UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH
Escola d'Enginyeria de Barcelona Est

TREBALL FI DE GRAU

**Doble Grau en Enginyeria Mecànica i Enginyeria Electrònica Industrial i Automàtica**

# DISSENY I CONTROL D'UN ROBOT DE DUES RODES AUTO BALANCEJAT

## Memòria i Annexos


**Autor:** Gil Ricart Vilarrubias
**Director:** Francisco Casellas Beneyto
**Co-Director**: Mariolly Davila Cordido

**Convocatòria:** Setembre 2024

# Resum

Aquest treball de fi de grau se centra en el disseny i desenvolupament d'una plataforma escalable de robot de dues rodes auto-balancejat, un projecte que integra conceptes d'enginyeria mecànica i electrònica. L'objectiu principal és crear una plataforma versàtil que no només aconsegueixi l'estabilitat dinàmica, sinó que també pugui adaptar-se a diverses aplicacions i escalar-se en mida. En el context actual de la robòtica, hi ha una creixent demanda de solucions flexibles i eficients en àmbits com el transport, la logística i la seguretat. Mitjançant l'ús de sensors, motors i un sistema de control avançat, el projecte busca implementar un prototip funcional que pugui servir com a base per a futurs desenvolupaments i personalitzacions en el control de sistemes dinàmics.

El desenvolupament del projecte inclou el disseny mecànic, la integració electrònica i el desenvolupament del programari necessari per mantenir l'equilibri, assegurant alhora l'escalabilitat i l'adaptabilitat. Aquest enfocament ha permès aplicar conceptes clau de robòtica i control automàtic, obtenint una solució tecnològica que és funcional i adaptable a diferents casos d'ús. L'estudi també aborda la viabilitat econòmica i ambiental, centrant-se en la sostenibilitat en la selecció de materials i el consum energètic, així com el potencial futur de la plataforma per a aplicacions tecnològiques i la seva escalabilitat.

# Resumen

Este trabajo de fin de grado se centra en el diseño y desarrollo de una plataforma escalable de robot de dos ruedas autoequilibrado, un proyecto que integra conceptos de ingeniería mecánica y electrónica. El objetivo principal es crear una plataforma versátil que no solo logre la estabilidad dinámica, sino que también pueda adaptarse a diversas aplicaciones y escalarse en tamaño. En el contexto actual de la robótica, hay una creciente demanda de soluciones flexibles y eficientes en ámbitos como el transporte, la logística y la seguridad. A través del uso de sensores, motores y un sistema de control avanzado, el proyecto busca implementar un prototipo funcional que pueda servir como base para futuros desarrollos y personalizaciones en el control de sistemas dinámicos.

El desarrollo del proyecto incluye el diseño mecánico, la integración electrónica y el desarrollo del software necesario para mantener el equilibrio, asegurando a la vez la escalabilidad y la adaptabilidad. Este enfoque ha permitido aplicar conceptos clave de robótica y control automático, logrando una solución tecnológica que es funcional y adaptable a diferentes casos de uso. El estudio también aborda la viabilidad económica y ambiental, centrándose en la sostenibilidad en la selección de materiales y el consumo energético, así como el potencial futuro de la plataforma para aplicaciones tecnológicas y su escalabilidad.

# Abstract

This thesis focuses on the design and development of a scalable self-balancing two-wheeled robot platform, a project that integrates concepts from mechanical and electronic engineering. The main objective is to create a versatile platform that not only achieves dynamic stability but can also be adapted for various applications and scaled in size. In the current context of robotics, there is a growing demand for flexible, efficient solutions in fields such as transportation, logistics, and security. By employing sensors, motors, and an advanced control system, the project aims to deliver a functional prototype that can serve as a foundation for further development and customization in dynamic systems control.

The project development includes mechanical design, electronic integration, and the necessar software development to maintain balance while ensuring scalability and adaptability. This approach has allowed the application of key concepts in robotics and automatic control, resulting in a technological solution that is both functional and adaptable to different use cases. The study also addresses economic and environmental feasibility, focusing on sustainability in material selection and energy consumption, as well as the platform's potential for future technological applications and scaling.

# Agraïments

Vull agrair al meu director, Francisco Casellas Beneyto, i a la meva codirectora, Mariolly Davila Cordido, la seva orientació i suport constant al llarg de tot el projecte. També vull expressar el meu agraïment a la meva família i amics pel seu suport incondicional durant aquests anys.

Finalment, una menció especial al meu avi, que sempre va ser una persona clau a la meva vida i a qui dedico aquest treball amb tot el meu afecte.

# Glossari

**PCB:** una PCB o una placa de circuit imprès, és una placa aïllant que serveix de suport als components electrònics, i en la qual hi ha dipositada una capa fina de material conductor, de manera que efectua les interconnexions necessàries entre els components.[1]

**PWM:** Pulse Width Modulation, consisteix en la variació del cicle de treball d'un senyal periòdica, sigui per transmetre informació o per controlar la quantitat d'energia enviada.

**BMS:** Battery Management System, sistema encarregat de la gestió de càrrega i descàrrega d'una bateria.

**Protoboard:** una placa de proves, és un instrument usat comunament per provar el disseny electrònic sense necessitat de soldar els components.

**Outlier:** en un context estadístic, es parlaria d'un valor atípic, que és aquell que difereix àmpliament de la resta de valors.

**IDE:** Integrated Development Environment, és una eina informàtica que inclou el conjunt d'eines de programació necessàries per a un programador.

**CAD:** Computer-Aided Design, és un sistema de disseny per a productes o instal·lacions industrials que es basa en el perfeccionament successiu d'una primera forma elemental mitjançant un sistema interactiu de natura informàtica. [2]

**MCU:** microcontrolador, és un dispositiu electrònic el qual permet dur a terme processos lògics per executar les ordres gravades a la seva memòria per l'usuari.

# Índex

**RESUM** 2

**RESUMEN** 3

**ABSTRACT** 4

**AGRAÏMENTS** 6

**GLOSSARI** 8

**1. INTRODUCCIÓ** 17

1.1. Objectius i abast del treball 17

**2. ESTAT DE L'ART** 20

2.1. Robots mòbils amb rodes 20

2.2. Robots de dues rodes 23

2.2.1. Història dels robots de dues rodes 24

2.2.2. Principis de funcionament 25

2.2.3. Control mitjançant PID 27

2.2.4. Reptes futurs 29

**3. COMPONENTS ELECTRÒNICS** 30

3.1. Microcontrolador 30

3.1.1. Característiques tècniques 30

3.1.2. Opcions al mercat 31

3.2. Motors elèctrics 33

*3.3. Drivers* 35

3.4. Unitat de mesura inercial 40

3.5. Bateria 42

3.6. Esquema electrònic 47

3.7. PCB 50

**4. DISSENY MECÀNIC** 53

4.1. Estructura del robot 53

4.2. Carcassa externa 63

4.3. Mecanisme d'acoblament roda-eix 64

**5. SOFTWARE** 67

5.1. Entorn de desenvolupament ..... 67
5.2. Pseudocodi ..... 67
5.3. Llibreries ..... 71
5.3.1. Arduino.h ..... 71
5.3.2. Wire.h ..... 72
5.3.3. MPU6050.h ..... 73
5.3.4. PID_v1.h ..... 74
5.3.5. QuickMedianLib.h ..... 75
5.3.6. AccelStepper.h ..... 76

**6. PROTOTIP ..... 79**
6.1. Fabricació electrònica ..... 79
6.2. Construcció de l'estructura ..... 80
6.3. Resultat final ..... 82
6.4. Proves finals ..... 83

**7. ANÀLISI DE L'IMPACTE AMBIENTAL ..... 85**

**CONCLUSIONS ..... 87**

**PRESSUPOST ..... 89**

**BIBLIOGRAFIA ..... 92**

**MANUAL D'USUARI ..... 97**

**ANNEX A ..... 99**
A1. Plànols ..... 99

**ANNEX B ..... 107**
B.1. Codi ..... 107

# Índex de figures

Figura 1. Evolució de les cerques a IEEE Explore, des del 2009 fins al 2020. [3] _____ 20

Figura 2. Murata Girl [6] _____ 21

Figura 3. a) Robot tipus bicicleta, b) robot tipus pèndol invertit [4]. _____ 21

Figura 4. Segway [7] _____ 22

Figura 5. Vista planta d'un robot de tres rodes [8]. _____ 22

Figura 6. Robot omnidireccional. [8]. _____ 23

Figura 7. Plataforma de dues rodes. Font pròpia. _____ 24

Figura 8. JOE. [9]. _____ 24

Figura 9. Segway. [7]. _____ 25

Figura 10. Pèndol invertit. [13]. _____ 26

Figura 11. Microcontrolador ESP32 WROOM-32 [44]. _____ 32

Figura 12. Control d'un motor pas a pas amb un pont en H. [25] _____ 35

Figura 13. Distribució de pins de l'A4988 [26] _____ 36

Figura 14. Taula lògica per la resolució dels passos pel driver A4988. [26]_____ 37

Figura 15. Taula lògica per la resolució dels passos pel driver DRV8825. [26] _____ 38

Figura 16. Disposició dels pins del TMC2209. [26] _____ 39

Figura 17. MPU6050 amb els eixos de mesura. [28]_____ 41

Figura 18. Cel·la de 3,7 V i 1100 mAh. [45] _____ 45

Figura 19. Estats del circuit reductor. [46]. 46

Figura 20. Esquema electrònic del conjunt. Font pròpia. 47

Figura 21. a) esquema del driver A4988. [47] b) pins del model adquirit. Font pròpia. 49

Figura 22. Disseny de la cara posterior de la PCB. Font pròpia. 51

Figura 23. Disseny de la cara davantera de la PCB. Font pròpia. 52

Figura 24. Render del robot. Font pròpia. XX 53

Figura 25. Motor pas a pas i escaires 1x1. Font pròpia. 54

Figura 26. Escaires 1x1. Font pròpia. 55

Figura 27. Làmina de 9 forats. Font pròpia. 55

Figura 28. Conjunt de motors i làmines de 9 forats. Font pròpia. 56

Figura 29. Conjunt amb els suports als eixos dels motors. Font pròpia. 56

Figura 30. Càrregues aplicades al conjunt. Font pròpia. 57

Figura 31. Estrès al que està sotmès el conjunt en MPa. Font pròpia. 58

Figura 32. Deformació del model en metres. Font pròpia. 58

Figura 33. Làmina en U de 7 forats. Font pròpia. 59

Figura 34. Conjunt de motors, làmines de 9 forats i làmines en U de 7 forats. Font pròpia. 60

Figura 35. Base del robot. Font pròpia. 62

Figura 36. Assemblatge final de l'estructura. Font pròpia. 62

Figura 37. Meitat de la carcassa externa. Font pròpia. 63

Figura 38. Detall de l'eix del motor pas a pas. Font pròpia. _____ 64

Figura 39. Eix intern de la roda. Font pròpia. _____ 65

Figura 40. Render del robot i la carcassa. Font pròpia. _____ 66

Figura 41. Pseudocodi principal. Font pròpia. _____ 68

Figura 42. Pseudocodi de la funció lectura. Font pròpia. _____ 70

Figura 43. Pseudocodi funció control. Font pròpia. _____ 71

Figura 44. Captura de pantalla del serial monitor. Font pròpia._____ 72

Figura 45. Captura oscil·loscopi dels pulsos amb l'error de temps acumulat. Font pròpia.___ 76

Figura 46. Captura de l'oscil·loscopi amb el pols generat mitjançant el PWM. Font pròpia.__ 77

Figura 47. Placa PCB del prototip. Font pròpia. _____ 79

Figura 48. Detall dels escaires amb l'estructura i la base. Font pròpia. _____ 80

Figura 49. Aspecte del prototip sense la carcassa. Font pròpia._____ 81

Figura 50. Carcassa externa del robot. Font pròpia._____ 81

Figura 51. Prototip final. Font pròpia._____ 82

Figura 52. Imatge lateral del prototip. Font pròpia. _____ 82

Figura 53. Connexió motors amb drivers. Font pròpia. _____ 97

Figura 54. Robot amb la meitat de la carcassa. Font pròpia. _____ 98

# Índex de taules

Taula 1. Compartiva microcontroladors. [18][19][20] _____ 32

Taula 2. Comparativa dels diferents motors pas a pas. [21] [22] [23] [24] _____ 34

Taula 3. Estudi de la intensitat consumida en funció del voltatge d'alimentació. Font pròpia. 43

Taula 4. Comparativa dels dos materials. [32][33]. _____ 61

Taula 5. Costos d'enginyeria i mà d'obra propis. Font pròpia._____ 89

Taula 6. Materials. Font pròpia. _____ 90

Taula 7. Costs indirectes. Font pròpia. _____ 91

Taula 8. Cost total del projecte. Font pròpia._____ 91

# 1. Introducció

Aquest treball presenta el desenvolupament d'un projecte que integra els coneixements adquirits al doble grau en Enginyeria Mecànica i Enginyeria Electrònica Industrial i Automàtica cursat. El projecte consisteix en la creació d'un robot de dues rodes auto-balancejat, un dispositiu que combina tant el disseny mecànic com el control electrònic per aconseguir una estabilitat dinàmica en temps real. Aquest tipus de robots es caracteritzen per la seva capacitat de mantenir-se en equilibri sobre dues rodes, mitjançant l'ús de sensors i algoritmes de control, que ajusten constantment la posició i velocitat de les rodes per contrarestar qualsevol desplaçament del centre de gravetat. La motivació per abordar aquest projecte neix de la meva passió per la integració de disciplines, especialment en la robòtica, on és molt comú combinar la mecànica i l'electrònica per crear solucions innovadores. Des de sempre s'ha estat interessat a entendre i comprendre com els principis físics es poden aplicar per construir sistemes complexos que interactuen amb el món real de manera eficient. Aquest projecte de disseny i control d'un robot de dues rodes auto-balancejat representa una síntesi perfecta dels interessos en enginyeria mecànica, amb el seu disseny estructural i dinàmica de moviments, i en enginyeria electrònica, amb l'aplicació de sensors i sistemes de control. L'origen d'aquest treball es remunta a la necessitat de trobar un repte tècnic que combinés les dues branques del doble grau. Veient l'interessant desafiament que suposa mantenir l'estabilitat en sistemes dinàmics, concretament, en robots de dues rodes, sent aquests un clar exemple d'un sistema inestable. A partir d'aquí es va decidir que el treball de fi d'estudis es centraria en aquest tema, amb l'objectiu d'aprofundir en la comprensió d'aquests sistemes i de l'estructura mecànica que els sustenta.

## 1.1. Objectius i abast del treball

L'objectiu principal d'aquest treball és dissenyar i implementar un robot de dues rodes balancejat que sigui capaç de mantenir-se en equilibri de manera autònoma. Es pot desglossar aquest objectiu en els següents objectius específics:

- **Disseny mecànic del treball:** es pretén desenvolupar una estructura mecànica adequada que permeti al robot mantenir-se estable sobre dues rodes. Aquest disseny serà realitzat primerament mitjançant l'eina de CAD SolidWorks, que permetrà modelar el robot en 3D amb precisió. Aquest procés inclourà la selecció de materials que proporcionin la rigidesa i la lleugeresa necessàries, així com la determinació de les dimensions i formes òptimes per a cada component del robot. Un cop completat el disseny digital, es realitzarà una simulació

per verificar el comportament estructural del robot, assegurant així que el disseny compleix els requisits de seguretat i rendiment.

- **Integració dels sistemes electrònics:** un dels aspectes clau del projecte és la integració dels components electrònics que permetran al robot funcionar correctament. Aquest procés d'integració inclou la selecció i connexió de tots els perifèrics necessaris per dur a terme aquest projecte. A més a més, es vol dissenyar una placa de circuit imprès (PCB), per muntar tots els components. Es prestarà especial atenció a l'eficiència energètica del sistema, assegurant que els components electrònics seleccionats siguin compatibles entre si i que la distribució de l'energia sigui adequada. També es considerarà la gestió tèrmica per evitar sobreescalfaments que puguin afectar el rendiment dels components i del conjunt que aquests formen.
- **Desenvolupament del software de control:** el desenvolupament del software de control és un dels aspectes més crítics del projecte ja que serà el responsable de mantenir l'estabilitat del robot en temps real.
- **Implementació d'un prototip:** un cop finalitzats els objectius anteriors, es procedirà a la construcció del prototip físic del robot. Aquesta fase inclou l'assemblatge de les peces mecàniques segons el disseny establert, la instal·lació dels components electrònics seleccionats, mitjançant la fabricació d'una PCB, i la integració del software de control creat. Durant aquesta etapa es realitzaran ajustaments finals per garantir que totes les parts treballin de manera harmoniosa i es duran a terme proves, tant d'estabilitat, com de resposta a pertorbacions, durabilitat de la bateria, tèrmiques, etc. per validar la funcionalitat bàsica del robot.

Al llarg de tot el projecte es buscarà que el disseny sigui sostenible i econòmicament viable. Això implica una selecció de materials adequada, amb un baix impacte ambiental, i l'ús de components electrònics eficients des del punt de vista energètic. A part, es prestarà atenció al cost total del projecte, amb l'objectiu de crear un robot que no només sigui funcional i eficient, sinó també assequible i fàcil de reproduir. Es durà a terme una anàlisi de costos per comparar diferents opcions de components i materials, prioritzant aquells que ofereixin un bon equilibri entre qualitat, rendiment i preu. Aquest enfocament sostenible i econòmic, farà que el projecte sigui més atractiu per a aplicacions pràctiques i potencialment escalable per a altres usos o desenvolupaments futurs.

Tot i que el projecte es desenvolupa dins d'un marc acadèmic amb recursos i temps limitats, això no compromet la seva ambició. El disseny del prototip funcional està orientat a demostrar la viabilitat del concepte de manera controlada i eficient. Les decisions preses,

tant en la selecció de materials com en el desenvolupament del *software*, s'han centrat a garantir un equilibri entre qualitat, rendiment i sostenibilitat.

El prototip resultant serà testat en entorns controlats per assegurar-ne la funcionalitat bàsica, prioritzant l'estabilitat dinàmica i l'eficiència energètica. Tot i que l'enfocament principal és aconseguir l'equilibri autònom de manera efectiva, el disseny és prou flexible per considerar millores futures, com ara la integració de funcions avançades o l'adaptació per a aplicacions més complexes.

Amb aquest enfocament, es vol demostrar un concepte sòlid que, a més de ser funcional, té el potencial d'evolucionar en versions posteriors i aplicacions més àmplies.

BY NC ND

# 2. Estat de l'art

Actualment, un dels temes principals a la societat són els robots. És comú, a dia d'avui, fer-ne ús per tal de facilitar operacions quotidianes, les quals podrien ser més complexes sense aquesta interacció. Això s'ha vist sostingut amb la quantitat de cerques que s'han realitzat a la pàgina web IEEE Xplore. Aquest augment de recerques es pot observar a la figura 1, la qual mostra el número de *hits* per cada any, fins al 2020 [3].

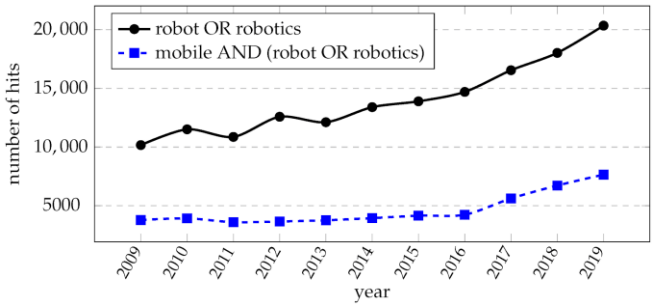



*Figura 1. Evolució de les cerques a IEEE Explore, des del 2009 fins al 2020. [3]*

Tal i com s'observa en la figura 1 les cerques que incloïen les paraules *robots* o *robòtics* han experimentat un augment, a mesura que ens anem apropant a l'actualitat. En el gràfic, també es pot observar l'evolució de cerques de robots mòbils, que també ha incrementat.

En aquest treball ens centrarem en els robots mòbils, que són aquells sistemes robòtics que poden desplaçar-se en diferents entorns, ja sigui de manera autònoma o controlada. Normalment, la definició d'aquests robots es realitza segons la seva mobilitat, el medi en el que s'ha de moure o característiques específiques. El llibre "Springer Handbook of Robotics" [4] defineix cinc tipus de robots mòbils. Aquests cinc tipus, poden quedar reduïts a tres, si la diferenciació es realitza pel medi, és a dir, es tenen els robots terrestres, els aquàtics i els aeris. Aquest treball està centrat en els robots mòbils terrestres, que es classifiquen segons la seva manera de moure's: amb rodes, erugues o cames.

El desenvolupament del projecte es durà a terme mitjançant un robot amb rodes, per tant, seguidament s'introduiran les diferents configuracions existents.

## 2.1. Robots mòbils amb rodes

Els robots mòbils amb rodes (RMR) són dispositius capaços de desplaçar-se per un medi terrestre i d'impulsar-se per si mateixos. El principal problema d'aquests robots és la dificultat que presenten

per superar els obstacles, sobretot si el terreny presenta moltes pedres o poca adherència. Tot i els desavantatges que presenta són els més usats en medi terrestre degut a la seva facilitat de control.

En funció de la disposició de les rodes, el robot pot tenir un comportament molt diferent [5].

- **Robot d'una sola roda:** són robots basats en una sola roda, el que implica una gran dificultat per mantenir el robot en equilibri. És recomanable utilitzar una roda esfèrica ja que així s'aconsegueix augmentar la superfície de contacte amb el terra. Un exemple d'ús d'aquesta tecnologia podria ser la Murata Girl, tal i com es mostra a la figura 2 [6].

*Figura 2. Murata Girl [6]*

- **Robot de dues rodes:** en aquesta categoria s'inclouen els robots que empren en la seva configuració dues rodes. Existeixen diferents maneres de col·locar les rodes, ja sigui com en una bici, o al mateix eix, és a dir, en paral·lel [4].

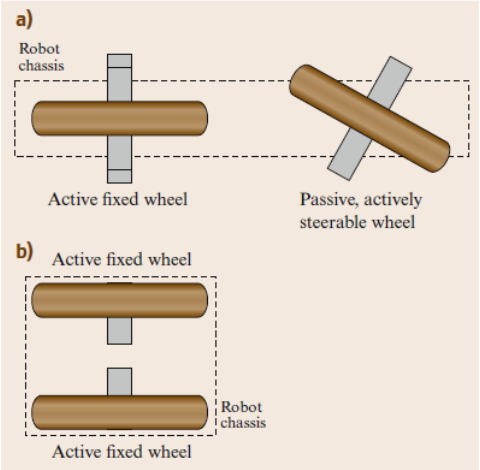



*Figura 3. a) Robot tipus bicicleta, b) robot tipus pèndol invertit [4].*

El control dels robots de dues rodes és més senzill que pel cas anterior, tot i que es requereix d'un sistema actiu de control per a mantenir l'estabilitat del dispositiu. Avui en dia són dels robots més emprats, degut a la seva eficiència energètica i al seu disseny que demana menys components, i per tant permet al robot més agiliat i una grandària més reduïda. És possible trobar aquesta distribució en diferents aplicacions, com un *Segway*, un *hoverboard*, etc. [7].

*Figura 4. Segway [7]*

- **Robots de tres rodes:** aquest grup inclou tots aquells robots que incloguin tres rodes en el seu disseny. En aquests tipus de disseny es poden trobar casos en els que les tres rodes fossin motores o casos en els que només dues de les rodes fossin motores i la tercera fos una roda de recolzament que ajudés a facilitar l'equilibri [8].

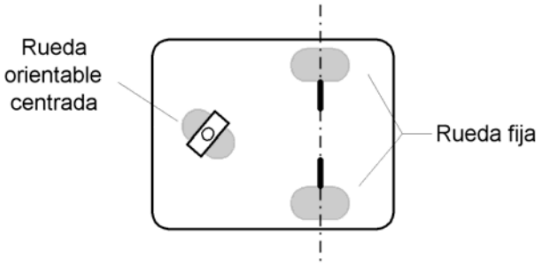



*Figura 5. Vista planta d'un robot de tres rodes [8].*

Seguint aquesta classificació, es pot anar augmentant el número de rodes en un robot, tot i que no és gaire comú trobar robots amb més de 5 rodes.

- **Robots omnidireccionals:** són robots que disposen de maniobrabilitat absoluta, sense necessitat de reorientar-se per desplaçar-se cap a una determinada direcció. A la figura 6, s'observen el conjunt de moviments que pot realitzar el robot omnidireccional *Uranus*, desenvolupat per la universitat de Michigan [8].

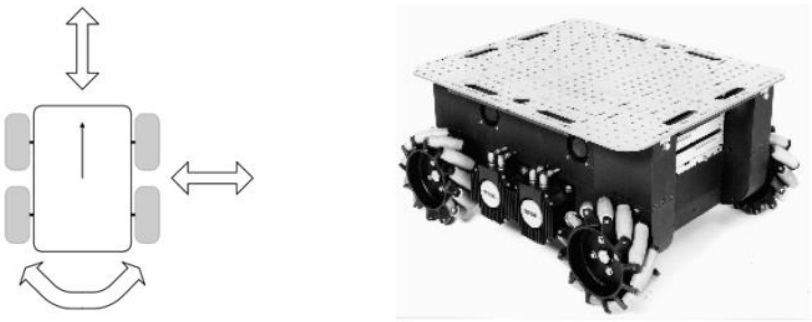


*Figura 6. Robot omnidireccional. [8].*

## 2.2. Robots de dues rodes

Aquest treball es centrarà en el desenvolupament d'un robot de dues rodes, ja que ha sigut la plataforma escollida per l'agilitat per moure's entre espais reduïts, de manera ràpida, lleugera i eficaç, així com també per la seva eficàcia energètica, ja que requereix menys components i en conseqüència d'un pes menor i finalment perquè aquests sistemes també són més barats degut a la possibilitat d'usar menys components que altres plataformes.

Tal i com s'ha explicat i s'observa a la figura 3, hi ha dos tipus de configuracions existents per als robots de dues rodes:

En el primer cas, les rodes estan col·locades com en una bicicleta. Una de les rodes, sovint la motora, està fixada, mentre que l'altra és dirigible, ja sigui de manera passiva o activa. L'estabilitat d'aquest robot augmentarà amb la velocitat, per tant hi haurà un punt en que no serà necessari un sistema actiu d'estabilitat, i el robot es podrà sustentar per ell mateix. Ara bé, aquest robot difícilment podrà mantenir-se dret en parat i aquesta és el principal desavantatge que presenta.

Per a altra banda, en la segona configuració les rodes estan col·locades en paral·lel i les dues rodes son motores. Aquest sistema es basa en el model matemàtic de pèndol invertit i requereix sempre d'un control actiu per mantenir l'equilibri. Les rodes estan situades sota la base i permeten al robot mantenir l'equilibri movent-se en la direcció d'inclinació, intentant mantenir el centre de masses per sobre l'eix de les rodes. En la següent figura es representa el disseny físic que presenta un robot amb la configuració esmentada.

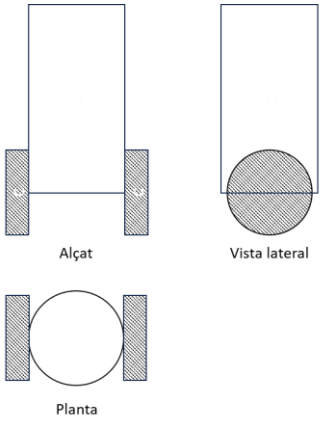



*Figura 7. Plataforma de dues rodes. Font pròpia.*

Per al desenvolupament d'aquest treball, s'ha decidit fer ús de la segona configuració, i dur a terme el projecte amb una plataforma semblant a la descrita en la figura 7.

