

Treball de Fi de Màster

Màster Universitari en Automàtica i Robòtica

**Desenvolupament virtual i en context d'un
sensor per comandar una plataforma
d'ajuda a la mobilitat**

MEMÒRIA

Autor/a: Ferran Flaqué Borrellas
Director/a: Joaquim Minguella Canela
Co-director/a: Alicia Casals Gelpí
Convocatòria: Setembre 2023



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



Resum

Aquest projecte parteix de la idea d'emprar sensors impresos en 3d per tal de comandar una plataforma d'ajuda a la mobilitat (cadira de rodes). Els sensors han estat dissenyats en altres projectes i impresos en l'espai de fabricació digital de l'ETSEIB (Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona). Principalment, s'han utilitzat dos tipus de sensors, un que d'ara endavant s'anomenarà de tipus cinta i que consta bàsicament d'una cinta plàstica amb un component resistiu a l'interior i un de tipus joystick que conté 4 elements resistius (un per cada direcció). El principi de funcionament dels sensors es basa en la variació de la resistència elèctrica a conseqüència del desplaçament exercit sobre aquests.

Per tal de poder extreure un senyal de control a partir d'aquests sensors, doncs, s'ha cercat la millor manera d'obtenir un senyal generat per una resistència variable (la del sensor) i s'ha considerat més útil mesurar el voltatge emprant un divisor de tensió o un pont de Wheatstone pel fet que només ens interessa obtenir un senyal amb el qual controlar la cadira i no mesurar la resistència en si. En aquesta fase, s'ha cregut necessari amplificar el senyal, ja que la variació entre els voltatges mínims i màxims llegits era reduïda i no s'aprofitava el rang de lectura dels convertidors analògic a digital (ADC). A més a causa del soroll s'ha cregut convenient aplicar algun mètode de filtratge del senyal.

Un cop es disposava d'un mètode per llegir el senyal amb menys soroll, s'ha observat comportaments anòmals (caigudes de resistència a l'exercir una força de tracció sobre el sensor) i ha calgut fer assajos per poder modelar el comportament del sensor en funció del desplaçament exercit sobre aquest.

Un cop s'ha establert el comportament del sensor a traccions, emprant la lectura d'aquest s'ha creat un senyal de control. Per tal de poder provar el funcionament del senyal de control generat pel sensor ha calgut simular la cadira, ja que aquesta no ha estat construïda encara (s'ha fet una proposta del disseny complet del circuit electrònic que s'haurà de fer servir un cop es materialitzi la cadira). La simulació s'ha fet partint d'un dibuix CAD de la cadira i fent servir Gazebo (que ve inclòs en la llibreria de ROS) com a simulador.

Finalment, s'ha dut a terme l'anàlisi econòmica i ambiental del projecte.

Resumen

Este proyecto parte de la idea de usar sensores imprimidos en 3d con el objetivo de controlar una plataforma de ayuda a la movilidad (silla de ruedas). Los sensores han sido diseñados en otros proyectos e imprimidos en el espacio de fabricación digital de la ETSEIB. Principalmente, se han usado dos tipos de sensores, uno que en adelante se llamará de tipo cinta y que consta básicamente de una cinta plástica con un componente resistivo en su interior y uno de tipo joystick que contiene 4 elementos resistivos (uno para cada dirección). El principio de funcionamiento de los sensores se basa en la variación de resistencia eléctrica como consecuencia del desplazamiento ejercido sobre estos.

Para poder extraer una señal de control a partir de estos sensores se ha buscado la mejor manera de obtener dicha señal a partir de una resistencia variable (la del sensor), se ha considerado que lo más útil es leer el voltaje usando un divisor de tensión o un puente de Wheatstone porque solo nos interesa poder generar la señal de control y no leer la resistencia en sí. En esta fase, se ha considerado necesario amplificar la señal debido a la baja variación del nivel de voltaje máximo y mínimo, ya que no se aprovechaba el rango de lectura de los diferentes ADC. Además, debido al ruido, se ha creído conveniente aplicar algún método de filtrado de la señal.

Una vez se disponía de un método para leer la señal con menor ruido, se ha observado comportamientos anómalos (caídas de resistencia al ejercer una fuerza de tracción sobre el sensor) i ha sido necesario realizar diversas pruebas para modelar el comportamiento del sensor en función del desplazamiento de este.

Una vez establecido el comportamiento del sensor a tracciones, usando la lectura de este se ha creado una señal de control. Para probar el funcionamiento de esta señal de control, ha sido necesario simular la silla, ya que aún no ha sido construida. La simulación se ha hecho usando un dibujo CAD de la silla y usando Gazebo (que está incluido en la librería de ROS) como simulador.

Finalmente, se ha realizado el análisis económico y ambiental del proyecto.

Abstract

This project is based on the idea of using 3D printed sensors with the aim of controlling a mobility aidance platform (wheelchair). The sensors have been designed in other projects and printed in the digital manufacturing space of the ETSEIB. Mainly, two types of sensors have been used, one that will from now on be called tape type and basically consists of a plastic tape with a resistive component inside, and a joystick type that contains 4 resistive elements (one for each direction). The principle of operation of the sensors is based on the variation of electrical resistance because of the displacement applied on them.

To extract a control signal from these sensors, there has been some research on the different methods used to read variable resistances. It has been considered that the most useful thing is to read the voltage using a voltage divider or a Wheatstone bridge because we are only interested in being able to generate the control signal and not to read the resistance itself. In this phase, it has been considered necessary to amplify the signal due to the low variation of the voltage level as the reading range of the different ADCs was not fully used. In addition, due to noise, it has been considered convenient to apply some methods to filter the signal.

Once achieved a reading with low noise, anomalous behaviours (drops in resistance when exerting a traction force on the sensor) have been observed and it has been considered necessary to perform various tests to model the behaviour of the sensor depending on the displacement applied.

Once the behaviour has been established, using the reading of the sensors, a control signal has been created. To test the operation of this control signal, it has been necessary to simulate the chair, since it has not yet been built. The simulation has been done using a CAD sketch of the chair and using Gazebo (which is included in the ROS library) as a simulator.

Finally, the economic and environmental analysis of the project has been carried out.

Contingut

RESUM	3
RESUMEN	4
ABSTRACT	5
CONTINGUT	6
GLOSSARI I NOMENCLATURA	9
LLISTAT DE FIGURES	10
LLISTAT DE TAULES	13
1. INTRODUCCIÓ	14
1.1. Motivació	14
1.2. Abast del treball	14
1.3. Requeriments previs	15
1.4. Objectius del treball	15
1.4.1. Objectius relacionats amb el control de la plataforma	15
1.4.2. Objectius relacionats amb la simulació de la plataforma	15
2. ESTAT DE L'ART	17
2.1. Lectura de resistències variables	17
2.2. Amplificació del Senyal	18
2.3. Filtrat digital del Senyal	19
3. ADQUISICIÓ I PROCESSAT DEL SENYAL	23
3.1. Element Sensor	23
3.2. Circuit per llegir resistències	24
3.2.1. Divisor de tensió	24
3.2.2. Pont de Wheatstone	26
3.3. Circuit per amplificar el Voltatge mesurat	27
3.3.1. Etapa d'entrada	28
3.3.2. Etapa de sortida	29
3.4. ADC	32
3.4.1. ADC-10-F103C	33
3.4.2. Arduino UNO R3	33
3.5. Circuit complet	34
3.6. Filtratge del senyal	35
3.6.1. Moving Average	35
3.6.2. Single-Pole	36

4.	SIMULACIÓ DE LA PLATAFORMA D'AJUDA A LA MOBILITAT	38
4.1.	Part Visual.....	38
4.2.	Codi de la simulació.....	40
4.2.1.	Cadira_descr.....	41
4.2.2.	Cadira_control.....	44
4.2.2.1.	Config.....	44
4.2.2.2.	Scripts.....	45
4.2.2.2.1	Main/Main_2:.....	46
4.2.2.2.2	Settings.....	47
4.2.2.2.3	Menú.....	47
4.2.2.2.4	LecturaVoltatges.....	47
4.2.2.2.5	Filtratge.....	47
4.2.2.2.6	ContatgeMinMax.....	48
4.2.3.	Cadira_vis.....	48
5.	PLA D'EXPERIMENTACIÓ	49
5.1.	Lectura i processament del senyal de control.....	49
5.1.1.	Anàlisi del comportament dels elements sensors.....	49
5.1.2.	Filtratge del Senyal.....	50
5.1.3.	Generació del senyal de control.....	51
5.2.	Simulació de la Plataforma d'ajuda a la mobilitat.....	51
6.	RESULTATS	52
6.1.	Lectura i processament del senyal de control.....	52
6.1.1.	Anàlisi del comportament dels elements sensors.....	52
6.1.2.	Filtrat del Senyal.....	54
6.1.3.	Generació del senyal de control.....	58
6.1.4.	Circuit resultant.....	59
6.2.	Simulació de la Plataforma d'ajuda a la mobilitat.....	60
7.	ESTUDI ECONÒMIC	65
7.1.	Despeses dels components.....	65
7.2.	Cost de recursos Humans.....	67
7.3.	Cost elèctric.....	67
7.4.	Cost Total.....	68
8.	ESTUDI AMBIENTAL	69
8.1.	Consum energètic.....	69
8.2.	Residus derivats del projecte.....	70
9.	ESTUDI SOCIAL I D'IGUALTAT DE GÈNERE	71
10.	CONCLUSIONS	72

10.1. Control de la plataforma mitjançant els sensors	72
10.2. Simulació de la plataforma.....	72
11. AGRAÏMENTS	74
12. BIBLIOGRAFIA	75

Glossari i Nomenclatura

ROS: Robot Operating System.

CAD: Computer-aided design (disseny assistit per computadora).

ADC: Analog-to-digital converter (Convertidor analògic a digital).

CMRR: Common Mode Rejection Ratio (Relació de rebuig en mode comú).

XACRO: XML Macro

XML: Extensible Markup Language (Llenguatge de marques extensible).

TPU: Thermoplastic Polyurethane (Poliuretà termoplàstic).

PLA: Àcid Polilàctic.

BASH: Bourne-Again Shell.

TFM: Treball de final de Màster.

UPC: Universitat Politècnica de Catalunya.

ETSEIB: Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona.

USB: Universal Serial Bus.

IVA: Impost sobre el Valor Afegit.

Llistat de figures

Il·lustració 1. Esquema d'un amplificador electrònic [2].	18
Il·lustració 2. Respostes temporals d'un filtre [3].	20
Il·lustració 3. Respostes freqüencials d'un filtre [3].	21
Il·lustració 4. Imatge del Joystick complet (a dalt a l'esquerra), components del joystick (a dalt a la dreta), cintes de PLA i de TPU (a baix a la esquerra) i detall de l'element sensor (a baix a la dreta).	23
Il·lustració 5. Esquema d'un divisor de tensió.	24
Il·lustració 6. Comportament teòric del divisor de tensió en funció d'una resistència variable amb una referència de 5 Volts.	25
Il·lustració 7. Esquema d'un pont de Wheatstone [2].	26
Il·lustració 8. Comportament teòric del pont de Wheatstone en funció d'una resistència variable amb una referència de 5 Volts.	27
Il·lustració 9. Esquema d'un amplificador d'instrumentació [4].	28
Il·lustració 10. Etapa d'entrada d'un amplificador d'instrumentació.	28
Il·lustració 11. Etapa de sortida d'un amplificador d'instrumentació.	29
Il·lustració 12. Etapa de sortida d'un amplificador d'instrumentació aplicant superposició amb $V_d = 0$.	30
Il·lustració 13. Etapa de sortida d'un amplificador d'instrumentació aplicant superposició amb $V_a = 0$.	31
Il·lustració 14. ADC-10-F103C [5].	33
Il·lustració 15. Arduino UNO R3 [6].	33
Il·lustració 16. Circuit d'un amplificador inversor.	34
Il·lustració 17. Circuit complet.	34
Il·lustració 18. Resposta a un impuls esglaió a un filtre de tipus Moving Average.	35
Il·lustració 19. Resposta a un impuls esglaió a un filtre de tipus single-pole.	37

Il·lustració 20. Disseny de la plataforma d'ajuda a la mobilitat.....	38
Il·lustració 21. Base de la cadira.....	39
Il·lustració 22. Roda Motor.....	39
Il·lustració 23. Base de la roda Caster.....	40
Il·lustració 24. Roda Caster.....	40
Il·lustració 25. Model d'un robot diferencial [11].....	45
Il·lustració 26. Menú utilitzat per al control.....	45
Il·lustració 27. Banc d'assaig utilitzat en l'anàlisi del comportament dels sensors [12]	50
Il·lustració 28. Model 1 de Comportament vist amb l'ADC-10-F103C.....	52
Il·lustració 29. Model 2 de Comportament vist amb l'ADC-10-F103C.....	53
Il·lustració 30. Provena 11 llegida amb l'Arduino.....	54
Il·lustració 31. Comparativa de diferents filtres de tipus moving average llegits amb l'ADC-10-F103C.	55
Il·lustració 32. Comparativa de diferents filtres de tipus moving average llegits amb l'Arduino.....	56
Il·lustració 33. Comparativa de filtres de tipus single-pole amb diferents M.....	58
Il·lustració 34. Senyal de control obtinguda fent probes amb el sensor de tipus cinta.	58
Il·lustració 35. Circuit complet.....	59
Il·lustració 36. Detall de la placa de connexions.....	60
Il·lustració 37. Calibrat del sensor.....	61
Il·lustració 38. Images que demostren el gir anti-horari.	61
Il·lustració 39. Images que demostren el moviment rectilini.....	62
Il·lustració 40. Conjunt d'imatges on es mostra un gir més obert (d'adalt a l'esquerra a a baix a la dreta).....	63
Il·lustració 41. Retorn al punt d'origen.	64

Llistat de taules

Taula 1. Mètodes per a la mesura de resistències [1]	17
Taula 2. Tipus d'amplificadors operacionals.....	19
Taula 3. Exemples de cada tipus de filtre [3]	21
Taula 4. Selecció de resistències per l'amplificador d'instrumentació.....	35
Taula 5. Resum dels experiments realitzats.....	49
Taula 6. Cost de les cintes sensores.....	65
Taula 7. Cost del Joystick.....	65
Taula 8. Costos totals derivats dels components electrònics emprats.....	66
Taula 9. Cost de Personal	67
Taula 10. Cost elèctric.....	67
Taula 11. Cost total del projecte.....	68
Taula 12. Resum de consums i emissions derivades del projecte	70

1. Introducció

La recerca d'aquest projecte ha estat parcialment finançada pel projecte "Orthosis-Chair Hybrid Platform to make compatible Mobility, Functionality and Acceptability for application in domestic environments" (POSMOFYA) del Ministerio de Ciencia e Innovación, projecte: PID2020-116091RB-I00.

1.1. Motivació

Els comandaments de les plataformes d'ajuda a la mobilitat actuals com els emprats en les cadires de rodes elèctriques, són poc flexibles pel que fa a les capacitats dels usuaris. Això, principalment es deu al fet que per abaratir costos, aquests controls es produeixen en sèrie amb molt poca variabilitat entre els diferents models existents en el mercat. En cas de ser necessari un comandament diferent dels que ja existeixen, es requereix la fabricació d'un de nou, cosa que resulta en un elevat cost i en un temps de fabricació més llarg.

Aquests problemes es poden solucionar emprant peces produïdes mitjançant la impressió en 3D. Actualment, hi ha poca varietat de filaments conductius usats en les impressores 3D, a més els que hi ha en el mercat són relativament nous i les seves propietats (particularment les elèctriques) encara no han estat prou estudiades. És per tot això que convé analitzar el comportament elèctric dels diferents comandaments impresos en 3D que es pretenen fer servir per controlar les plataformes d'ajuda a la mobilitat i crear estratègies de control en conseqüència.

Els comandaments que s'imprimeixen en 3D, es volen utilitzar en una plataforma d'ajuda a la mobilitat que encara no ha estat construïda, per tal de poder implementar un mètode de control que tingui una bona funcionalitat amb la plataforma en qüestió, es requereix una solució que permeti simular-la el més fidelment possible (pel que fa als aspectes físics) a la que es pretén construir.

1.2. Abast del treball

El present treball es limitarà a generar un senyal amb el qual comandar la plataforma d'ajuda a la mobilitat (cadira de rodes), analitzant, filtrant i processant els senyals obtinguts mitjançant sensors resistius dissenyats en altres projectes. No es pretén dissenyar nous sensors ni mètodes d'assaig d'aquests. Pel que fa a la verificació del funcionament correcte del senyal de control, es farà generant ordres de control sobre una cadira simulada. Respecte a la simulació, el disseny de l'estructura en si de la cadira queda fora de l'abast del projecte i es crearà un model a partir d'un disseny esquemàtic o s'adaptarà a partir d'un model 3D preexistent de la plataforma d'ajuda a la mobilitat. Aquest model serà modificat pertinentment per a poder ser utilitzat amb els simuladors disponibles dintre de les llibreries

de ROS, en concret Gazebo i RVIZ.

1.3. Requeriments previs

Pel que fa als requisits previs d'aquest treball, consisteixen principalment a disposar dels diferents models de sensors que s'han d'emprar. També es disposarà d'un banc de treball per poder fer les anàlisis inicials del comportament dels sensors. Per altra banda, també s'haurà de disposar d'un punt de partida per a la simulació de la plataforma, sigui una representació esquemàtica de la mateixa o sigui un disseny generat fent ús de programes tipus CAD (Computer-Aided Design).

A més s'haurà de disposar d'un ordinador amb Linux versió 18.0.4.6 LTS i el programari ROS en la seva versió corresponent (ROS Melodic Morenia).

1.4. Objectius del treball

Tal com s'ha comentat anteriorment, els objectius principals d'aquest projecte, es poden classificar segons quina de les dues fases que componen el projecte satisfan.

1.4.1. Objectius relacionats amb el control de la plataforma

Pel que fa als objectius que estan relacionats amb el control de la plataforma tenim:

- Establir quin serà el mètode per obtenir les dades del sensor i quins paràmetres seran més interessants mesurar (voltatge, resistència, desplaçament, etc).
- Establir quin preprocessament del senyal convindrà aplicar per a poder emprar el sensor.
- En cas de ser necessari definir quin filtre/filtres són més convenients utilitzar per a eliminar el soroll sense arribar a comprometre el control.
- Definir com serà el circuit complet a partir dels requisits del objectius anteriors i proposar el circuit que caldrà utilitzar en la cadira un cop es materialitzi.
- Definir com serà el senyal de control a partir del llegit del sensor (es farà un control analògic, tot o res, de tipus digital (amb diferents nivells) etc.)

1.4.2. Objectius relacionats amb la simulació de la plataforma

Pel que fa als objectius relacionats amb la simulació tenim:

- Implementar el model de la plataforma el més realista possible tant en gazebo com en RVIZ.
- Assolir un control prou fiable per a poder desplaçar la plataforma i poder retornar al punt de partida amb un mínim marge d'error.

- Establir quins seran els moviments possibles amb els sensors de què es disposa.

2. Estat de l'Art

En aquest apartat, s'analitzarà l'estat de l'art respecte als mètodes que s'empraran per a poder satisfer els tres primers objectius del projecte, per tant, s'ha dividit en tres seccions. La resta d'objectius són més específics d'aquest projecte en qüestió i, per tant, no es considerarà cercar-ne l'estat de l'art.