### 2.2.1. Història dels robots de dues rodes

El primer robot de dues rodes auto-balancejat que s'ha trobat és d'un estudi realitzat per l'Escola Politècnica Federal de Lausana (EPFL) l'any 2002. L'objectiu del projecte era desenvolupar un prototip d'un vehicle robòtic, anomenat JOE (figura 8), que fos capaç de mantenir l'equilibri. Per dur a terme les proves pertinents i no posar en risc el conductor van escalar la plataforma [9].

*Figura 8. JOE. [9].*

En el mateix any, 2002, es va començar a comercialitzar un vehicle amb la mateixa idea, el *Segway* (figura 9). Aquest va ser desenvolupat principalment per al transport de persones, i era capaç de mantenir l'equilibri i de moure's en la direcció en la que s'inclinava l'usuari. Per dur a terme aquests avenços, es van utilitzar 5 giroscopis per tal d'assegurar el correcte funcionament, tot i que segons l'empresa 3 giroscopis eren suficients, en van usar 5 per seguretat [7].

*Figura 9. Segway. [7].*

Posteriorment, *Segway* ha continuat comercialitzant nous models, tot i que a dia d'avui han deixat més de banda la comercialització de models semblants, centrant-se més en patinets elèctrics o monocicles.

Aquest descobriment per part de *Segway* INC. va obrir portes a noves marques per a desenvolupar productes similars. Així doncs, l'any 2012 Shane Chen presenta la patent d'un *hoverboard*, amb una idea molt parella a la de *Segway*, però anul·lant el manillar [10].

Actualment, l'empresa Ascento ha emprat una plataforma de dues rodes per desenvolupar el seu últim robot. Aquest pot realitzar tasques de seguretat com la detecció de persones, control de matrícules, comprovar portes i finestres, escanejar amb càmeres tèrmiques, etc. [11].

### 2.2.2. Principis de funcionament

Aquest tipus de configuració respon al nom de pèndol invertit, ja que el comportament del seu sistema es pot estudiar amb aquest model matemàtic. Per tant, mitjançant el seu estudi es pot desenvolupar el sistema de control.

Es pot analitzar el sistema com si es tractés del model d'un carro amb una vara, tal i com va realitzar Razvan V. Florian l'any 2007 [12]. Aquest treball basarà part del seu desenvolupament matemàtic en aquest article. En aquest, les equacions deriven de la segona llei de Newton, però l'autor hi afegeix unes correccions.

En l'article es considera la força de fregament, la qual s'inclou en l'equació, tot i que per aquest treball de final de grau es considerarà negligible. Això es deu al fet que s'espera que el robot sigui capaç de funcionar en diferents terrenys i superfícies, i per tant s'haurien de considerar totes les

opcions possibles en el sistema de control del robot. Per altra banda, s'unificaran les rodes, és a dir, per al sistema de control no es farà distinció entre la roda esquerra i la roda dreta, ja que totes dues treballaran igual per a estabilitzar el sistema. Al final, l'objectiu principal del pèndol invertit és el de mantenir el centre de gravetat del conjunt per sobre les rodes.

Per a l'estudi del sistema s'assumeix un carro, amb llibertat per moure's en l'eix horitzontal, i el pal es pot moure en el pla vertical.

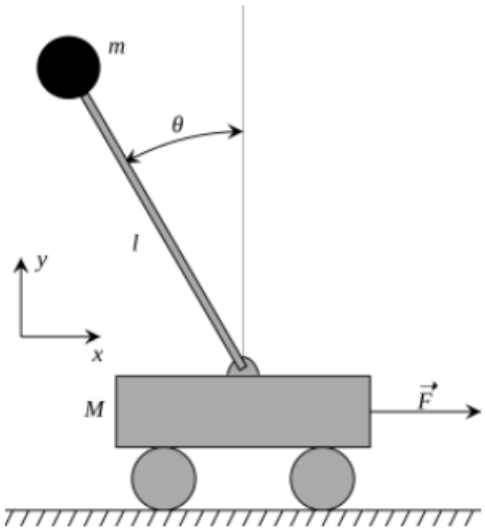



*Figura 10. Pèndol invertit. [13].*

Seguidament es definiran els components que s'empren en la resolució del sistema dinàmic anterior.

En l'eix horitzontal tenim els següents paràmetres:

- $x$: desplaçament [m]
- $\dot{x}$: velocitat [m/s]
- $\ddot{x}$: acceleració [m/s$^2$]

En l'eix vertical:

- $\theta$: desplaçament angular [rad·s]
- $\dot{\theta}$: velocitat angular [rad/s]
- $\ddot{\theta}$: acceleració angular [rad/s$^2$]

Finalment considerarem:

- M: massa del carro i les rodes [kg]
- m: massa del pèndol [kg]
- l: alçada del pal

Segons Azvan R. i Florian V. , s'arriba a les següents equacions si negligim el fregament:

$$\ddot{\theta} = \frac{g \cdot sin\big(sin(\theta)\big) + cos\big(cos(\theta)\big) \cdot \frac{-F - m \cdot l \cdot \theta^2 \cdot sin(sin(\theta))}{M + m}}{l\left(\frac{4}{3} - \frac{m \cdot \theta}{M + m}\right)} \qquad \textbf{(Eq.2.1)}$$

$$\ddot{x} = \frac{F + m \cdot l \cdot (\dot{\theta}^2 \cdot sin\big(sin(\theta)\big) - \ddot{\theta} \cdot cos(cos(\theta))}{M + m} \qquad \textbf{(Eq.2.2)}$$

### 2.2.3. Control mitjançant PID

Durant l'estudi d'altres projectes o articles que hagin desenvolupat una idea de projecte similar, se'n destaca principalment l'ús del PID, Proporcional-Integral-Derivatiu, com a mètode comú per controlar l'estabilitat del robot. El PID és la tècnica de control automàtic més utilitzada actualment, al 2006 el 90% dels bucles ja funcionaven amb aquest tipus de control [14].

Un controlador PID és un mètode per mantenir una variable de procés, en aquest cas la inclinació del robot, al voltant d'un valor desitjat, definit en anglès com a *setpoint*. El PID ajusta contínuament la sortida d'un sistema basant-se en l'error, sent aquest la diferència entre el *setpoint* i el valor actual. Aquest tipus de controladors combinen tres components per gestionar l'estabilitat del sistema. Cadascun d'aquests té un paper específic per millorar la resposta del sistema:

- **Control proporcional (P):** presenta una resposta immediata a l'error, és a dir, la sortida del controlador és proporcional a l'error actual. Per tant, el control genera una sortida que és directament proporcional a l'error, implicant això que com més gran sigui la diferència, més gran serà la correcció aplicada pel sistema. Existeix la constant proporcional, Kp, que determina la magnitud d'aquesta resposta. La principal limitació és que no permet eliminar completament l'error en estat estacionari, ja que l'error ha de ser diferent a zero per generar una sortida proporcional. Matemàticament, la sortida del control proporcional, queda definida com:

$$Sortida = Kp \cdot e(\tau) \quad \textbf{(Eq.2.3)}$$

- **Control Integral (I):** és el component que ajuda a eliminar l'error en estat estacionari. Aquest control considera l'acumulació d'errors passats i ajusta la sortida en conseqüència. Això permet que fins i tot per un error petit, si aquest persisteix en el temps, la contribució d'aquest component augmentarà. Per fer-ho, suma l'error al llarg del temps i la seva contribució a la sortida, es defineix matemàticament com:

$$Sortida = K_i \cdot \int_0^t e(\tau)\, d\tau \quad \textbf{(Eq.2.4)}$$

Sent Ki, com en el control anterior amb Kp, la constant de guany integral i e(τ) l'error en el temps τ. Segons Nise [15], l'acció integral té l'efecte d'eliminar l'error en règim permanent. De tota manera, una acció integral massa severa pot introduir inestabilitat al sistema degut a una sobre-correcció de l'error acumulat. A més, la suma de l'error pot retardar la resposta inicial del sistema.

- **Control derivatiu (D):** el terme derivatiu es refereix al fet que aquest component calcula la derivada de l'error respecte al temps, és a dir, determina la velocitat de canvi de l'error. D'aquesta manera, es dota al controlador de la capacitat d'anticipar futurs errors, basant-se en la tendència actual. La seva contribució a la sortida del control, es pot definir com:

$$Sortida = K_d \cdot \frac{de(\tau)}{d\tau} \quad \textbf{(Eq.2.5)}$$

Per a aquest cas, sent Kd la constant de guany derivatiu. Segons Nise [15], l'acció derivativa un amortiment anticipat que ajuda a reduir les oscil·lacions i millorar l'estabilitat del sistema. Ara bé, com els altres dos controls, també presenta certs inconvenients. El principal és que pot amplificar el soroll en la mesura de l'error, ja que el soroll sovint es manifesta amb canvis ràpids en el senyal.

Per tant, la suma d'aquests tres controls dona nom al control PID. Sent la sortida d'aquest la suma de tots tres.

$$Sortida = Kp \cdot e(\tau) + K_i \cdot \int_0^t e(\tau)\, d\tau + K_d \cdot \frac{de(\tau)}{d\tau} \qquad \textbf{(Eq.2.6)}$$

### 2.2.4. Reptes futurs

Un dels principals objectius que es plantegen en el futur és el de millorar l'eficiència en les operacions realitzades pels robots, de manera que se n'augmenti la seguretat, s'asseguri la precisió i es millori la velocitat en aquestes. Per tant, els robots intel·ligents guanyaran intel·lecte d'una manera més humana. Per aconseguir-ho, encara queda recerca per fer i és imprescindible aprofundir en els sistemes analítics dels robots, així com assolir un grau d'autonomia més elevat que l'actual. Per exemple, millorar la localització i la navegació dels robots autònoms en medis aleatoris, on el robot ha de dissenyar el camí, esquivant-ne els obstacles. Per ser capaços de dissenyar aquests sistemes es plantegen la interacció activa entre robots i que aquests mateixos siguin capaços de col·laborar per aconseguir un mateix objectiu.

És cert que els robots mòbils presenten diverses dificultats que hauran de ser ateses, com la dificultat d'aconseguir un control de moviment òptim, o el de minimitzar el temps de cerca del millor camí. És per això que es preveu implementar *Machine Learning* i *Deep Learning* per tal d'optimitzar les mancances i potenciar les aplicacions possibles [16].

# 3. Components electrònics

És essencial comprendre quins elements electrònics configuren el robot, amb especial èmfasi en el microcontrolador, ja que aquest desenvoluparà la tasca de cervell central. El microcontrolador, peça fonamental, processarà les dades provinents dels sensors com l'IMU (*Inertial Movement Unit*) i usarà especialment la informació de l'orientació i l'acceleració. Mitjançant aquestes dades, es podran determinar els moviments necessaris per a mantenir l'equilibri del dispositiu en tot moment.

Evidentment, el moviment necessari per a balancejar-se vindrà proporcionat per dos motors, els quals ofereixen tracció i moviment sobre les dues rodes. Per la correcta coordinació amb el microcontrolador, s'han integrat dos *drivers*, els quals actuen com a ponts entre el nucli i els motors, assegurant un control eficient i precís. A més, per garantir que el robot té la capacitat d'equilibrar-se, és necessari que pugui percebre el seu entorn. Per fer-ho, s'ha incorporat una unitat de mesura inercial, com s'ha dit prèviament. Aquesta ofereix informació vital sobre l'acceleració i l'orientació en la qual es troba el robot, permetent-li ajustar-se a les condicions variables del seu entorn de manera dinàmica.

En els apartats futurs es realitzarà una anàlisi més detallada d'aquests components, destacant les seves funcions, característiques i rellevància en el desenvolupament del nostre projecte.

## 3.1. Microcontrolador

Com s'ha esmentat anteriorment, el microcontrolador esdevé una peça clau en el procés de creació d'aquest projecte. Aquest assumeix la funció de cervell central del sistema. En aquest apartat s'analitzen les característiques tècniques més rellevants a considerar durant la selecció d'un microcontrolador que s'adeqüi al nostre sistema.

### 3.1.1. Característiques tècniques

És clau valorar diverses característiques durant l'elecció del microcontrolador. Per això, és important definir molt bé quines especificacions físiques comprèn el nostre robot. És a dir, entendre l'aplicació a la qual el volem sotmetre, i quines interfícies són requerides per al correcte funcionament del sistema. És per això que en aquest apartat s'analitzaran les característiques més rellevants a considerar.

- **Arquitectura de la CPU:** entenent arquitectura de la CPU com al disseny intern de la unitat de processament d'un microcontrolador, aquesta determina la manera en la qual la CPU

executa les instruccions i com processa les dades. Aquesta té un impacte directe en el rendiment i en l'eficiència en les tasques de control i processament. Actualment, s'empren dos tipus diferents, la CISC (*Complex Instruction Set Computer*) i la RISC (*Reduced Instrucion Set Computer*) [17]. La primera destaca per la seva capacitat de realitzar un conjunt ampli d'operacions complexes amb poques instruccions, en canvi, l'arquitectura RISC optimitzen l'execució del codi amb instruccions senzilles i eficients, sent així més fàcils d'implementar.

- **Freqüència de rellotge:** determina la velocitat de funcionament, per tant, té una afectació directa a la capacitat de processament del sistema i el seu temps de resposta. Per altra banda, el consum d'energia també es veurà afectat amb la freqüència, ja que a l'augmentar-la, pot millorar el rendiment, però també pot augmentar el consum d'energia, per tant, cal considerar quina és la òptima per la nostra aplicació.
- **Memòria:** aquesta juga un paper fonamental en l'emmagatzematge de codi, variables, dades temporals, etc. N'existeixen diferents tipus, una classificació comuna és segons la volatilitat, és a dir, si la memòria reté o no la informació quan no hi ha alimentació elèctrica. La memòria ROM (*Read-Only Memory*) és una memòria no volàtil freqüentment usada per emmagatzemar el codi. A aquesta memòria la CPU no li pot escriure a la seva velocitat d'execució d'ordres. Però, en canvi, es tenen les memòries RAM (*Random Access Memory*) que són utilitzades per guardar dades temporals i variables durant l'execució del programa, ja que aquestes sí que permeten ser escrites a la velocitat d'execució d'instruccions de la CPU.
- **Ports d'entrada i sortida:** el nombre i tipus de ports que presentin definiran la connectivitat del MCU. És important pensar en quins perifèrics seran necessaris en el nostre sistema, per tal de determinar la capacitat d'interacció que presentarà el MCU. Poden presentar ports digitals, ports analògics, ports de comunicació síncrona o asíncrona, etc. Principalment, considerarem els pins GPIO (*General Purpose Input/Output*) que son els que ens permeten connectar dispositius externs.
- **Consum d'energia:** un dels temes més preocupants avui en dia és la sostenibilitat, i és per això, que el sistema ha de complir amb uns criteris de sostenibilitat. Per tant, és clau avaluar el consum energètic per garantir un funcionament eficient i una autonomia adequada, ja que en aplicacions on l'autonomia té un rol vital, és imprescindible aprofitar al màxim l'energia aportada per les bateries. Totes les característiques anteriors ajudaran a definir quin consum energètic presentarà el microcontrolador.

### 3.1.2. Opcions al mercat

Actualment, al mercat s'ofereixen una àmplia gamma de microcontroladors adequats per a usos d'automatització i control. En aquest projecte de final de grau, s'han valorat i es destaquen les següents opcions:

*Taula 1. Compartiva microcontroladors. [18][19][20]*

| | Freqüència de rellotge [MHz] | GPIO | Memòria | | Preu [€] |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | ROM [B] | RAM | |
| **Arduino UNO R3** | 16 | 14 | 1 KB | 2 KB | 24,70 |
| **Raspberry Pi Zero 2W** | 100 | 20 | - | 512 MB | 11,18 |
| **ESP32** | 240 | 34 | 448 KB | 520 KB | 11,49 |

Per al desenvolupament d'aquest projecte s'ha decidit fer ús de l'ESP32. A continuació es pot observar el disseny del microcontrolador muntat a la seva placa de desenvolupament.

*Figura 11. Microcontrolador ESP32 WROOM-32 [44].*

Aquest microcontrolador és àmpliament usat en vàries aplicacions. Un dels principals avantatges que presenta aquest dispositiu és que disposa de dos nuclis de baix consum. Això el dota de la capacitat de córrer dues tasques simultànies. A més a més, presenta un mòdul que permet la connectivitat mitjançant Wi-FI i Bluetooth. Per tant, el seu preu i les seves capacitats, el fan el microcontrolador indicat.

## 3.2. Motors elèctrics

Com s'ha considerat prèviament, els motors elèctrics esdevenen una part clau en el desenvolupament d'aquest projecte, ja que són els encarregats de transmetre el moviment a les rodes i proporcionar el desplaçament necessari per mantenir l'equilibri. Sense aquests, el projecte perd el sentit.

Actualment, els motors elèctrics formen part del dia a dia. És comú usar-los per cuinar, al prémer el botó del microones, o fins i tot haver-los normalitzat per ser usats en vehicles, tant cotxes, com patinets, bicicletes... Darrere un motor elèctric, hi ha certes característiques a considerar.

Primerament, la classificació més bàsica que reben els motors és segons l'alimentació que usen i, per tant, poden ser de corrent continu (CC) o bé de corrent altern (CA).

Considerant que els motors de corrent altern presenten més dificultats per al control de velocitat, sent aquest punt vital en el nostre projecte, i que ofereixen una densitat de par menor, és a dir, és necessari un motor de dimensions més grans per obtenir un par similar a un motor de corrent continu més petit, ens decantarem per l'ús d'un motor de corrent continu. Aquests són més senzills i resulten en un control més precís.

Dins d'aquest segment, es desencadenen dos altres tipus: els motors amb escombreta i els motors sense escombreta. Els primers presenten escombretes per tal d'establir la connexió entre l'estator i el rotor. Són molt usats pel seu baix cost, la facilitat de control, etc. Però presenten un gran desavantatge: el desgast, ja que la vida útil de les escombretes és limitada, i per tant, si no es substitueixen, la del motor també es veu afecatda. En canvi, els motors sense escombretes, com diu el seu nom, no requereixen d'aquestes per a la connexió i ho fan mitjançant electroimants. Ens centrarem en els segons.

Com és evident, existeixen diferents tipus de motors sense escombretes. Però per al desenvolupament del nostre projecte, s'utilitzaran motors pas a pas. Aquests compleixen amb els requisits escollits prèviament, és a dir, funcionen amb corrent continu i sense escombretes. En aquests motors el seu rotor gira en petits increments angulars quan els bobinats de l'estator són electrificats de manera programada. En aquest tipus de motors, la suma de diferents passos, resulten en una revolució, i per tant, el número de passos determinen el moviment mínim necessari per a realitzar una volta. S'ha escollit treballar amb aquests tipus degut a la possibilitat de controlar la posició del rotor amb facilitat, permetent un control precís i amb petits increments. També presenten una alta velocitat de rotació i un par motor elevat, fet que provoca que el seu consum d'energia sigui més elevat que per altres motors, tot i això, s'ha decidit usar-los.

Per a escollir els motors idonis per a constituir el robot, s'han considerat motors pas a pas bipolars i se n'han avaluat característiques com la potència i el par motor que oferien els motors, ja que són necessaris moviments potents i ràpids per equilibrar el robot; l'angle de pas, és a dir, el moviment mínim, ja que el moviment necessita poder ser precís; les dimensions, les quals s'havien d'adaptar a la mida del robot, i no ser d'un pes molt elevat, fet que podria perjudicar-nos; i finalment el preu, aspecte limitant en el pressupost del projecte.

Per trobar el motor més ajustat per al treball s'ha realitzat un estudi de mercat i s'han comparat les diferents disponibles:

*Taula 2. Comparativa dels diferents motors pas a pas. [21] [22] [23] [24]*

| | **Par motor [Nm]** | **Inductància /fase [mH]** | **Angle de pas [°]** | **Dimensions [mm]** | **Pes [kg]** | **Preu [€]** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **17HS19-2004S1** | 0,59 | 3,00 ± 20% | 1,80 | 42x42x48 | 0,40 | 17,2 |
| **PKP244D23** | 0,58 | 2,10 | 1,80 | 42x42x39 | 0,30 | 54,7 |
| **HT17-221D** | 0,22 | 23,0 | 0,90 | 42x42x34 | 0,23 | 51,0 |
| **JK42HS40-1304F** | 0,39 | 5,00 | 1,80 | 42x42x40 | 0,28 | 27,8 |

A la taula anterior podem observar la comparativa realitzada, amb diferents possibilitats que presenten característiques similars, i sobretot, unes dimensions comparables. En aquesta taula es destaquen amb color verd les característiques amb millor valor. Cal destacar-ne dos, que presenten la majoria de característiques. El guanyador de la comparativa, l'HT17221D, brilla en tres de les cinc característiques, amb la meitat d'angle de pas que els seus competidors, un pes reduït i una elevada inductància. En canvi, el primer motor, el 17HS192004S1, destaca en el seu elevat par motor i en el seu econòmic preu respecte als rivals.

Valorant subjectivament els dos candidats finals, s'ha decidit utilitzar el primer model, el 17HS192004S1, degut al seu elevat par motor, sent pràcticament tres vegades més gran que el que presenta l'altre model, i amb un preu molt més econòmic. D'altra banda, aquests motors són més accessibles al presentar una disponibilitat més elevada que la resta. Per tant, aquest serà el motor en el qual es muntarà el robot.

El motor pas a pas 17HS19-2004S1 opera mitjançant l'activació successiva de dues bobines. Aquestes estan col·locades de manera que s'energitzen per crear un camp magnètic i provocar un moviment al rotor. Es van alternant els camps magnètics de les dues bobines, per tal d'anar incrementant en petits angles la rotació.

Aquestes dues bobines es troben connectades a quatre cables, un parell per cada bobina. Al fluir el corrent a través d'elles, es crea el camp magnètic que provoca el gir del rotor. Aquesta tècnica és la que permet al sistema moure's.

Aquest motor requereix d'un corrent nominal d'entre 0,5 fins a 2 A, per tal haurem de buscar un *driver* que pugui satisfer aquests requeriments.

## 3.3. *Drivers*

En aquest tipus d'aplicacions, on els motors pas a pas requereixen corrents i voltatges elevats per funcionar i els quals el microcontrolador no pot subministrar, els *drivers* juguen un rol clau. Aquests dispositius són capaços d'amplificar el corrent que subministra el microcontrolador per excitar les bobines dels motors, i d'aquesta manera generar moviment.

Els motors pas a pas són bipolars, per tant disposen de dues bobines. Per controlar el moviment d'aquests, és necessari que el corrent pugui fluir en els dos sentits de la bobina, i per tant canviar-ne la polaritat. Sovint, per fer-ho, aquests *drivers* empren ponts en H. Venint el seu nom per a la seva característica forma, semblant a la lletra H.

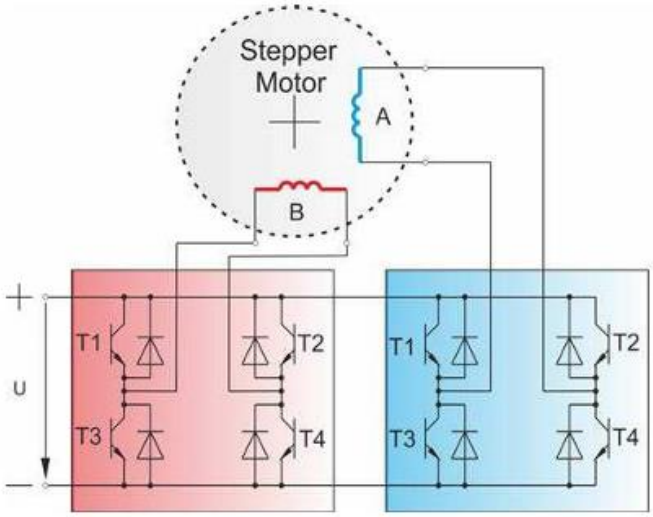



*Figura 12. Control d'un motor pas a pas amb un pont en H. [25]*

Els ponts en H, normalment compostos per transistors, permeten canviar el sentit del corrent mitjançant la commutació d'aquests. Per tant, amb dos ponts sencers, es poden controlar els corrents i les polaritzacions de les dues bobines dels motors.

D'altra banda, l'ús d'aquests sistemes permeten un control de seqüència de les bobines mitjançant la lògica interna de la que disposen. Aquest facilita el control sobre els senyals necessaris per a l'excitació de les bobines, reduint-lo a ordres de passos i direcció. Això és extremadament important, i en simplifica la manipulació, garantint així que l'ordre de seqüenciació de les bobines és el correcte.

A més a més, la majoria de *drivers* que actualment es troben al mercat permeten l'ús de l'anomenat *microstepping*. Aquesta funcionalitat permet dividir els passos dels motors, en passos més petits, i d'aquesta manera es garanteix un moviment més suau i precís. Això sí, l'ús d'aquesta funció implica una pèrdua en el parell motor.

Finalment, aquests dispositius disposen de sistemes de protecció envers la temperatura, les sobrecàrregues, etc. D'aquesta manera es pot assegurar que el microcontrolador no es veurà compromès en alguna d'aquestes situacions.

Per tant, revisant els aspectes més rellevants, els *drivers* ens proporcionen un seguit d'avantatges, i es converteixen en un component essencial per a la funcionalitat de l'aplicació.

Revisant els *drivers* més usats per a aquest tipus d'aplicacions, i que s'adaptin als requeriments tècnics dels motors, se'n destaquen els més rellevants:

- **A4988** [26]**:** dins de les opcions que es presenten, és un dels més antics, i destaca per la seva fiabilitat i el seu baix cost. El circuit integrat, l'A4988, que és el que dona el nom del *driver* i és fabricat per Allegro MicroSystems, està compost per dos seccions; la part de potència, que gestiona la tensió i el corrent destinats al motor i la part de lògica, que és la

*Figura 13. Distribució de pins de l'A4988 [26]*

destinada a controlar el motor amb els dos pins d'entrada esmentats anteriorment. El *driver* presenta la següent configuració de pins:

El pin ENABLE, que disposa d'una resistència de *pull-down*, força l'estat lògic d'aquest a nivell baix. Per tant, si no es connecta aquest pin, el *driver* queda habilitat.

Seguidament els tres pins MS1, MS2 i MS3 determinen la resolució dels micro-passos. Com en el cas anterior, també disposen de resistències de *pull-down*, determinant el seu estat a nivell baix si no es connecten. Aquests pins permeten suficients combinacions com per poder arribar a establir 1/16 de passos. La següent taula determina les combinacions que permeten canviar la resolució dels passos:

| MS1 | MS2 | MS3 | Resolución - Micropasos |
|---|---|---|---|
| Low | Low | Low | Paso completo |
| High | Low | Low | Medio paso |
| Low | High | Low | 1/4 de paso |
| High | High | Low | 1/8 de paso |
| High | High | High | 1/16 de paso |

*Figura 14. Taula lògica per la resolució dels passos pel driver A4988. [26]*

El pin RESET reinicia el mòdul i s'activa amb un nivell lògic baix. Aquest pin no té resistència de pull-up, i és per això que en l'esquemàtic global, serà connectat amb el pin SLEEP, el qual si que disposa de la resistència anomenada i és l'encarregat d'introduir el sistema en un estat de baix consum.

Finalment els dos últims pins són els encarregats del moviment del robot. El pin DIR, de direcció, que mitjançant un nivell lògic alt o baix, determina el sentit de gir. I el pin STEP, de passos, és l'encarregat de gestionar els polsos rebuts pels microcontrolador i transmetre'ls al motor.

Continuant per l'altra banda, disposa dels pins de terra, GND. Així com també els pins d'alimentació, ja siguin els de nivell lògic de 5 V o l'alimentació necessària pels motors.
Finalment, en els 4 pins restants es connecten cada extrem de les bobines. D'aquesta manera es podran excitar en la seqüència correcta.

Continuant amb les característiques tècniques, aquest *driver* permet controlar motors amb una tensió de 8 V a 35 V, i amb una intensitat màxima de sortida de 2 A. Accepta també voltatges entre 3,3 V i 5,5 V per al control lògic.

- **DRV8825** [26]**:** com en el model anterior, aquest dispositiu també disposa d'una secció destinada a la lògica i una altra a la potència. Aquest *driver* usa un chip fabricat per Texas Instruments. Aquest *driver* presenta una distribució de pins molt similar a l'anterior. Tot i que les seves prestacions són superiors a l'A4988, ja mitjançant els mateixos pins que s'han descrit prèviament té la capacitat de generar fins a 1/32 de passos. Aquesta seria la principal diferència que presenten aquests dos models. La següent taula mostra les combinacions de bits que permeten configurar cada partició dels passos.

| M0 | M1 | M2 | Resolución - Micropasos |
|---|---|---|---|
| Low | Low | Low | Paso completo |
| High | Low | Low | Medio paso |
| Low | High | Low | 1/4 de paso |
| High | High | Low | 1/8 de paso |
| Low | Low | High | 1/16 de paso |
| High | Low | High | 1/32 de paso |
| Low | High | High | 1/32 de paso |
| High | High | High | 1/32 de paso |

*Figura 15. Taula lògica per la resolució dels passos pel driver DRV8825. [26]*

D'altra banda aquest *driver* permet treballar amb uns voltatges de motors més elevats, amb un rang d'entre 8,2 V fins a 45 V. El voltatge lògic acceptat és d'entre 2,5 V i 5,5 V i la intensitat màxima que pot subministrar a la sortida és de 2,5 A.

- **TMC2209** [26]**:** finalment, l'últim *driver* destacat, presenta unes prestacions molt superiors als dos altres models. El chip que duu aquest *driver* és fabricat a Alemanya per Trinamic, i és el que anomena el *driver*, el TMC2209. Aquest *driver* suporta una resolució de fins a 1/256 parts de passos. Actualment, aquest *driver* és el model més sofisticat per al control de motors pas a pas.

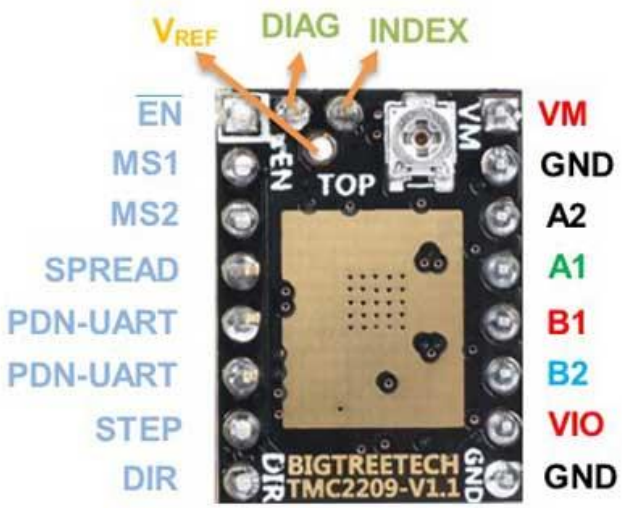



*Figura 16. Disposició dels pins del TMC2209. [26]*

S'observa en la imatge anterior que aquest dispositiu presenta uns pins lleugerament diferents al costat esquerre, sent els de la dreta idèntics en tots tres casos.

Aquest mòdul permet tres configuracions diferents en funció de l'ús que se li vulgui donar. La primera seria el mode *Step*/*Direction*, en el qual la funcionalitat seria la mateixa que per als dos *drivers* anteriors. Seguidament disposa del mode UART, que permet la transmissió de dades en sèrie entre dispositius mitjançant un port transmissor receptor asíncron universal. I finalment el mode SPI, provinent d'interfície perifèrica serial. Aquests dos últims modes aprofiten totes les característiques especials que disposa aquest *driver*. Algunes d'aquestes característiques son:

- *Stanby corrent reduction*: aquest redueix el corrent quan es troba en espera.
- *StealthChop2*: és un mode silenciós, tant amb el motor parat com a altes velocitats.
- *CoolStep*: aquest s'encarrega de controlar el corrent, per mantenir els motors en una temperatura adequada. Per reduir la temperatura, disminueix la tensió quan no hi ha càrrega.

- *StallGuard*: substitueix la funció dels sensors de final de carrera, i detecta la càrrega del motor.
- *SpreadCycle*: accelera i desaccelera el motor d'una manera més progressiva.
- *DcStep*: garanteix el moviment a altes velocitats realitzant tots els passos, és a dir, sense saltar-se'n cap.
- *MicroPlyer*: permet una major suavitat amb els micro-passos.

Per tant, els pins diferents al costat esquerre, són els que ens permeten escollir entre les diferents configuracions existents.

Com amb els altres dos casos, el rang de tensió lògica és molt similar, sent en aquest cas entre 3 V i 5 V. Un corrent eficaç de sortida de 2 A i amb la capacitat d'alimentar motors d'entre 4,75 V i 36 V.

Finalment amb l'anàlisi dels tres principals models realitzat, es decideix usar l'A4988 per al projecte. Per a l'elecció s'ha descartat l'últim *driver* per la seva complexitat d'ús. Aquest disposa de moltes configuracions especials, que no són requerides per al robot, per tant, s'estaria sobredimensionant aquest component. Respecte als dos restants, la decisió s'ha pres en base a la disponibilitat i a la facilitat d'accés del *driver* escollit. Al ser usat freqüentment i portar molts anys al mercat, és habitual que les botigues en disposin amb *stock*.

## 3.4. Unitat de mesura inercial

Com s'ha comentat prèviament, per al desenvolupament d'aquest projecte és de vital importància l'adquisició de dades que descriguin en tot moment l'estat en que es troba el nostre dispositiu. Aquest estat, no és més que l'angle d'inclinació que aquest pren. De manera que, sent coneixedors d'aquest valor podrem adaptar la resta de components per corregir-ne la inèrcia.

Tal com descriu l'article de N.Ahmad et al. [27], aquests sensors son usats per mesurar la velocitat, l'orientació i la força gravitacional.

Els graus de llibertat determinen el número de paràmetres independents del sistema. En funció del número de sensors que disposin, es poden tenir IMUs amb 2 graus de llibertat fins a 9. Però principalment n'existeixen dos tipus diferents:

- **Unitat de mesura inercial amb dos sensors:** aquestes unitats son compostes per un acceleròmetre i un giroscopi. Si cada sensor disposa dels seus 3 eixos (x, y i z), disposarem d'un total de 6 graus de llibertat. Els dos sensors son capaços d'obtenir els angles per separat, però l'ús dels dos, ens permet un calibratge i un resultat més exactes.

- **Unitat de mesura inercial amb tres sensors:** com en el cas anterior, es disposa d'un acceleròmetre, un giroscopi, i a més a més d'un magnetòmetre. Per tant, si entenem que cada sensor disposa de tres eixos, aquesta unitat tindrà 9 graus de llibertat. Aquestes unitats acostumen a proporcionar un valor més acurat de la rotació vertical.

Considerant aquestes dues opcions per al projecte a desenvolupar, cal destacar la problemàtica que presenta el segon tipus de sensor, ja que al treballar amb un magnetòmetre són més susceptibles als materials ferromagnètics. Per tant, si treballem amb motors elèctrics, és un aspecte prou important a considerar.

D'altra banda, afegir que el tercer sensor proporciona una millor lectura en un eix que no és de vital importància per al projecte, ja que principalment, valorarem la rotació entorn al seu eix transversal.

Per tant doncs, valorant tots els aspectes que ens defineixen el projecte, es decideix treballar amb una unitat de mesura inercial de dos eixos.

Actualment al mercat es disposa de una gran varietat d'unitats de mesura amb 6 graus de llibertat. Però s'ha optat per treballar amb el MPU6050. Aquesta unitat de mesura permet la comunicació amb el microcontrolador mitjançant el protocol I2C. Aquesta tipus de comunicació serial permet la comunicació amb la majoria de controladors del mercat, incloent el que s'ha escollit. D'altra banda, destacar que és molt utilitzada per un gran ventall d'aplicacions, i per tant hi ha accés a més informació al respecte.

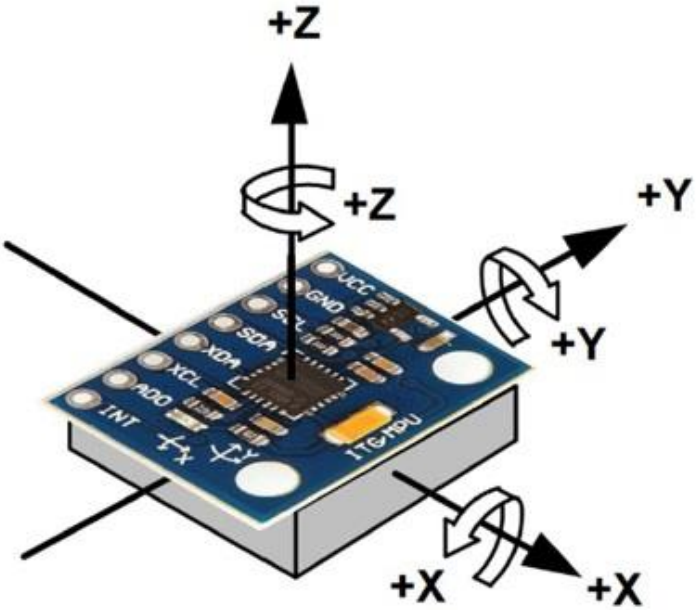



*Figura 17. MPU6050 amb els eixos de mesura. [28]*

## 3.5. Bateria

El sistema d'alimentació és fonamental pel funcionament dels components electrònics. Per dotar el robot d'una certa autonomia, s'ha cregut que el més senzill seria alimentar-lo mitjançant una bateria.

Avui en dia, en el mercat actual, existeix una gran varietat de tipus de bateries que podrien ser usades per al disseny del robot. Les opcions més habituals són:

- **Bateries de plom-àcid:** presenten una densitat d'energia molt baixa i un pes elevat. La seva capacitat disminueix si es descarrega del tot i tendeixen a descarregar-se ràpidament. El seu cicle de vida és baix i un llarg temps de càrrega. Tot i això presenten un cost relativament baix i una gran robustesa.
  Tanmateix, aquestes bateries no són ideals per a aquest projecte. Al presentar una eficiència tan baixa i un pes més elevat, no s'adapten suficient als requeriments del robot.
- **Bateries de Níquel-Cadmi (Ni-Cd):** al contrari que en el cas anterior, aquestes bateries presenten una vida útil llarga, i són resistents a les descàrregues profundes. No obstant això, tant la toxicitat del cadmi com l'efecte memòria, que és aquell en el qual es redueix la seva la capacitat si es carrega la bateria quan no es troba totalment descarregada, en limiten molt el seu ús.
  Aquest tipus de bateries son més usades en aplicacions on es requereix d'una durabilitat excepcional, i on es puguin garantir cicles de càrrega i descàrrega complerts. Per tant, al no ser el nostre cas, també se'n descarta el seu ús per al robot.
- **Bateries de Ió-Liti (Li-Ion):** aquestes bateries són les més usades actualment per a la majoria d'aplicacions, ja siguin vehicles elèctrics, aplicacions robòtiques, etc. A diferència de les altres dues, aquestes bateries combinen una alta densitat energètica, un baix pes i un cicle de vida llarg. A més a més, aquestes bateries no pateixen del descrit efecte memòria, ni tendeixen a auto descarregar-se.
- **Bateries de Polímer de Liti (Li-Po):** són bateries molt similars a les anteriors, tot i que són més adaptables, ja que són més flexibles i presenten una densitat energètica més elevada. Aquesta característica les fa molt més adequades per a l'ús que se'ls vol donar. Ara bé aquest tipus de bateries són més susceptibles a danys físics, per tant necessitaran ser manejades amb més cura.
  De totes maneres, per al nostre robot s'ha decidit usar aquest últim tipus de bateries.

Per a continuar amb l'elecció de la bateria, és importantíssim calcular l'autonomia de la qual es vol dotar al robot. Per fer-ho, es realitza un càlcul aproximat del consum energètic dels components

que el composen. Com que aquests ja han sigut definits prèviament, es determinarà mitjançant els fulls tècnics del components el seu consum energètic i pel cas dels motors, s'ha realitzat una prova al laboratori, observant-ne el seu consum alimentant-se amb diferents voltatges.

La següent taula exposa els consums d'un motor girant sense fregament a una freqüència de 200 Hz.

*Taula 3. Estudi de la intensitat consumida en funció del voltatge d'alimentació. Font pròpia.*

| Voltatge d'alimentació [V] | Intensitat consumida [mA] |
|---|---|
| 8 | 400 |
| 12 | 276 |
| 16 | 220 |
| 20 | 190 |

S'ha realitzat l'estudi amb un rang de 8 V a 20 V. Per sota de 8 V, l'excitació de les bobines no era suficientment ràpida perquè els motors treballessin correctament a diferents freqüències, mostrant en ocasions dificultats per girar. S'ha cregut, que tot i que el *driver* permet alimentar motors fins a 35 V, no és necessari treballar amb un voltatge més elevat que 20 V.

Per realitzar el càlcul de l'autonomia, es prendrà el valor màxim de la taula, i a posteriori, ja es decidirà a quin voltatge es vol treballar. Per tant, es prendrà 400 mA com a consum energètic d'un motor. Tenint en compte que es treballarà amb dos motors, estem parlant d'un consum de 800 mA.

Seguint amb el microcontrolador, segons la seva documentació tècnica [20], pot consumir fins a 500 mA, en funció de les seves condicions operatives. Com en el cas anterior, es prendrà el consum màxim.

Pel que fa al consum energètic de la unitat de mesura inercial MPU6050 i del driver A4988, s'ha decidit menysprear-ne el consum, al tractar-se de valors aproximadament propers a 1 µA.

Considerant doncs, que el microcontrolador treballarà a un voltatge de 5 V, podem calcular la potència consumida. D'aquesta manera, podrem determinar el consum de corrent que això implicarà a la bateria de 12 V.

$$P_u = 0{,}5\ A \cdot 5\ V = 2{,}5\ W \qquad \textbf{(Eq.3.1)}$$

Aplicant un rendiment d'un 90%, obtenim una potencia consumida:

$$P_u = 2{,}5\ W \cdot 0{,}9 = 2{,}78\ W \qquad \textbf{(Eq.3.2)}$$

Calculant doncs, el corrent que suposa aquest potencia útil per la bateria de 12 V:

$$I = \frac{2{,}78\ W}{12\ V} = 0{,}231\ A = 231\ mA \qquad \textbf{(Eq.3.3)}$$

Per tant, el consum total del sistema seria de:

$$Consum\ total = 800 + 231 = 1031\ mA = 1{,}03\ A \qquad \textbf{(Eq.3.4)}$$

Considerant doncs, una durada aproximada del funcionament del robot d'una hora, obtenim els amperes hora necessaris per a aquesta funcionalitat:

$$Capacitat = 1{,}03\ A \cdot 1\ h = 1{,}03\ Ah \qquad \textbf{(Eq.3.5)}$$

Per un tema de facilitat d'*stock* i de disponibilitat, s'ha decidit usar una bateria d'1100 mAh . Per tant, aquesta bateria ens proporcionaria una autonomia mínima de:

$$Autonomia = \frac{1{,}1\ Ah}{1{,}03\ A} = 1{,}06\ h = 64{,}07\ mim \qquad \textbf{(Eq.3.6)}$$

Tenint en compte però, que aquestes bateries no es poden descarregar del tot, es considerarà que es pot fer un ús aproximat del 80 % de la capacitat d'aquesta. Per tant, es disposarà d'una autonomia de:

$$Autonmia\ real = 64{,}07 \cdot 0{,}8 = 51{,}26\ min \qquad \textbf{(Eq.3.7)}$$

Cal considerar, que aquests càlculs han estat realitzats amb els corrents màxims, i per tant aquest determina l'autonomia mínima de la qual disposarà el sistema.

Aquestes han sigut les cel·les escollides per composar la bateria que alimentarà el projecte.

*Figura 18. Cel·la de 3,7 V i 1100 mAh. [45]*

A continuació cal determinar la tensió necessària per alimentar el conjunt. Considerant que els motors treballen amb consistència a partir dels 8 V, i que les cel·les de polímer de liti disponibles proporcionen 3,7 V cada una. Per tant, seran necessàries:

$$n° \; de \; cel \cdot les = \frac{8 \; V}{3{,}7 \; V \; x \; cel \cdot la} = 2{,}16 \; cel \cdot les \qquad \textbf{(Eq.3.8)}$$

Tenint en compte que el resultat no és nombre exacte, s'aproxima a 3, per poder garantir els 8 V mínims. Per tant, definint el nombre total de cel·les com a 3, es torna a calcular la tensió final subministrada:

$$Tensió = 3{,}7 \; V \cdot 3 \; cel \cdot les = 11{,}1 \; V \qquad \textbf{(Eq.3.9)}$$

Havent aconseguit alimentar els motors, ara queda alimentar el microcontrolador. Aquest s'alimenta amb una tensió de 5 V. És per això que serà necessari emprar un regulador de tensió. Aquests dispositius són capaços de mantenir una tensió de sortida constant, independent de les variacions de la tensió d'entrada.

Existeixen dos tipus diferents de reguladors de tensió, els reguladors lineals i els reguladors commutats. Per aquest projecte ens centrarem en els últims, ja que són molt més eficients que els primers, els quals dissipen la potencia generada a partir de la diferencia de voltatge d'entrada i

sortida. En canvi, pels reguladors commutats, el seu principi de funcionament és el de commutar ràpidament un interruptor, sovint un transistor, i transferir l'energia, sovint mitjançant un inductor, que permet descarregar-lo i carregar-lo.

Per a reduir la tensió, s'usa un convertidor Buck. Amb aquests circuits s'aconsegueix una tensió inferior a la sortida, i permet tensions d'entrada més elevades. Com s'ha comentat, aquests circuits commuten, i per tant es poden trobar en l'estat de conducció (On-State), o oberts (Off-State). En la següent imatge es mostra el circuit principal, amb els dos estats descrits.

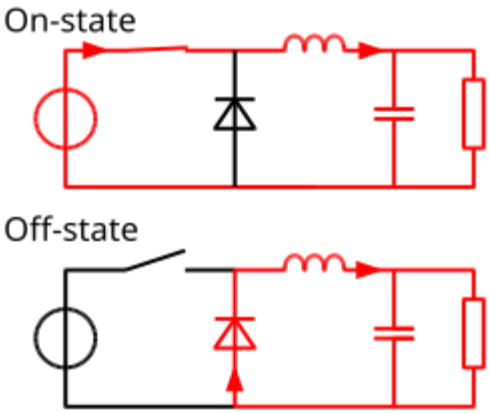



*Figura 19. Estats del circuit reductor. [46].*

Basant-nos doncs en reguladors de tensió que implementin aquest convertidor, se'n troba un que s'adapta correctament a les especificacions exposades. El convertidor LM2596S [29], incorpora un convertidor Buck, que permet una tensió d'entrada de fins a 40 V, i una tensió de sortida ajustable, entre 1,25 V i 35 V.

Finalment, la última consideració que s'ha de tenir en compte és la gestió de càrrega i descàrrega de les bateries Li-Po. Com s'ha explicat anteriorment, aquestes bateries pateixen si es descarreguen per sota un llindar, i la seva gestió de càrrega també s'ha de monitoritzar. És per això, que és necessari que el sistema de bateries compti amb un sistema de monitorització de bateria (BMS), i així poder assegurar una millor salut de la bateria i més seguretat. Aquests sistemes controlen la tensió, temperatura i corrent de la bateria, podent així prevenir sobrecàrregues i descàrregues excessives. D'altra banda, també poden equilibrar les cel·les que composen una bateria, d'aquesta manera es gestiona una càrrega i descàrrega uniforme en totes elles.

Les cel·les escollides, porten un sistema de monitorització de bateries intern, per tant cada cel·la realitza la seva pròpia gestió. Aquest sistema no és l'òptim, ja que és millor comptar amb un BMS de 3 cel·les que realitzi el control del conjunt, però al portar-ho les bateries integrat, ja no és necessari instal·lar un BMS extern, i per tant s'abarateix el cost.

## 3.6. Esquema electrònic

En aquest apartat es descriurà l'esquema elèctric i les connexions entre els components descrits amb anterioritat. La següent imatge descriu l'esquema elèctric del conjunt del circuit. Aquest ha sigut realitzat mitjançant el software informàtic KiCad. Aquest és un programari lliure que permet el disseny de circuits electrònics i la seva conversió a circuits impresos.

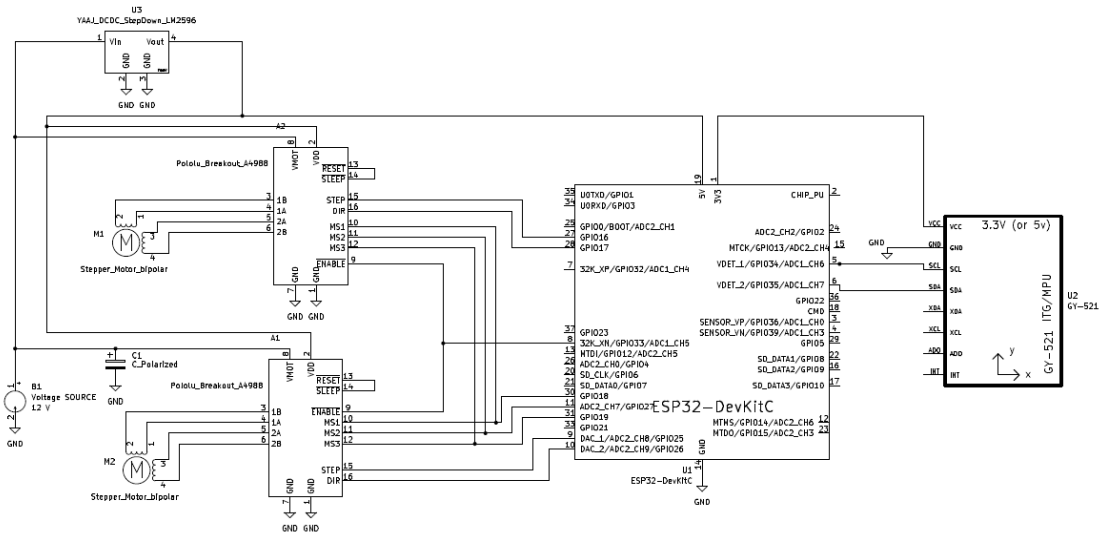



*Figura 20. Esquema electrònic del conjunt. Font pròpia.*

En aquest, podem observar les interaccions que presenten els components entre ells. Se'n destacaran els més rellevants.

Començant per l'esquerre, s'ha descrit la bateria com un font de tensió de 12 V. D'aquesta manera s'aconsegueix simplificar més l'esquema. S'observa que s'ha col·locat un condensador entre GND i la font de tensió. Aquest desenvolupa una funció de protecció del sistema, és a dir, en cas que es generi un pic de tensió, el condensador l'absorbeix i posteriorment es descarrega progressivament, alliberant l'energia gradualment. Així doncs, s'aconsegueix protegir els *drivers* i a més a més s'estabilitza el comportament del sistema, ajudant a mantenir un funcionament més estable.

Per l'elecció d'aquest component, s'ha decidit instal·lar un condensador electrolític. Per calcular el valor adequat d'aquest component, s'han desenvolupat els càlculs amb la tensió d'arrissat. D'aquesta manera podem determinar la capacitat mínima del condensador perquè aquest garanteixi una tensió d'arrissat baixa. Assumint que aquesta tensió pot prendre un valor d'1% de la tensió subministrada per la font de tensió, és a dir, en aquest cas de 12 V; que la freqüència màxima

de commutació segons el *datasheet* dels *drivers* [30] és de 50 kHz i considerant la intensitat màxima descrita prèviament de 400 mA, sent de 800 mA pel conjunt de dos motors, s'obté:

$$C = \frac{I}{f \cdot V_a} = \frac{0{,}8\ A}{50 \cdot 10^3\ Hz \cdot 0{,}12} = 1{,}33 \cdot 10^{-4}\ F = 133\ \mu F \qquad \textbf{(Eq.3.10)}$$

Seleccionant el següent valor de capacitat de la taula de valors nominals dels condensadors, es veu que aquest presenta una capacitat de 220 µF i 16 V, una capacitat lleugerament superior a la calculada, però que garanteix el valor de la tensió d'arrissat màxim i amb una tensió nominal lleugerament superior als 12 V del sistema d'alimentació, proporcionant un marge de seguretat afegit, garantint que el condensador no fallarà degut a sobrecàrregues de tensió.

Seguint amb els *drivers*, aquests presenten l'opció de limitar la intensitat que circula per les bobines, indiferentment de la tensió d'entrada. A aquest mecanisme se'l coneix com a *Chopping*. És important doncs, ajustar bé aquest el potenciòmetre de la placa, per tal d'aconseguir el valor desitjat.

Segons el *datasheet [30]* proporcionat pel fabricant, el *driver* A4988 presenta la següent equació per determinar el corrent màxim:

$$I_{max} = \frac{V_{REF}}{8 \cdot R_s} \qquad \textbf{(Eq.3.11)}$$

Per trobar el valor de la resistència de sensat ($R_s$), cal observar el nostre *driver* específicament, ja que en funció de la placa, aquest valor pot variar.

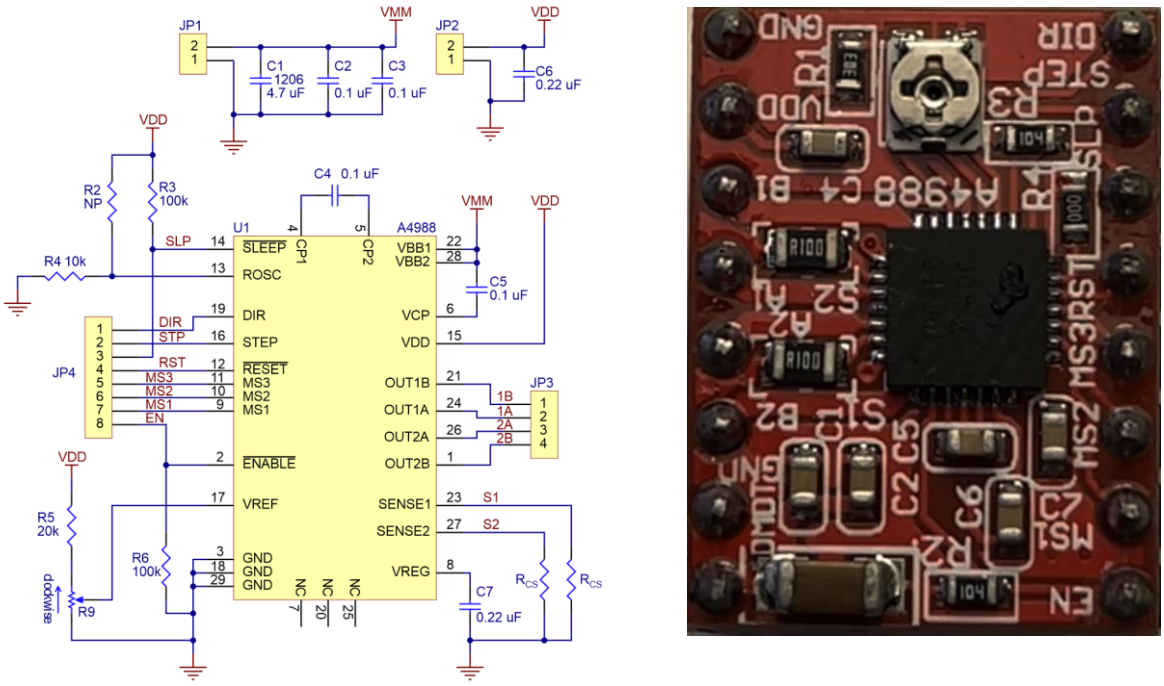



*Figura 21. a) esquema del driver A4988. [47] b) pins del model adquirit. Font pròpia.*

Segons l'esquema, les resistències de sensat, venen determinades per S1 i S2 a la placa. Mirant el driver, imatge de la dreta (B), observem que tant la resistència S1 com la S2 prenen un valor de R100, és a dir, de 0,1 Ω.