2.1. Lectura de resistències variables

Els mètodes de lectura de resistències són molt variats en funció de les característiques que es requereixen (precisió, tipus de senyal obtingut, etc). Exemples de varis mètodes en trobem classificats a la Taula 1.

Exactitud Requerida	Mètodes de Ponts	Mètodes directes	Mètodes Alternatius
Major de 0,1%	1 - Pont de Wheatstone. 2 - Divisors de voltatge d'alta precisió. 3 - Comparació directa Mitjançant resistor i potenciòmetre. 4 - Comparador de corrent de Kusters i MacMartin.	No aplicables.	No aplicables.
Entre el 0,1 i 1%	1 - Pont de Wheatstone. 2 - Divisors de voltatge d'alta precisió.	1 - Amplificador Operacional.	1 - Voltímetre-Amperímetre.
Menor d'1%	1 - Pont de Wheatstone.	1 - Òhmmetre de bobina Creuada.	1 - Mètode de desviació directa. 2 - Mètode de pèrdua de càrrega. 3 - Voltímetre-Amperímetre.

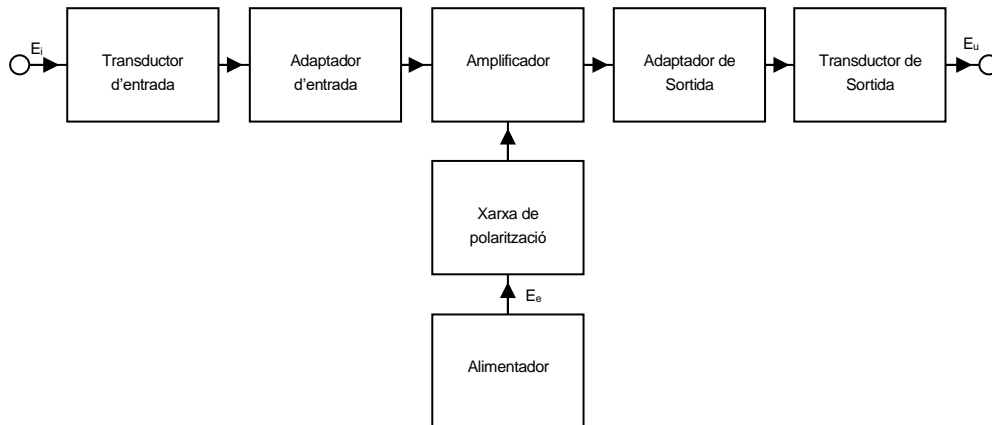
Taula 1. Mètodes per a la mesura de resistències [1]

Dels diferents mètodes de lectura de resistències, s'ha de descartar els alternatius, ja que per al present treball la presa de dades es realitza amb un ADC (convertidor analògic-Digital) que només llegeix voltatges i no intensitats i no es disposa d'un mètode de commutació com el requerit per als mètodes de pèrdua de càrrega ni de desviació directa. A més també convé descartar l'Òhmmetre de bobina creuada, ja que tampoc és pràctic per a prendre dades mitjançant l'ADC. Resten, per tant, els mètodes relacionats amb ponts així com el mètode de l'Amplificador operacional. Informació més extensa sobre els diferents mètodes per mesurar resistències es pot trobar en [1].

2.2. Amplificació del Senyal

Quan se cerca informació respecte al preprocessament del senyal provinent de sensors amb resistències variables, particularment l'amplificació del senyal obtingut, la majoria de les solucions implica emprar amplificadors electrònics.

Els amplificadors electrònics són dispositius que modulen l'energia elèctrica, i generalment, estan construïts seguint l'esquema de blocs de la Il·lustració 1:



Il·lustració 1. Esquema d'un amplificador electrònic [2].

Aquests dispositius generen una energia en la sortida E_u en funció de l'energia a l'entrada E_i (que sol ser de menor valor) gràcies a l'energia E_e proporcionada per l'alimentador. L'energia de sortida, per tant, mai podrà ser major que la d'alimentació.

Principalment, els Amplificadors estan compostos per transistors o per vàlvules de buit (més antigues i emprades en electrònica d'alta potència). Els amplificadors més comuns són els Amplificadors operacionals que són d'alt guany i acoblament directe (a corrent continu). En funció de la xarxa de reacció externa poden ser dels tipus de la Taula 2.

Tipus d'amplificadors	Funció que Compleixen
Seguidor de tensió.	Proporciona el mateix voltatge a l'entrada que a la sortida, però amb molta menor impedància de sortida
Amplificador Inversor.	El voltatge complementari al d'entrada s'amplifica multiplicant per un guany A_v .
Amplificador no inversor.	El voltatge d'entrada s'amplifica multiplicant per un guany A_v .
Amplificador sumador.	Produeix la suma dels voltatges a la entrada.
Amplificador diferencial.	Produeix la resta dels voltatges a la entrada.
Amplificador Integrador.	Produeix la integral del voltatge proporcionat a la entrada.
Amplificador Derivador.	Produeix la derivada del voltatge proporcionat a la entrada.
Amplificador d'instrumentació.	Amplifica el resultat de la resta dels dos voltatges d'entrada multiplicant-lo per un guany A_v .

Taula 2. Tipus d'amplificadors operacionals.

De les diferents tipologies d'amplificadors, els més utilitzats per a amplificar senyals en l'aplicació que ens interessa són els amplificadors inversors, els no inversors i els amplificadors d'instrumentació. Informació addicional sobre els amplificadors operacionals es pot obtenir en [2].

2.3. Filtrat digital del Senyal

Finalment, pel que fa al filtratge del senyal, destaquen els filtres digitals, ja que tenen bones prestacions i s'implementen a partir de programari que s'executa sobre el microcontrolador evitant així haver de muntar circuits addicionals. A més aquests es poden modificar fàcilment canviant-ne els paràmetres en el programa.

Els filtres digitals, els podem classificar en dos tipus principalment:

- FIR, filtres de resposta impulsional finita. La sortida d'aquest filtre es basa només en les entrades actuals i anteriors.
- IIR, filtre de resposta impulsional infinita. La sortida d'aquest filtre es basa en les entrades actuals i anteriors com el FIR, però a més hi intervenen les sortides anteriors.

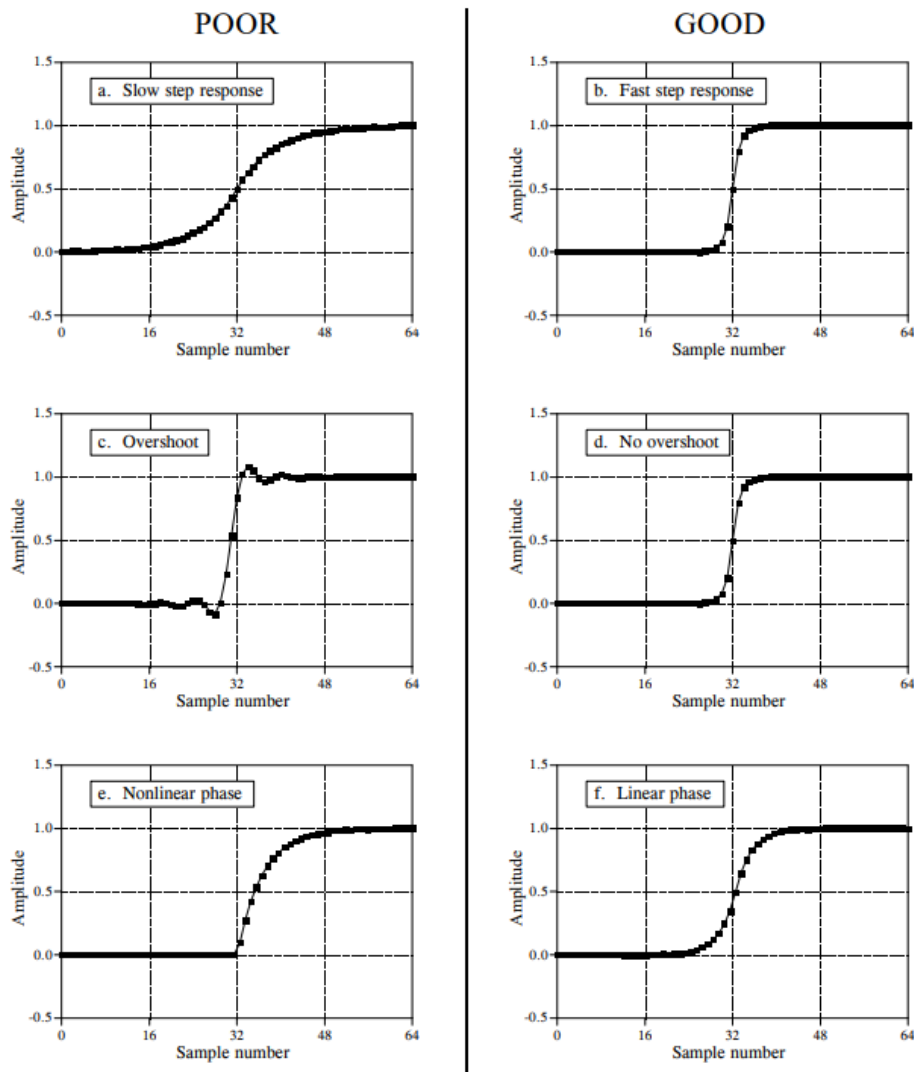
Parlant de filtres, a més, s'han de considerar els efectes tant en el domini temporal com en el domini freqüencial:

Pel que fa al domini temporal, cal considerar els següents aspectes:

- La resposta a un impuls esglaió ha de ser prou ràpida per a poder diferenciar els diferents successos en un senyal (per exemple les ordres d'engegada o aturada de la plataforma d'ajuda a la mobilitat han de ser prou ràpides per a actuar amb

seguretat). En les seccions a i b de la Il·lustració 2 hi trobem una comparativa d'exemple de resposta lenta i de la ràpida respectivament.

- S'ha d'evitar la sobretensió de flanc (overshoot en Anglès), ja que aquesta sobretensió canvia el valor de l'amplitud de les mostres del senyal. En les seccions c i d de la Il·lustració 2 es pot trobar un exemple de resposta amb sobretensió i sense sobretensió respectivament.
- Finalment, és desitjable que hi hagi simetria entre la meitat inferior i la meitat superior de la resposta a l'impuls esglaió per a fer que un flanc de pujada s'assembli a un flanc de baixada (linear phase en Anglès). Es pot observar un exemple de resposta asimètrica i una altra de simètrica en les seccions e i f de la Il·lustració 2.



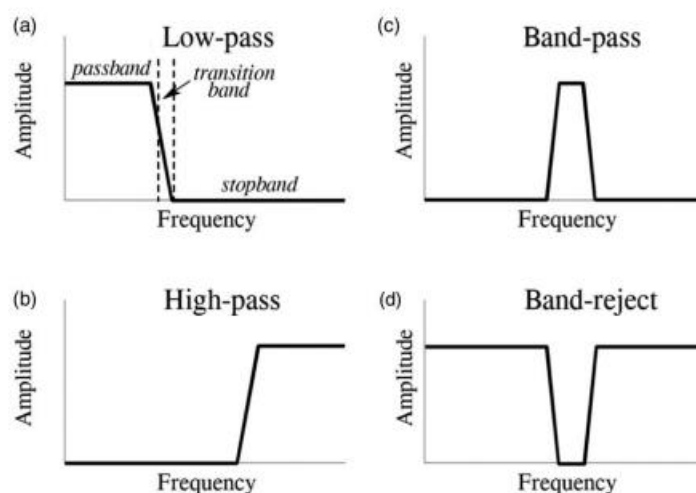
Il·lustració 2. Respostes temporals d'un filtre [3].

Respecte al domini de la freqüència, podem classificar els filtres segons els següents tipus:

- Filtres passa-baixos, aquests filtres permeten passar senyals amb una freqüència

menor que la de tall. Aquest tipus de filtre es pot veure en la secció a de la II·lustració 3.

- Filtres passa-banda, permeten passar senyals entre dos intervals de freqüència. Aquest tipus de filtre es pot veure en la secció c de la II·lustració 3.
- Filtres passa-alts, permeten el pas d'altres freqüències. Aquest tipus de filtre es pot veure en la secció b de la II·lustració 3.
- Filtre elimina-banda, és el filtre complementari al passa-banda, és a dir, impedeix el pas a senyals entre dos intervals de freqüència. Aquest tipus de filtre es pot veure en la secció d de la II·lustració 3.



II·lustració 3. Respostes freqüencials d'un filtre [3]

D'acord amb la classificació dels filtres, a la Taula 3 hi trobem un exemple de cada tipus:

	Convolution (FIR)	Recursion (IIR)
Time Domain	Moving average	Single Pole
Frequency Domain	Windowed-Sine	Chebyshev
Custom	FIR Custom	Iterative design

Taula 3. Exemples de cada tipus de filtre [3]

D'aquests filtres, els més interessants per al nostre projecte, són els de domini temporal.

De filtres de tipus Moving average tenim els següents:

- Simple Moving average
- Cumulative Moving Average
- Weighted moving average (si s'utilitza recursivament es pot considerar un filtre de tipus IIR).
- Exponentially weighted Moving Average.

Els filtres Simple moving average i Single pole son especialment interessants a causa de la seva simplicitat i bons resultats. Informació addicional sobre el filtrat digital de senyals es pot trobar en [3].

3. Adquisició i processat del senyal

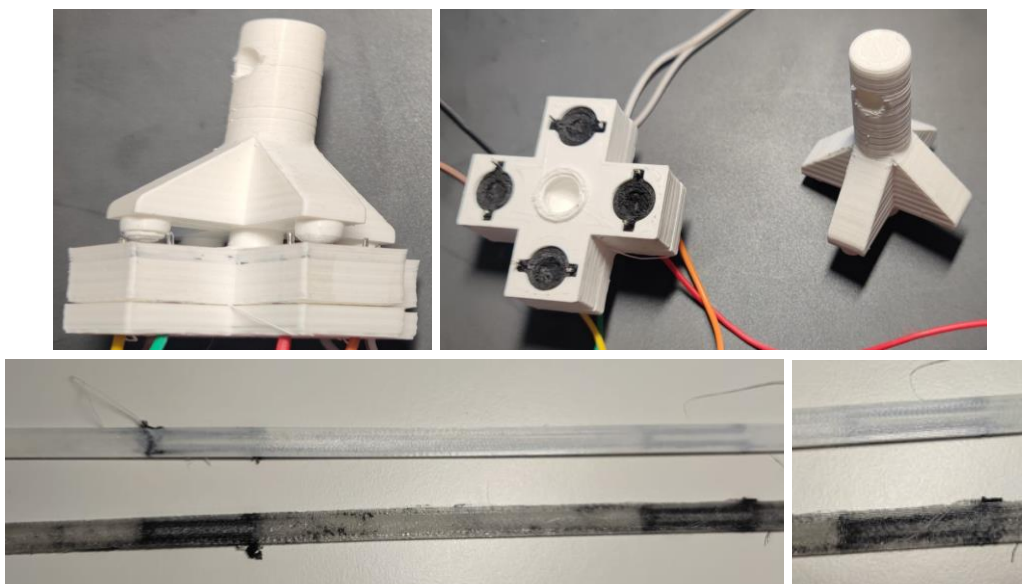
En aquesta secció es defineixen els diferents components emprats per a l'adquisició i preprocessat del senyal vistos des de l'element sensor fins a l'ADC amb què es llegirà el senyal un cop preprocessat.

3.1. Element Sensor

En el projecte s'empraran principalment dos tipus diferents de sensors, un de tipus cinta i un de tipus joystick. A la Il·lustració 4 hi trobem imatges dels dos tipus de sensors. Aquests sensors estan fabricats mitjançant impressores 3d multimaterial (tenen dos o més extrusors), ja que cada sensor està compost principalment per dos tipus de materials diferents:

- Un dels materials serveix de suport sobre el qual s'imprimirà la galga extensomètrica. Pot ser de TPU o PLA.
- L'altre material, el Filaflex Conductiu és un filament de TPU conductor de l'electricitat amb una resistència de $3,9\Omega\text{-cm}$.

El principi de funcionament del sensor es basa en la variació de la resistència en funció de la força que s'hi aplica. Com que aquest principi no canvia en funció del disseny del sensor, la mateixa arquitectura que s'usi en aquests dos sensors es pot utilitzar en qualsevol altre disseny que empri aquests dos materials.

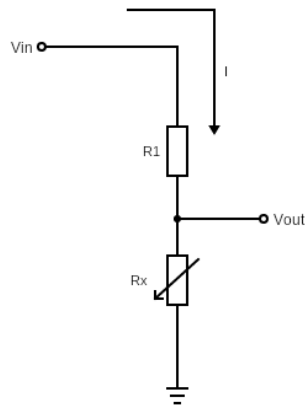


Il·lustració 4. Imatge del Joystick complet (a dalt a l'esquerra), components del joystick (a dalt a la dreta), cintes de PLA i de TPU (a baix a l'esquerra) i detall de l'element sensor (a baix a la dreta)

3.2. Circuit per llegir resistències

3.2.1. Divisor de tensió

El circuit més senzill per a mesurar una resistència és mitjançant un divisor de tensió com el de la Il·lustració 5. En aquest circuit, una tensió d'alimentació es reparteix entre dues o més impedàncies en sèrie.