Realitzant proves al laboratori, s'ha determinat que la intensitat màxim a la que han treballat els motors ha sigut de 0,5 A, podem determinar la tensió de referència del nostre circuit.

$$V_{REF} = \frac{I_{max}}{R_s \cdot 8} = \frac{0{,}5}{0{,}8} = 0{,}625\ V \qquad \textbf{(Eq.3.12)}$$

Per ajustar la tensió de referència, connectem el *driver* només amb l'alimentació lògica, i es mesura amb el multímetre digital 2110 de Keithley la tensió de referència. Rotant el potenciòmetre, s'aconsegueix la tensió de referència desitjada.

A continuació, es pot observar a l'esquema general, que els pins SLEEP i RESET del *driver* estan connectats entre sí, tal i com s'havia comentat en l'apartat anterior. D'aquesta manera es pot assegurar un estat lògic alt.

Sobre la connexió entre els pins MS1, MS2, MS3 i ENABLE, s'observa que s'ha decidit ajuntar els pins dels dos *drivers*, i així reduir-ne el control seu control a 4 pins de l'ESP32. Això es pot realitzar d'aquesta manera, perquè s'entén que si existeix la necessitat de canviar el mode de treball dels motors, serà necessari pels dos, i es podrà implementar només canviant l'estat d'un pin.

Ara bé, cal destacar que el control dels passos i la direcció s'ha implementat per separat. Depenent de les funcionalitats que es vulguin implementar al sistema, pot ser necessari que un dels dos motors giri més ràpidament que l'altre. De manera paral·lela, a l'estar els dos motors col·locats de manera simètrica, els estats de la direcció són els oposats, i només així s'aconsegueix que els dos avancin o retrocedeixin. Tot i que hagués sigut possible oposar els estats amb una porta lògica NOT per a algun dels dos pins, s'ha preferit permetre un control més flexible.

Finalment, queda descriure la comunicació entre el sensor MPU6050 i el microcontrolador. Tal i com s'ha descrit anterior, aquest sensor permet la transmissió d'informació mitjançant el protocol I2C. Aquest requereix de dos pins, SDA i SCL. En molts microcontroladors, existeixen ports d'entrada específics per la correcta lectura de la informació transmesa. En el cas de l'ESP32, permet assignar aquests ports als pins que es cregui corresponents.

## 3.7. PCB

Per realitzar el muntatge final del prototip s'ha decidit dissenyar una placa de circuit imprès. S'ha de tenir en compte que aquestes permeten una presentació molt més compacte que una *protoboard*. En aquest sentit, el disseny de la PCB permet traçar pistes de connexió precises, optimitzant el camí de les connexions elèctriques, i així aconseguir minimitzar la resistència i la inductància paràsita. Aquest muntatge dota al circuit d'una seguretat i una fiabilitat afegida.

Existeixen dos tipus de muntatges diferents. El muntatge en superfície (SMT), que és el més usat avui en dia, permet soldar components a les plaques sense que aquests l'hagin de travessar. Això permet que els components puguin ser més petits, sigui més ràpid i econòmic. No obstant això, per soldar els components a la PCB, s'ha usat el segon mètode, el muntatge a través del forat. S'ha decidit emprar aquesta metodologia, perquè és més senzill de soldar amb les eines disponibles, i perquè s'ha cregut que s'adaptava més amb els components a muntar.

Per realitzar la placa PCB, s'ha dissenyat amb el mateix software que l'esquema electrònic, KiCad, i s'ha enviat el disseny a l'empresa JLCPCB. Actualment, és l'empresa referència a nivell mundial, i es dediquen a fabricar plaques en petites quantitats per a projectes. Aquest fet, facilita molt les tasques de fabricació.

Aquesta companyia disposa de les seves pròpies regles de disseny, per tal de garantir un producte estandarditzat i sense errors. Per exemple, aquests requereixen un espaiat mínim entre forats de 0,254 mm, una mida mínima de forat de trepant i un espaiat mínim entre pistes, per tal que no es vegi afectada la integritat de la senyal, el control d'impedància i la manufacturabilitat. Per aquest motiu, l'empresa executa el seu propi diagnòstic DRC (Design Rule Checks), per tal d'assegurar que és possible fabricar els dissenys enviats. Seguint les normes principals i els estàndards de l'empresa, s'ha decidit començar el disseny de la PCB amb la mida més econòmica, 10 cm per 10 cm.

De la placa s'han aprofitat les dues superfícies possibles, la part de davant i la part posterior. Amb aquest sistema, es permet dissenyar una PCB molt més reduïda, permetent doncs reduir la mida final de la PCB. S'ha decidit connectar les pistes d'alimentació dels diferents components a la cara posterior. A més a més, s'ha creat un pla de masses, per unir els diferents punts que van dirigits a GND.

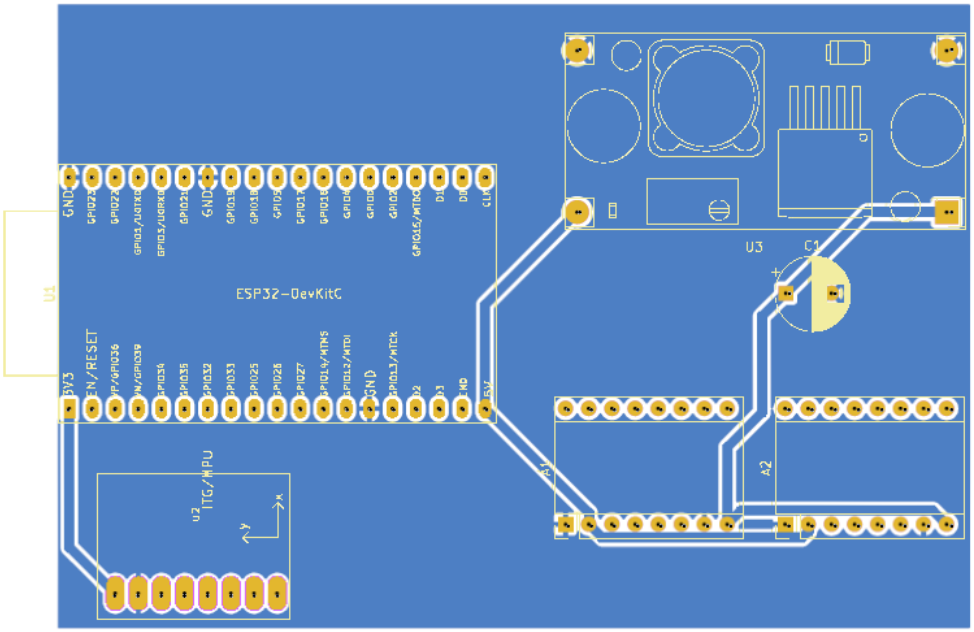



*Figura 22. Disseny de la cara posterior de la PCB. Font pròpia.*

Per la cara del davant de la placa, s'ha decidit unir els pins de control.

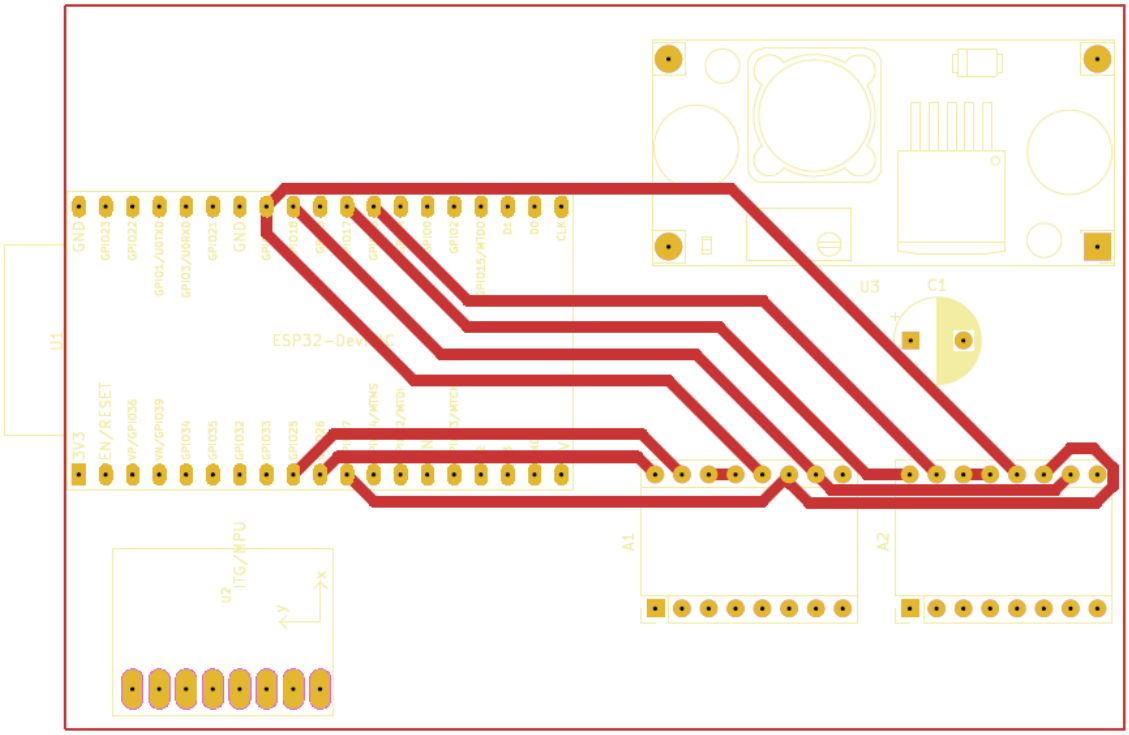



*Figura 23. Disseny de la cara davantera de la PCB. Font pròpia.*

Cal destacar que tant per les dues cares, s'ha evitat creuar pistes per sota l'antena de comunicació WiFi de l'ESP32, ja que així ho sol·licita el fabricant. Per aquest motiu, s'ha decidit col·locar l'antena a l'extrem esquerre de la placa, de manera que no pugui patir interferències.

# 4. Disseny mecànic

El disseny mecànic pren un gran pes en aquest projecte transversal entre l'enginyeria electrònica industrial i automàtica i l'enginyeria mecànica. És per aquest motiu, que un dels objectius ha sigut combinar un disseny que permeti al robot ser completament funcional i alhora que presenti un disseny estèticament atractiu.

El disseny mecànic del robot s'ha realitzat amb Solidworks, un software de disseny CAD. Aquest permet modelar, acoblar components i realitzar simulacions mecàniques del conjunt. L'ús d'aquest software ha permès crear un model detallat i realista del robot, optimitzant així el disseny . Principalment, es pot dividir el disseny del robot en dues parts principals, que juntes componen el robot.

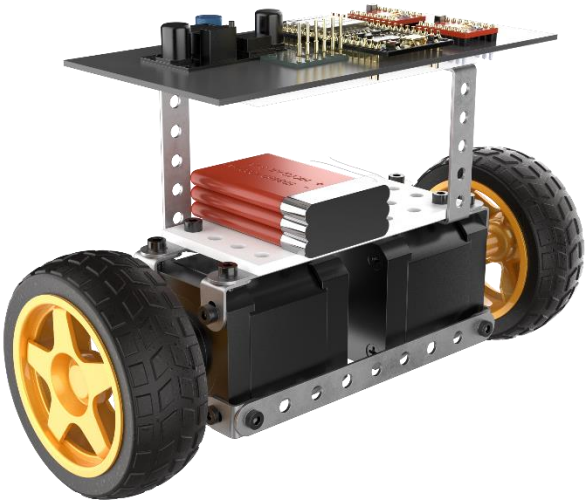


*Figura 24. Render del robot. Font pròpia. XX*

## 4.1. Estructura del robot

La primera és l'estructura interna, l'esquelet del robot. Aquest és l'encarregat d'integrar els diferents components que formen el robot. Per tant, es començaran definint totes les peces que formen aquest conjunt.

La base principal del robot, es fonamenta en la unió dels motors entre ells, i aprofitar la rigidesa d'aquests per ajudar a compondre una estructura sòlida i resistent. Per fer-ho, es va pensar en unes làmines allargades i planes que permetessin unir els dos robots i alhora crear la base de construcció.

Durant el procés de pluja d'idees sobre el disseny d'aquestes barnilles d'unió, es va pensar a usar elements de la marca Meccano. La principal funció d'aquestes, és la de crear una base que permeti desenvolupar joguines per a nens petits. Per tant, s'adaptava molt adequadament a les peces que es volien dissenyar.

Aquestes peces dissenyades especialment per la funció esmentada, venen construïdes amb acer. Aquest material és conegut per la seva resistència i durabilitat. L'acer presenta una resistència superior a l'alumini, tot i que aquest presenta un pes menor. Tots dos materials són molt duradors, i resistents a la corrosió. Tot i això, s'han decidit emprar les làmines d'acer, ja que per accessibilitat, era més senzill utilitzar les peces prefabricades de Meccano, que realitzar les mateixes peces d'alumini. Probablement, si s'hagués valorat la fabricació de les làmines, s'hagués optat per construir-les amb alumini pel seu baix pes, això hagués permès al robot ser més àgil.

Els dos motors presentaven 4 forats amb rosca de mètric 4 per la seva cara exterior, on es situa l'eix de sortida i es col·loca la roda. Per aprofitar aquests forats per la construcció de la base, es van col·locar 8 escaires, per tal de poder-hi collar les làmines posteriorment. Això es pot observar en la següent imatge, que presenta un dels motors.

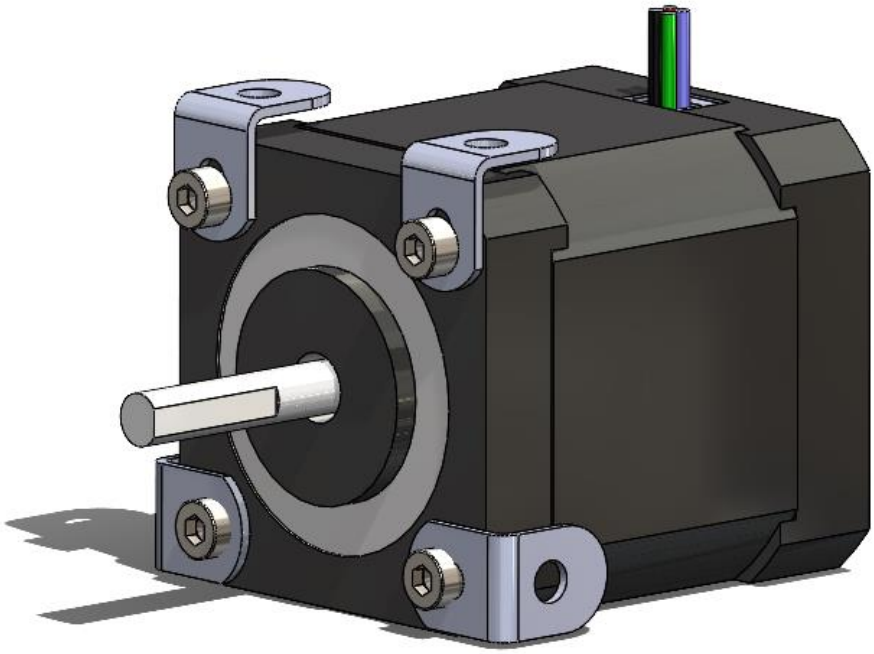


*Figura 25. Motor pas a pas i escaires 1x1. Font pròpia.*

Cal mencionar que pel disseny dels motors, s'ha partit d'un disseny descarregat de GrabCad [31]. Aquests, han permès treballar amb les mides precises i amb un disseny molt acurat dels motors a SolidWorks.

Els escaires dissenyats són escaires 1x1, és a dir, un forat per lateral, però sent un dels dos forats ovalat, permetent això una adaptació de l'alçada dels escaires respecte als motors. Amb aquests escaires, tampoc no hi ha hagut cap mena d'elecció de material, ja que també formen part del conjunt de Meccano, per tant, són fabricats amb acer.

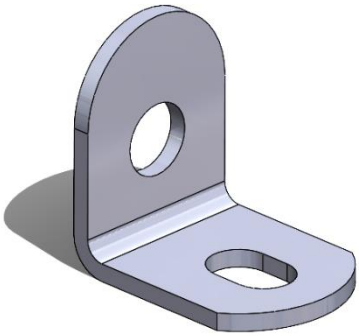


*Figura 26. Escaires 1x1. Font pròpia.*

A continuació, s'han usat aquests escaires per collar les 4 làmines metàl·liques que uneixen els dos motors. Totes presenten el mateix disseny amb 9 forats i el material usat fins ara, l'acer.

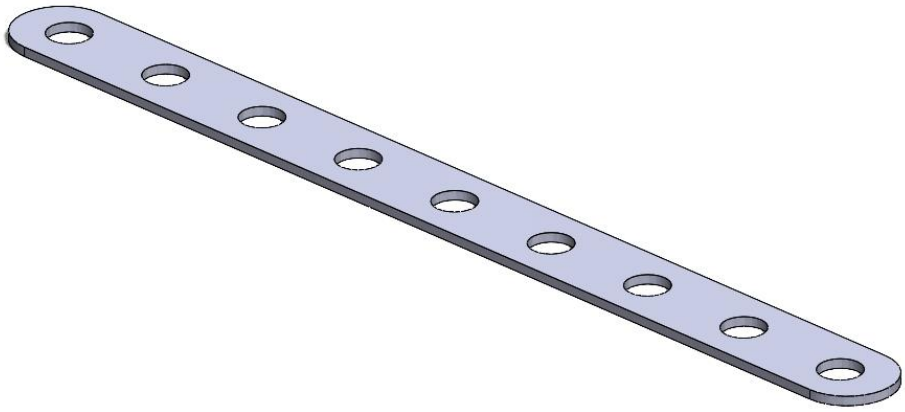


*Figura 27. Làmina de 9 forats. Font pròpia.*

Aquestes peces muntades sobre el robot constitueixen la base principal on es construirà el robot. En la següent imatge es pot veure la base del conjunt.

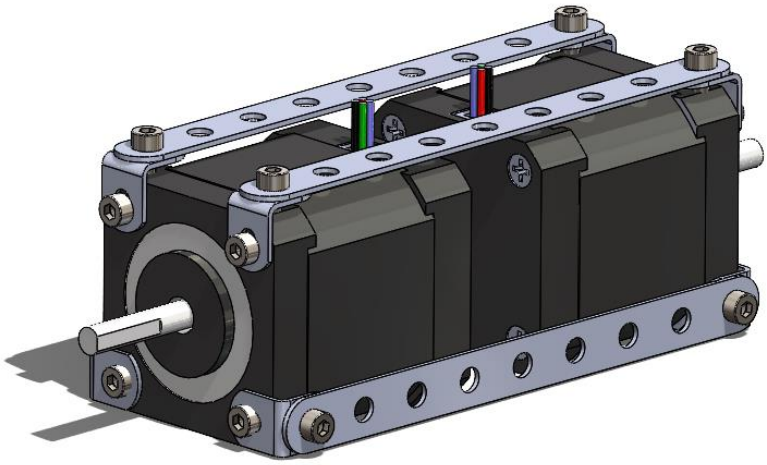


*Figura 28. Conjunt de motors i làmines de 9 forats. Font pròpia.*

S'observa com el conjunt va prenent consistència. Arribats a aquest punt, es decideix realitzar un estudi de la base del robot, per comprovar que permet continuar fabricant el robot sobre seu. Per fer-ho, s'ha usat el software Autodesk Fusion 360.

S'han emprat dos suports simulant el recolzament que tindria el robot sobre les rodes. Per tant, s'han col·locat dos suports als eixos dels motors, per tal d'aconseguir aquesta simulació. Aquests es poden veure a la següent imatge.

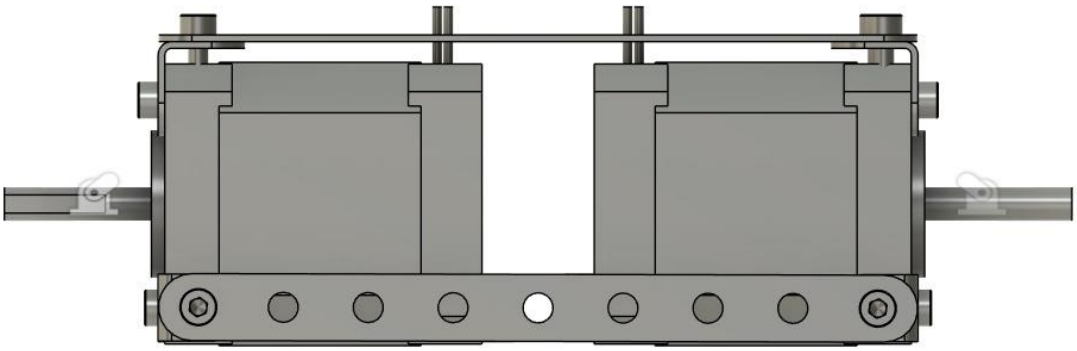


*Figura 29. Conjunt amb els suports als eixos dels motors. Font pròpia.*

En aquest estudi estàtic s'ha decidit col·locar un seguit de càrregues aplicades. Tenint en compte que el robot haurà de suportar l'estructura amb tots els components electrònics, s'ha realitzat una aproximació de la massa distribuïda que haurà de suportar aquest.

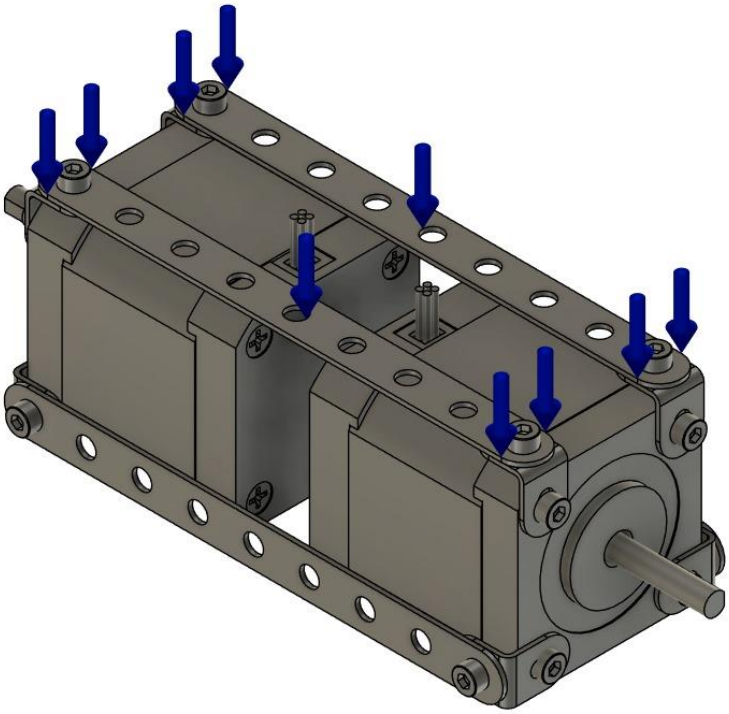


*Figura 30. Càrregues aplicades al conjunt. Font pròpia.*

El valor d'aquestes càrregues s'ha aproximat a 5 N, és a dir, aproximadament uns 500 grams. S'ha decidit usar aquest valor, considerant el pes tots els components electrònics, la carcassa, i en cas de futures aplicacions, possibles objectes que hagi de suportar el conjunt.

Els resultats d'aquest estudi han sigut els esperats, i amb un pes tan insignificant, el conjunt és suficientment resistent com per a ser utilitzat en aquest projecte. Com es pot observar a la imatge 31, en la qual s'observa l'estrès al qual està sotmès el conjunt, es veu que els punts on el model pot ser més vulnerable, la tensió màxima que aquest presenta és de 21,9 MPa aproximadament. Tots els valors es troben dins del rang acceptable de l'acer, i per tant, no es contempla que hi pugui existir cap vulnerabilitat del material.

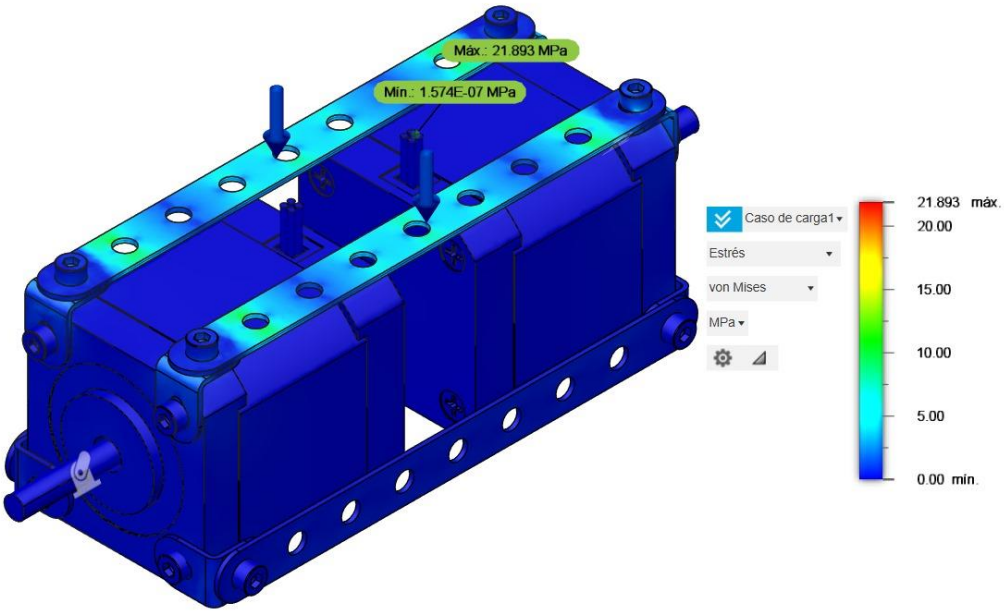



*Figura 31. Estrès al que està sotmès el conjunt en MPa. Font pròpia.*

Continuant amb l'anàlisi de la simulació, es pot comprovar que la deformació màxima a la qual es pot trobar sotmès el material pren un valor de 0,131 mm. Aquest és pràcticament intranscendent en el comportament de l'estructura. Com en el cas anterior, es pot observar en la següent imatge els punts on la deformació serà màxima.

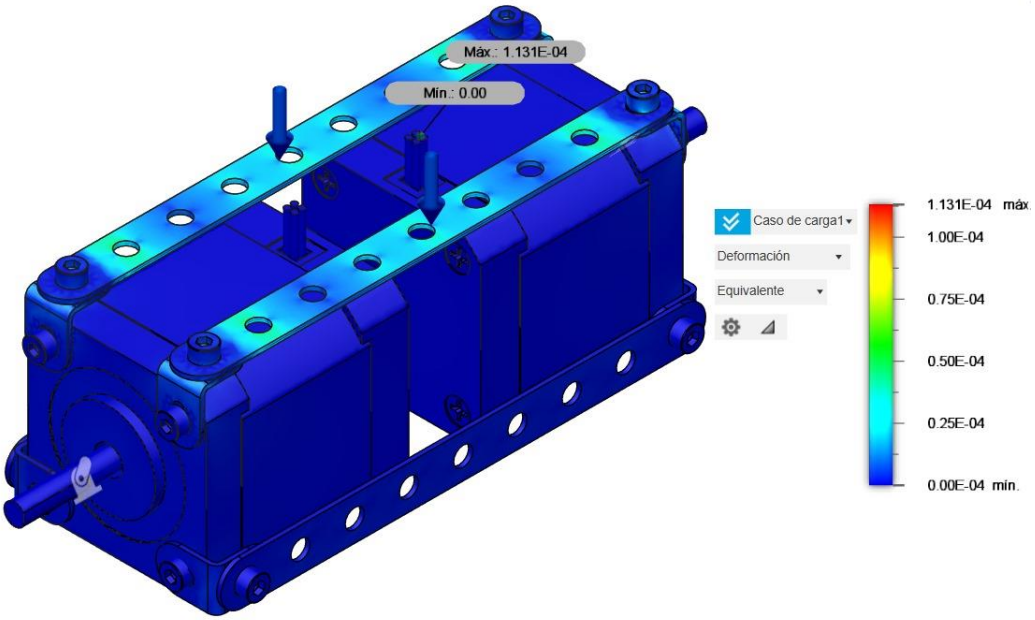



*Figura 32. Deformació del model en metres. Font pròpia.*

Un cop realitzat l'estudi, i veient que el model actual funciona correctament com a base per a tota l'estructura, s'ha procedit amb el disseny. Per poder col·locar tots els components electrònics que componen el robot és necessari disposar de superfícies suficients. Com es pot veure al disseny principal, la imatge 24 s'han construït dos nivells. En un d'ells, s'hi ha col·locat les bateries amb el seu component de gestió de la bateria, i al segon nivell la placa PCB amb la resta de components.

Per tal de disposar de dos nivells, s'han usat dos peces en U que permeten collar les dues superfícies planes, i crear l'espai suficient per ubicar tots els components. A la següent imatge, es pot observar la peça, composta per un total de 7 forats. El material, com pels altres dos tipus de làmines, també és acer.

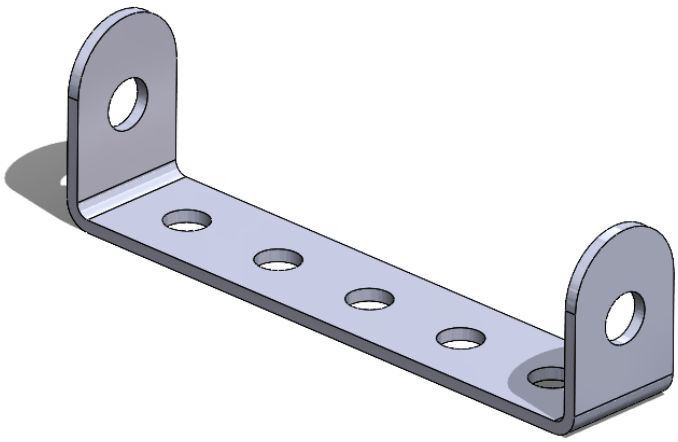


*Figura 33. Làmina en U de 7 forats. Font pròpia.*

Amb l'objectiu de dotar al robot de la màxima agilitat possible, un dels requisits principals era que no tingués un pes excessiu, i que, per tant, pogués tenir més facilitat de superació d'obstacles de cara a possibles aplicacions. En conseqüència, s'ha optat i s'ha decidit, que només usant dues làmines com les anteriors, seria suficient per subjectar-les a les superfícies on van instal·lats els components. Afegint doncs aquesta nova peça a l'assemblatge s'obté el següent.

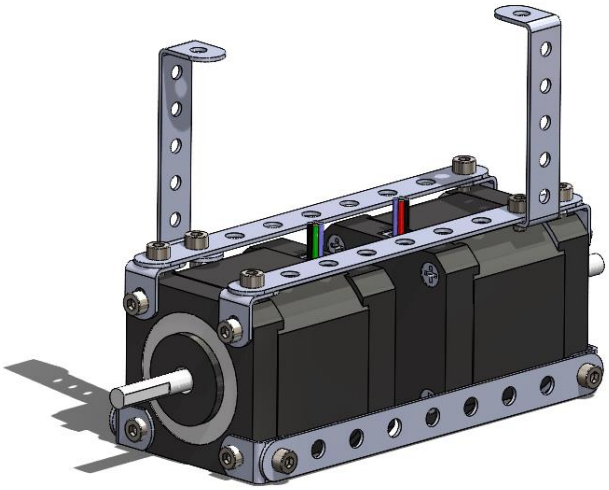


*Figura 34. Conjunt de motors, làmines de 9 forats i làmines en U de 7 forats. Font pròpia.*

Amb aquestes peces en U col·locades, ja tenim l'estructura principal del robot. Ara bé, com s'ha comentat anteriorment, convé destacar les dues superfícies que han de permetre situar els sistemes de control.

Considerant, doncs, que un dels aspectes claus del robot ha de ser la seva lleugeresa, cal buscar un material que permeti una fàcil adaptació a l'estructura i proporcioni les capacitats físiques per subjectar els components.

Per l'elecció del material, s'han valorat diverses opcions, que es detallen a continuació.

Un dels primers materials amb els quals es va pensar va ser l'alumini. Com s'ha comentat prèviament, aquest proporciona una relació pes resistència extraordinària. Molt superior a altres materials. Tot i això, la superfície no ha de suportar molt de pes, ja que els components electrònics són molt lleugers. S'està parlant que els dispositius més pesats són les bateries, sent de 22 grams cada una, per tant, un total de 66 grams. A més a més, l'alumini no és un material fàcil de manipular, i és comú l'ús de màquines de CNC per obtenir peces a mida. És per aquests motius, que aquest material queda descartat.

Posteriorment a descartar l'alumini per ser difícil de manipular a casa, es va decidir centrar-se en materials més accessibles i fàcils de manipular. Alhora, però, calia considerar materials lleugers. És per això que es va posar el focus en materials com la fusta, el cartó i derivats, plàstics, etc.

Després d'un estudi, en el qual es van valorar altres projectes, i quins materials havien usat aquests, es va acotar els materials a una selecció de dos: PLA i MDF. Sent el PLA un plàstic usat per realitzar impressions 3D. El tauler de densitat mitja (MDF) un aglomerat de fibres de fusta. A continuació es

realitzarà una comparativa de les propietats físiques que s'ha cregut convenient dels materials esmentats.

*Taula 4. Comparativa dels dos materials. [32][33].*

| Propietats | PLA (Àcid Polilàctic) | MDF (espessor de 2,5 a 4 mm) |
|---|---|---|
| **Material** | Termoplàstic biodegradable | Material compost de fibres de fusta i resines |
| **Densitat [g/m$^3$]** | 1,24 | 0,6 – 0,8 |
| **Resistència a la tracció [MPa]** | 47 – 70 | 22-30 |
| **Biodegradabilitat** | Altament biodegradable | No biodegradable |
| **Mòdul de Young [GPa]** | 3,5 – 4 | 3 – 4 |
| **Preu [€/kg]** | 15 – 30 | 1 – 3 |
| **Facilitat de mecanitzat** | Facilitat per ser imprès i mecanitzat | Fàcil de tallar |
| **Acabat superficial** | Suau i brillant | Suau, apte per pintar |

Amb la taula comparativa realitzada, es pot observar que les propietats físiques que presenten són força similars. És cert, que el PLA presenta una densitat més elevada, sent pràcticament el doble que la del MDF. Tot i això, s'ha optat per construir les dues superfícies amb PLA, ja que el fet de comptar amb una impressora 3D per crear-les, proporcionarà un nivell de professionalitat i precisió més elevat que per l'altre material.

Tot seguit, amb el material escollit, cal definir la mida d'aquestes superfícies. Un dels temes principals és la lleugeresa i la sostenibilitat, no es vol fer un ús excessiu de material innecessari. Per tant, aquestes superfícies no cal que sigui molt grans, simplement suficients per poder-hi col·locar els components necessaris. Per exemple, la PCB pot anar subjecte pel mig, no serà necessari que la superfície que la sosté, presenti les mateixes dimensions. Dit això, es procedeix a dissenyar les superfícies amb els forats per poder-hi passar els cargols necessaris. A més a més, la superfície

presenta un seguit de forats, d'aquesta manera, s'aconsegueix reduir encara més el material. Finalment, aquesta, queda dissenyada com es presenta tot seguit.

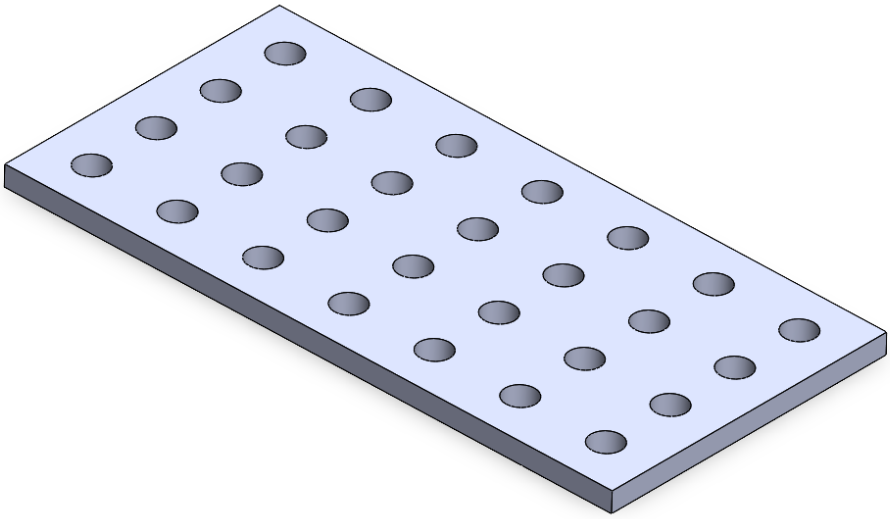


*Figura 35. Base del robot. Font pròpia.*

Finalment, això compondria tota l'estructura del robot. A la figura 36 podem veure l'assemblatge complet de l'estructura que suportarà la carcassa, els components electrònics, etc. Es pot observar, que el disseny és bastant modular, és a dir, està bastant segmentat. Aconseguint, doncs, un manteniment més senzill, a causa de la fàcil substitució de possibles peces en mal estat.

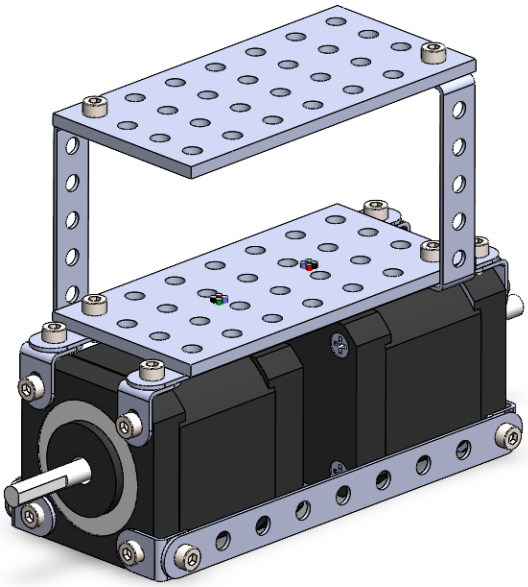


*Figura 36. Assemblatge final de l'estructura. Font pròpia.*

## 4.2. Carcassa externa

La segona part del disseny mecànic és la carcassa externa del robot. Aquesta carcassa externa és fàcilment substituïble, de manera, que en funció de l'aplicació per la qual es vulgui utilitzar el robot, es pot canviar. En aquest projecte se li ha volgut donar un punt més estètic, i s'ha volgut crear una carcassa que humanitzi el robot. Però si es volgués usar el robot com a mitjà de transport, o per transportar paquets, es podria dissenyar una carcassa que permetés al robot tenir una superfície de càrrega. Per a aquest motiu s'ha volgut crear una carcassa, fàcil d'intercanviar, permetent això adaptar la plataforma creada als diferents usos que se li vulgui donar.

Com s'ha comentat, doncs, l'ús principal pel qual s'ha dissenyat la carcassa d'aquest projecte ha sigut per donar-li un toc més estètic i professional, sense cap part funcional.

Aquesta carcassa ha de permetre recobrir els components principals del robot, però sense perdre la modularitat que destaca el robot. Per tant, ha de permetre accedir fàcilment a l'interior del robot, sigui per substituir components, o simplement per actualitzar el codi de funcionament. Per aquest motiu, s'ha decidit dividir la carcassa amb dues parts, que seran unides mitjançant cargols de mètric 4.

Així doncs, això permet un muntatge molt més senzill, permetent adaptar la carcassa externa a les mides de l'estructura interna. A continuació es pot observar una meitat de la peça. Se'n destaca el seu disseny minimalista, amb els forats pels cargols passants, i els nervis vistos.

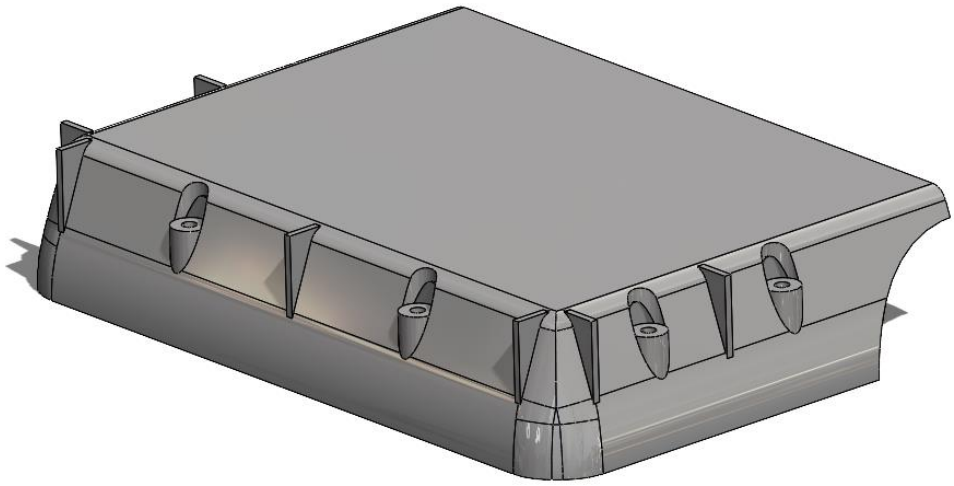


*Figura 37. Meitat de la carcassa externa. Font pròpia.*

Com es pot observar a la figura 24, la carcassa ha estat dissenyada per ser transparent, donant així un toc més modern deixant els components interiors a la vista.

Finalment, la unió de la carcassa a l'estructura interna s'ha fet mitjançant altres peces de Meccano, que permeten l'intercanvi fàcil entre diferents tapes externes. D'aquesta manera, s'aconsegueix adaptar el robot a tot tipus d'aplicacions diferents. Així doncs, intercanviant la part externa, s'adapta a nous terrenys i maneres diferents de treballar.

## 4.3. Mecanisme d'acoblament roda-eix

Un dels punts clau d'aquest projecte, és la transmissió de la rotació dels motors a les rodes, ja que aquestes són les que tindran el contacte directe amb la superfície, i per tant les encarregades de mantenir tot el sistema en equilibri. L'acoblament efectiu entre la roda i l'eix del motor és essencial per garantir una transmissió de moviment sense pèrdues i una resposta adequada del sistema de control.

L'eix del motor presenta un disseny específic, amb una secció majoritàriament rodona però amb un costat pla, tal com es pot observar a la figura 38. Aquesta característica permet un encaix perfecte amb les rodes, ja que evita qualsevol lliscament entre l'eix i la roda, assegurant una unió sòlida i estable. El mecanisme d'acoblament utilitzat és un encaix per pressió.

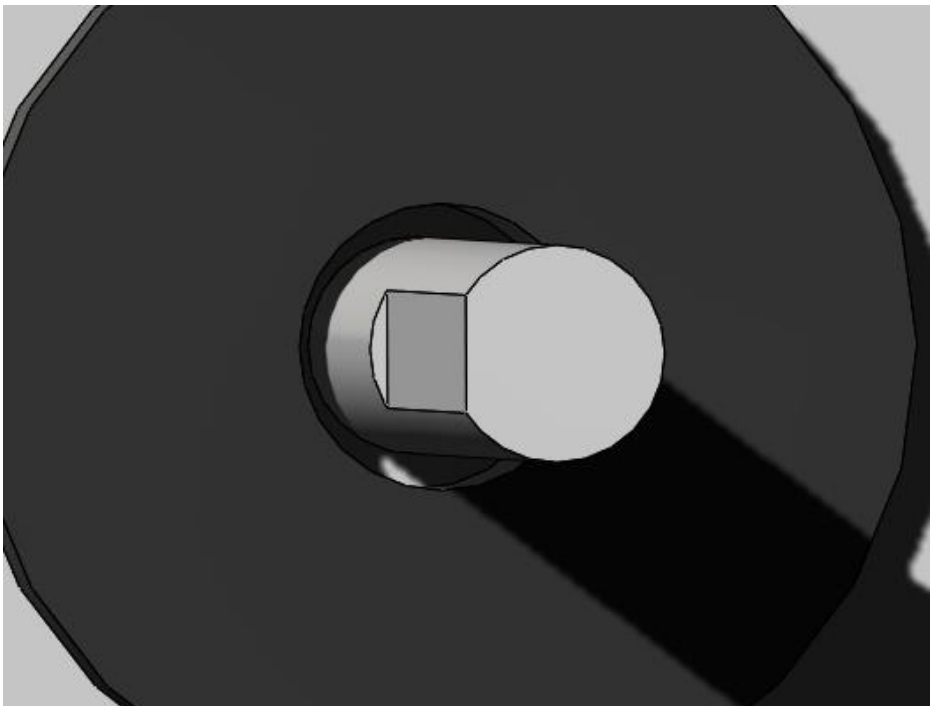


*Figura 38. Detall de l'eix del motor pas a pas. Font pròpia.*

Per garantir que aquest encaix sigui efectiu, s'aplicarà la norma ISO 286, que proporciona una base per establir les dimensions acceptables de tolerància entre l'eix i la roda. En aquest cas, l'eix del motor té un diàmetre nominal de 5 mm, amb una tolerància establerta de (+0, -0,012), que el classifica com un eix h7. Per tal d'aconseguir un encaix adequat, la roda dissenyada presenta un diàmetre de 5 mm amb una tolerància H7, que defineix la tolerància del forat amb un rang de 5.000 mm a 5.012 mm.

Així, es determina un joc màxim de 0.020 mm i un joc mínim de 0 mm, la qual cosa permet un ajustament precís sense comprometre la seguretat de la unió. Aquest tipus d'encaix no requereix elements addicionals com cargols o claus, facilitant tant el muntatge com el desmuntatge del sistema.

Per tant, la roda ha de tenir el mateix disseny intern que l'eix sortint del motor, permetent l'ajustament correcte entre ambdues parts. A més, aquest sistema d'acoblament per pressió, combinat amb la forma de l'eix, proporciona una transmissió directa de la força generada pel motor cap a la roda, mantenint l'eficiència i la precisió en els moviments. La selecció de materials d'alta resistència i l'optimització de les toleràncies asseguren la durabilitat i fiabilitat del conjunt, evitant desajustos o desgast prematur en condicions d'ús prolongat.

*Figura 39. Eix intern de la roda. Font pròpia.*

Finalment, el conjunt del robot lluiria tal com es mostra a la següent imatge:

*Figura 40. Render del robot i la carcassa. Font pròpia.*

# 5. Software

Seguidament, es procedirà a descriure el codi implementat al microcontrolador, per tal de permetre al robot dur a terme les seves principals funcionalitats.

## 5.1. Entorn de desenvolupament

Per implementar el disseny del codi, es van valorar diferents entorns que permetien programar, i carregar el codi a la placa de desenvolupament. Finalment, es va decidir que per falta de comoditat i de temps, ja que introduir-se a un entorn nou comporta una adaptació, es treballaria amb l'entorn Arduino IDE. Aquest programari és molt senzill, però permet desenvolupar les tasques principals que es requereixen pel projecte. A més a més, disposa d'un *serial monitor* i un *serial plotter*. Aquests han sigut usats per rebre dades des de l'ESP32, i així poder comprovar que els valors són els esperats.

Per adaptar el microcontrolador ESP32 a aquest entorn, el qual està pensat per treballar amb plaques d'Arduino, ha sigut necessària la instal·lació d'un *driver*, ja que per defecte aquest microcontrolador no es troba disponible entre les possibles opcions.

Per definir el microcontrolador, cal primerament afegir una URL al gestor de targetes, i posteriorment ja es pot instal·lar des del menú de *Board Manager* el paquet ESP32. Aquest és el que permet que l'Arduino IDE reconegui el microcontrolador.

En aquest programa, és comú utilitzar el propi llenguatge d'Arduino. L'objectiu principal va ser crear una adaptació del llenguatge C que permetés programar d'una manera més intuïtiva i senzilla. És per això que permeten l'ús de llibreries, i al ser una opció popularment usada, és comú trobar llibreries desenvolupades per altres usuaris.

## 5.2. Pseudocodi

En la següent imatge, es descriu el pseudocodi d'aquest projecte.

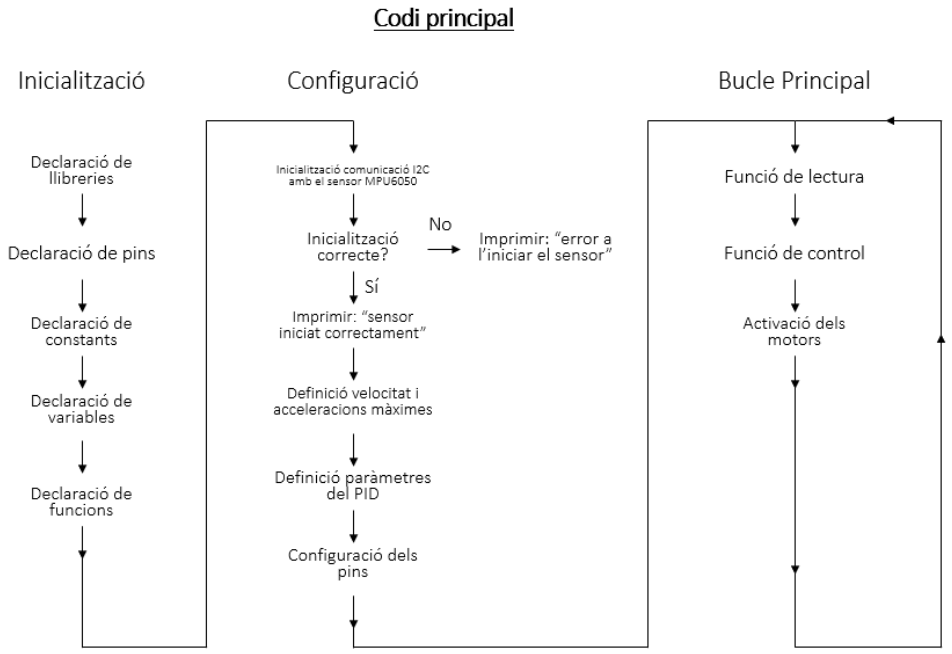



*Figura 41. Pseudocodi principal. Font pròpia.*

Es pot diferenciar el codi principal en tres segments. El primer, és la inicialització. En aquest procés es defineixen les llibreries que es volen usar. En el següent apartat, s'especificaran totes les llibreries usades. Tot seguit es defineixen els pins que s'empraran i es fa la declaració de constants i variables. En el codi dissenyat, es farà ús de dos funcions, per tant, és important que quedin definides a l'inici.

Seguidament, comença la part de configuració, popularment coneguda com a *void setup()* a Arduino. En aquesta etapa s'inicialitza la comunicació en sèrie I2C del microcontrolador i la unitat inercial de mesura. Com es pot observar en l'esquema del pseudocodi, en funció de si la iniciació ha estat realitzada amb èxit, el microcontrolador ens retornarà, mitjançant el serial monitor, el resultat d'aquesta.

Posteriorment, dins la configuració es defineixen les velocitats i acceleracions màximes dels motors. Aquest valor ha estat escollit en funció de les proves realitzades al laboratori. S'ha observat que l'activació i el funcionament dels motors és més adient quan es limita la velocitat màxima a un valor de 500 i l'acceleració a 5000, referint-se aquests, als passos per segon, i segon al quadrat pel cas de l'acceleració.

Pel que fa a la definició dels paràmetres del PID, és important definir en quin mode es vol que treballi. En aquest cas el PID treballarà en mode AUTOMATIC, en aquest mode el PID calcula la sortida en base al valor de l'entrada i al valor desitjat, freqüentment conegut com a *setpoint*. En

aquest procés també es defineix el temps de mostra, que en aquest cas pren un valor de 10 ms i finalment es defineixen els límits superiors i inferiors de la sortida. Per a aquest projecte s'ha limitat entre un rang de -500 fins a 500.

Per últim, dins la part de configuració es defineixen els pins de direcció i d'ENABLE com a pins de sortida i se'ls hi assigna el valor desitjat.

Un cop s'han realitzat tots els passos anteriors, el programa entra dins la reiteració principal. S'observa al pseudocodi que el bucle és molt senzill, ja que aquest compta amb l'activació de dues funcions.

La primera funció que s'executa és la de lectura de les dades de la unitat de mesura inercial. Per dur a terme aquest procés, es llegeixen els valors que ens proporciona l'acceleròmetre. S'utilitzen l'acceleració en els eixos x, y i z. Es van dur a terme vàries proves de lectura amb l'acceleròmetre. En aquestes s'imprimien tots els valors, tant de l'acceleròmetre com del giroscopi, i s'observava que els tres valors proporcionats per l'acceleròmetre eren els més precisos, i per tant, els que ens proporcionarien valors més exactes. És per això que, finalment, es va decidir treballar només amb els valors proporcionats per aquest.

Així doncs, per calcular el valor de la inclinació, s'ha usat la següent regla trigonomètrica, sent *ax*, *ay* i *az* les acceleracions en cada eix:

$$angle = \frac{atan2\left(ax, \sqrt{ay^2 + az^2}\right)}{\pi} \cdot 180 \qquad \textbf{(Eq.5.1)}$$

Tot seguit, aquest valor s'assigna a una llista de 9 valors. Quan s'ha realitzat les 9 lectures, és a dir, la llista ja té tots els valors, s'ordenen de menor a major, i posteriorment es realitza el càlcul de la mediana. S'usa aquest mètode per evitar possibles lectures errònies. D'aquesta manera, s'intenta assegurar que el valor de lectura coincideix amb els valors reals. Cal destacar que aquest càlcul estadístic és molt menys susceptible als valors extrems que la mitjana aritmètica, i que per aquest motiu ha estat seleccionat.

Ara aquest valor passa per un altre filtre, per assegurar que la lectura és correcte. S'ha considerat que un canvi major a 5 graus, entre la lectura actual i la lectura anterior, donada la freqüència de lectura, era poc propens a representar la realitat. És per a aquest motiu, que si el canvi entre els dos valors, és major a 5, es procedeix a sumar 5 o restar 5 al valor previ, en funció de si la diferència entre els dos és positiva o negativa. D'aquesta manera, aquest filtre ens permet erradicar els valors

anormals, coneguts en anglès com a *outliers*. Si es donés el cas en que la diferència entre els dos valors fos menor a 5, simplement s'assigna el valor actual com la lectura correcta. Tot aquest procés es pot veure representant en la següent imatge.

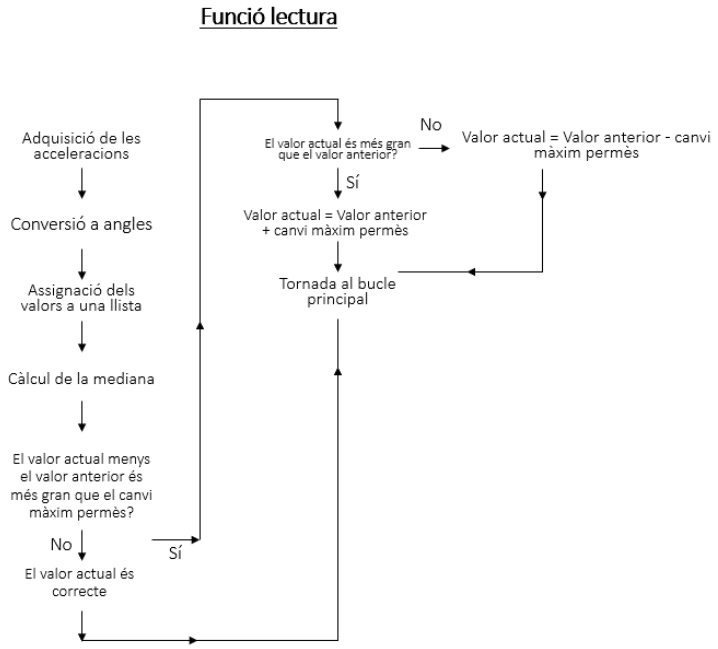



*Figura 42. Pseudocodi de la funció lectura. Font pròpia.*

A continuació, amb el valor de la lectura actual, entrenem a la funció de càlcul del PID. Aquesta funció és força simple, degut a l'ús d'una llibreria pel càlcul del PID. Des d'un principi es va voler crear una control per PID adaptatiu, i que per a un angle d'entrada molt gran, també augmentessin les constants del PID, i d'aquesta manera aconseguir un control més precís. Finalment es va descartar aquesta opció, ja que es va comprovar que pel robot era molt complicat estabilitzar passada una certa inclinació, i que per tant, no era funcional implementar-ho així. Tot i això, s'ha deixat l'assignació de les constants en aquesta funció, per si en algun moment es volgués implementar, fos més senzill. És per això que el primer que es realitza en aquesta funció és afinar i assignar els valors de les constants del PID, tant la proporcional, com la integral i la derivativa.