Il·lustració 5. Esquema d'un divisor de tensió

Segons la llei d'Ohm:

$$V_{in} = I \cdot R_{equivalent} \quad [1]$$

Aquesta equació es pot reescriure com a:

$$I = \frac{V_{in}}{R_{equivalent}} = \frac{V_{in}}{R_1 + R_x} \quad [2]$$

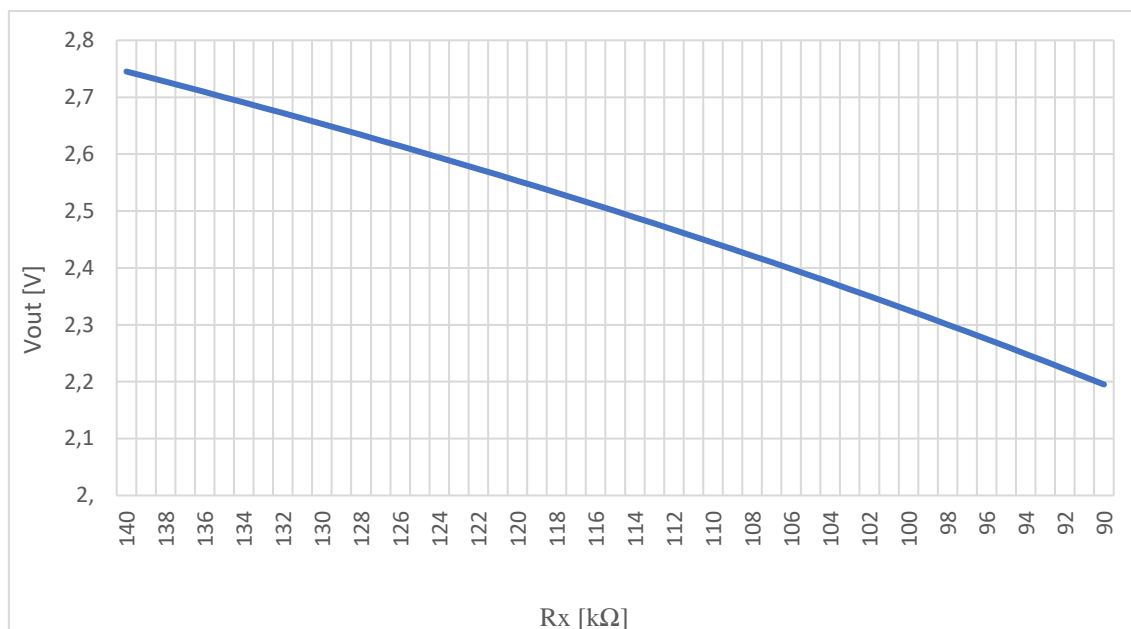
Emprant altre cop la llei d'ohm per a V_{out} s'obté:

$$V_{out} = I \cdot R_x \quad [3]$$

Substituint en l'equació anterior la intensitat calculada en [2] obtenim:

$$V_{out} = \frac{V_{in}}{R_1 + R_x} \cdot R_x \quad [4]$$

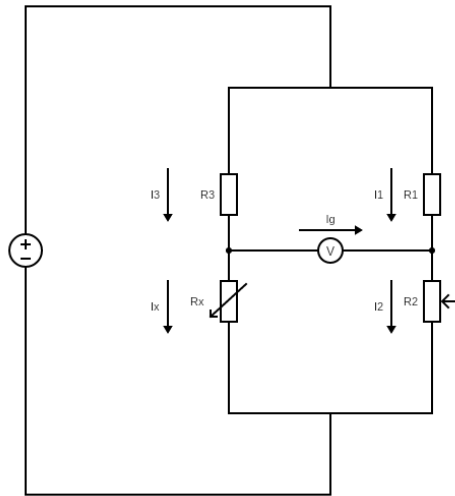
Si s'escull un R_1 a la meitat del rang de variació de R_x , obtenim un voltatge proporcional a la resistència del sensor emprat en el control com per exemple el de la Il·lustració 6.



Il·lustració 6. Comportament teòric del divisor de tensió en funció d'una resistència variable amb una referència de 5 Volts

Com es pot observar, V_{out} està centrat entorn de la meitat del voltatge d'entrada. I mai podrà tenir valors negatius. Donat que en els següents passos s'utilitzen amplificadors operacionals que tenen un rang de funcionament de $-V_{cc}$ a $+V_{cc}$ (on V_{cc} és el voltatge d'alimentació) ens interessa centrar V_{out} a 0V. Per a poder fer-ho s'emprarà un pont de Wheatstone.

3.2.2. Pont de Wheatstone



Il·lustració 7. Esquema d'un pont de Wheatstone [2].

El pont de Wheatstone és un circuit molt emprat per a la mesura de resistències. Està compost per dos divisors de tensió en paral·lel amb un voltímetre que mesura la tensió entre el punt mig de cada divisor, tal com es pot observar en la Il·lustració 7. Quan el voltatge mesurat pel voltímetre (V_g) és 0, es diu que el pont està equilibrat.

Emprant l'equació [4] per a cada branca del pont de Wheatstone, tenim que:

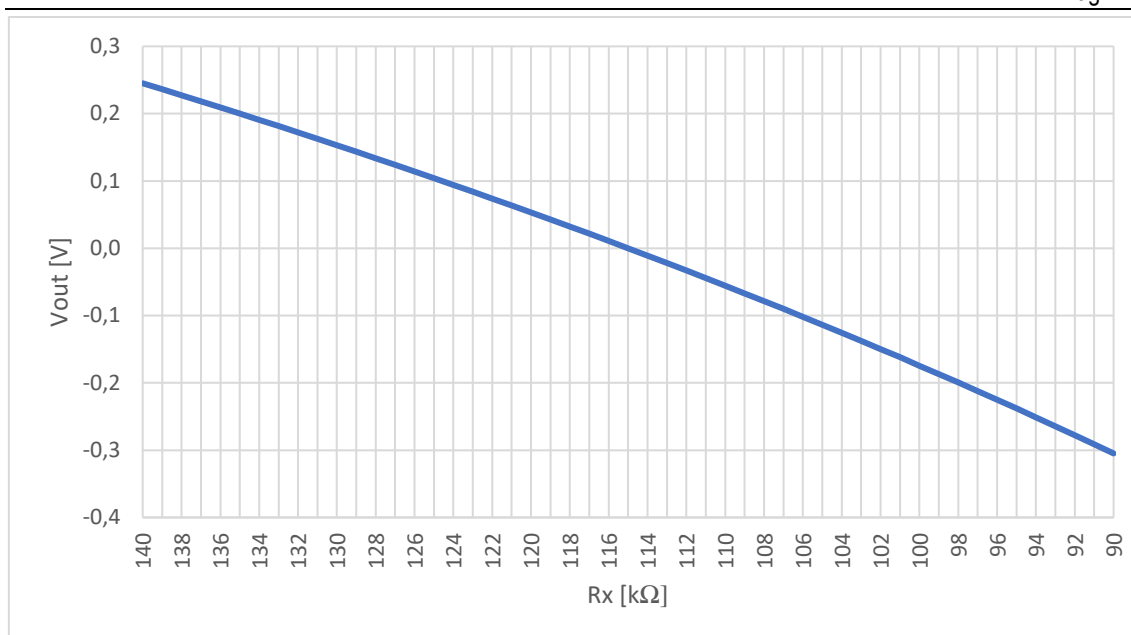
$$V_{R2} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{in} \quad [5]$$

$$V_{Rx} = \frac{R_x}{R_3 + R_x} \cdot V_{in} \quad [6]$$

Finalment, per al voltatge mesurat pel voltímetre tenim que:

$$V_g = \left(\frac{R_x}{R_3 + R_x} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \cdot V_{in} \quad [7]$$

Com s'ha comentat anteriorment, gràcies al pont de Wheatstone podem equilibrar el pont entorn de 0V quan el sensor es trobi en repòs (sense cap força aplicada). Això es pot aconseguir ajustant el potenciòmetre R_2 i permetrà aprofitar tot el rang dels amplificadors operacionals. Tal com es pot veure a la Il·lustració 8:



Il·lustració 8. Comportament teòric del pont de Wheatstone en funció d'una resistència variable amb una referència de 5 Volts

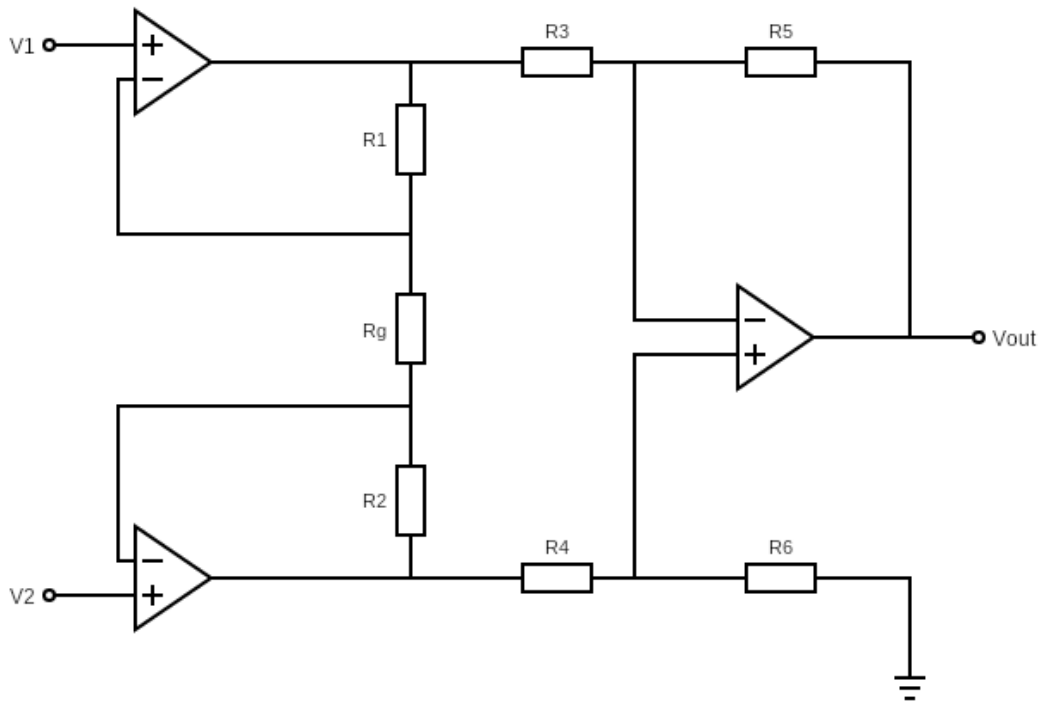
Informació addicional sobre els ponts de Wheatstone es pot trobar en [2].

3.3. Circuit per amplificar el Voltatge mesurat

Donat que el voltatge obtingut pel circuit per mesurar el senyal és bastant reduït (menys de 0,7V de diferència entre el màxim i el mínim) i considerant que ens interessa poder generar un senyal de control analògic (que pugui variar de 0 a 100%), s'intentarà aprofitar el màxim possible el rang dels ADC que s'utilitzarà. Per aquest motiu, s'amplificarà el senyal mitjançant amplificadors d'instrumentació.

Un amplificador d'instrumentació és emprat per a amplificar senyals de molt baix nivell tals com els batecs d'un cor, terratrèmols, lectures de galgues extensomètriques, etc. Un avantatge d'aquest tipus d'amplificadors és que té un alt CMRR (Common mode rejection ratio), que és la mètrica que indica l'habilitat d'un amplificador per a rebutjar senyals de mode comú (és a dir aquells que apareixen simultàniament en les dues entrades de l'amplificador). Aquesta propietat permet reduir el soroll causat per la font d'alimentació del circuit o a interferències electromagnètiques en el cable usat per transportar el senyal (entre d'altres).

L'amplificador d'instrumentació està compost per tres amplificadors operacionals, 6 resistències fixes i una que es podrà canviar fàcilment (cosa que permetrà ajustar el guany de l'amplificador d'instrumentació) tal com es pot observar en la Il·lustració 9.

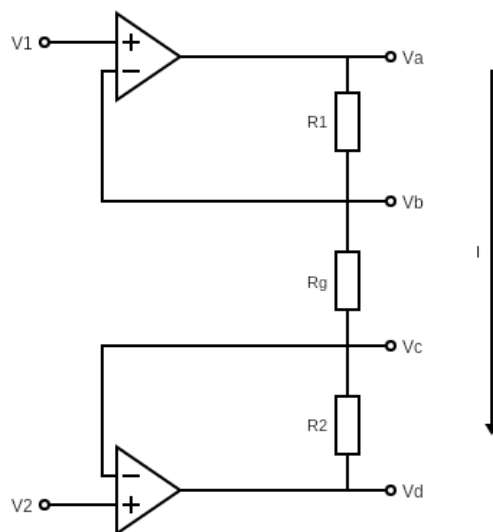


Il·lustració 9. Esquema d'un amplificador d'instrumentació [4]

Per tal d'analitzar el circuit, és convenient dividir-lo entre l'etapa d'entrada i la de sortida.

3.3.1. Etapa d'entrada:

La part corresponent a l'etapa d'entrada del circuit es pot veure en la Il·lustració 10:



Il·lustració 10. Etapa d'entrada d'un amplificador d'instrumentació

Donant que la impedància d'entrada dels amplificadors operacionals és molt elevada, es considera que la intensitat entre la pota inversora (-) i la no inversora (+) és 0. És per això que es pot considerar que $V_b = V_1$ i $V_c = V_2$. Per tant, aplicant la llei d'ohm tenim que:

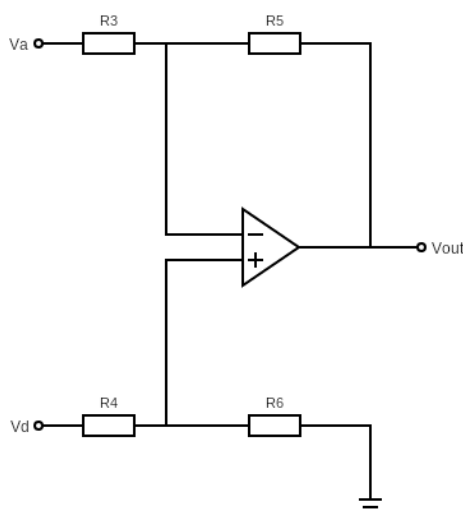
$$I = \frac{V_1 - V_2}{R_g} \quad [8]$$

A més, aplicant la llei d'ohm entre V_a i V_d tenim que:

$$I = \frac{V_a - V_d}{R_1 + R_g + R_2} \quad [9]$$

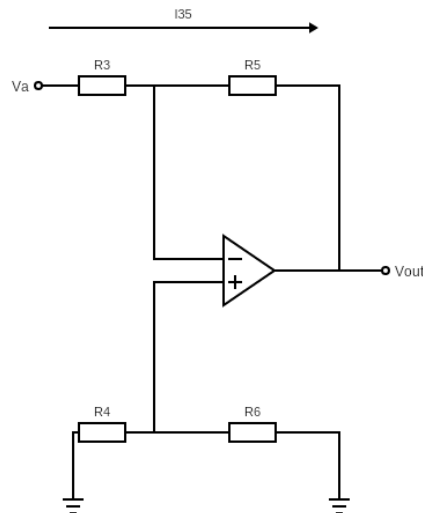
3.3.2. Etapa de sortida:

La part corresponent a l'etapa de sortida del circuit es pot veure en la Il·lustració 11.



Il·lustració 11. Etapa de sortida d'un amplificador d'instrumentació

Per tal d'analitzar-la aplicarem el principi de superposició primer equiparant V_d a 0 com es mostra en la Il·lustració 12:



Il·lustració 12. Etapa de sortida d'un amplificador d'instrumentació aplicant superposició amb $V_d = 0$

Aplicant la llei d'ohm:

$$I = \frac{V_a - V_-}{R_3} \quad [10]$$

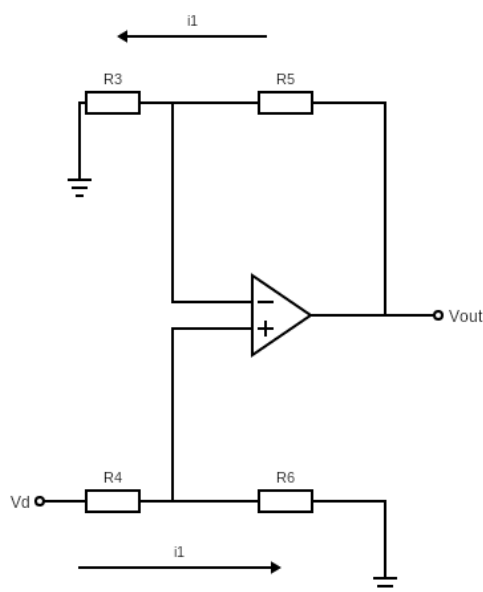
A més:

$$I = \frac{V_- - V_{out}}{R_5} \quad [11]$$

Donat que $V_- = V_+$ i que $V_+ = 0$ (ja que l'elevada impedància d'entrada impedeix que hi hagi flux de corrent entre les potes d'entrada de l'amplificador operacional):

$$\frac{V_a}{R_3} = \frac{-V_{out}}{R_5} \quad [12]$$

Aplicant ara $V_a = 0$ com es mostra en la Il·lustració 13:



Il·lustració 13. Etapa de sortida d'un amplificador d'instrumentació aplicant superposició amb $V_a = 0$

Donat que $V_- = V_+$ i aplicant les equacions d'un divisor de tensió, tenim:

$$V_- = \frac{R_6}{R_4 + R_6} \cdot V_d \quad [13]$$

Aplicant la llei d'ohm:

$$\frac{V_-}{R_3} = \frac{V_{out} - V_-}{R_5} \quad [14]$$

$$\frac{V_-}{R_3} = \frac{V_{out}}{R_5} - \frac{V_-}{R_5} \rightarrow V_{out} = \frac{R_5 + R_3}{R_3} \cdot V_- \quad [15]$$

Substituint V_- pel resultat de l'equació [13] tenim:

$$V_{out} = \left(\frac{R_3 + R_5}{R_3} \right) \cdot \left(\frac{R_6}{R_4 + R_6} \right) \cdot V_d \quad [16]$$

Unint les equacions obtingudes mitjançant el principi de superposició ([12] i [16]), s'obté:

$$V_{out} = -\frac{R_5}{R_3} \cdot V_a + \left(\frac{R_3 + R_5}{R_3} \right) \cdot \left(\frac{R_6}{R_4 + R_6} \right) \cdot V_d \quad [17]$$

Si escollim els resistors de manera que $R_3 = R_4$ i $R_5 = R_6$:

$$V_{out} = \frac{R_5}{R_3} \cdot (-V_a + V_d) \quad [18]$$

De les equacions ([8] i [9]), tenim:

$$V_d - V_a = \frac{R_1 + R_g + R_2}{R_g} \cdot (V_2 - V_1) \quad [19]$$

Finalment, combinant les equacions ([18] i [19]), tenim:

$$V_{out} = \frac{R_5}{R_3} \cdot \frac{R_1 + R_g + R_2}{R_g} \cdot (V_2 - V_1) \quad [20]$$

Si a més s'escullen els resistors de manera que $R_1 = R_2$ i $R_3 = R_5$ s'obté:

$$V_{out} = \frac{2R_1 + R_g}{R_g} \cdot (V_2 - V_1) = \left(1 + \frac{2 \cdot R_1}{R_g}\right) \cdot (V_2 - V_1) \quad [21]$$

Per a simplificar el circuit, s'ha escollit resistors de $10k\Omega$, per tant, l'equació de l'amplificador d'instrumentació quedarà:

$$V_{out} = \left(1 + \frac{20K}{R_g}\right) \cdot (V_2 - V_1) \quad [22]$$

I el factor d'amplificació es calcularà:

$$A_v = \left(1 + \frac{20K}{R_g}\right) \quad [23]$$

Informació addicional dels amplificadors d'instrumentació pot trobar-se en [4].

3.4. ADC

Per fer el present projecte, s'emprarà l'ADC-10-F103C, ja que és compacte i compatible amb tots els ordinadors, a més, és molt senzill d'utilitzar (només cal connectar-lo al port USB i ja es poden llegir dades). A més com que la plataforma d'ajuda a la mobilitat real no usará un ordinador, es compararà el funcionament d'aquest ADC amb l'Arduino (que a diferència de l'ADC-10-F103C) pot executar codi i, per tant, pot servir tant d'ADC com de controlador.

3.4.1. ADC-10-F103C



Il·lustració 14. ADC-10-F103C [5]

El dispositiu, que es pot veure en la Il·lustració 14, té una freqüència de mostreig de 2Hz (com a mínim es pot llegir el valor del voltatge cada 0.5 segons). Disposa de 10 entrades analògiques que poden llegir voltatges en el rang 0-3.3V. La seva resolució és de 12bits, per tant, es podran llegir 4096 diferents nivells de voltatge. Com que el voltatge de referència és de 3.3 volts la seva resolució és de 0,8 mV. Tota la informació disponible d'aquest dispositiu es troba en [5].