Amb els valors de les constants definits, es procedeix a calcular el valor de les sortida del PID. Cal recalcar que s'ha emprat una llibreria per dur a terme aquests càlculs. En l'explicació del següent apartat, es detallaran les principals funcionalitats d'aquesta i perquè s'ha escollit.

La sortida del PID ens determinarà la velocitat i el sentit de gir del motors. Per tant, un cop s'obté el valor de la sortida, es procedeix assignar aquest valor als motors. Ara bé , només s'assigna aquest valor si el valor de l'angle d'entrada es troba fora del rang de 2 i -2 graus. Això s'ha realitzat així

perquè d'aquesta manera s'eviten moviments petits, és a dir, el robot es trobaria constantment corregint la seva posició.

Com en la funció anterior, la següent imatge recull la funció de control descrita prèviament:

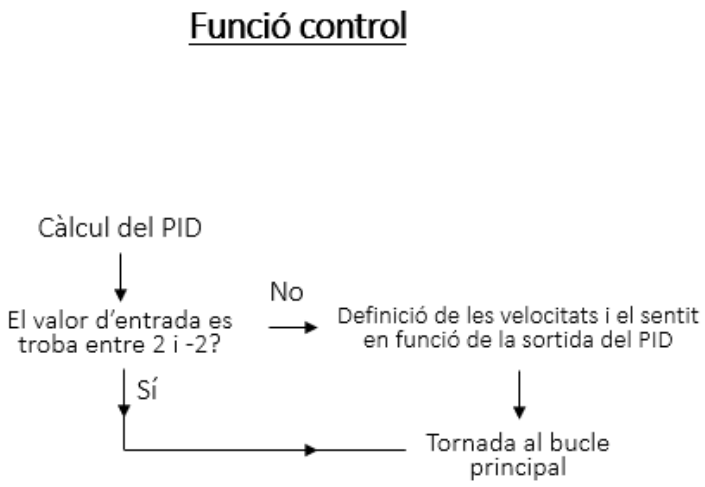



*Figura 43. Pseudocodi funció control. Font pròpia.*

Per acabar el codi, al bucle principal, es fan córrer els motors. Si és el cas que als motors se'ls hi ha assignat una velocitat giraran, però si es troben fora del rang d'histèresi determinat, no es mouran.

## 5.3. Llibreries

Com s'ha dit anteriorment, en aquest apartat es procedirà a descriure les llibreries emprades pel desenvolupament d'aquest codi.

### 5.3.1. Arduino.h

Aquesta llibreria [34] és una de les fonamentals pel desenvolupament de projectes amb plataformes d'Arduino. A l'estar treballant amb un microcontrolador que no és de la família d'Arduino s'han d'importar les funcionalitats bàsiques per tal de poder treballar-hi.

Principalment aquesta llibreria inclou les dues funcions principals d'Arduino, *setup*() i *loop*(). La funció de *setup* és l'etapa de configuració que s'ha descrit anteriorment i el *loop* s'entén com el bucle principal.

Aquesta llibreria també permet un control dels pins molt més senzill. Inclou funcions que permeten definir els pins com a entrades o sortides i també dona l'opció de configurar i escriure valors alts o baixos als pins digitals.

A més a més també possibilita la comunicació en sèrie. Aquesta es basa en l'intercanvi de dades entre l'ordinador i els seus dispositius perifèrics, en aquest cas, el microcontrolador. Aquesta eina ha sigut utilitzada per poder anar registrant, mitjançant el *serial monitor*, les lectures del acceleròmetre, la sortida del PID, etc. A la figura 44, podem observar una captura de pantalla dels valors registrats per la unitat de mesura inercial. En aquest cas, es va decidir imprimir els valors registrats per l'acceleròmetre, en els tres eixos, la temperatura, i els tres eixos enregistrats pel giroscopi.

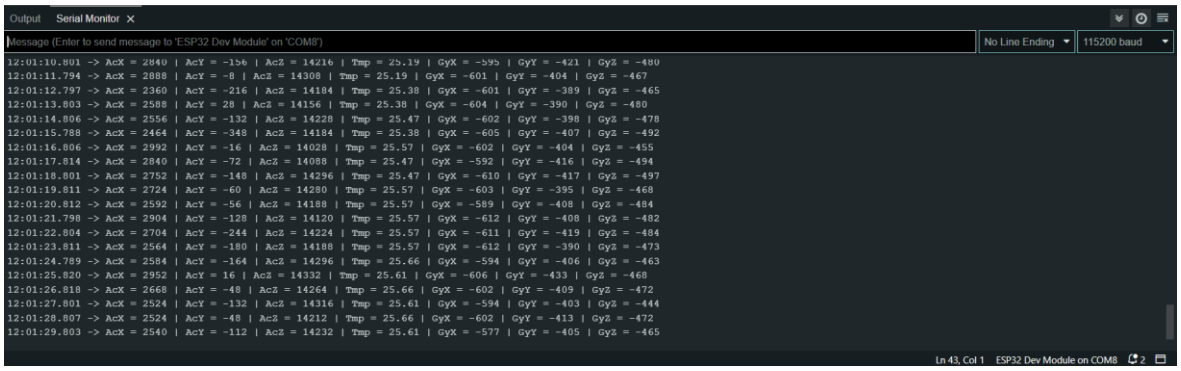



*Figura 44. Captura de pantalla del serial monitor. Font pròpia.*

Aquesta llibreria proporciona un gran nombre de funcions que permeten als desenvolupadors interactuar amb més facilitat amb el processador. Aquí només se n'han destacat les que principalment s'han usat en aquest projecte.

### 5.3.2. Wire.h

Aquesta llibreria [35] ha estat una eina vital per la comunicació I2C entre l'ESP32 i els seus dispositius externs compatibles amb aquest protocol de comunicació, per a aquest cas, la unitat de mesura inercial, el MPU6050. La simplificació que permet aquesta llibreria, permet als desenvolupadors centrar-se més en la lògica de l'aplicació, i deixar de banda altres tòpics de la comunicació simplificant les operacions de lectura i escriptura.

Per fer-ho, aquesta llibreria proporciona una interfície simplificada que permet reduir molt la dificultat d'ús d'aquest protocol. Gestiona els detalls de baix nivell de l'I2C, és a dir, gestiona l'inici i l'aturada, la gestió de les dades SDA i del rellotge SCL. Això permet comunicar-se utilitzant funcions de lectura i escriptura senzilles. És més, el fet que es puguin especificar fàcilment l'adreça del dispositiu I2C i dels registres que es volen escriure o llegit propensa a aquesta facilitat d'interacció entre dispositius.

Aquesta llibreria permet dur a terme operacions de lectura i escriptura de manera eficient. Proporciona funcions per a la transmissió de dades des del mestre cap a l'esclau i viceversa. Per exemple, es pot iniciar una transmissió amb l'adreça d'un dispositiu esclau, enviar múltiples bytes de dades, i després finalitzar la transmissió assegurant-se que les dades es rebin correctament. Per a la recepció, es poden sol·licitar dades d'un esclau, verificar la disponibilitat de les dades i llegir els bytes rebuts. Aquesta capacitat de gestionar la comunicació de manera eficient és essencial per a sensors que proporcionen dades d'alta precisió, com és el cas de l'acceleròmetre en el nostre projecte.

El fet que *Wire.h* sigui una llibreria oficial d'Arduino garanteix la seva compatibilitat amb una àmplia varietat de dispositius. Aquesta compatibilitat, combinada amb la seva facilitat d'ús, permet una implementació ràpida de funcionalitats d'escriptura i lectura sense requerir un període d'aprenentatge extens. A més, la llibreria inclou mecanismes de gestió d'errors que ajuden a identificar i resoldre problemes de comunicació, agilitzant la detecció de problemes i millorant la robustesa del sistema.

Aquesta combinació de simplificació de la comunicació, compatibilitat i gestió d'errors fa que la llibreria *Wire.h* sigui una opció ideal per a projectes que requereixen una comunicació fiable i eficient amb sensors, actuadors i altres perifèrics I2C. Així doncs, es converteix en una eina essencial per millorar la funcionalitat i la fiabilitat de les aplicacions.

### 5.3.3. MPU6050.h

Al treballar amb aquesta unitat de mesura inercial, aquesta llibreria [36] ha resultat ser clau pel desenvolupament del projecte. Aquesta llibreria permet centrar-se en l'aplicació de les dades obtingudes, i no tant en l'obtenció d'aquestes dades. Juntament amb la llibreria anterior, aquestes permeten una gestió més eficient de l'adquisició de dades.

Aquesta llibreria permet inicialitzar i configurar el sensor. Incloent funcions d'inicialització, les quals configuren els registres bàsics necessaris requerits per posar el sensor en marxa. Això implica la configuració de la freqüència de mostreig, els rang de lectura i altres paràmetres inicials necessaris per començar a rebre dades.

Cal destacar també que aquesta llibreria inclou dos funcions que proporcionen les opcions de llegir les dades dels sensors en brut i emmagatzemar-les a les variables establertes. Aquestes dues funcions es poden llegir per separat, (*getAcceleration(&ax,&ay,&az*) i *getRotation(&gx,&gy,&gz*)), o amb les dues juntes, mitjançant la funció *getMotion(&ax,&ay,&az, &gx,&gy,&gz*). Com que en aquest projecte, només s'usaran els valors extrets per l'acceleròmetre, s'emprarà la primera funció.

La llibreria també permet calibrar i ajustar els valors de lectura dels sensors. Això ho fa mitjançant un número '*n*' de lectures, el qual es definible per l'usuari. D'aquest manera, això col·labora en aconseguir una millor precisió en les lectures, eliminant així qualsevol biaix estàtic que pugui estar considerant el sensor. Inclou també un filtre digital de pas baix, que ajuda a reduir el soroll de les lectures del sensor, però aquests no ha sigut utilitzat, ja que s'han utilitzat altres mètodes per garantir lectures correctes.

Finalment, aquesta llibreria inclou altres funcionalitats que no han sigut utilitzades, però que és important destacar-les. Una d'elles són les interrupcions. Aquest sensor permet treballar amb interrupcions i aquesta llibreria permet gestionar-les i determinar un rang d'histèresi per l'activació d'aquestes. Al principi del projecte es va considerar treballar amb interrupcions, per tal de simplificar el codi, però al final va resultar que era molt complicat determinar un rang d'histèresi pel qual el sensor no trigués massa en activar-se, però tampoc no fes lectures constants, sense activar els motors. Per tant, al final es va decidir incloure una funció de lectura al bucle principal.

Per tant, al ser una llibreria tant influent, i amb tant de potencial, s'ha decidit incorporar-la al projecte.

### 5.3.4. PID_v1.h

La llibreria *PID_v1.h [37]* proporciona una implementació de l'algoritme de control PID amb algunes correccions respecte a la llibreria original. Com en els casos anteriors, aquesta llibreria permet implementar fàcilment controladors PID, però en aquest cas, els motius principals de l'elecció han sigut uns altres. Principalment, s'ha decidit usar aquesta llibreria per les millores que presenta representa a una funció de PID que es pugui implementar. Com es pot llegir l'article del Brett Beauregard, que defineix les principals característiques de la llibreria [38], aquesta té en consideració vàries problemàtiques. A continuació se'n destaquen les més rellevants:

- **Temps de mostreig:** aquest PID permet definir un temps de mostreig en particular, ja que en general aquests sistemes funcionen millor si s'avalua en un període de temps regular. Per tant, tot indicant el període de mostreig, es simplifiquen les els càlculs matemàtics.

- **Impuls del derivatiu:** sovint és comú observar com el que en anglès es coneix com a *derivative kic*k. Aquest es dona quan el valor de l'error canvia de manera sobtada, al ser canviat el seu valor desitjat. Això provoca que l'error derivatiu incrementi de manera immediata i satura la sortida del controlador. En aquesta llibreria s'ha implementat una funció per considerar-ho. Tot i això, al no variar el nostre valor objectiu o *setpoint* no és res que s'hagi de considerar.
- **Ajustar les constants:** com s'ha explicat prèviament, al principi es volia implementar un control adaptatiu del sistema. Per fer-ho era necessari variar el valor de les constants. Amb aquesta llibreria s'inclou una funcionalitat que permet l'ajust d'aquests paràmetres, un cop el sistema ja ha sigut configurat. Per tant, a l'inici es va valorar molt positivament aquesta característica.
- **Signe de la sortida:** finalment, un punt important en aquest projecte, era poder determinar la velocitat de gir en funció de la sortida del PID. Que aquesta llibreria permetés una sortida del controlador amb el signe negatiu, simplificava molt el control del robot, podent així controlar la direcció amb el signe de la sortida del PID.

Cal destacar que aquesta llibreria ofereix altres funcionalitats que, tot i ser menys rellevants per a aquest projecte, no s'han mencionat. No obstant això, les funcionalitats esmentades han estat determinants en la decisió d'utilitzar aquesta llibreria. Com amb la resta de llibreries descrites, la seva integració al projecte suposa una notable simplificació per als desenvolupadors.

### 5.3.5. QuickMedianLib.h

Un dels mètodes usats per filtrar les dades de lectura de l'acceleròmetre ha sigut implementar el càlcul de la mediana. D'aquesta manera s'aconsegueix una robustesa i una resistència al soroll que permeten ser al sistema molt més fiable, i a prova de possibles fluctuacions i lectures errònies. Per poder dur a terme aquestes aplicacions, s'ha decidit utilitzar aquesta llibreria.

Mitjançant l'ús d'aquesta llibreria [39] s'ha reduït la dificultat principal del càlcul de les medianes. S'ha de recordar que, per poder calcular la mediana primerament s'ha d'ordenar de menor a major, i posteriorment escollir el valor del mig.

Aquesta llibreria integra algoritmes que optimitzen aquestes funcionalitats, i per tant tracten el conjunt de dades d'una manera més ràpida i eficient. Per tant, per integrar-ho en el nostre codi, simplement s'ha de crear una llista, que assigni un total de nou lectures. Finalment aquesta llista serà la que usarà aquesta llibreria per assignar el valor de la mediana.

Com en tots els casos anteriors, la implementació d'aquesta llibreria amb Arduino, permet una fàcil integració. Aquesta llibreria és molt versàtil i permet adaptar-se molt bé a les necessitats de cada desenvolupador. Si fos el cas que es necessités variar el número de lectures, no suposaria cap problema.

### 5.3.6. AccelStepper.h

Finalment, aquesta és la última llibreria utilitzada [40], i la que ha suposat un dilema més important. En un principi es va optar per generar els polsos dels motors mitjançant software, ja que era la manera més senzilla de dur-ho a terme. A mesura que el projecte va anar avançant, es va descobrir que la idea inicial no es podia dur a terme, ja amb tots els processos que s'havien d'executar, es creava un pols poc regular, que no permetia als motors girar correctament. Això es pot veure a la següent imatge, que correspon als polsos del motor capturats amb l'oscil·loscopi. Aquí s'observa que els polsos no són regulars, i que presenten un cicle de treball descompensat. Tot plegat, propiciava que el sistema no funcionés correctament.

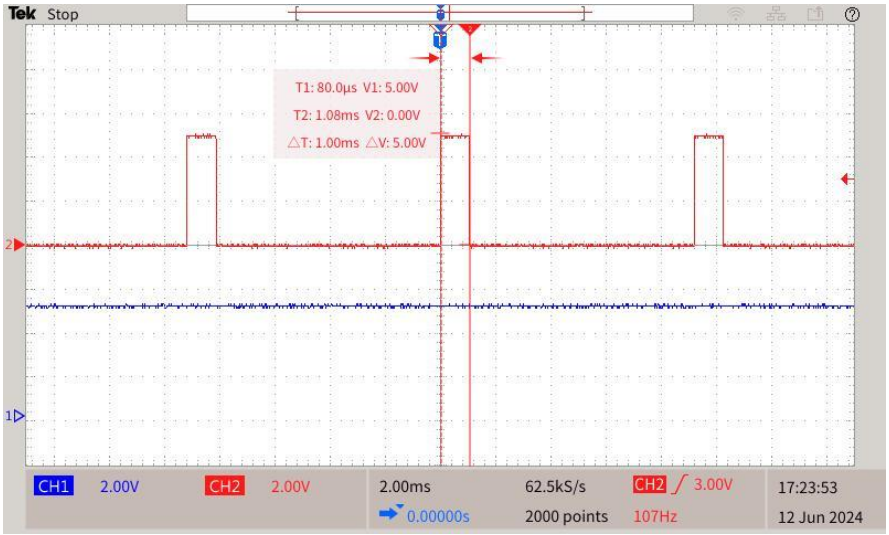



*Figura 45. Captura oscil·loscopi dels pulsos amb l'error de temps acumulat. Font pròpia.*

Per corregir això, es va decidir crear els polsos mitjançant el conegut PWM (*Pulse WIdth Modification*). Aquest permetia crear senyals amb freqüències determinades, i per tant, es podia obtenir un pols, que modificant-ne la freqüència, aconseguia rotar els motors a diferents velocitats.

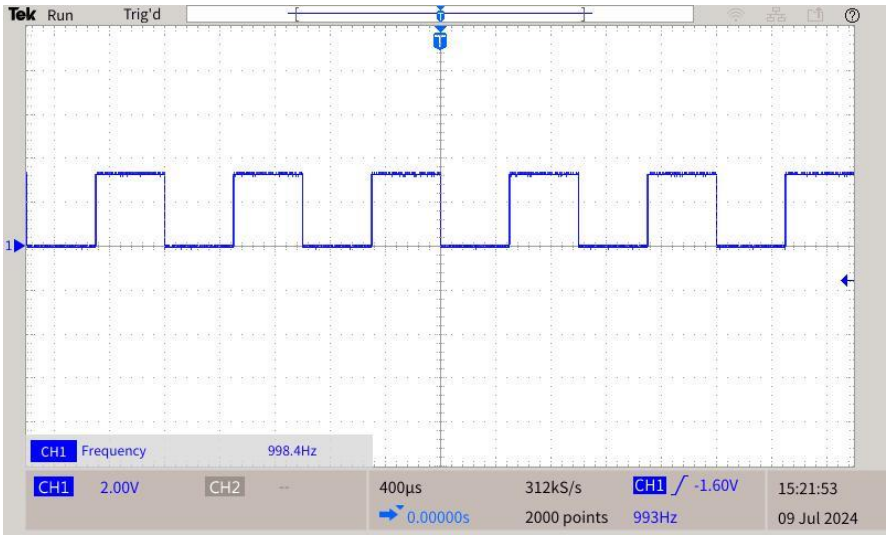



*Figura 46. Captura de l'oscil·loscopi amb el pols generat mitjançant el PWM. Font pròpia.*

Aquesta implementació va funcionar, fins que es va començar a implementar el control de la direcció dels motors. Va resultar molt complicat realitzar un control simultani que controlés la velocitat i la direcció de gir.

És per aquests motius que finalment es va considerar implementar el control dels motors mitjançant la llibreria d'*AccelStepper*.

Aquesta llibreria proporciona funcions de treball molt potents, permetent controlar tant la velocitat de gir, com l'acceleració. Això permet un control molt més adaptatiu del gir, i permet moviments menys sobtats, important per l'estabilitat del robot.

Al ser una llibreria multitasca, permet córrer el pols generat sense bloquejar l'execució de la resta del programa. D'aquesta manera s'evita la primera problemàtica que va sorgir al generar el pols mitjançant software.

Una de les implementacions que es va intentar posar en pràctica amb aquesta llibreria, va ser la del control de moviments, és a dir, determinar el número de passos que el motor havia de realitzar per tal d'estabilitzar-se. Això es va dur a terme mitjançant el càlcul de l'angle de desviació dividit pel moviment mínim a realitzar, és a dir, treballant amb els passos sencers ("*full-step*") 1,8 °. Després de vàries proves es va descartar aquesta implementació.

En resum, finalment aquesta llibreria ha estat usada per implementar un control més adaptatiu de l'acceleració i la velocitat de gir dels motors, permetent també definir-ne el sentit de gir.

Aquestes han sigut totes les llibreries que s'han integrat al codi, per tal de poder desenvolupar les principals funcionalitats del robot.

A l'annex d'aquest treball, es pot trobar el codi emprat per al control de l'equilibri del robot.

# 6. Prototip

Per complementar tot el desenvolupament del robot, s'ha decidit construir un prototip. D'aquesta manera també es pot comprovar que els càlculs són correctes i que els resultats són els esperats. Aquest apartat descriurà la fabricació electrònica, com la construcció de l'estructura i l'assemblatge de final del robot.

A més a més, es duran a terme un seguit de proves, per estudiar el comportament final del robot. En aquestes, s'analitzarà l'estabilitat del robot, i la seva resposta a possibles pertorbacions. A part, es comprovarà que la duració de la bateria compleix els mínims establerts.

## 6.1. Fabricació electrònica

Com s'ha esmentat prèviament, la part electrònica serà muntada sobre una PCB, permetent així un disseny més sòlid, i donant seguretat i fiabilitat al sistema.

El disseny de la PCB que presenta el prototip no és el disseny final, ja que aquest ha anat patint modificacions, i sol·licitar la construcció de les plaques a l'empresa JLCPCB és un procés que requereix temps. Per aquest motiu, el prototip usa un dels primers dissenys que es van realitzar.

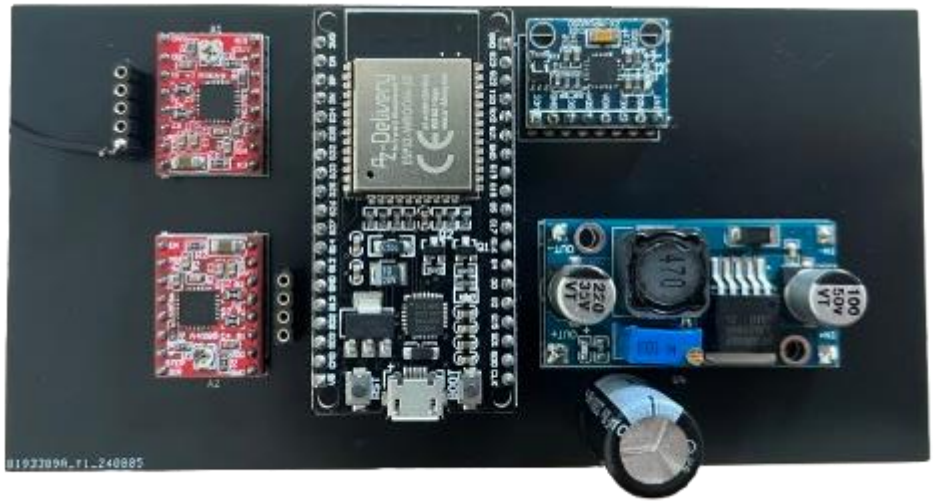


*Figura 47. Placa PCB del prototip. Font pròpia.*

A continuació, s'han unit les cel·les necessàries per composar la font d'alimentació de 12 V, aproximadament. Tal i com s'ha dit a la part de disseny electrònic, per aconseguir aquest valor, eren necessàries 3 cel·les. Així doncs, s'han soldat 3 cel·les, que composen la bateria total del robot. Els dos extrems de la bateria, s'han soldat a un connector mascle, que serà l'encarregat de connectar-se als cables procedents de la PCB, per tal d'alimentar tot el sistema.

Finalment, s'han soldat els cables de les bobines dels motors a un connector, de manera que l'ordre fos el correcte pels *drivers*. D'aquesta manera, s'assegura que no hi ha contactes no desitjats entre les bobines, i permet la substitució dels motors si fos necessari.

## 6.2. Construcció de l'estructura

Per la construcció de l'estructura, s'han emprat les peces descrites anteriorment, i s'ha construït l'estructura que ho subjecta tot.

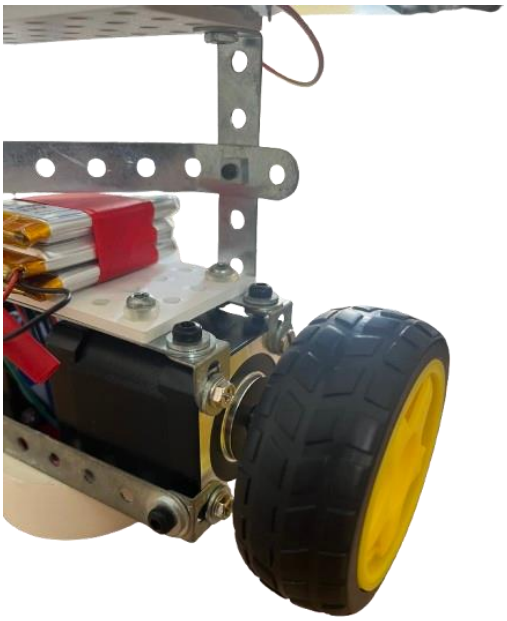


*Figura 48. Detall dels escaires amb l'estructura i la base. Font pròpia.*

A la imatge anterior, es pot veure també les bases impreses amb PLA blanc. En aquest cas, s'observa la plataforma inferior, que subjecta les 3 cel·les de bateria.

Cal destacar del prototip que per assegurar la correcta unió entre l'eix i la roda es va decidir emprar adhesiu termofusible, de manera que la transmissió queda assegurada.

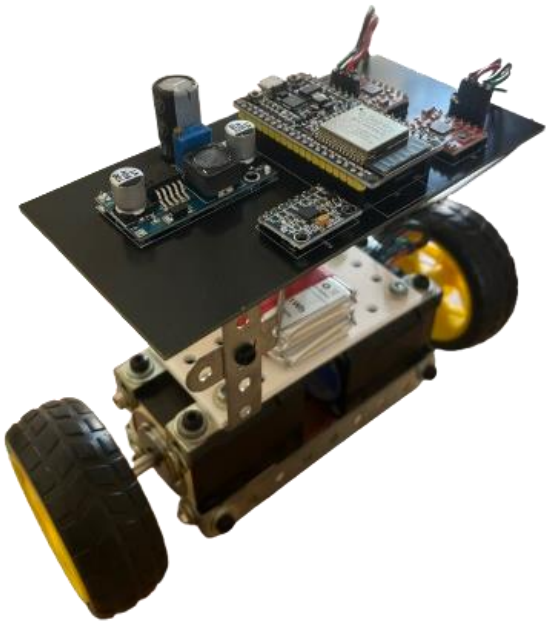


*Figura 49. Aspecte del prototip sense la carcassa. Font pròpia.*

Pel que fa a la carcassa externa, la intenció principal era la impressió amb un material transparent. Aquest tipus d'impressions es duen a terme amb resines, ja que aquestes permeten aconseguir un acabat transparent. En canvi, amb una impressora 3D amb filaments, això no és possible, ja que a l'apilar capes es pot aconseguir un acabat translúcid, però no transparent.

Valorant les dues opcions, s'ha decidit imprimir-ho amb filament PLA, que tot i no permetre l'acabat transparent desitjat, és una opció molt més sostenible, ja que actualment presenta un menor impacte ambiental i existeixen opcions de filaments reciclats. Per aquest motiu doncs, la carcassa del prototip és blanca i totalment opaca.

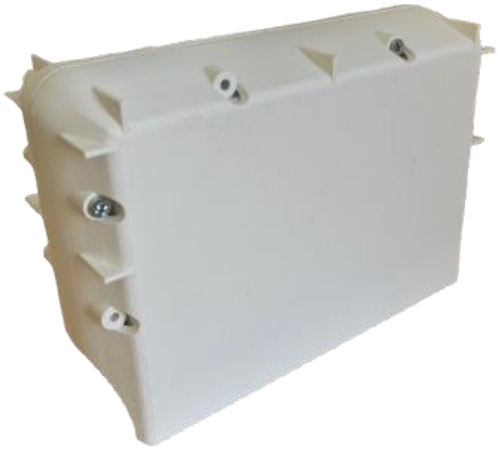


*Figura 50. Carcassa externa del robot. Font pròpia.*

## 6.3. Resultat final

Amb el conjunt fet, l'assemblatge del conjunt, resulta en el següent prototip:

*Figura 51. Prototip final. Font pròpia.*

*Figura 52. Imatge lateral del prototip. Font pròpia.*

## 6.4. Proves finals

En aquest apartat s'han dut a terme les proves del prototip per tal de determinar el seu rendiment, validar els resultats esperats i identificar possibles millores que podrien optimitzar la seva dinàmica.

Per començar, s'ha analitzat la capacitat d'equilibri del robot en diferents condicions. En una primera prova, es va avaluar l'estabilitat sobre una superfície llisa i sense influència externa. En aquest escenari, el comportament del prototip va ser l'esperat: va aconseguir mantenir-se estable i corregir les petites desviacions de manera eficient, sense perdre en cap moment l'equilibri. Això va confirmar la viabilitat del disseny per a condicions ideals.

En una segona prova, es van introduir petites pertorbacions manuals per comprovar la capacitat del robot de rectificar la seva posició després de rebre empentes. Els resultats van mostrar que, en la majoria dels casos, el robot era capaç de mantenir l'equilibri. Tanmateix, quan l'angle d'inclinació superava els 25°, es va observar que el sistema no podia recuperar la verticalitat. Aquesta informació permet enfocar futures millores, com ara la implementació d'un límit mecànic que restringeixi l'angle d'inclinació a valors inferiors a aquest llindar, o l'ajust de l'algoritme de control per incrementar la velocitat de correcció. Aquestes solucions podrien millorar la resposta a pertorbacions externes, tot i que, per qüestions de temps, no s'han pogut implementar durant el projecte actual.

De manera paral·lela, es van dur a terme proves d'autonomia per verificar si els càlculs teòrics es corresponien amb el rendiment real del robot. El robot es va deixar en funcionament continuat sobre una superfície llisa mentre es monitorava la durada de la bateria. Els resultats van ser molt positius: el robot va superar amb èxit l'autonomia mínima prevista de 51 minuts, la qual cosa confirma que els càlculs s'havien fet de manera conservadora, tenint en compte consums màxims i un aprofitament del 80% de la càrrega de la bateria.

En conjunt, aquestes proves han demostrat que el prototip compleix els objectius de disseny establerts, i han posat de manifest punts de millora que ofereixen noves oportunitats per optimitzar-ne el rendiment.

# 7. Anàlisi de l'impacte ambiental

Aquest treball s'adhereix a les normatives nacionals i europees. Per aquest motiu, s'han considerat els següents punts:

S'ha procurat que, en compliment de la directiva europea 2011/65/UE i la legislació espanyola segons el Reial decret 219/2013, tots els components utilitzats complissin amb la normativa RoHS (Restriction of Hazardous Substances). Aquesta normativa garanteix que els components no continguin nivells perillosos de substàncies com el plom, mercuri, cadmi, crom hexavalent, bifenils poli bromats (PBB) i èters de difenil polibromat (PBDE), entre d'altres.

A més a més, el projecte ha tingut en compte el compliment del Reial decret 186/2016, de 6 de maig, que regula la compatibilitat electromagnètica dels equips elèctrics i electrònics. Això garanteix que el prototip no emeti ni sigui susceptible d'interferències electromagnètiques, assegurant-ne el correcte funcionament en entorns on coexisteixen altres dispositius electrònics.

Pel que fa a la seguretat, s'ha seguit la "Guía de buenas prácticas de seguridad en robótica" [41] per assegurar que el disseny i la implementació del robot compleixin els estàndards mínims de seguretat. Tot i que aquest robot no està destinat a un entorn industrial, s'han considerat alguns dels principis aplicables per garantir la seguretat en la seva manipulació i ús.

D'altra banda, cal tractar la gestió de residus. Per realitzar aquest projecte s'han emprat algunes peces reutilitzades d'altres projectes, contribuint a la minimització de residus. A més a més, cal considerar la correcta gestió dels components quan aquests arribin al límit de la seva vida útil. En aquests casos, cal regir-se segons la Directiva 2002/96/EC sobre la gestió de residus d'aparells elèctrics i electrònics (RAEE), assegurant un procés adequat de reciclatge.

A més del compliment amb les normatives esmentades, s'ha tingut en compte l'eficiència energètica dels components utilitzats, prioritzant aquells que minimitzen el consum d'energia durant el funcionament del sistema. Això contribueix a reduir l'impacte ambiental a llarg termini, especialment en projectes on el consum energètic pot ser significatiu.

Durant la fase de desenvolupament i fabricació del projecte, s'ha prioritzat la minimització de residus i la reutilització de materials d'altres projectes. Aquesta estratègia busca reduir l'impacte ambiental generat pel projecte, adoptant un enfocament més sostenible en la selecció i gestió de recursos.

En cas que el projecte requereixi transport o enviament, s'han valorat materials d'embalatge sostenibles i reciclables, per garantir que l'impacte mediambiental en aquesta fase sigui mínim.

Aquestes mesures estan alineades amb la voluntat de reduir les emissions associades al projecte en totes les seves fases.

Finalment, s'ha plantejat la possibilitat de compensar les emissions generades durant el cicle de vida del projecte mitjançant iniciatives com la plantació d'arbres o la col·laboració amb programes de reciclatge electrònic, per contribuir activament a la reducció de l'impacte mediambiental del projecte.

# Conclusions

Un cop finalitzat aquest projecte, es pot determinar que s'han assolit els objectius establerts a l'inici. S'ha aconseguit dissenyar i implementar un robot de dues rodes que és capaç de mantenir-se en equilibri de manera autònoma.

Durant el procés de disseny de l'estructura mecànica s'ha aconseguit desenvolupar una estructura lleugera i robusta capaç de dotar al robot de la capacitat de mantenir l'equilibri sobre dues rodes. Mitjançant l'ús de SolidWorks, es va modelar el robot en 3D, fet que permet optimitzar les dimensions i materials per obtenir un comportament estructural òptim. Les simulacions prèvies a la construcció han estat vitals per assegurar la viabilitat del disseny, comprovant-ne la resistència abans de la fabricació.

Pel que fa a la integració dels sistemes electrònics, s'han seleccionat components d'alta eficiència que funcionen de manera sinèrgica. En aquest punt, ha sigut important la implementació d'una PCB, la qual va facilitar la interconnexió de tots els perifèrics.

Un altre aspecte clau ha estat el desenvolupament del *software* de control, que ha resultat essencial per garantir el correcte funcionament del robot en temps real. L'algoritme desenvolupat ha demostrat la seva capacitat per mantenir l'estabilitat dinàmica, ajustant constantment la velocitat i la posició de les rodes en resposta a les dades dels sensors. Això ha permès que el robot es mantingués en equilibri de manera autònoma.

La construcció del prototip físic va ser la culminació de totes aquestes fases. L'assemblatge de les peces mecàniques i la instal·lació dels components electrònics es van dur a terme de manera satisfactòria, i així podent posar a prova el robot en condicions reals. Els resultats obtinguts van confirmar la funcionalitat del prototip, que va ser capaç de mantenir-se estable, complint així l'objectiu principal del projecte.

En definitiva, aquest treball ha permès demostrar amb èxit la viabilitat del disseny de dues rodes auto-balancejat, sent una síntesi efectiva entre disseny mecànic, integració electrònica i *software* de control. Gràcies a les proves realitzades s'ha pogut confirmar l'estabilitat del prototip obrint les portes a futures ampliacions, com ara la integració de funcions més avançades.

# Pressupost

En aquest apartat, es durà a terme l'anàlisi del cost total de projecte. Per fer-ho, es considerarà els costs d'enginyeria i mà d'obra, tant propis com subcontractats, costs d'enviament, materials, components electrònics, etc.

Les següents taules proporcionen una descripció detallada del pressupost.

*Taula 5. Costos d'enginyeria i mà d'obra propis. Font pròpia.*

| Concepte | Cost (€/h) | Hores (h) | Subtotal (€) |
|---|---|---|---|
| Disseny mecànic | 16,26 | 200 | 3.252 |
| Disseny electrònic | 15,64 | 250 | 3.910 |
| Programació software | 17 | 300 | 5.100 |
| Fabricació i muntatge del prototip | 10 | 200 | 2.000 |
| Documentació i memòria | 10 | 200 | 2.000 |
| **TOTAL:** | | | 16.252 |

El temps d'aquesta taula, resulta d'una aproximació realitzada, ja que no s'ha portat el registre exacte de les hores dedicades a cada fase del robot. Però considerant que 1 ECTS equival a 25 hores, i que per tant pel total del TFE hi corresponen 1200h, s'ha fet una repartició entre les hores destinades a la memòria i al prototip.

S'ha decidit aproximar el preu a l'hora al valor escollit per cada categoria. S'han agafat les mitjanes de sous d'un enginyer mecànic i un enginyer electrònic a Espanya [42][43]. Les tarifes són variables en funció de les tasques.

*Taula 6. Materials. Font pròpia.*

| Concepte | Preu unitari (€/u) | Quantitat (u) | Subtotal (€) |
|---|---|---|---|
| ESP32 | 11,49 | 1 | 11,49 |
| 17HS19-2004S1 | 17,21 | 2 | 34,42 |
| A-4988 | 6,03 | 2 | 12,06 |
| MPU-6050 | 3,99 | 1 | 3,99 |
| LM2596S | 5,49 | 1 | 5,49 |
| Condensador electrolític 220 µF/16 V | 0,19 | 1 | 0,19 |
| Bateria LP603449 | 6,75 | 3 | 20,25 |
| PCB | 26,07 | 1 | 26,07 |
| Rodes | 0,21 | 2 | 0,42 |
| Filament PLA blanc (1 Kg) | 21,49 | 0,75 | 16,1175 |
| Cables Dupont (40u) | 5,45 | 1 | 5,45 |
| Fil d'estany (10 g) | 2,00 | 1 | 2 |
| **TOTAL:** | | | 137,95 |

D'altra banda, també cal considerar els costos indirectes del projecte. Aquests costos es deriven de recursos compartits i de l'ús d'infraestructures que han estat necessàries per al desenvolupament del projecte. A diferència dels costos directes, que es poden atribuir de manera específica a activitats o materials, els costos indirectes són aquells que suporten diverses fases del projecte, com el disseny, la fabricació i la documentació.

Per apropar els costos indirectes, s'ha decidit calcular un 25% del valor dels recursos utilitzats. A continuació, es presenta la taula que detalla aquests costos indirectes:

*Taula 7. Costs indirectes. Font pròpia.*

| Concepte | Cost (€) | Percentatge | Subtotal (€) |
|---|---|---|---|
| Ordinador | 1.400 | 25 % | 350 |
| Impressora 3D | 450 | 25 % | 112,5 |
| Llicència de SolidWorks | 999 | 25 % | 249,75 |
| Llicència de Word | 69 | 25 % | 17,25 |
| Multímetre | 25,98 | 25 % | 6,495 |
| **TOTAL:** | | | 735,99 |

Finalment, es pot agrupar el cost total del prototip en la següent taula.

*Taula 8. Cost total del projecte. Font pròpia.*

| Concepte | Subtotal (€) |
|---|---|
| Costs d'enginyeria | 16.252 |
| Materials | 137,95 |
| Costs indirectes | 735,99 |
| **TOTAL:** | 17.125,94 |

# Bibliografia


[1] "circuit imprès | enciclopedia.cat." Accessed: Sep. 18, 2024. [Online]. Available: https://www.enciclopedia.cat/gran-enciclopedia-catalana/circuit-impres

[2] "disseny amb ajuda d'ordinador | enciclopedia.cat." Accessed: Sep. 18, 2024. [Online]. Available: https://www.enciclopedia.cat/gran-enciclopedia-catalana/disseny-amb-ajuda-dordinador

[3] U. Jahn *et al.*, "A Taxonomy for Mobile Robots: Types, Applications, Capabilities, Implementations, Requirements, and Challenges," *Robotics 2020, Vol. 9, Page 109*, vol. 9, no. 4, p. 109, Dec. 2020, doi: 10.3390/ROBOTICS9040109.

[4] B. Siciliano and O. Khatib, Eds., *Springer Handbook of Robotics*. Springer Berlin Heidelberg, 2008. doi: 10.1007/978-3-540-30301-5.

[5] "Wheeled robots types, uses, advantages and disadvantages | Science online." Accessed: Feb. 20, 2024. [Online]. Available: https://www.online-sciences.com/robotics/wheeled-robots-types-uses-advantages-and-disadvantages/

[6] "MURATA GIRL | Murata Manufacturing Co., Ltd." Accessed: Feb. 22, 2024. [Online]. Available: https://corporate.murata.com/en-us/more_murata/robots/mgirl

[7] "Segway HT model i167 (i Series)." Accessed: Feb. 26, 2024. [Online]. Available: https://cf.psl.msu.edu/segway/i167/i167.html

[8] I. Bambino, "Una Introducción a los Robots Móviles Año 2008".

[9] F. Grasser, A. D'Arrigo, S. Colombi, and A. C. Rufer, "JOE: A mobile, inverted pendulum," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 49, no. 1, pp. 107–114, Feb. 2002, doi: 10.1109/41.982254.

[10] S. Chen, "Two-wheel, self-balancing vehicle with independently movable foot placement sections," US8738278B2, Feb. 11, 2013

[11] "Ascento - Secure Assets with Robotics and AI." Accessed: Feb. 27, 2024. [Online]. Available: https://www.ascento.ai/

[12] R. Azvan and V. Florian, "Correct equations for the dynamics of the cart-pole system," 2005, Accessed: Feb. 27, 2024. [Online]. Available: http://scholar.google.com/

[13] "iimyo2".

[14] C. Knospe, "PID control," *IEEE Control Syst*, vol. 26, no. 1, pp. 30–31, 2006, doi: 10.1109/MCS.2006.1580151.

[15] R. Hossain, "Control System By Norman nise Sixth Ed." Accessed: Aug. 12, 2024. [Online]. Available: https://www.academia.edu/35425584/Control_System_By_Norman_nise_Sixth_Ed

[16] R. Raj and A. Kos, "A Comprehensive Study of Mobile Robot: History, Developments, Applications, and Future Research Perspectives," *Applied Sciences 2022, Vol. 12, Page 6951*, vol. 12, no. 14, p. 6951, Jul. 2022, doi: 10.3390/APP12146951.

[17] T. Jamil, "RISC versus CISC: Why less is more," *IEEE Potentials*, vol. 14, no. 3, pp. 13–16, 1995, doi: 10.1109/45.464688.

[18] "Raspberry Pi Zero 2 W," 2024.

[19] "Arduino® UNO R3".

[20] "ESP32WROOM32 Datasheet," 2023, Accessed: Sep. 16, 2024. [Online]. Available: https://www.espressif.com/en/support/download/documents.

[21] "17HS19-2004S1 pdf, 17HS19-2004S1 Description, 17HS19-2004S1 Datasheet, 17HS19-2004S1 view ::: ALLDATASHEET :::" Accessed: May 06, 2024. [Online]. Available: https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/1141324/STEPPERONLINE/17HS19-2004S1.html

[22] "Stepper Motors PKP Series".

[23] "HT17-221D." Accessed: May 06, 2024. [Online]. Available: https://www.applied-motion.com/s/product/step-motor-9-degreeht17221d/01t5i000000xzMcAAI?name=HT17-221D-NEMA-17-High-Torque-Stepper-Motor-0.9-Degree-w-double-shaft

[24] "OpenHacks | Open Source Hardware | Productos | Stepper Motor Nema17 JK42HS40 1304F." Accessed: May 06, 2024. [Online]. Available: https://www.openhacks.com/page/productos/id/2928/title/Stepper-Motor-Nema17-JK42HS40-1304F

[25] I. Virgala, M. Kelemen, A. Gmiterko, and T. Lipták, “Control of Stepper Motor by Microcontroller,” *Journal of Automation and Control, Vol. 3, 2015, Pages 131-134*, vol. 3, no. 3, pp. 131–134, Dec. 2015, doi: 10.12691/AUTOMATION-3-3-19.

[26] “Cómo Arduino y los drivers A4988, DRV8825, TMC2209 hacen que una impresora 3D genere movimiento.” Accessed: Sep. 16, 2024. [Online]. Available: https://programarfacil.com/blog/arduino-blog/a4988-drv8825-tmc2209/

[27] N. Ahmad, A. R. Ghazilla, N. M. Khairi, and V. Kasi, “Reviews on Various Inertial Measurement Unit (IMU) Sensor Applications”, doi: 10.12720/ijsps.1.2.256-262.

[28] “Tutorial MPU6050, Acelerómetro y Giroscopio.” Accessed: Sep. 16, 2024. [Online]. Available: https://naylampmechatronics.com/blog/45_tutorial-mpu6050-acelerometro-y-giroscopio.html

[29] P. By ALLDATASHEETCOM, “LM2596 SIMPLE SWITCHER ® Power Converter 150 kHz 3A Step-Down Voltage Regulator Check for Samples: LM2596 1FEATURES DESCRIPTION Typical Application,” 1999. [Online]. Available: www.ti.com

[30] “A4988 datasheet.” [Online]. Available: www.allegromicro.com

[31] “NEMA17_17HS19-2004S1_Stepperonline | 3D CAD Model Library | GrabCAD.” Accessed: Sep. 16, 2024. [Online]. Available: https://grabcad.com/library/nema17_17hs19-2004s1_stepperonline-1

[32] “Propiedades del PLA.” Accessed: Sep. 16, 2024. [Online]. Available: https://sites.google.com/view/poliacidolactico-coma/poli%C3%A1cido-l%C3%A1ctico/propiedades-del-pla

[33] “Página 1 de 2 MDF (Medium Density Fibreboard).”

[34] “ArduinoCore-avr/cores/arduino/Arduino.h at master · arduino/ArduinoCore-avr · GitHub.” Accessed: Sep. 16, 2024. [Online]. Available: https://github.com/arduino/ArduinoCore-avr/blob/master/cores/arduino/Arduino.h

[35] “Arduino/libraries/Wire/Wire.h at master · esp8266/Arduino · GitHub.” Accessed: Sep. 16, 2024. [Online]. Available: https://github.com/esp8266/Arduino/blob/master/libraries/Wire/Wire.h

[36] "i2cdevlib/Arduino/MPU6050/MPU6050.h at master · jrowberg/i2cdevlib · GitHub." Accessed: Sep. 16, 2024. [Online]. Available: https://github.com/jrowberg/i2cdevlib/blob/master/Arduino/MPU6050/MPU6050.h

[37] "Arduino-PID-Library/PID_v1.h at master · br3ttb/Arduino-PID-Library · GitHub." Accessed: Sep. 16, 2024. [Online]. Available: https://github.com/br3ttb/Arduino-PID-Library/blob/master/PID_v1.h

[38] "Improving the Beginner's PID – Introduction | Project Blog." Accessed: Sep. 16, 2024. [Online]. Available: http://brettbeauregard.com/blog/2011/04/improving-the-beginners-pid-introduction/

[39] "GitHub - luisllamasbinaburo/Arduino-QuickMedian: Librería para cálculo de la mediana rápido en Arduino." Accessed: Sep. 16, 2024. [Online]. Available: https://github.com/luisllamasbinaburo/Arduino-QuickMedian

[40] "AccelStepper/AccelStepper.h at master · adafruit/AccelStepper · GitHub." Accessed: Sep. 16, 2024. [Online]. Available: https://github.com/adafruit/AccelStepper/blob/master/AccelStepper.h

[41] "Guía de buenas prácticas de Seguridad en robótica." Accessed: Sep. 1, 2024. [Online]. Available: https://prevencion.asepeyo.es/wp-content/uploads/R1E23340-Guia-de-buenas-practicas-de-Seguridad-robotica-2023-5.pdf

[42] "Salario para Ingeniero Mecánico en España - Salario Medio." Accessed: Sep. 16, 2024. [Online]. Available: https://es.talent.com/salary?job=ingeniero+mec%C3%A1nico

[43] "Salario para Ingeniero Electronico en España - Salario Medio." Accessed: Sep. 16, 2024. [Online]. Available: https://es.talent.com/salary?job=ingeniero+electronico

[44] "ESP32 Wi-Fi & Bluetooth SoC | Espressif Systems." Accessed: Sep. 16, 2024. [Online]. Available: https://www.espressif.com/en/products/socs/esp32

[45] "EEMB Batería 3.7V 1100mAh 603449 Bateria de lipo Recargable Bateria Litio con Conector JST ¡Asegúrese de Que la polaridad del Dispositivo Coincide con la batería Antes de Comprar! : Amazon.es: Electrónica." Accessed: Sep. 16, 2024. [Online]. Available: https://www.amazon.es/EEMB-Bater%C3%ADa-603449-Recargable-pol%C3%ADmero/dp/B08FD39Y5R/ref=asc_df_B08FD39Y5R/?tag=googshopes-21&linkCode=df0&hvadid=699723920382&hvpos=&hvnetw=g&hvrand=10840824945131396018&hvpone=&hvptwo=&hvqmt=&hvdev=c&hvdvcmdl=&hvlocint=&hvlocphy=9199046

&hvtargid=pla-1013606631553&psc=1&mcid=6e8586943f5f3918a280838982b5e758&gad_source=1

[46] "(PDF) A Review on Buck-Boost DC-DC Converter with Capability of Zero Voltage Switching." Accessed: Sep. 16, 2024. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/367090325_A_Review_on_Buck-Boost_DC-DC_Converter_with_Capability_of_Zero_Voltage_Switching

[47] "Pololu - Schematic diagram of the A4988 stepper motor driver carrier (both green and black editions)." Accessed: Sep. 16, 2024. [Online]. Available: https://www.pololu.com/picture/view/0J3359

# Manual d'usuari

Aquest manual d'usuari proporciona les instruccions necessàries per poder dotar a l'usuari dels coneixements per fer funcionar el prototip de robot de dues rodes dissenyat en el marc d'aquest treball de fi d'estudis.

**ADVERTENCIA:** no sotmetre l'equip amb un tensió d'entrada superior a 12 V.

Si és la primera vegada que es posa en marxa el dispositiu, es recomana carregar el codi proporcionat a l'Annex B d'aquest treball. Aquest pas és crucial per assegurar que el microcontrolador disposa del codi per mantenir l'equilibri del robot. És important realitzar aquest procés amb el robot en vertical, de manera que la unitat de mesura inercial quedi ben calibrada.

Un cop carregat el codi al microcontrolador, es pot procedir a endollar els connectors dels motors amb els *drivers* de la PCB. Per fer-ho, cal comprovar que la connexió s'estableix en l'ordre correcta, connectant sempre els cables verds a l'exterior de la PCB, com es pot observar a la següent imatge.

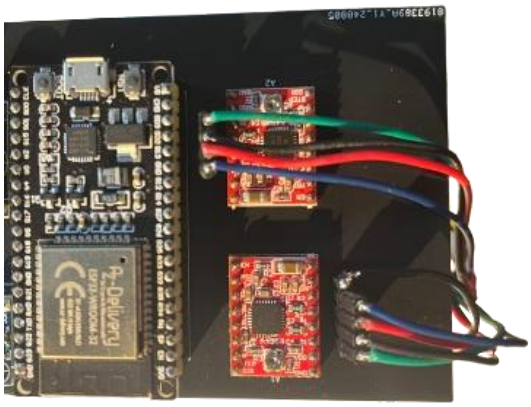


*Figura 53. Connexió  motors amb drivers. Font pròpia.*

Amb això completat, prossegueix el muntatge de la carcassa externa. Primerament, cal col·locar una primera meitat de la carcassa. Per fer-ho, s'introduiran les dos barnilles roscades als dos orificis que presenta la carcassa.

*Figura 54. Robot amb la meitat de la carcassa.*
*Font pròpia.*

Seguidament, serà necessari el muntatge de l'altra meitat de la carcassa, la qual disposa dels cargols per ajuntar les dues meitats. En aquest pas, és important dur els connectors de l'alimentació de la PCB i de la bateria, cap a una posició accessible des de la part inferior del robot. D'aquesta manera, quan la carcassa del robot estigui muntada, es podran connectar els cables de l'alimentació. Si es vol, es pot connectar el cable negre de GND abans de muntar la segona meitat i posteriorment amb la carcassa col·locada només caldrà connectar el cable vermell de l'alimentació.

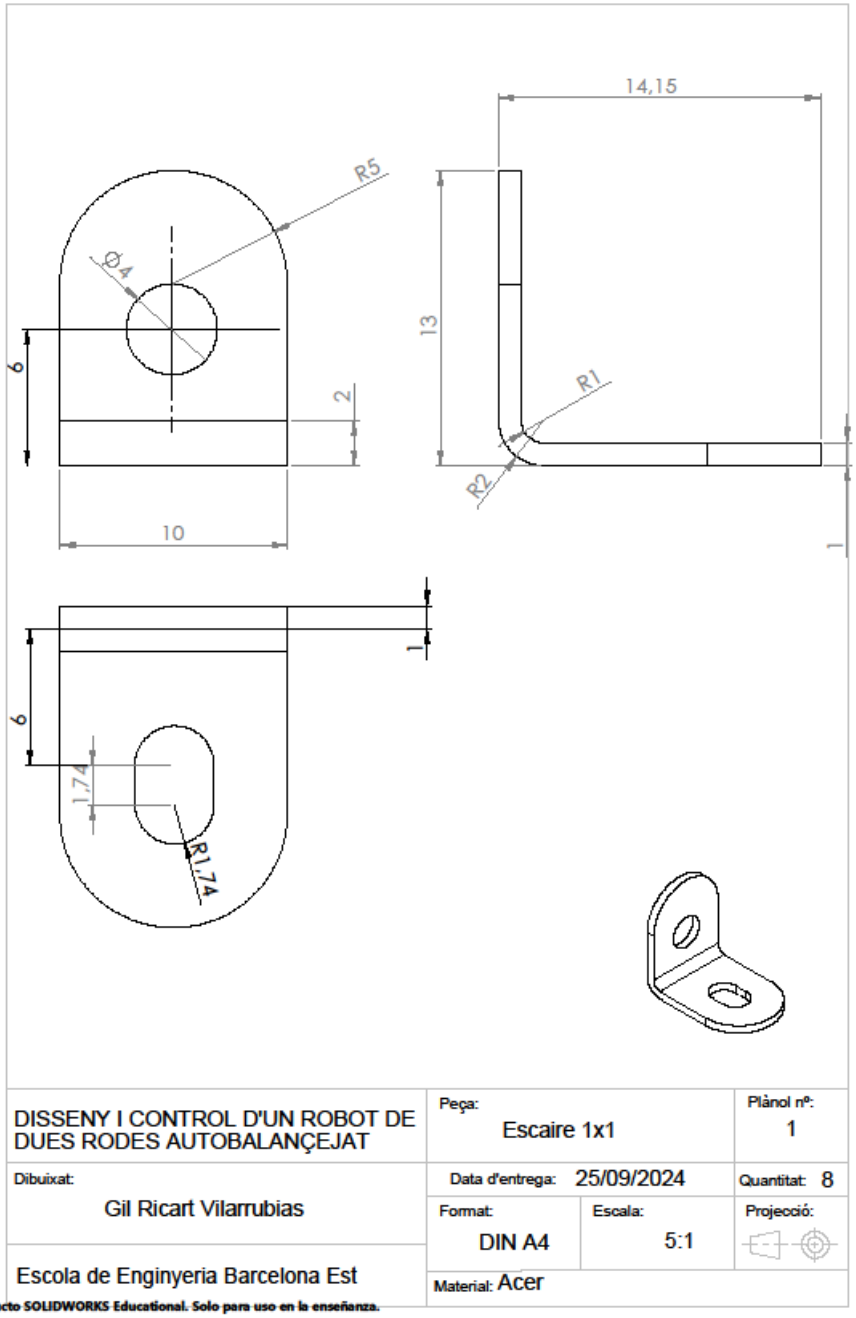
Amb aquest procés complert, ja es tindria el robot funcionant i mantenint l'equilibri per si mateix.