3.4.2. Arduino UNO R3.

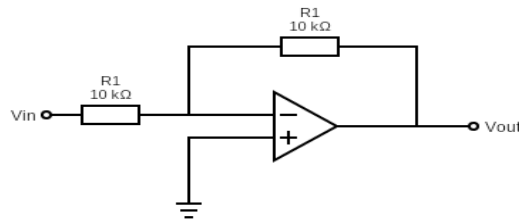


Il·lustració 15. Arduino UNO R3 [6]

El microcontrolador, que es pot veure en la Il·lustració 15, té una freqüència de mostreig de fins a 400kHz (és a dir com a mínim es pot llegir el valor del voltatge cada 2.5 μ s. Disposa de 5 entrades digitals que poden llegir en el rang 0-5V o 0-3.3V. La seva resolució de 10bits (1024 diferents nivells de voltatge) permeten llegir amb una resolució de 3,2 mV en el rang de 0 a 3.3V. Tota la informació disponible sobre aquesta placa de microcontrolador es troba en [6].

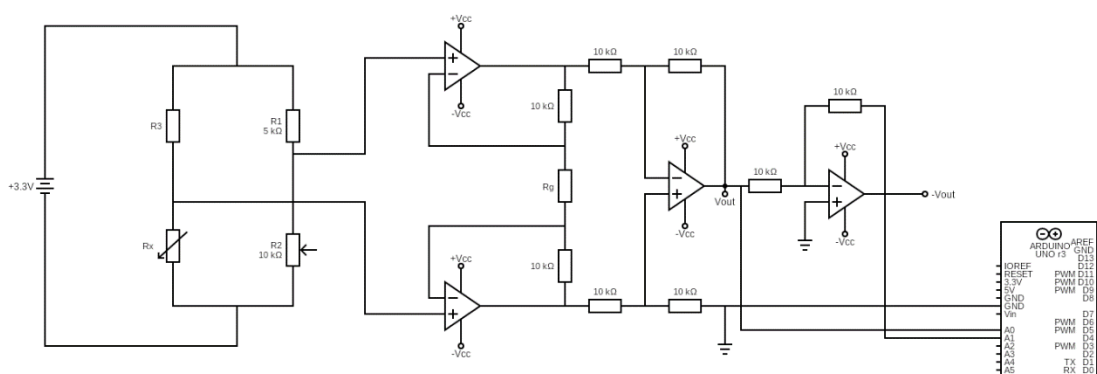
3.5. Circuit complet

Cap dels dos ADC pot llegir voltatges negatius, per tant, s'emprarà un amplificador inversor de guany 1 com el de la Il·lustració 16.



Il·lustració 16. Circuit d'un amplificador inversor

On $V_{out} = -V_{in}$. Per a poder llegir voltatges negatius, per tant, s'emparan dues entrades de l'ADC una per a poder llegir el voltatge V_{in} i l'altre per a llegir el voltatge invertit (V_{out}). En conseqüència, el circuit complet és el que es pot veure en la Il·lustració 17.



Il·lustració 17. Circuit complet

l'equació completa del circuit és:

$$V_{out} = \left(1 + \frac{20000}{R_g}\right) \cdot \left(\frac{R_x}{R_3 + R_x} - \frac{R_2}{R_1 + R_2}\right) \cdot V_{in} \quad [24]$$

Pel que fa a la selecció de les resistències, R_2 és un potenciòmetre de 10kΩ que servirà per ajustar el 0 en les condicions d'equilibri. R_1 és una resistència que se situarà a la meitat del rang del potenciòmetre (5,1kΩ ja que és la resistència de què es disposa). R_x és la resistència del sensor i per últim R_3 se situarà a la meitat del rang del sensor (que s'haurà de determinar amb un òhmmetre).

Resistència	R ₁	R ₂	R ₃	R _x	R _g
Valor	5kΩ	Variable (fins a 10kΩ)	A la meitat del rang de R _x	Variable en funció de la força aplicada	Escollida experimentalment

Taula 4. Selecció de resistències per l'amplificador d'instrumentació

La resistència R_g s'escollirà experimentalment en funció del guany requerit per tal d'aprofitar al màxim el rang de lectura de l'ADC (0-3.3V). El resum de totes aquestes resistències es troba en la Taula 4. Per comoditat i per simplificar les equacions, la resta de resistències s'han fixat a 10kΩ.

Aquest mateix circuit serà vàlid per tots dos ADC.

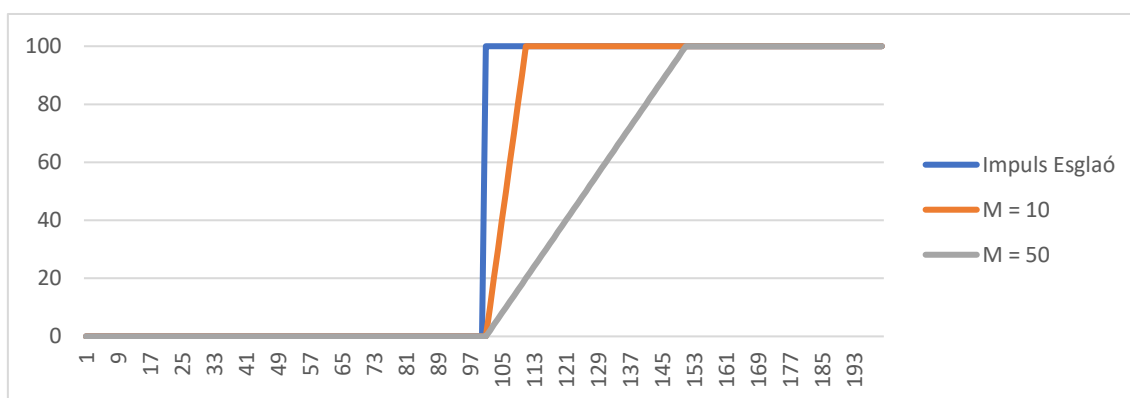
3.6. Filtratge del senyal

Tant el senyal amplificat com el normal mostren un alt nivell de soroll, per tant, s'ha hagut d'emprar un filtre. A l'hora d'escollir el filtre a utilitzar, s'han tingut en compte dos tipus. El moving average (mitjana desplaçada) i el Single-Pole Filter (filtre d'un sol pol).

3.6.1. Moving Average

Un filtre moving average és aquell on per obtenir el senyal processat s'aplica una mitjana no ponderada sobre un conjunt de valors previs, aquest filtre és de tipus FIR (Finite impulse response) on només es consideren les entrades. L'equació del filtre Moving average és la següent:

$$y(k) = \frac{1}{M} \cdot \sum_{i=0}^M x[k - i] \quad [25]$$



Il·lustració 18. Resposta a un impuls esglaó a un filtre de tipus Moving Average

Com es pot observar en la Il·lustració 18, el temps que triga el filtre a arribar al valor final de l'impuls esglaió depèn molt del nombre de mostres que es fa servir i, per tant, convindrà ajustar-lo bé perquè el control no tingui una resposta excessivament lenta.

Com a Avantatges d'aquest filtre, destaquen:

- La seva simplicitat a l'hora de programar-lo.
- És inherentment estable (sempre acaba convergint al valor real).
- No requereix retroalimentació, en conseqüència, els errors d'aproximació no es van sumant a cada iteració.

El desavantatge principal és que com més mostres s'emprin, més augmenta el temps de computació.

El codi emprat per al filtre és el següent:

```
def filtrarVoltatge(ValorLlegit, Array, Index, numLectures):

    Array[Index] = ValorLlegit #Les N Mostres es guarden en un array
    Index = Index + 1 #Es mou l'index 1 posició

    #Si l'index es major al màxim nombre de lectures es reinicia a 0
    if (Index >= numLectures):
        Index = 0

    #Es defineix la variable total i se suma tots els valors
    # emmagatzemats en l'array
    Total = 0.0
    for i in Array:
        Total = Total + i

    #Es calcula la mitjana de tots els valors del array
    Avg = Total/numLectures

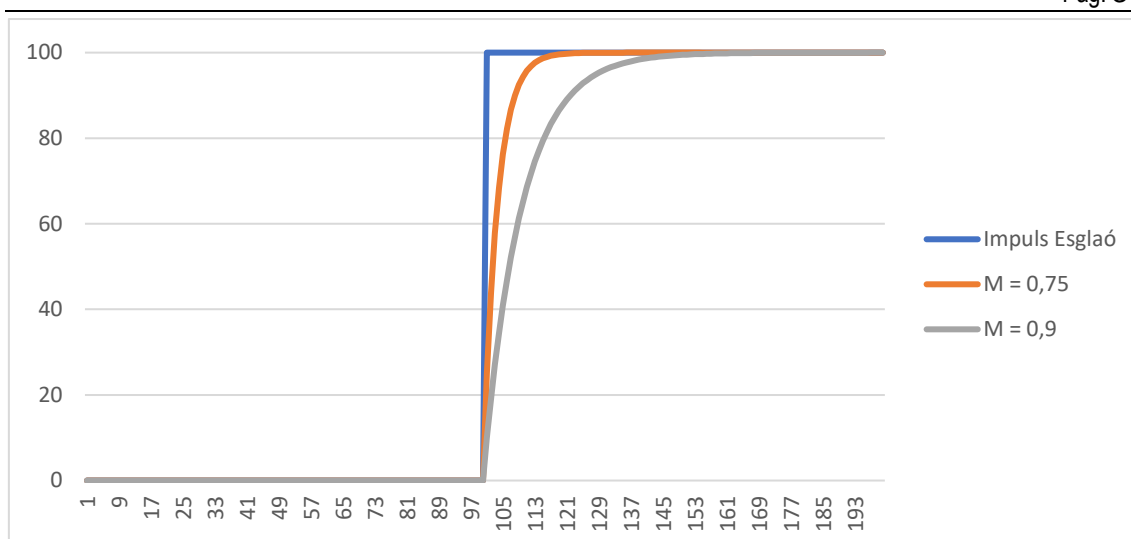
    #Es retornen les dades en una variable de tipus filtratge
    ValorFiltrat = Filtratge(Array, Index, Avg)
    return ValorFiltrat
```

3.6.2. Single-Pole

Aquest filtre és de tipus IIR (Infinite Impulse Response), per tant, és de tipus recursiu (la sortida del filtre depèn tant de l'entrada com de la sortida anterior). L'equació del filtre d'un sol pol és la següent:

$$y_k = M \cdot x_k + (1 - M) \cdot y_{k-1} \quad [26]$$

On M (el pes de la sortida anterior) < 1.



II·lustració 19. Resposta a un impuls esglaó a un filtre de tipus single-pole

Com es pot observar en la II·lustració 19, el temps que triga en el filtre a arribar al valor final de l'impuls esglaó depèn del pes M.

Com a principal avantatge d'aquest filtre destaca que és molt eficient pel que fa al temps de computació.

Com a principal desavantatge, destaca que aquest filtre pot ser inestable.

El codi emprat per al filtre és el següent:

```
def filtrarVoltatge2(ValorLlegit, ValorAnterior, PesRecursiu):  
    #S'aplica la formula del filtre d'un sol pol  
    ValorActual = (PesRecursiu*ValorAnterior) + ((1-  
PesRecursiu)*ValorLlegit)  
    #Es retorna el valor filtrat  
    return ValorActual
```

4. Simulació de la plataforma d'ajuda a la mobilitat

Un cop s'ha decidit quin filtre es fa servir en el senyal, s'ha de poder comprovar que és factible controlar la cadira emprant el sensor. Donat que encara no s'ha fabricat, convindrà simular-la.

En aquesta secció s'especifica els passos necessaris per a poder implementar la simulació. S'ha separat en dues seccions segons si les tasques acomplertes corresponen a canvis en el model CAD que es disposa de la cadira o si corresponen al codi usat per a la simulació i comandament de la cadira..

4.1. Part Visual

Per a la simulació de la cadira, es parteix del model en format STL de la mateixa tal com el de la II·lustració 20:



II·lustració 20. Disseny de la plataforma d'ajuda a la mobilitat

El model CAD, s'ha escalat, ja que les unitats de l'eina que s'ha emprat per a crear-lo eren diferents de la que s'ha emprat per a editar-lo i de les emprades pel Gazebo. A més, cada element mòbil ha de estar en un arxiu independent per tal de poder-ne simular el moviment en Gazebo. És per això que s'ha separat les parts de la cadira següents:

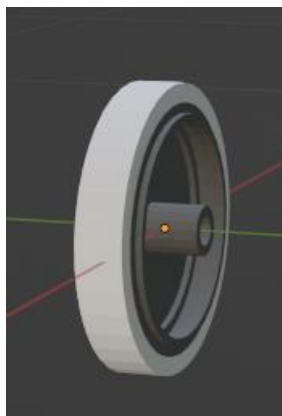
- La base, compon l'estructura de tota la cadira. (el model es pot veure en la II·lustració 21):



Il·lustració 21. Base de la cadira

L'origen d'ordenades de la base component s'ha situat en el centre de masses del model i, per tant, s'haurà de tenir en compte a l'hora d'acoblar tots els components en el simulador.

- La roda Motora, aquest element s'ha separat ja que ha de tenir rotació respecte la base (el model de la roda es pot veure en la Il·lustració 22):

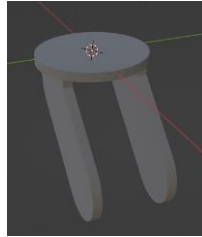


Il·lustració 22. Roda Motor

Aquesta peça també, s'ha centrat en el centre de masses del model.

- La base de la roda Caster (el model de la qual es pot veure en la Il·lustració 23):

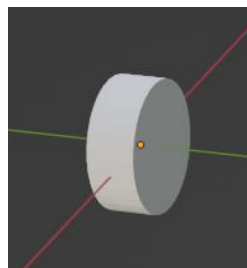
Donat que les rodes de tipus Caster poden girar sobre l'eix Z per tal de desplaçar-se en qualsevol de les direccions, també cal separar la base de la roda:



Il·lustració 23. Base de la roda Caster

En aquest cas, per tal de simplificar les transformacions, l'origen d'aquest disseny s'ha centrat sobre la superfície de rotació de la base.

- Roda Caster (el model de la qual es pot veure en la Il·lustració 24):



Il·lustració 24. Roda Caster

En aquest cas, l'origen torna a ser el centre de masses de la roda.

4.2. Codi de la simulació

Per tal d'implementar la simulació, el codi s'ha emmagatzemat a bitbucket cosa que gràcies al programari Git permet fer un bon control sobre les diferents versions del codi a mesura que es va modificant. La documentació associada a git, es troba en [7].

La documentació associada amb ROS, Gazebo i RVIZ es troba disponible a [8], [9] i [10] respectivament.

Amb l'objectiu de mantenir ben ordenat el codi, s'ha dividit en les següents carpetes:

```
+---cadera_de_rodas
  +---src
    +---cadera_control
      +---config
        control.yaml
      +---scripts
        ContatgeMinMax.py
        filtratge.py
        lecturaVoltatges.py
        main.py
        main_2.py
        menu.py
        settings.py
    +---cadera_descr
      +---meshes
        cadera.dae
        CasterBase.dae
        CasterRoda.dae
        Roda_Motor.dae
      +---urdf
        cadera.urdf.xacro
        caster.urdf.xacro
        rodaMotor.urdf.xacro
    +---cadera_vis
      +---launch
        cadera_vis.launch
```

4.2.1. Cadera_descr

El codi imprescindible per a la simulació es troba dintre de la subcarpeta `cadera_descr`. Aquesta subcarpeta, alhora conté les carpetes `meshes` (on s'inclou els fragments del model de la plataforma d'ajuda a la mobilitat que prèviament s'han exportat en format `.dae`) i `urdf`. És en aquesta última carpeta on s'haurà de definir les diferents relacions entre els models en 3d per tal que el simulador sigui capaç d'interpretar correctament el funcionament que el model ha de tenir.

Pel que fa a les relacions que han de tenir els elements, s'ha definit en format `xacro`, això permet que per a cada element repetit (2 rodes motores, 4 bases Caster i 4 rodes Caster) només s'ha de definir un sol fitxer `.xacro`.

Examinant el codi de `rodaMotor.urdf.xacro` es pot comprendre l'estructura bàsica que ha de tenir tot fitxer d'aquest tipus:

```

<?xml version="1.0"?>
<robot name="wheel" xmlns:xacro="http://ros.org/wiki/xacro" >

  <xacro:property name="roda_kp" value="600000" />
  <xacro:property name="roda_kd" value="3" />
  <xacro:property name="roda_mu1" value="10000000" />
  <xacro:property name="roda_mu2" value="10000000" />
  <xacro:property name="M_PI" value="3.14" />

  <xacro:macro name="wheel" params="wheel_prefix parent_link *joint_pose *axis">

    <!-- Wheel Link -->
    <link name="${wheel_prefix}_wheel_link">
      <inertial>
        <origin xyz="0 0 0"/>
        <mass value="0.50000000"/>
        <inertia ixx="0.00276879" ixy="-0.00000043" ixz="-0.00000140"
iyy="0.00520797" iyz="0.00000030" izz="0.00276862"/>
      </inertial>

      <visual>
        <origin xyz="0.0 0.0 0.0" rpy="0.0 0.0 0.0" />
        <geometry>
          <mesh filename="package://cadira_descr/meshes/Roda_Motor.dae" />
        </geometry>
      </visual>
      <collision>
        <origin xyz="0.0 0.0 0.0" rpy="0.0 0.0 0.0" />
        <geometry>
          <mesh filename="package://cadira_descr/meshes/Roda_Motor.dae" />
        </geometry>
      </collision>
    </link>

    <!-- Wheel Joint -->
    <joint name="${wheel_prefix}_wheel" type="continuous">
      <parent link="${parent_link}"/>
      <child link="${wheel_prefix}_wheel_link"/>
      <xacro:insert_block name="joint_pose"/>
      <xacro:insert_block name="axis"/>
      <dynamics damping="0.5" friction="100.0" />
    </joint>

    <gazebo reference="${wheel_prefix}_wheel_link">
      <mu1 value="${roda_mu1}"/>
      <mu2 value="${roda_mu2}"/>
      <kp>${roda_kp}</kp>
      <kd>${roda_kd}</kd>
      <dampingFactor>0.05</dampingFactor>
      <fdirl value="1 0 0"/>
    </gazebo>

    <transmission name="${wheel_prefix}_wheel_trans" type="SimpleTransmission">
      <type>transmission_interface/SimpleTransmission</type>
      <actuator name="${wheel_prefix}_wheel_motor">
        <mechanicalReduction>1</mechanicalReduction>
      </actuator>
      <joint name="${wheel_prefix}_wheel">
      </joint>
    </transmission>

  </xacro:macro>
</robot>

```

Principalment, hi trobem dues seccions:

- 1- variables internes de l'arxiu,
- 2- Definició de l'element que es repeteix.

Dintre d'aquesta última secció destaquen dos elements:

- Link: En aquest element es defineixen les parts rígides d'un robot que uneixen les diferents articulacions. En aquest cas el Link (eslavó) és la mateixa roda. En aquest element, s'ha de definir tres subseccions principals:
 - o Inertial: És on es defineixen les inèrcies, la massa i la posició del centre de masses respecte a l'articulació.
 - o Visual: És on es defineixen els components visuals, siguin figures geomètriques simples o models més complexos (com per exemple els emmagatzemats en la carpeta meshes). En aquest punt, la posició fa referència a la posició del centre del component visual respecte a l'articulació.
 - o Collision: És on es defineix l'element pel que fa a les col·lisions amb l'entorn. Aquí, l'element es sol definir igual que en la part visual tot i que es pot simplificar emprant figures geomètriques (cilindre en el cas de la roda per exemple).
- Joint: En aquest apartat es defineix tot el relatiu amb el moviment de l'articulació, com per exemple el coeficient de fricció i l'esmoreïment. Com que hi ha dues rodes, la posició de l'articulació respecte a la base de la cadira i la direcció de gir s'especifica com a variable d'entrada:

```
<xacro:insert_block name="joint_pose"/>  
<xacro:insert_block name="axis"/>
```

Al final de tot de l'arxiu hi ha codi que requereix gazebo i RVIZ per tal de poder simular el model.

L'arxiu caster.urdf.xacro està definit de manera similar. Però en aquest cas hi trobem dos eslavons i dues articulacions.

En l'arxiu cadira.urdf.xacro, hi trobem una estructura similar, amb l'afegit de la crida a les macros creades en els altres dos documents (amb les posicions definides com a variables d'entrada):

En l'inici del document s'inclouen els dos fitxers previs.

```
<xacro:include filename="$(find cadira_desc)/urdf/rodaMotor.urdf.xacro" />  
<xacro:include filename="$(find cadira_desc)/urdf/caster.urdf.xacro" />
```

A sota de la definició de la base s'inclou la crida a les macros amb la posició exacta de l'articulació respecte a la base (origin) i la direcció del moviment (axis):

```

<xacro:wheel wheel_prefix="left" parent_link="base_link" >
  <origin xyz=" -0.13593 -0.30801 -0.56371" rpy="0 0 0" />
  <axis xyz="0 1 0" rpy="0 0 0" />
</xacro:wheel>

<xacro:wheel wheel_prefix="right" parent_link="base_link" >
  <origin xyz=" -0.13593 0.30801 -0.56371" rpy="0 0 ${M_PI}" />
  <axis xyz="0 -1 0" rpy="0 0 0" />
</xacro:wheel>

<xacro:caster caster_prefix="BL" parent_link="base_link" >
  <origin xyz=" 0.35453 -0.30182 -0.54571" rpy="0 0 0" />
</xacro:caster>

<xacro:caster caster_prefix="BR" parent_link="base_link" >
  <origin xyz=" 0.35453 0.30182 -0.54571" rpy="0 0 0" />
</xacro:caster>

<xacro:caster caster_prefix="FL" parent_link="base_link" >
  <origin xyz=" -0.54547 -0.30182 -0.54571" rpy="0 0 0" />
</xacro:caster>

<xacro:caster caster_prefix="FR" parent_link="base_link" >
  <origin xyz=" -0.54547 0.30182 -0.54571" rpy="0 0 0" />
</xacro:caster>

```

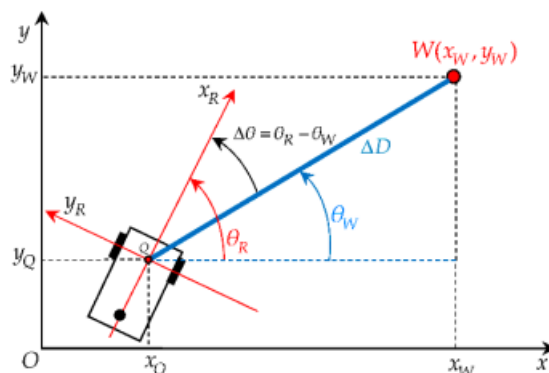
4.2.2. Cadira_control

En aquesta carpeta hi trobem dues subcarpetes:

4.2.2.1. Config

En aquesta carpeta hi tenim l'arxiu control.yaml. Aquest arxiu permet la inicialització d'un node en ROS que publicarà a les rodes motores la velocitat angular que han de mantenir per tal de complir una consigna de velocitat lineal (endavant-endarrere) i una de velocitat angular (rotació esquerra-dreta), aquestes consignes provindran dels sensors emprats en el projecte.

Aquest node considera la cadira com un robot diferencial (ja que només té dues rodes motores cap de les quals gira entorn de l'eix Z, el vertical) com el de la Il·lustració 25:



Il·lustració 25. Model d'un robot diferencial [11]

On la velocitat lineal i angular del robot compleixen les següents equacions:

$$v = \frac{1}{2}(v_r + v_l) \quad [27]$$

$$\dot{\theta} = \frac{1}{b} \cdot (v_r - v_l) \quad [28]$$

On b és la separació entre rodes, v_r és la velocitat tangencial de la roda dreta i v_l és la velocitat tangencial de la roda esquerra.

4.2.2.2. Scripts

En aquesta carpeta, es troba el codi emprat en la lectura i processament del senyal de cada sensor.

Donat que per poder emprar els sensors s'ha de calibrar el pont de Wheatstone i ajustar-lo a 0, i obtenir les lectures de nivell màxim i mínim que es pot llegir (per a cada sensor) s'ha creat un menú com el de la Il·lustració 26 per a poder executar cadascuna d'aquestes tasques:

```

Menu:
A) Iniciar el control
E) Equilibrar Pont
Md) Actualitzar Màxim
Me) Actualitzar Míxim
Q) Sortir
md) Actualitzar Mínim
me) Actualitzar Míxim
Escollir Acció
  
```

Il·lustració 26. Menú utilitzat per al control

- La funció Equilibrar el pont permet visualitzar el voltatge actual a cada sensor per tal de poder-lo situar en 0.
- Les funcions Md i Me, permeten emmagatzemar el valor resultant d'aplicar el

- màxim de força (que serà el mínim de resistència i per tant de voltatge) sobre el sensor dret i esquerra respectivament en el cas que només s'utilitzin dos sensors.
- Les funcions md i me, permeten emmagatzemar el mínim de força (que serà el màxim de resistència i per tant de voltatge) sobre el sensor dret i esquerra respectivament en el cas que només s'usin dos sensors.
 - La funció Iniciar el control executa un Publisher en ROS que envia la consigna calculada mitjançant els sensors.

Totes aquestes funcionalitats es troben fragmentades en diferents subcodis.

4.2.2.2.1 Main/Main_2:

En aquests arxius es troba la part principal del codi, on es llegeixen les dades dels sensors (2 en el cas de les cintes i 4 en el cas del joystick) obtingudes pel port sèrie de l'ADC i es filtren.

En cas d'haver seleccionat la funció activar el control del menú, també es calcula la consigna angular i lineal d'acord amb els valors filtrats i als màxims i mínims calculats. Per a fer-ho, s'aplica la següent fórmula:

$$V_{control} = \left(\frac{V_{min} - V_{Filtrat}}{V_{min} - V_{max}} \right) \cdot 2 \quad [29]$$

$V_{control}$ es multiplica per 2, ja que es considera que la velocitat màxima és 2m/s i, per tant, el 100% es considerarà 2m/s.

Un cop fet això, al valor resultant de $V_{control}$ s'hi imposa un valor màxim de 2 m/s i un mínim de 0 m/s. Això evitarà errors en cas que els valors màxims i mínims no hagin estat calibrats prou bé i impedirà que la histèresi dels sensors ens portin a valors fora del rang permès (a l'hora d'escollir el màxim i el mínim s'haurà de tenir en compte el comportament del sensor pel que fa a la histèresi per tal que aquesta no afecti).

Després s'aplicarà les equacions [27] i [28] per tal d'obtenir les consignes en termes de velocitat lineal i angular.

Finalment, s'inicia el node que ha de publicar aquestes consignes al controlador de velocitat de les rodes.

Aquestes funcions corresponen a la següent part del codi:

```

        VcontrolE = ((settings.VminEsq-
settings.VgalgaEsquerra)/(settings.VminEsq-settings.VmaxEsq)) * 2
        VcontrolD = ((settings.VminDret-
settings.VgalgaDreta)/(settings.VminDret-settings.VmaxDret)) * 2

        VclampedE = sorted((0.0, VcontrolE, 2.0))[1]
        VclampedD = sorted((0.0, VcontrolD, 2.0))[1]

        Vel = -(VclampedD + VclampedE)/2.0
        Ang = (-VclampedD + VclampedE)/0.62524

        print(Vel, ";", Ang, ";", settings.VgalgaEsquerra, ";",
settings.VgalgaDreta)

        pub = rospy.Publisher('/velocity_controller/cmd_vel',
Twist, queue_size=1)
        rospy.init_node('controller')
        rate = rospy.Rate(10) # 10hz
        move_cmd.linear.x = float(Vel)
        if (abs(Ang)>0.5):
            move_cmd.angular.z = float(Ang)
        else:
            move_cmd.angular.z = 0.0
        pub.publish(move_cmd)

        try:
            rate.sleep()

        except rospy.ROSInterruptException:
            pass

```

4.2.2.2 Settings

Aquest arxiu simplement serveix per a inicialitzar les variables globals.

4.2.2.3 Menú

Aquesta funció serveix per crear el menú per escollir quina funció s'aplica.

4.2.2.4 LecturaVoltatges

Aquesta funció processa les dades llegides de l'ADC en la funció main. Aquestes dades són de tipus string i hi ha els voltatges de totes les entrades de l'ADC. Convé doncs separar-les i convertir-les a variables de tipus float.

4.2.2.5 Filtratge

Aquest fitxer defineix la classe filtratge i s'hi troba la funció per aplicar el filtre.

4.2.2.2.6 ContatgeMinMax

Aquesta funció serveix per a emmagatzemar els valors màxims i mínims dels voltatges dels sensors.

Els codis complets es poden trobar en el repositori de bitbucket amb la explicació del funcionament comentada en ells:

https://ferranfb@bitbucket.org/ferranfb/cadira_de_rodas.git

4.2.3. Cadira_vis

En aquesta carpeta, principalment s'hi troba l'arxiu `cadira_viz.launch`. Igual que els arxius `.xacro`, aquest document també té el format xml. El fitxer, permet iniciar ROS, cridar un món buit en gazebo (1) i inicialitzar tant el model de la plataforma d'ajuda a la mobilitat com el controlador de velocitat (2).

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<launch>
  <arg name="paused" default="false"/>
  <arg name="use_sim_time" default="true"/>
  <arg name="robot_namespace" default="/" />

  <include file="$(find gazebo_ros)/launch/empty_world.launch">
    <arg name="paused" value="$(arg paused)"/>
    <arg name="use_sim_time" value="$(arg use_sim_time)"/>
    <arg name="gui" value="true"/>
    <arg name="headless" value="false"/>
    <arg name="debug" value="false"/>
    <arg name="verbose" default="false"/>
    <arg name="gui_required" value="true"/>
  </include>

  <group ns="$(arg robot_namespace)">

    <param name="robot_description" command="$(find xacro)/xacro '$(find
cadira_description)/urdf/cadira.urdf.xacro' --inorder robot_namespace:=$(arg
robot_namespace)" />

    <node name="cadira_spawn" pkg="gazebo_ros" type="spawn_model" output="screen"
args="
      -z 0.0
      -urdf -param robot_description
      -model $(arg robot_namespace)" />

    <rosparam command="load" file="$(find cadira_control)/config/control.yaml" />

    <node name="base_controller_spawner" pkg="controller_manager" type="spawner"
args="
      joint_state_controller
      velocity_controller
      "/>

    <node name="robot_state_publisher" pkg="robot_state_publisher"
type="robot_state_publisher">
    </node>