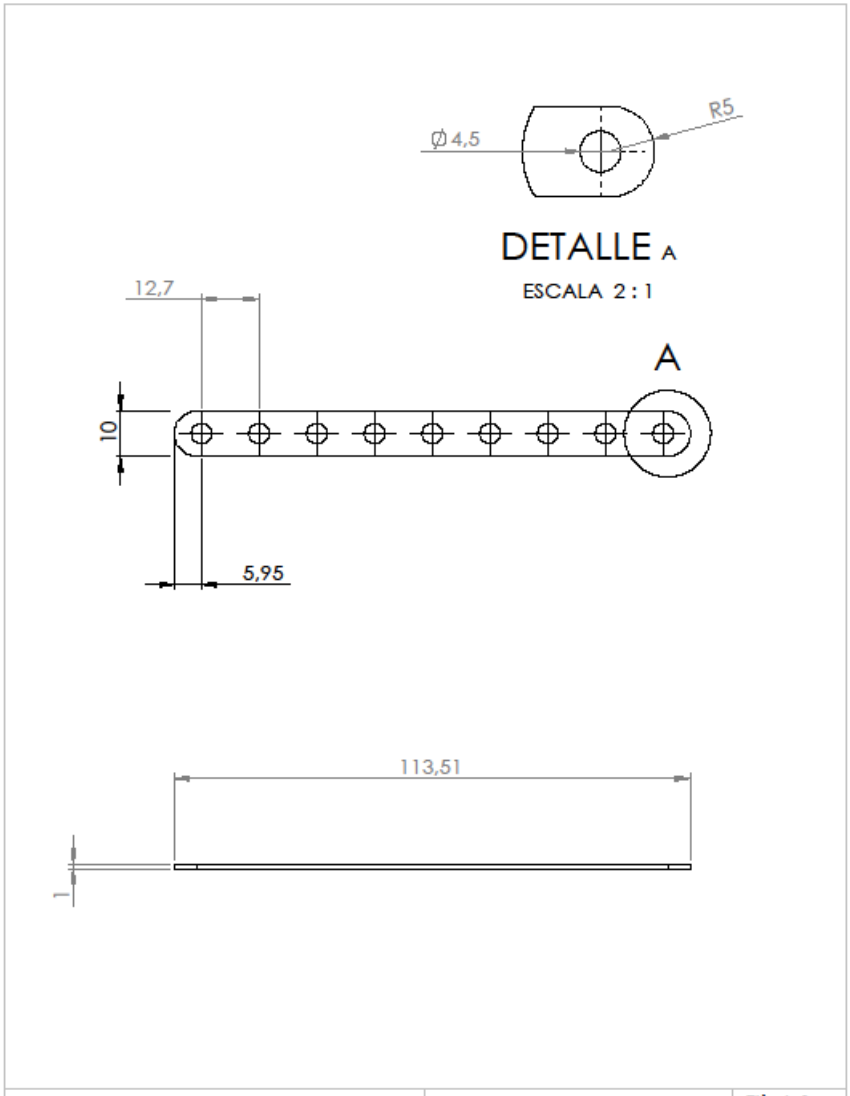
Per finalitzar l'operativa, es recomana levitar el robot, de manera que les rodes perdin el contacte amb el terra, i desconnectar el cable vermell de l'alimentació. D'aquesta manera s'aturarà el funcionament del robot.

Cal destacar que aquest prototip no disposa de polsador d'aturada d'emergència. Assegurar-se de desconnectar correctament el cable de d'alimentació per apagar el dispositiu.

# Annex A

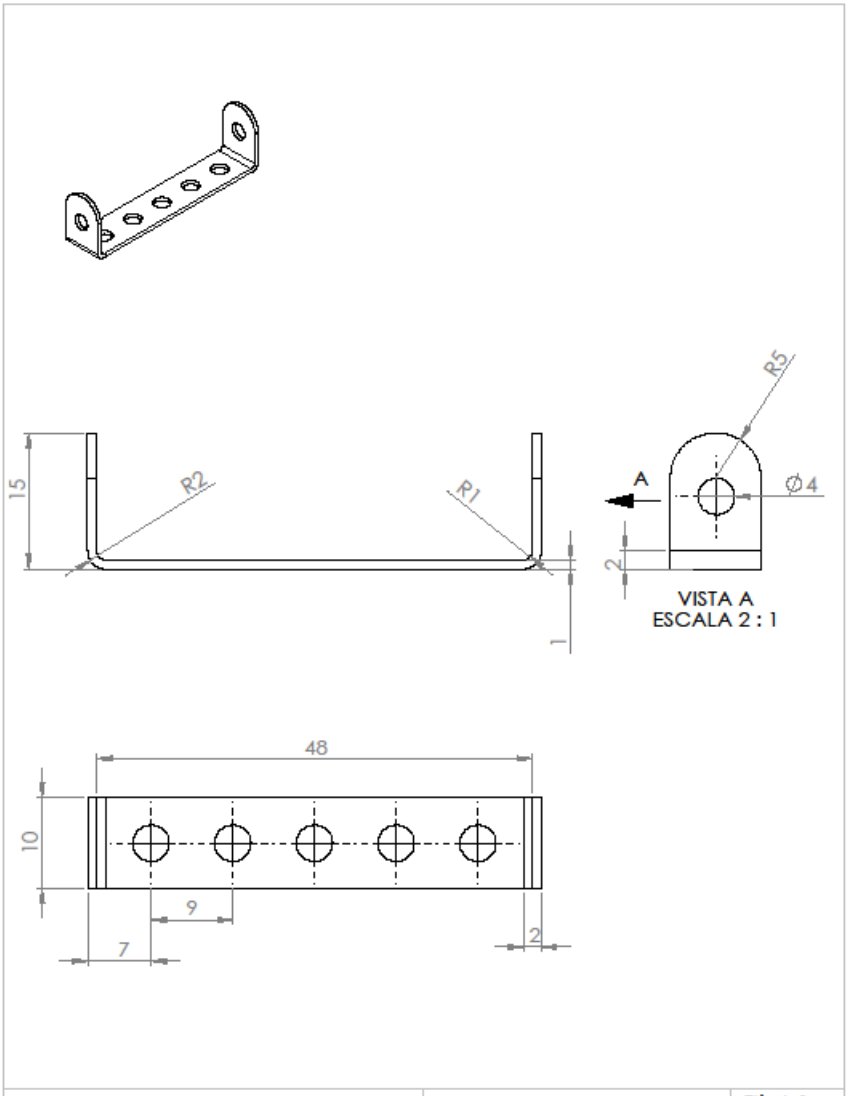
## A1. Plànols





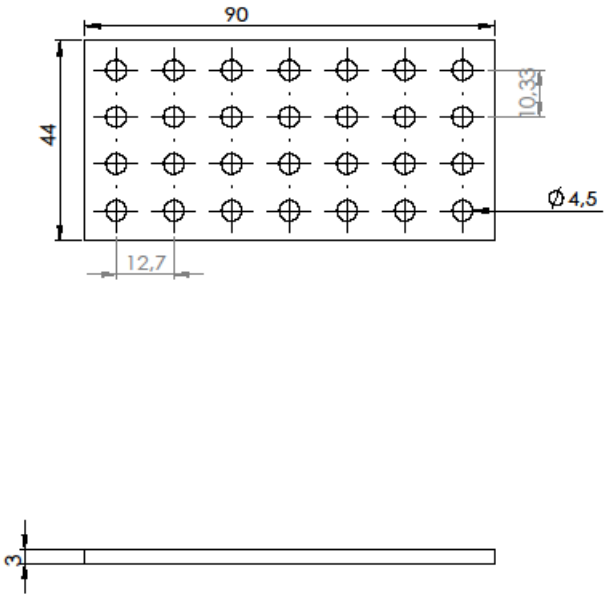

| | | | |
|---|---|---|---|
| DISSENY I CONTROL D'UN ROBOT DE DUES RODES AUTOBALANÇEJAT | Peça: Barnilla de 9 forats | | Plànol nº: 2 |
| Dibuixat: Gil Ricart Vilarrubias | Data d'entrega: 25/09/2024 | | Quantitat: 4 |
| | Format: DIN A4 | Escala: 1:1 | Projecció: |
| Escola de Enginyeria Barcelona Est | Material: Acer | | |

Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.



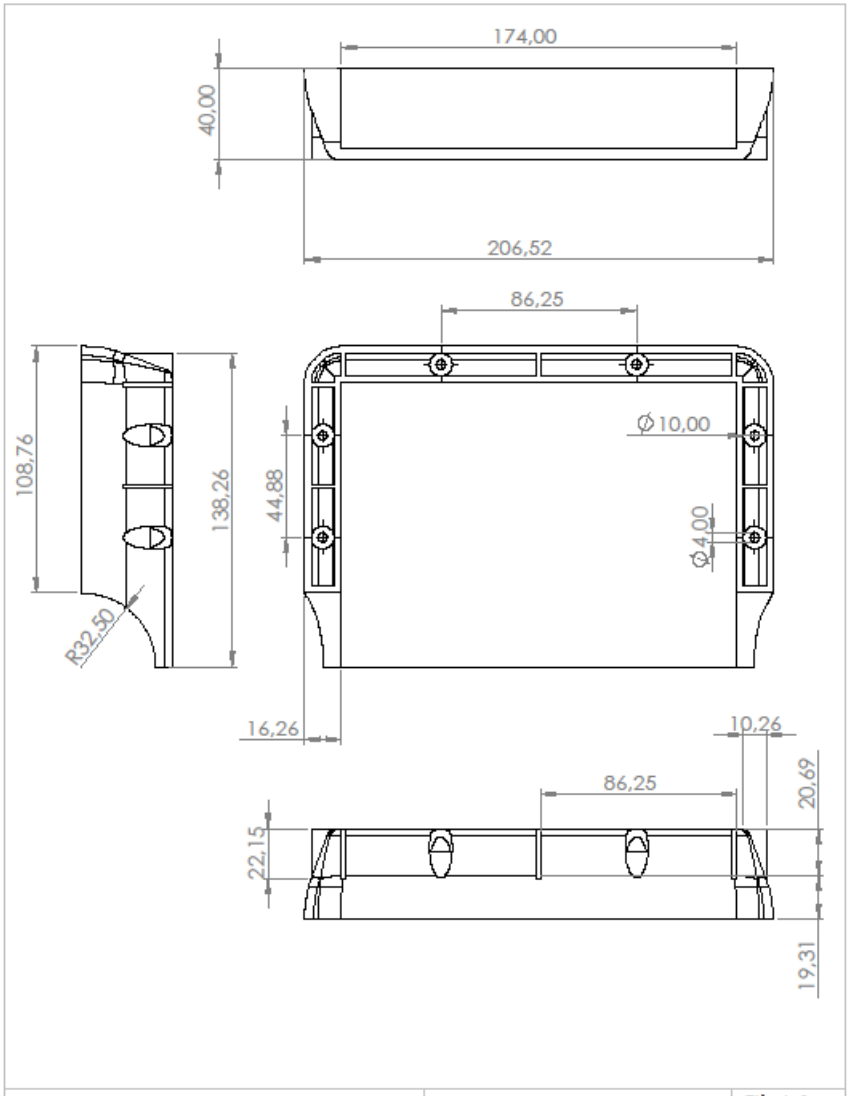

| | | | |
|---|---|---|---|
| DISSENY I CONTROL D'UN ROBOT DE DUES RODES AUTOBALANÇEJAT | Peça: Barnilla en "U" 7 forats | | Plànol nº: 3 |
| Dibuixat: Gil Ricart Vilarrubias | Data d'entrega: 25/09/2024 | | Quantitat: 2 |
| | Format: DIN A4 | Escala: 2:1 | Projecció: |
| Escola de Enginyeria Barcelona Est | Material: Acer | | |

Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.



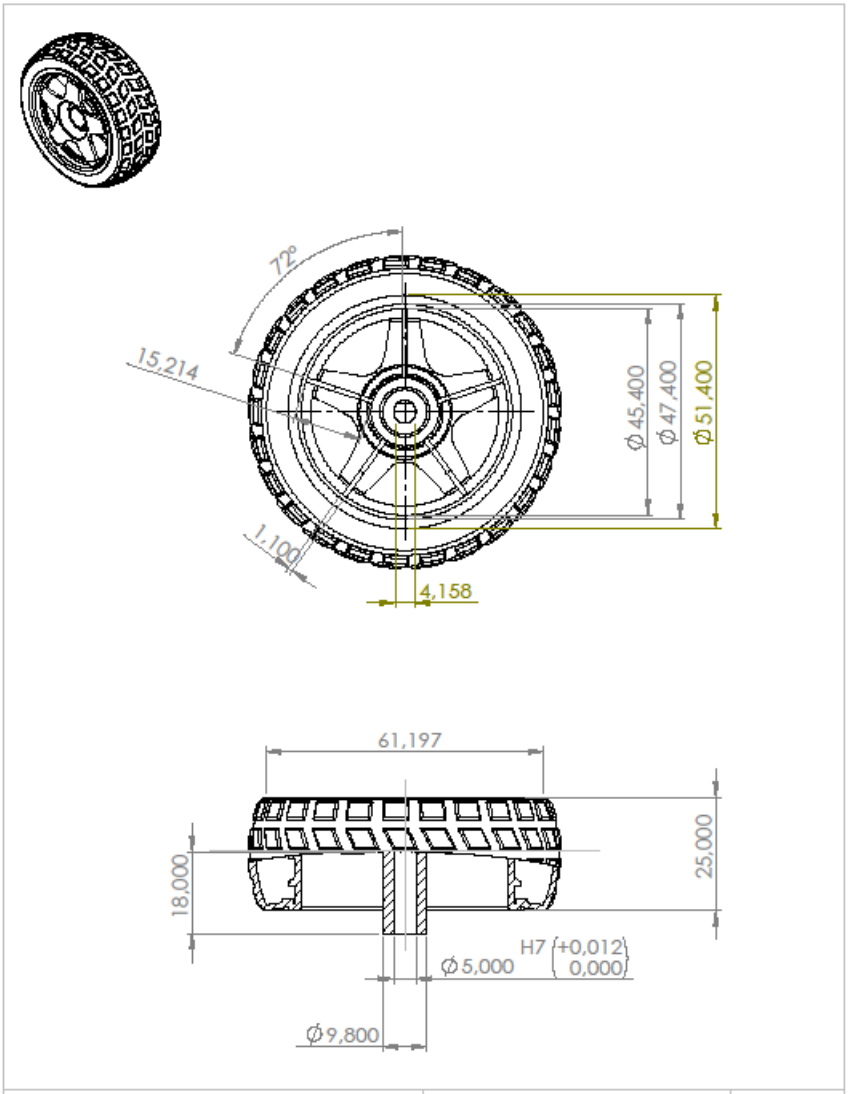

| | | | |
|---|---|---|---|
| DISSENY I CONTROL D'UN ROBOT DE DUES RODES AUTOBALANÇEJAT | Peça: Base | | Plànol nº: 4 |
| Dibuixat: Gil Ricart Vilarrubias | Data d'entrega: 25/09/2024 | | Quantitat: 2 |
| | Format: DIN A4 | Escala: 1:1 | Projecció: |
| Escola de Enginyeria Barcelona Est | Material: PLA | | |

Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.



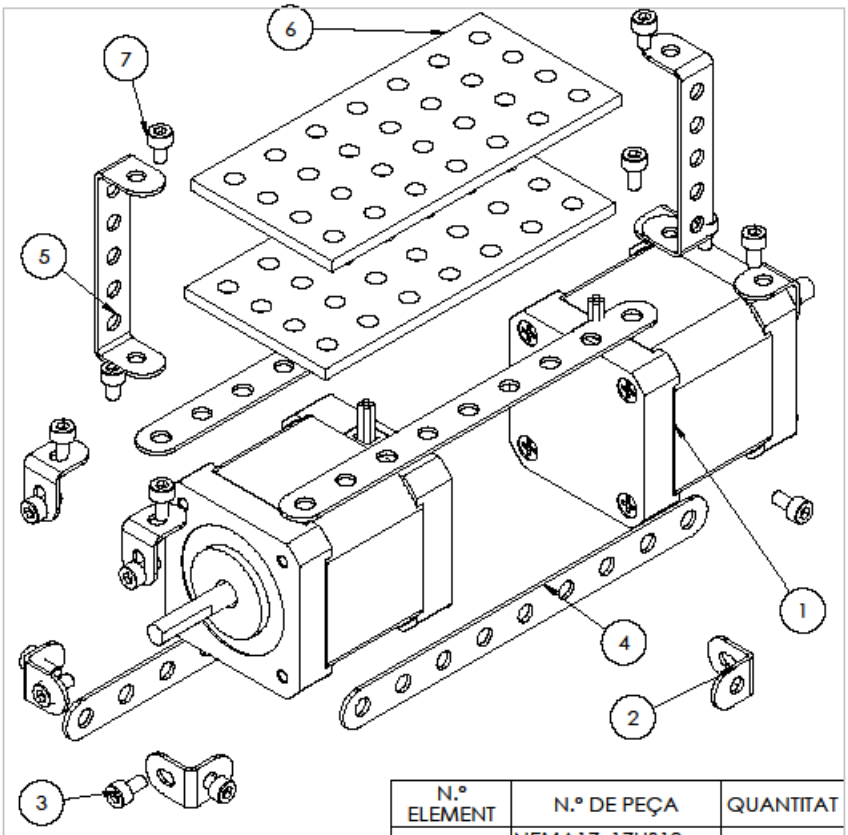

| | | | |
|---|---|---|---|
| DISSENY I CONTROL D'UN ROBOT DE DUES RODES AUTOBALANÇEJAT | Peça: Meitat carcassa externa | | Plànol nº: 5 |
| Dibuixat: Gil Ricart Vilarrubias | Data d'entrega: 25/09/2024 | | Quantitat: 2 |
| | Format: DIN A4 | Escala: 1:2 | Projecció: |
| Escola de Enginyeria Barcelona Est | Material: Acer | | |

Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.




| | | | |
|---|---|---|---|
| DISSENY I CONTROL D'UN ROBOT DE DUES RODES AUTOBALANÇEJAT | Peça: Roda | | Plànol nº: 6 |
| Dibuixat: Gil Ricart Vilarrubias | Data d'entrega: 25/09/2024 | | Quantitat: 2 |
| | Format: DIN A4 | Escala: 1:1 | Projecció: |
| Escola de Enginyeria Barcelona Est | Material: Acer | | |

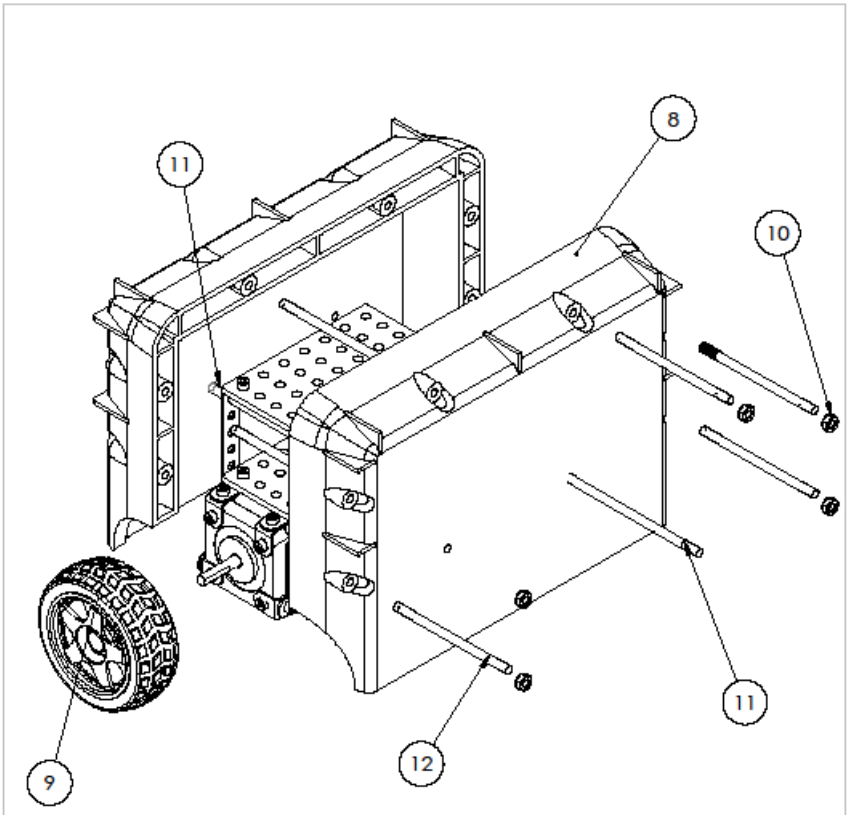
Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.




| N.º ELEMENT | N.º DE PEÇA | QUANTITAT |
|---|---|---|
| 1 | NEMA17_17HS19-2004S1_Stepperonline | 2 |
| 2 | meccano escaire 1x1 | 8 |
| 3 | ISO 4762 M3 x 6 - 6N | 16 |
| 4 | meccano 9 holes | 4 |
| 5 | meccano 7 holes escaire | 2 |
| 6 | base | 2 |
| 7 | ISO 4762 M3 x 5 - 5N | 4 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| DISSENY I CONTROL D'UN ROBOT DE DUES RODES AUTOBALANÇEJAT | Peça: Assemblatge estructura | | Plànol nº: 7 |
| Dibuixat: Gil Ricart Vilarrubias | Data d'entrega: 25/09/2024 | | Quantitat: 4 |
| | Format: DIN A4 | Escala: 1:1 | Projecció: |
| Escola de Enginyeria Barcelona Est | Material: Acer | | |

Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.




| N.º DE ELEMENTO | N.º DE PIEZA | DESCRIPCIÓN | CANTIDAD |
|---|---|---|---|
| 8 | meitat carcassa gil v1 | | 2 |
| 9 | Wheel D65x25 | | 1 |
| 10 | ISO - 4032 - M4 - W - N | | 7 |
| 11 | ISO 4762 M4 x 90 - 6N | | 2 |
| 12 | ISO 4762 M4 x 70 - 6N | | 6 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| DISSENY I CONTROL D'UN ROBOT DE DUES RODES AUTOBALANÇEJAT | Peça: Estructura, carcassa i rodes | | Plànol nº: 8 |
| Dibuixat: Gil Ricart Vilarrubias | Data d'entrega: 25/09/2024 | | Quantitat: 4 |
| | Format: DIN A4 | Escala: 1:2 | Projecció: |
| Escola de Enginyeria Barcelona Est | Material: Acer | | |

Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.

# Annex B

## B.1. Codi

```
// Importem les llibreries
#include <Arduino.h>
#include <I2Cdev.h>
#include <MPU6050.h>
#include <PID_v1.h>
#include <Wire.h>
#include <QuickMedianLib.h>
#include <AccelStepper.h>

// Definició dels pins
const int STEP_PIN = 26;
const int DIR_PIN = 27;
const int STEP_PIN2 = 17;
const int DIR_PIN2 = 16;
const int ENABLE = 25;
const int I2C_SDA = 18;
const int I2C_SCL = 19;

AccelStepper mystepper1(AccelStepper::DRIVER, STEP_PIN, DIR_PIN);
AccelStepper mystepper2(AccelStepper::DRIVER, STEP_PIN2, DIR_PIN2);

// Constants del MPU6050
MPU6050 sensor;
int16_t ax, ay, az;
int16_t gx, gy, gz;

const int LECTURES_TAMANY = 9;
double lectures[LECTURES_TAMANY];
double temps;
double Med_origen;
double Med_previ = 0;
double Med_actual = 0;
const double var_max = 3.0;

// PID paràmetres
double setpoint = 0.0;
double input, output;
double Kp =1.5, Ki = 0, Kd = 0;
PID pid(&input, &output, &setpoint, Kp, Ki, Kd, DIRECT);


// Definició de funcions
void lectura(void);
void control();


void setup(){
// Iniciem el MPU6050
  Serial.begin(115200);
  Wire.begin(I2C_SDA, I2C_SCL);
  sensor.initialize();
```

```
    if (sensor.testConnection()) {
        Serial.println("Sensor iniciado correctamente");
    } else {
        Serial.println("Error al iniciar el sensor");
    }

// Definim la velocitat màxima
  mystepper1.setMaxSpeed(500);
  mystepper2.setMaxSpeed(500);

// Definim l'acceleració màxima
  mystepper1.setAcceleration(5000);
  mystepper2.setAcceleration(5000);


// Configurem el PID en automàtic, el temps de mostreig, i els límits de
la sortida (output)
  pid.SetMode(AUTOMATIC);
  pid.SetSampleTime(10);
  pid.SetOutputLimits(-500, 500);

// Configuració dels pins
  pinMode(DIR_PIN, OUTPUT);
  pinMode(DIR_PIN2, OUTPUT);
  pinMode(ENABLE, OUTPUT);

// Assignem un valor als PINS
  digitalWrite(DIR_PIN, LOW);
  digitalWrite(DIR_PIN2, HIGH);
  digitalWrite(ENABLE, LOW);
}

// Llaç principal
void loop() {

// Funcions auxiliars
  lectura();
  control();

// Activació dels motors
  mystepper1.run();
  mystepper2.run();

// Comprovació valor sortida del PID
  Serial.println(output);


}

void control(){

// Assignem el valor de la lectura a l'entrada
  input = Med_actual-6;

// possibilitat de realitzar un control adaptatiu, canviant els valors
// de les constants del PID, en funció del valor d'entrada (input)
    Kp = 0.8;
    Ki = 0.0;
```

```
    Kd = 0.0;

  pid.SetTunings(Kp, Ki, Kd);

// Calculem l'output del PID
  pid.Compute();

// Histèresi entre 2 i -2. Assignem la velocitat en funció del valor
d'output,
// si ens trobem fora del rang, els motors no es giren, ja que no se'ls
hi estableix
// cap velocitat
  if ((input > 2) || (input <-2)){
  mystepper1.setSpeed(-output);
  mystepper2.setSpeed(+output);
}
}

void lectura(){

// Assignem 9 angles diferents a la llista lectures
for (int i = 0; i < LECTURES_TAMANY; i++) {
    sensor.getAcceleration(&ax, &ay, &az);
    lectures[i] = atan2(ax, sqrt(ay * ay + az * az)) * 180.0 / PI;
  }

// Realitzem la mediana de la llista

  Med_origen = QuickMedian<double>::GetMedian(lectures, LECTURES_TAMANY);

// Comprovem si la variació de la mediana, respecte al valor previ
// és superior a la variació màxima
    if (abs(Med_origen - Med_previ) > var_max) {
      if (Med_origen > Med_previ) {
          Med_actual = Med_previ + var_max;
      } else {
          Med_actual = Med_previ - var_max;
      }
  } else {
      Med_actual = Med_origen;
  }
  Med_previ = Med_actual;

}
```