  </group>
</launch>
```

5. Pla d'experimentació

Pel que fa a la forma en la qual s'ha conduït l'experimentació, es pot dividir en els dos apartats principals del projecte, la lectura i processament del senyal de control, i la simulació de la plataforma d'ajuda a la mobilitat.

5.1. Lectura i processament del senyal de control

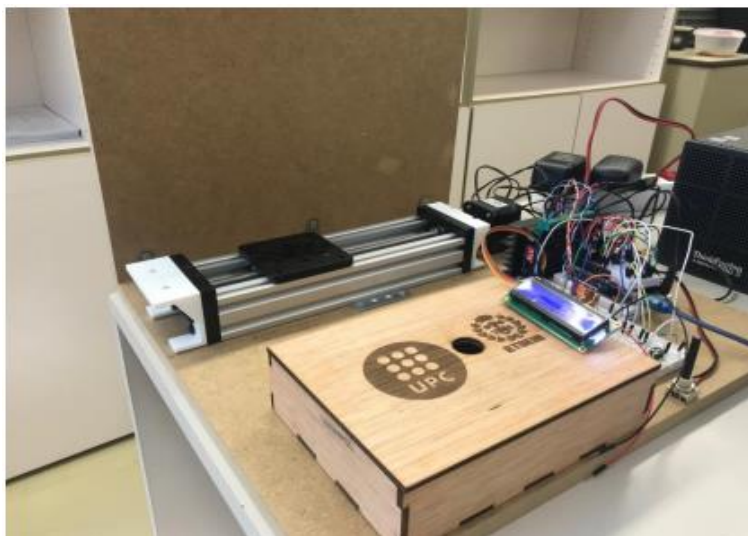
En aquest apartat s'han realitzat tres experiments relacionats amb la lectura i processament del senyal de control com els de la Taula 5.

	Metodologia	Objectiu	Indicadors	Sensors Emprats
Exp 1	Cicles d'estirada- relaxació de les cintes en un banc d'assaig.	Modelar el comportament a respostes mecàniques dels sensors.	S'ha trobat algun model representatiu i raonable dels sensors?	11 sensors de tipus cinta
Exp 2	Aplicar diferents filtres sobre les lectures dels sensors.	Veure el grau de retard generat a cada filtre en funció de diferents paràmetres per tal d'escollir el que funcioni millor.	S'ha trobat algun filtre que satisfaci les necessitats? (minimitzar el retard amb tota la reducció de soroll possible)	11 Sensors de tipus cinta
Exp 3	Aplicar l'algoritme de control sobre la lectura dels sensors.	Veure el nivell de control que es pot satisfer emprant el circuit.	S'ha assolit un nivell de control raonable?	11 Sensors de tipus cinta. 1 de tipus joystick.

Taula 5. Resum dels experiments realitzats.

5.1.1. Anàlisi del comportament dels elements sensors

Amb la intenció de poder modelar el comportament dels sensors, s'ha realitzat una sèrie de moviments mecànics de tracció-relaxació sobre les 11 provetes mentre es mesurava el voltatge de la sortida de l'amplificador d'instrumentació. Els moviments mecànics s'han generat fent ús del banc d'assaig de la Il·lustració 27:



Il·lustració 27. Banc d'assaig utilitzat en l'anàlisi del comportament dels sensors [12]

Aquest banc d'assaig està controlat per un Arduino i disposa d'un motor pas a pas que permet aplicar desplaçaments de 0,1 mm. Les ordres de control sobre el banc s'han generat emprant comandes a través del port sèrie que el controla [12].

En aquesta fase s'ha creat un codi Python per tal de llegir el voltatge i ordenar al motor el moviment. Tant la posició del banc com el voltatge (llegit des dels dos ADC) s'ha emmagatzemat en format csv per tal de poder processar aquesta informació i inferir el model de comportament dels sensors. En cas d'haver extret un model de comportament sobre el qual es pugui fomentar el projecte es considerarà un èxit aquest experiment.

El codi que s'ha fet servir en aquest apartat apareix en la secció corresponent de l'Annex.

5.1.2. Filtratge del Senyal

En aquest apartat, diferents filtres s'han aplicat sobre les lectures de les 11 provetes (llegides des de cada ADC) variant paràmetres dels filtres amb l'objectiu de poder emmagatzemar el senyal en funció dels paràmetres i el desplaçament exercit sobre les provetes. Aquestes dades s'han convertit en gràfiques per tal de veure quin dels filtres (i amb quins paràmetres) es té el comportament més bo. Es considerarà un èxit que s'hagi pogut reduir el soroll sense aportar un retard massa pronunciat que dificulti el control en el següent apartat.

5.1.3. Generació del senyal de control

En aquest apartat, s'ha implementat el control de la plataforma d'ajuda a la mobilitat utilitzant el filtre que prèviament s'ha escollit i considerant el comportament del sensor. Tenint en compte el comportament del sensor, es farà el càlcul de l'ordre de control en funció de la lectura actual del sensor. Es considerarà un èxit si s'aconsegueix generar senyals de control a nivells específics i fer cicles d'arrencada-aturada progressiu.

5.2. Simulació de la Plataforma d'ajuda a la mobilitat

Donat que aquesta part s'ha començat a fer en paral·lel al processament de senyal, s'ha hagut de simular les ordres mitjançant comandes Bash de linux. Un cop comprovat el funcionament individual de la plataforma simulada, s'ha utilitzat els sensors (amb el millor filtre trobat en l'apartat anterior) per tal de comprovar que és pot efectuar moviments de la plataforma segons les intencions del seu usuari. Es considerarà un èxit si s'ha pogut arribar al punt de partida amb una desviació mínima i si no es produeix cap comportament anòmal.

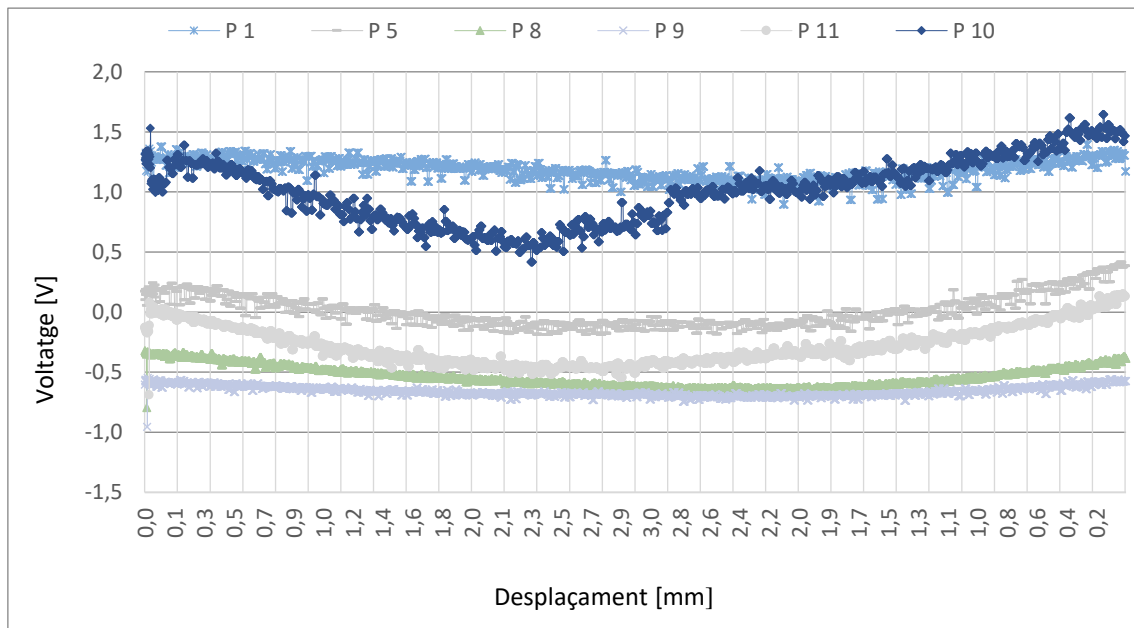
6. Resultats

D'acord amb els diferents passos especificats en el pla d'experimentació, tenim els resultats segons els següents apartats:

6.1. Lectura i processament del senyal de control

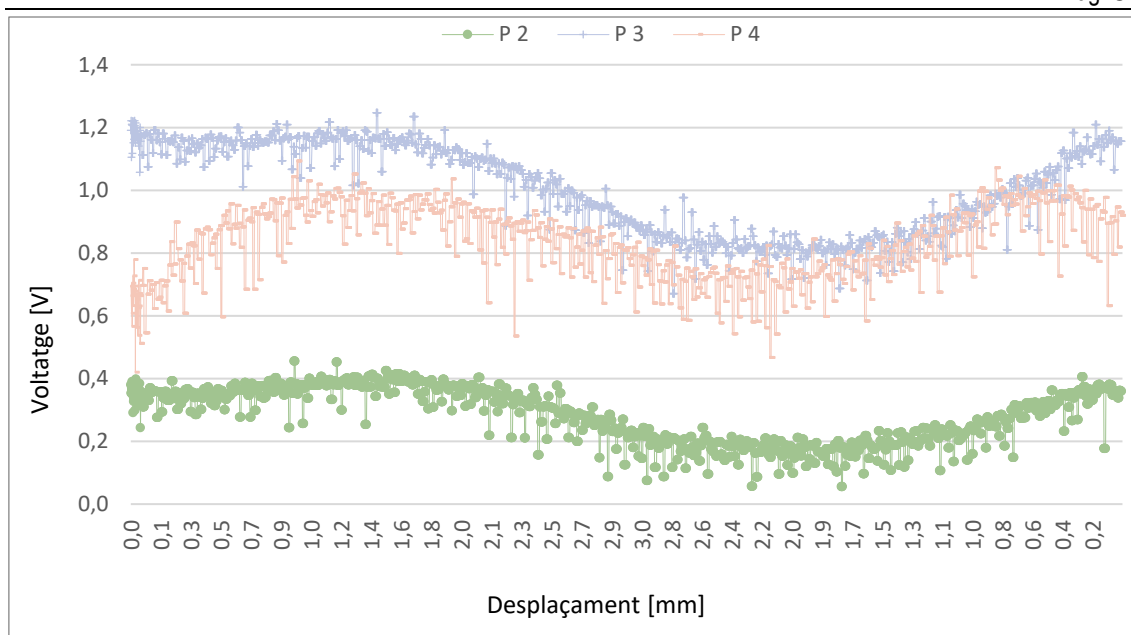
6.1.1. Anàlisi del comportament dels elements sensors

Pels sensors de tipus cinta, es pot observar dos models de comportament diferents.



Il·lustració 28. Model 1 de Comportament vist amb l'ADC-10-F103C

El primer model de comportament, és aquell que mostra certa concavitat, es redueix el voltatge (i, per tant, la resistència del sensor) amb el desplaçament tal com es pot veure en la Il·lustració 28.



Il·lustració 29. Model 2 de Comportament vist amb l'ADC-10-F103C

En el segon model de comportament, observat en els sensors 2, 3, 4, es pot veure un lleuger increment del voltatge (i, per tant, de la resistència) a mesura que es desplaça el sensor, fins que torna a disminuir aquest voltatge. En tornar a reduir el desplaçament es repeteix el comportament a la inversa, tal com es pot veure en la Il·lustració 29.

Després d'analitzar aquestes dades, es pot considerar que els dos tipus de comportaments es deuen a diferents qualitats d'impressió del sensor. En el segon model, una impressió de baixa qualitat provoca que les fibres del material plàstic se separin segons es desplaça, això implica una reducció de la secció de l'element conductor i, per tant, un increment de la resistència segons l'equació que descriu la resistència d'un conductor:

$$R = \rho \cdot l/A \quad [30]$$

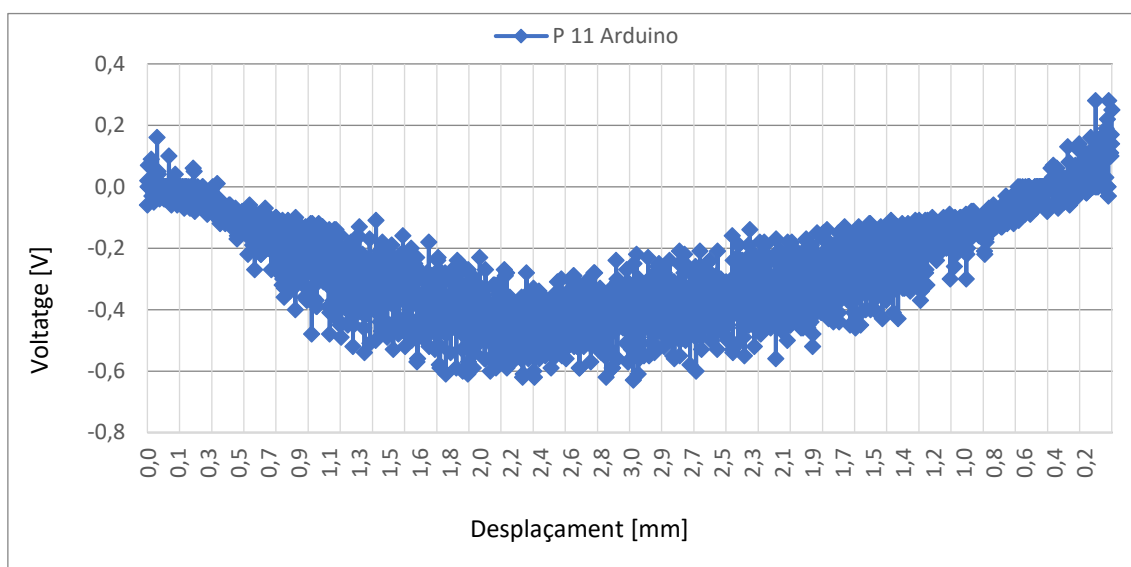
On ρ és la resistivitat, l la longitud del conductor i A la seva secció.

Un cop totes les fibres que tenen defectes s'han separat, tenim el mateix comportament que en el primer model. En el retorn a la posició inicial, hi ha certa histèresi, ja que no totes les fibres es tornen a unir.

En el primer model, tindriem el comportament més uniforme segons el qual el voltatge és inversament proporcional al desplaçament, tal com es pot veure en la Il·lustració 28. Això incompleix l'equació de la resistència, ja que un increment en la longitud hauria de produir un increment en la resistència. S'ha teoritzat que aquest comportament és degut al fet que el material conductor està compost per dos elements, un que serveix d'aglomerant que és el plàstic i l'altre que és conductor i que es troba dispers en forma de partícules dintre de l'aglomerant. En aquest cas, a l'aplicar desplaçament, la longitud incrementa, però també

es redueix la secció. Aquesta reducció provoca que la distància entre les partícules conductores també es redueixi. A conseqüència d'això últim es redueix la resistivitat base del material. Tot i que es produeixen dos fenòmens (augment de longitud, i reducció de resistivitat) el que té més pes en el resultat final és el de la reducció de la resistivitat, i per això es produeix aquesta reducció de la resistència. Aquesta teoria s'ha vist confirmada en consultar amb l'empresa fabricant del material conductor (recreus) mitjançant correu electrònic.

Una altra cosa que s'ha pogut observar comprovant els resultats previs és que donat que l'Arduino té una freqüència de mostreig major (10Hz ja que s'ha escollit llegir cada 100ms) en front dels 2Hz de l'ADC-10-F103C el soroll també és més influent en l'Arduino tal com es pot veure en la Il·lustració 30 on podem observar la lectura de la proveta 11.

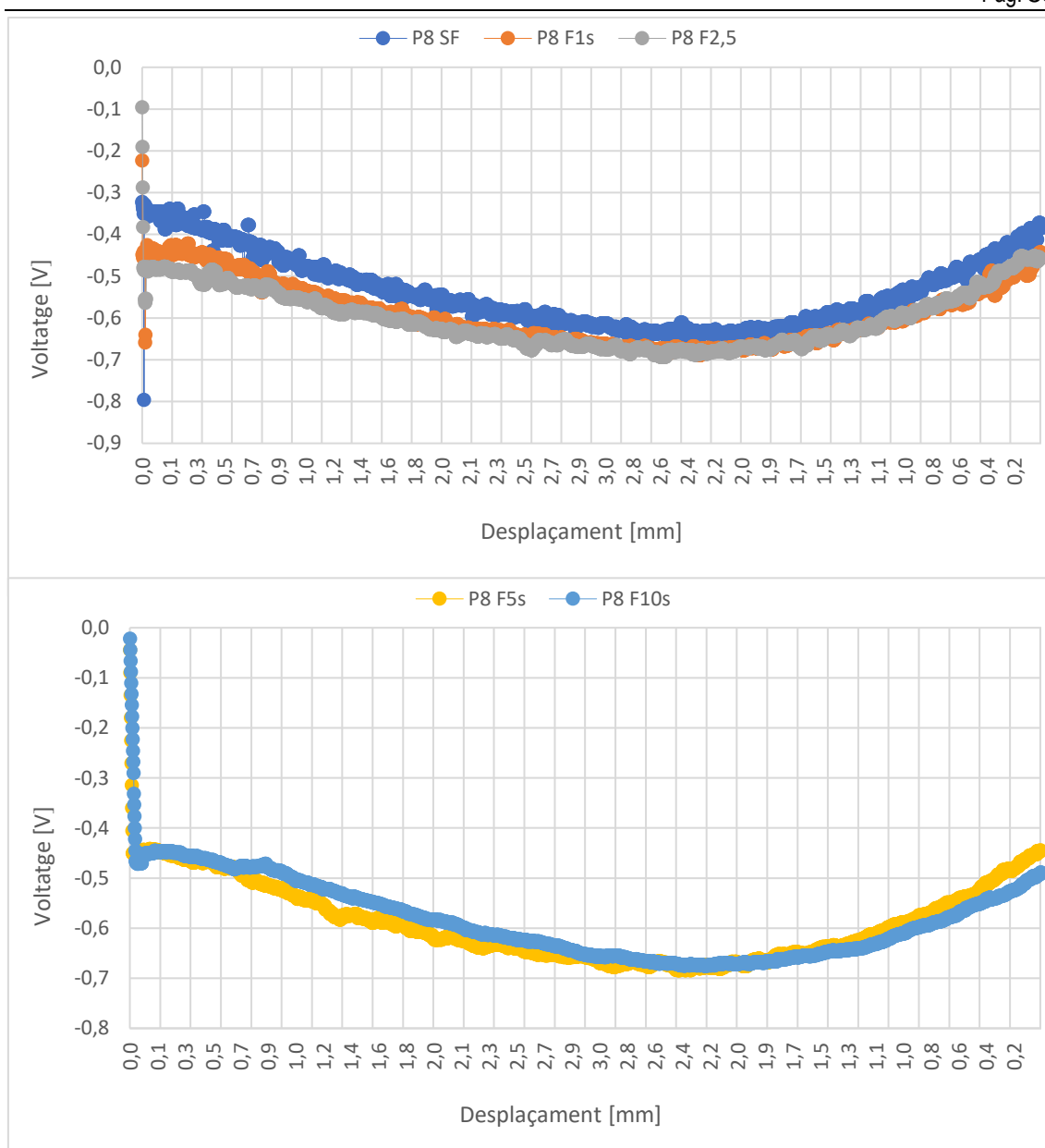


Il·lustració 30. Proveta 11 llegida amb l'Arduino

És per això que s'haurà d'emprar un filtre de major ordre en el cas de l'arduino per obtenir resultats similars que amb l'ADC-10-F103C.

6.1.2. Filtrat del Senyal

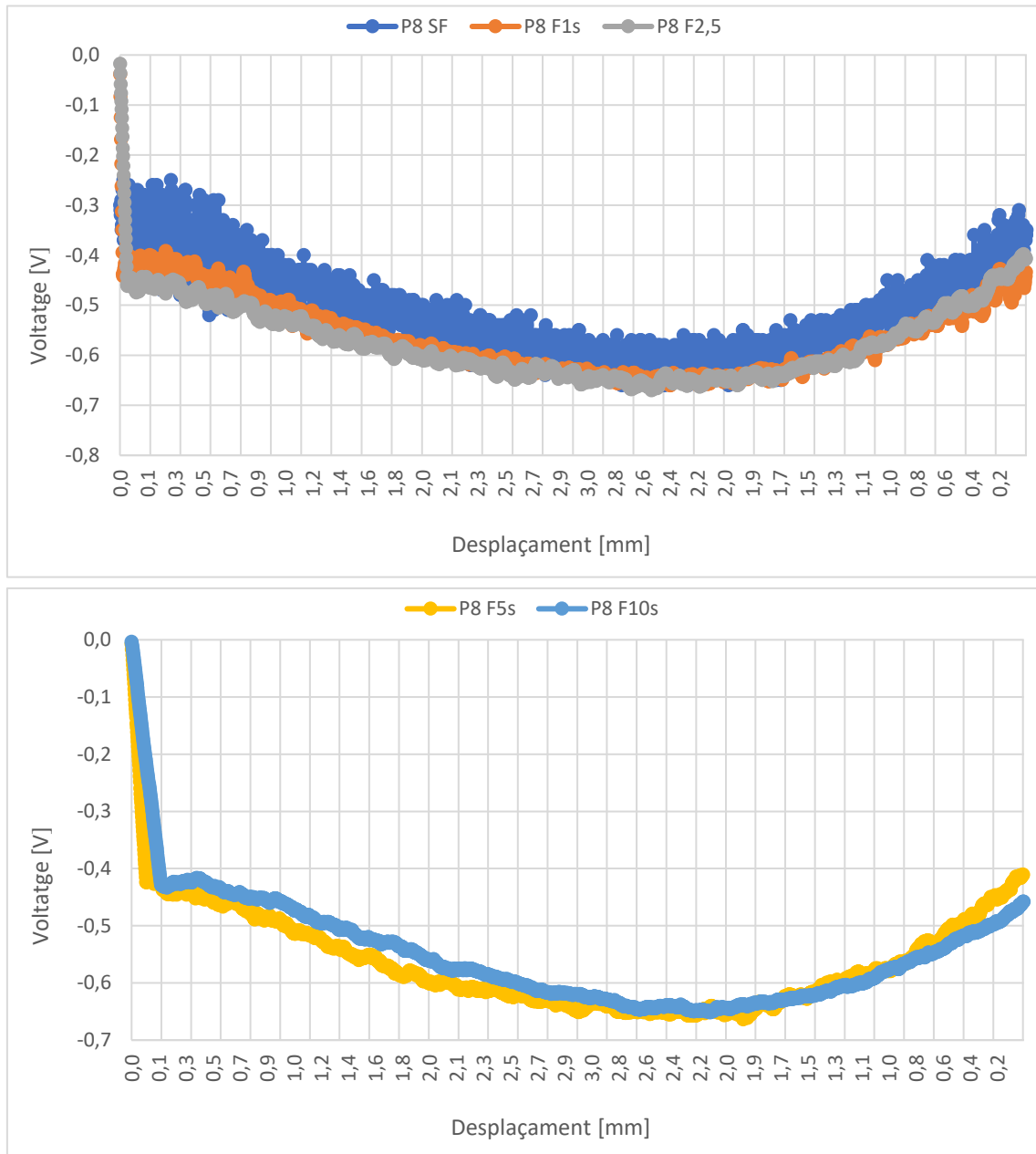
Pel que fa als filtres, s'ha repetit el mateix procediment amb totes les provetes, però s'emprarà la proveta 8 en aquest apartat per ser prou representativa.



II-lustració 31. Comparativa de diferents filtres de tipus moving average llegits amb l'ADC-10-F103C.

Com es pot veure en la II-lustració 31, amb un filtre d'1-2,5 segons (es fa la mitja sobre les últimes 2 o 5 mostres respectivament per la freqüència de mostreig de 2Hz) es pot reduir considerablement el soroll sense que hi hagi un retard massa gran, hi ha menys punts anòmals i l'amplitud en si de la línia és menor que la que no te filtre (SF). Pel que fa a la resta de filtres el retard ja és considerable (es pot veure clarament que el punt de partida són 0V i que hi ha moltes lectures des del punt de partida fins al nivell real del sensor).

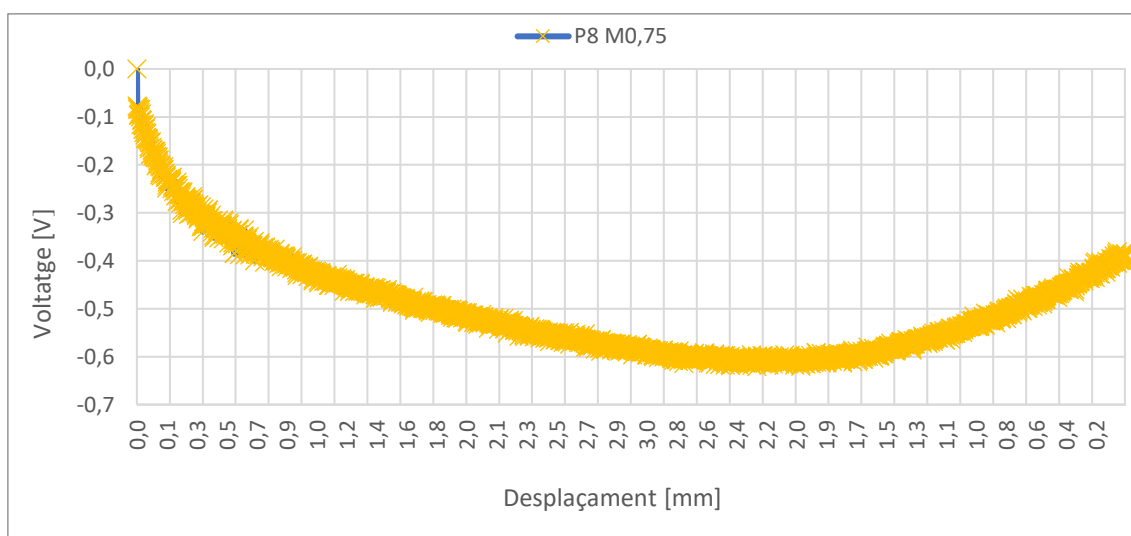
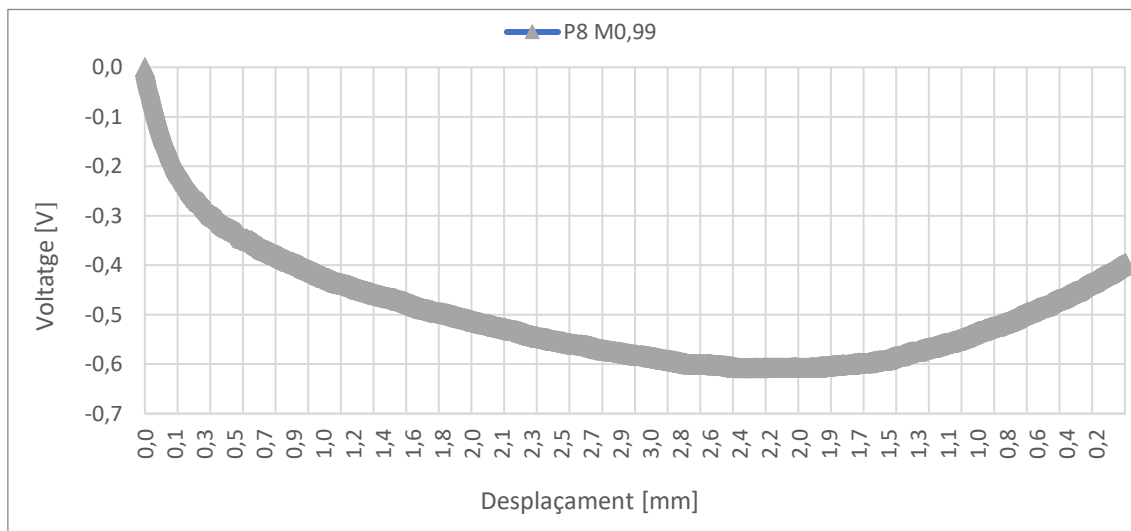
Més significatiu és l'efecte dels filtres sobre l'Arduino, com es pot observar en la Il·lustració 32, ja que té més soroll. Els filtres, però han estat confeccionats de tal manera que el retard sigui igual al cas anterior quan ens enfrontem a un impuls esglaió.

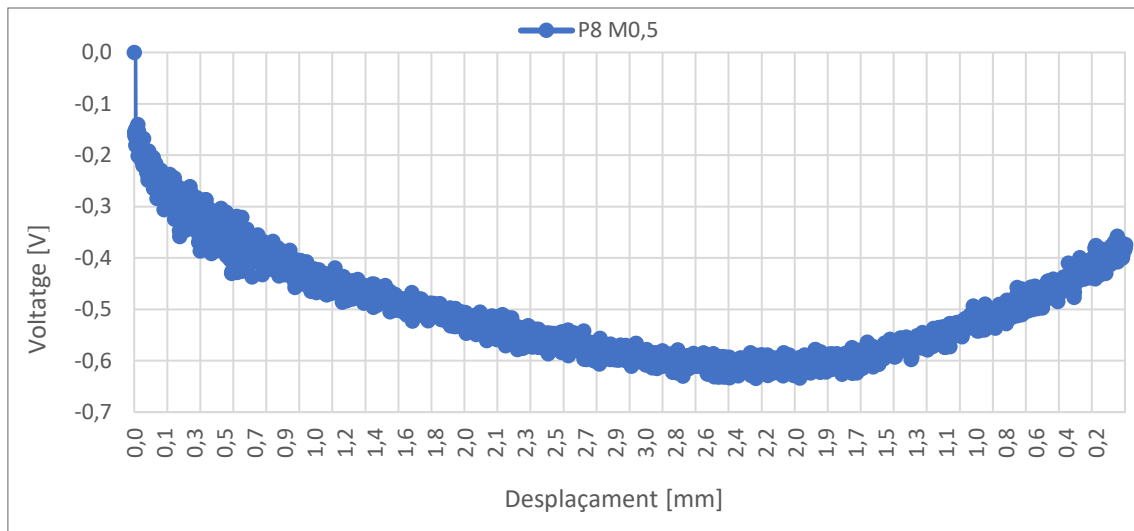


Il·lustració 32. Comparativa de diferents filtres de tipus moving average llegits amb l'Arduino

Les conclusions, però són les mateixes que amb l'ADC-10-F103C.

Pel que fa al filtre de tipus single-pole, es necessita un filtre amb un valor de M molt alt (0,99) per obtenir resultats similars als dels filtres d'1 o 2,5 s. A més hi ha un retard considerablement més alt com es pot veure en la Il·lustració 33.



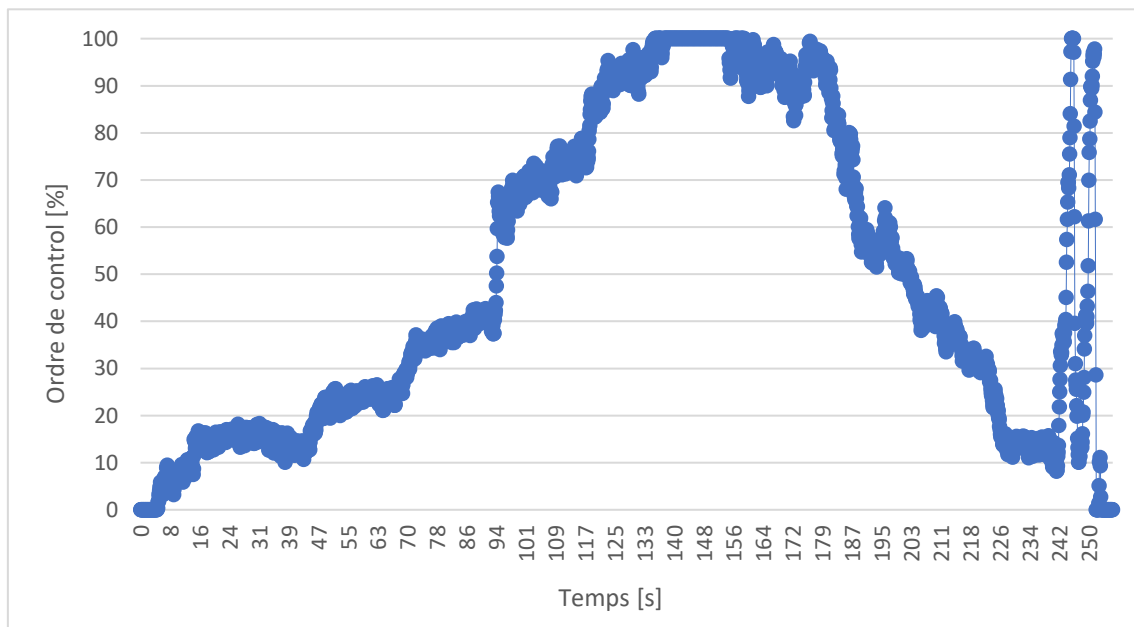


Il·lustració 33. Comparativa de filtres de tipus single-pole amb diferents M

Pel que s'ha pogut veure, el filtre que més bons resultats és el de tipus moving average amb 1 o 2,5 segons de retard (si la mostra és cada 0.5s, es fa la mitja sobre les últimes 2 o 5 mostres).

6.1.3. Generació del senyal de control

Pel que fa a la generació del senyal de control, un cop filtrat el senyal del sensor ha estat possible generar ordres de control de tipus analògic tal com es pot veure en la Il·lustració 34.

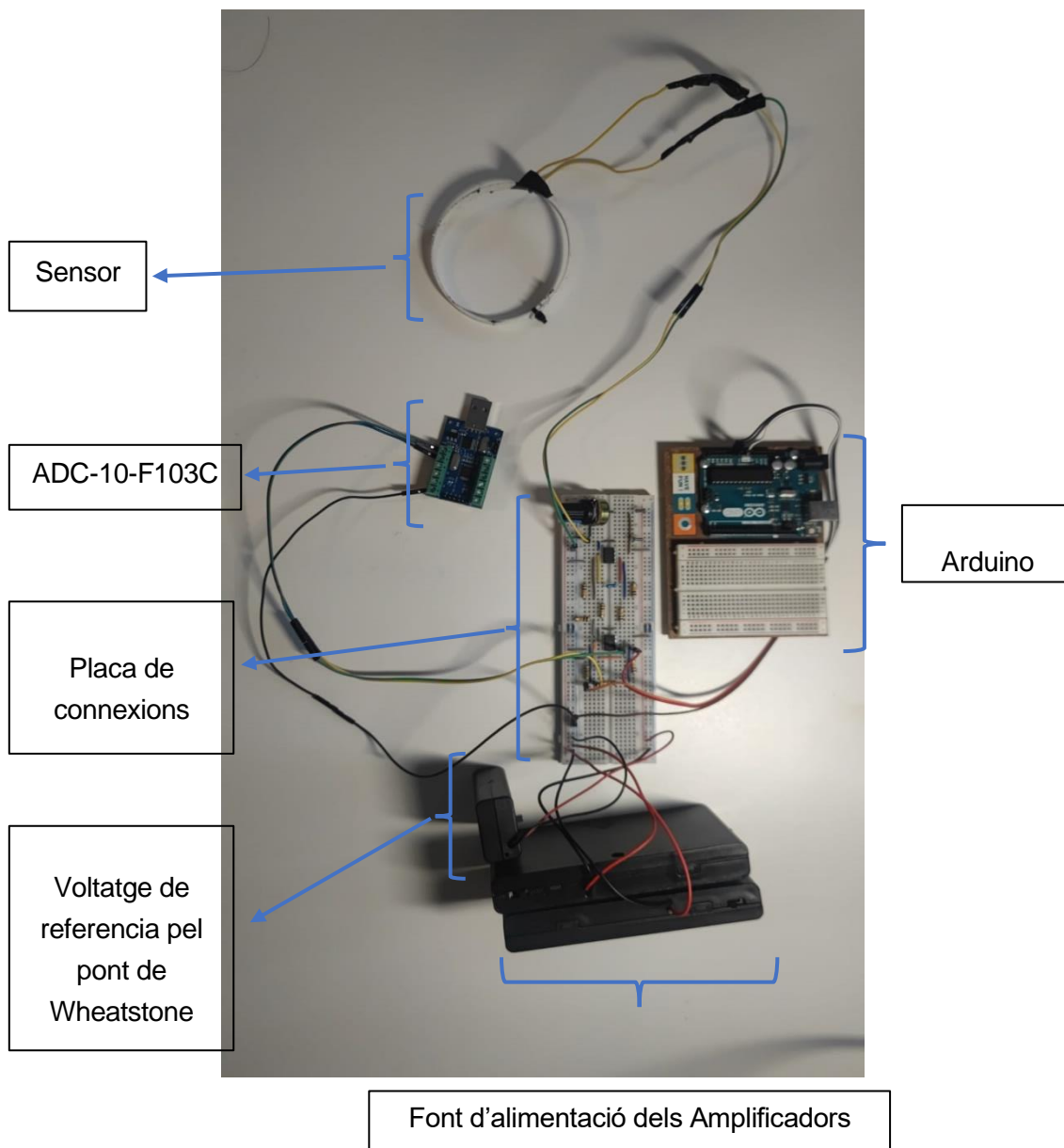


Il·lustració 34. Senyal de control obtinguda fent probes amb el sensor de tipus cinta.

És cert, però que hi ha cert nivell de soroll que causa que la precisió del senyal sigui entorn de un 5%, però això no serà determinant pel que fa al control de la plataforma d'ajuda a la mobilitat.

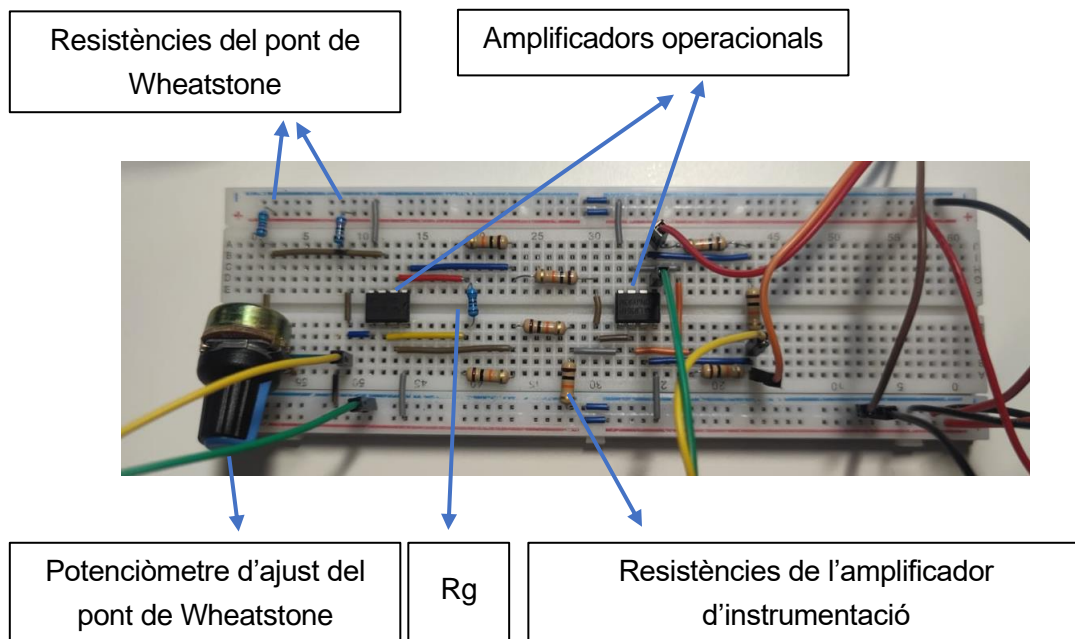
6.1.4. Circuit resultant

El circuit resultant un cop aplicats tots els passos és el de la Il·lustració 35.



Il·lustració 35. Circuit complet

I el detall de la placa de connexions es pot veure en la Il·lustració 36.



Il·lustració 36. Detall de la placa de connexions

Aquest mateix circuit es pot emprar tant per a la simulació com per a la cadira real ja que en el segon cas, es fa servir l'arduino enlloc de l'ADC-10-F103C.

6.2. Simulació de la Plataforma d'ajuda a la mobilitat

En aquest últim apartat, s'ha comprovat que es pot controlar correctament la cadira emprant els sensors de tipus cinta. Primerament s'ha obtingut el màxim i el mínim de cada sensor (esquerra i dret, en el cas de les cintes fent servir el menú).

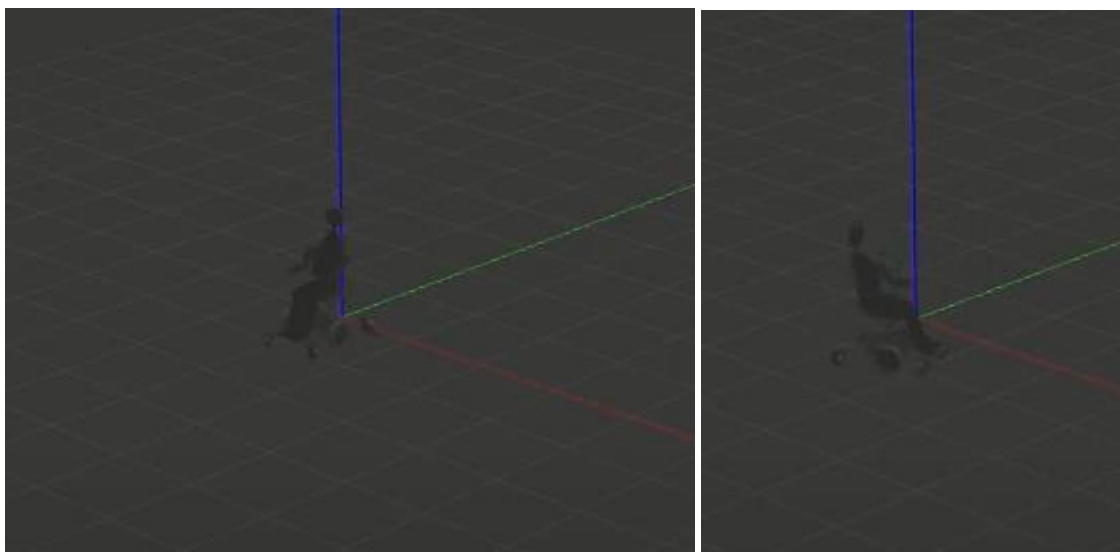
```
ferran@ferranPC: ~/Desktop/cadira_de_rodres/src/cadira_control/scripts
File Edit View Search Terminal Tabs Help
ferran@ferranPC: ~/Desktop/cadira_... x /home/ferran/Desktop/cadira_de_ro... x
V Galga esq -0.6815 V Galga dret -0.7945
^CMenu:
A) Iniciar el control
E) Equilibrar Pont
Md) Actualitzar Màxim
Me) Actualitzar Mínim
Q) Sortir
md) Actualitzar Mínim
me) Actualitzar Màxim
Escollir Acció Me
-0.06815 ; -0.6815 ; 1
```

II·lustració 37. Calibrat del sensor

En la II·lustració 37, s'escull calibrar el mínim del sensor esquerra amb la comanda per a tal efecte (me). La primera dada que es mostra, és la lectura de la mitja dels mínims, mentre que la segona és la lectura actual del sensor.

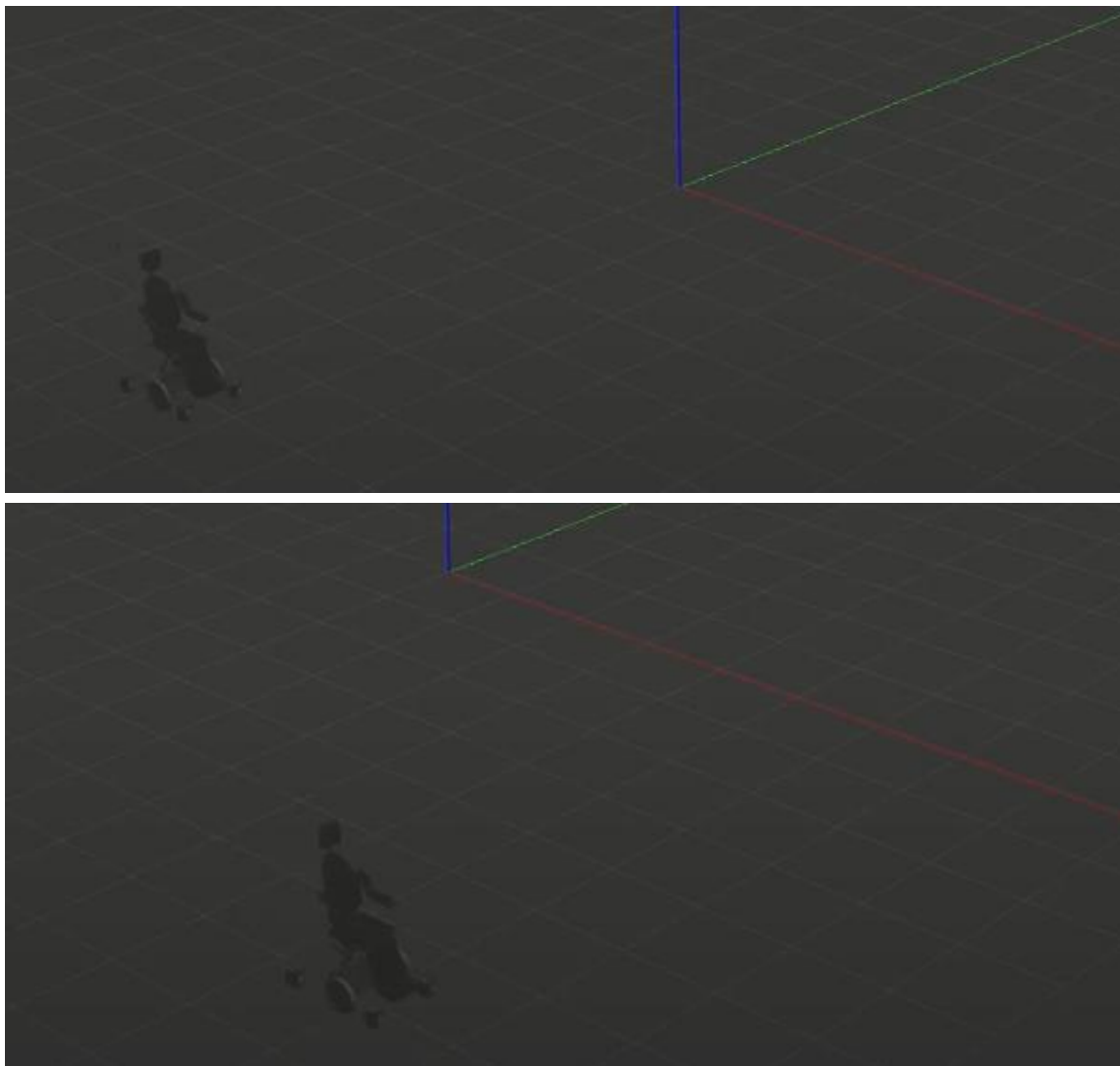
Un cop fet aquest pas per als màxims i mínims de tots els sensors, s'ha habilitat el control i s'han provat diferents moviments.

Primerament, s'ha provat de fer un gir en sentit contrari a les agulles del rellotge com el de la II·lustració 38.



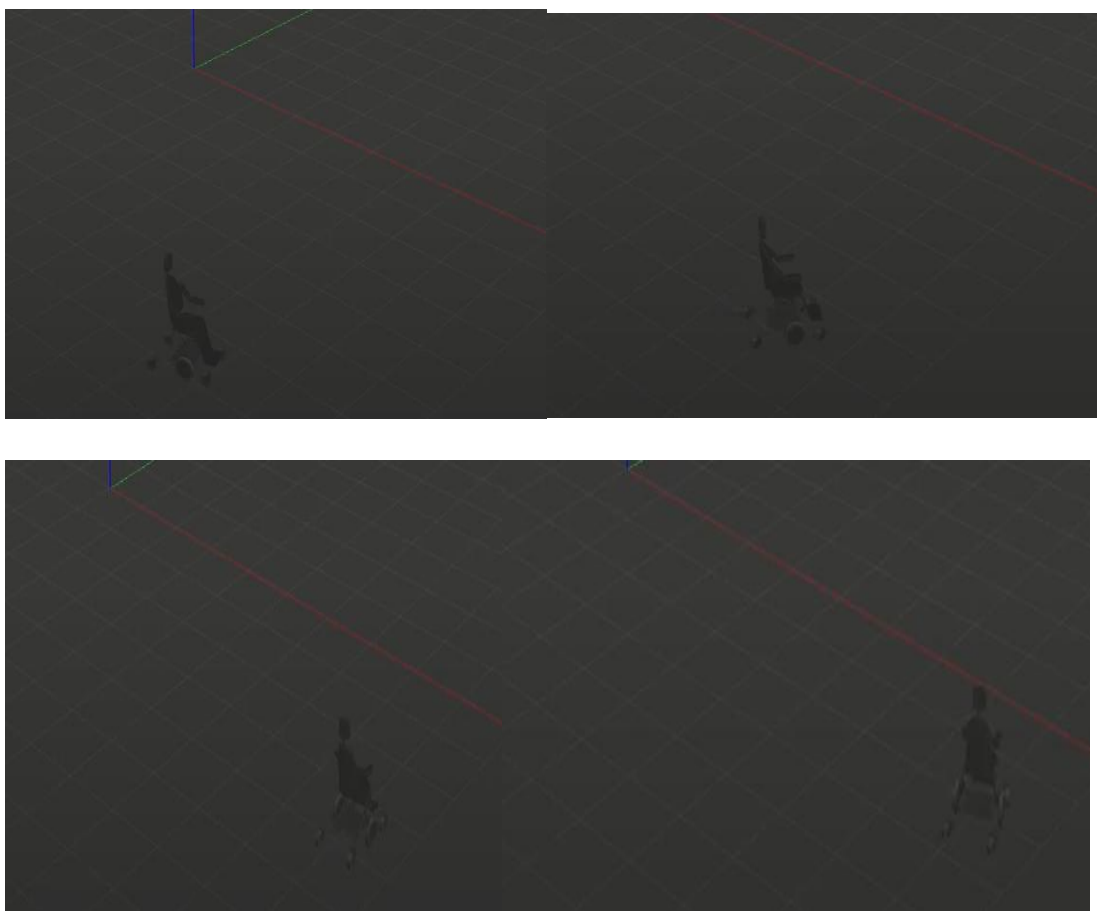
II·lustració 38. Images que demostren el gir anti-horari.

Seguidament s'ha fet un moviment rectilini en la direcció marcada per l'eix vermell en la Il·lustració 39:



Il·lustració 39. Images que demostren el moviment rectilini.

S'ha provat també girs més oberts com els de la Il·lustració 40:

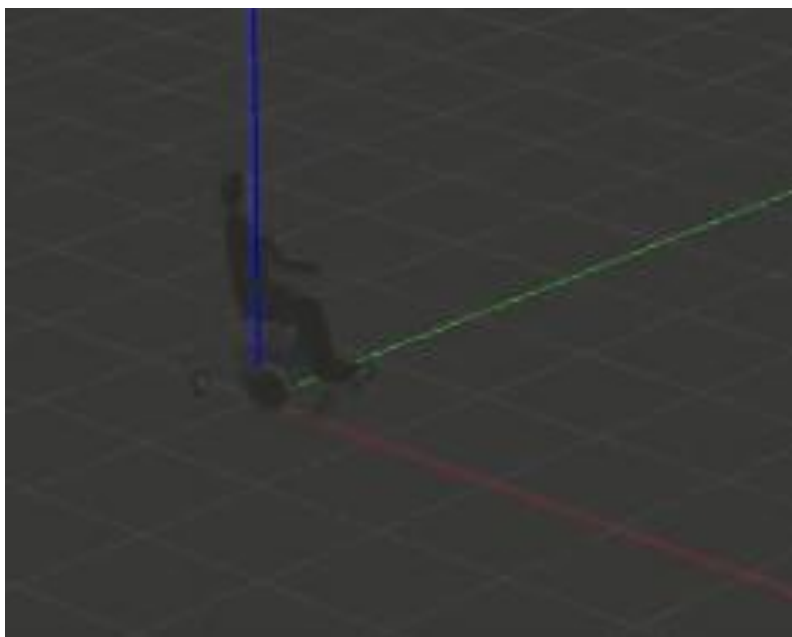


Il·lustració 40. Conjunt d'imatges on es mostra un gir més obert (d'adalt a l'esquerra a a baix a la dreta).

En definitiva, tots els moviments endavant, de gir horari, antihorari i combinacions d'aquests s'han pogut realitzar tant amb els sensors de tipus cinta com amb el de tipus joystick. És cert, però que els moviments que tenen un component de marxa enrere, només es poden fer amb el joystick. Per a poder-lo fer amb les cintes, convindria incorporar una cinta addicional que generi el senyal per a fer marxa enrere.

En aquest cas, l'usuari, fa la funció de "controlador" tancant el llaç de control (una resposta insuficient per part de la cadira provoca que l'usuari apliqui més força per a corregir aquest error). A diferència dels llaços oberts on es genera ordres independentment del resultat que aquestes ocasionen.

Les proves s'han considerat un èxit, ja que s'ha pogut arribar al punt de partida (l'origen marcat pels eixos verd, vermell i blau) amb una desviació visualment acceptable com la de la *Il·lustració 41*.



Il·lustració 41. Retorn al punt d'origen.

7. Estudi econòmic

L'estudi econòmic es pot dividir en funció de les despeses dels components emprats, les despeses de recursos humans i les despeses elèctriques derivades.

7.1. Despeses dels components

En aquest apartat, per una banda tenim els costos derivats de la impressió dels sensors.

A partir del preu de venda dels diferents materials i considerant que s'han imprès 30 cintes (de les quals no totes s'han acabat utilitzant per defectes o per tenir resultats molt similars a les 11 primeres), obtenim els costos derivats de la impressió de les cintes en la Taula 6.

Cost Material de les cintes sensores			
Material	Preu(€/g)	Grams	Total
TPU/PLA	0,022	0,9	0,02 €
FILAFLEX CONDUCTIVO	0,15	0,1	0,02 €
Total Unitari			0,03 €
Total			1,05 €

Taula 6. Cost de les cintes sensores

Pel que fa al Joystick, s'ha considerat que el "FILAFLEX CONDUCTIVO" suposa un 10% del pes total. Considerant això i els preus prèviament especificats, podem veure el cos total del joystick en la

Cost Material del Joystick			
Material	Preu(€/g)	Grams	Total
TPU/PLA	0,022	36	0,79 €
FILAFLEX CONDUCTIVO	0,15	4	0,60 €
Total Unitari			1,39 €
Total			1,39 €

Taula 7. Cost del Joystick

El cost total dels sensors emprats és de 2,44€. El cost elèctric associat es troba en l'apartat 7.3.

Pel que fa al cost dels circuits electrònics, el trobem resumit en la Taula 8. S'ha separat els costos per cada component del circuit. A més s'ha considerat que en el projecte s'utilitzen 4 circuits ja que el joystick ho requereix.

Components electrònics			
Circuit Electrònic			
Element	Peru unitari	Quantitat	Total
Pont de wheatstone			
Potenciòmetre	0,59 €	1	0,59 €
Resistors	0,05 €	2	0,10 €
Amplificador d'instrumentació			
Amplificador operacional LM358P	0,50 €	3	1,49 €
Resistors	0,05 €	7	0,35 €
Amplificador inversor			
Amplificador operacional LM358P	0,50 €	1	1,50 €
Resistors	0,05 €	2	0,10 €
Total Circuit			4,12 €
Total per 4 Circuits			16,48 €
Costos no imputables a un sol circuit			
Element	Peru unitari	Quantitat	Total
Porta-piles pont de Wheatstone	7,75 €	1	7,75 €
Porta-piles Amplificadors operacionals	4,44 €	2	8,88 €
Piles AAA	1,08 €	18	19,44 €
ADC-10-F103C	13,02 €	1	13,02 €
Arduino UNO	29,28 €	1	29,28 €
Total costos no imputables			78,37 €
Subtotal components electrònics			94,85 €

Taula 8. Costos totals derivats dels components electrònics emprats.

El total del apartat despeses de components és de 97,29€ considerant les partides prèvies. A més s'ha considerat que el 21% del IVA ja està afegit en els preus dels components.

7.2. Cost de recursos Humans

Pel que fa al cost dels recursos humans, s'ha considerat que la part relacionada amb la redacció de la documentació s'ha considerat una feina de caràcter administratiu i, per tant, s'ha separat de les altres feines més tècniques (les administratives s'han considerat un 20% sobre el total de 896h que s'han estimat).

- Per calcular el preu d'hora de la part administrativa, s'ha considerat que el sou brut del personal administratiu és de 21000€/any. Tenint en compte que les hores laborals anuals a Espanya són de mitjana 2080, s'ha calculat un sou de 10,1 €/h.
- Pel que fa al preu hora de la part més tècnica/de recerca, s'ha considerat un sou brut de 37900€/any. Per tant, el sou és de 18,23 €/h.

El cost total dels recursos humans, queda reflectit en la Taula 9.

	Preu/hora	hores	Cost
Part Administrativa	10,1€/h	179,2h	1809,92€
Part Tècnica	18,23€/h	716,8h	13067,26€
Total			14877,18€

Taula 9. Cost de Personal

7.3. Cost elèctric

Pel que respecta al cost elèctric, s'ha tingut en compte el consum calculat en l'anàlisi ambiental. A més, s'ha considerat que el preu del kWh és de 0,1353 € (consum mitjà segons xarxa elèctrica espanyola). S'ha tingut en compte, a més, l'IVA aplicable a l'electricitat (5%). Així doncs, el cost elèctric es pot veure en la Taula 10.

Energia Consumida	Preu	Total
94,274 kWh	0,1353 €/kWh	12,76 €
Total (aplicant 5% d'IVA)		13,4 €

Taula 10. Cost elèctric

7.4. Cost Total

Els total resultant de la suma de les tres partides és el de la Taula 11. A més, s'hi ha aplicat un marge comercial del 15% sobre el subtotal i un 21% de l'IVA sobre aquest benefici.

Partida	Cost
Despeses de components	114,17 €
Recursos humans	14.877,18 €
Cost elèctric	13,40 €
Subtotal	15.004,75 €
Marge Comercial (15%)	2.250,72€
IVA (21%)	472,65€
Total	17.728,12€

Taula 11. Cost total del projecte.

8. Estudi ambiental

Per tal d'analitzar l'impacte ambiental derivat d'aquest projecte, convé considerar que aquest prové de dues fonts. D'una banda, tenim el consum energètic utilitzat durant la realització d'aquest, i de l'altra, els residus derivats del projecte.

8.1. Consum energètic

Per tal de fer el treball, s'ha produït un consum elèctric determinat. Aquesta electricitat és generada a partir de diferents fonts (crema de derivats de petroli, crema de gas natural, energies renovables, nuclear, crema de carbó i crema de residus no renovables). D'aquestes fonts, les úniques que no emeten CO₂, són les nuclears i les renovables. D'acord amb el tant per cent d'ús de cada tipus de font d'energia, els gestors de la xarxa elèctrica espanyola estimen les emissions de CO₂ equivalents derivades de la generació d'energia elèctrica. Aquestes emissions s'han considerat que seran de l'ordre de 0,17 tones de CO₂ equivalent per cada MWh consumit (170 g/kWh).

El consum elèctric es pot dividir segons:

- Consum derivat de l'ordinador: Per totes les parts del projecte, s'ha hagut de fer servir un ordinador. Es calcula que l'ordinador ha estat en ús 896 hores. Considerant que el consum mitjà és de 100W/h (0,1kWh) es calcula el consum elèctric en 89,6kWh. Això es tradueix en unes emissions de CO₂ equivalents de 15,23kg. (En aquest apartat també està inclòs l'ús dels ADC, ja que s'alimenten a través de l'ordinador).
- Consum derivat de l'ús del banc d'assaig: El banc d'assaig té una potència de 20,4W [12]. Tenint en compte que s'ha fet servir un total de 15h, el consum elèctric derivat és de 0,306kWh i, per tant, s'han emès 0,052kg de CO₂ equivalent.
- Consum derivat de la impressió de provetes. Les provetes, que han estat impreses amb una impressora 3d model Sigma R19 de l'empresa BCN3D Technologies. Aquesta impressora té un consum de 312W (tenint en compte el voltatge d'alimentació de 240V i el consum de 1,3A) [13]. La fabricació de les provetes de tipus cinta, triga uns 15 minuts aproximadament per a cada una (en total se n'han imprès 30, tot i que no totes han estat usades degut a problemes de fabricació). Per altra banda, el temps de fabricació del joystick s'ha estimat en unes 4 hores. Tenint en compte això, s'ha considerat que la impressora 3d ha tingut un consum de 4,368kWh amb unes emissions de CO₂ equivalents de 0,742 kg.

Els consums elèctrics i les emissions derivades del projecte es troben resumits a la Taula 12.

	Consum Elèctric	Emissions de CO2
Ús de l'Ordinador	89,6 kWh	15,232 kg
Ús del Banc d'assaig	0,306 kWh	0,052 kg
Impressió de provetes	4,368 kWh	0,743 kg
Total	94,274 kWh	16,027 kg

Taula 12. Resum de consums i emissions derivades del projecte

8.2. Residus derivats del projecte

Pel que fa als residus que es deriven del projecte, tenim principalment dos tipus:

- Components electrònics: Per tal de reciclar aquests elements, s'envien en plantes de tractament on se separen pels seus components (plàstics, vidres, ceràmiques, metalls conductors, etc.). En l'actualitat, es pot recuperar el 70% dels components electrònics, tot i que el procés requereix maquinària especialitzada amb un elevat cost econòmic i energètic. S'estima que el pes total dels components electrònics és inferior a 100 grams, tenint en compte el comentat prèviament, es considerarà que 70 grams seran reciclables i 30 no ho seran. Els 30 grams que corresponen a elements no reciclables s'eliminaran mitjançant incineració, cosa que farà augmentar les emissions de CO₂ associades al projecte. S'ha de tenir en compte, però, que els components electrònics tenen una llarga vida útil.
- Sensors: Aquests elements estan compostos en la seva totalitat de materials plàstics, ja siguin TPU o PLA tots ells reciclables i en el cas de l'últim biodegradable. L'element conductor, està compost per TPU amb negre de carbó i, per tant, també és reciclable. Els sensors són més susceptibles al desgast, a més durant la seva producció es desaprofita una part del plàstic degut al funcionament de la impressora (purgues del injector). Amb tot, la quantitat de residus generats en la elaboració dels sensors és reduïda (en torn a 1 gram per cada sensor de tipus cinta, i en torn a 30 pel tipus joystick).

9. Estudi social i d'igualtat de gènere

A més, donat que els sensors que s'utilitzen en el projecte han estat impresos mitjançant impressores 3d, aquests tenen un elevat grau d'adaptabilitat a l'usuari impedit així discriminacions de gènere (tant pel que fa a les mides com la morfologia). En concret, tant les cintes com el joystick, es poden fer servir indistintament per dones o per homes.

Adicionalment, aquests sensors tenen un cost més reduït que els que es venen actualment en el mercat, sobre tot considerant que en aquest projecte el circuit està en fase de prototipat i, per tant, és més car que no fet en sèrie, en conseqüència, ajuda a democratitzar més l'ús de les cadires de rodes elèctriques permetent així que persones amb menors recursos hi tinguin accés.

En aquest projecte, s'ha procurat mantenir un llenguatge impersonal per tal de no fer distincions de gènere. Tot i que és cert que no hi ha paritat entre gèneres en ser l'equip conformat per un nombre imparell de persones.

10. CONCLUSIONS

A continuació es detallen les conclusions extretes respecte als objectius inicials del present projecte.

10.1. Control de la plataforma mitjançant els sensors

- En aquest projecte s'ha pogut veure un comportament inesperat pel que fa a la resposta dels sensors emprats. Tot i això, aquest comportament segueix un model determinat (a causa de l'estructura interna de l'element conductor, es produeix una disminució de la resistència quan s'hi aplica una tracció). És cert, però, que impressions de mala qualitat afecten el model i, per tant, s'haurà de refinar el procés d'impressió per tal d'evitar problemes derivats.
- Per altra banda, s'ha vist que és altament recomanable construir el circuit de forma que sigui possible equilibrar el senyal en torn de 0, ja que això permet aprofitar al màxim tant el rang de lectura dels ADC com el rang de funcionament dels amplificadors operacionals.
- També s'ha trobat necessari filtrar el senyal per tal d'eliminar el soroll més pronunciat. Això ha estat possible mitjançant un filtre de tipus moving average amb un nombre de dades reduït (menys de 25 en el filtre aplicat a l'Arduino amb un temps de 2.5s, sent aquest el pitjor dels casos) i sense un retard massa pronunciat.
- Pel que fa al circuit que s'utilitzarà en la cadira física, aquest és molt similar al obtingut a l'apartat 3.5, amb la diferència que serà convenient afegir 4 polsadors que compleixin la funció del menú que s'utilitza en l'ordinador, i un potenciòmetre per tal d'ajustar el nombre de lectures del filtre. D'aquesta manera s'assolirà les mateixes funcionalitats que en l'entorn simulat.
- Ha estat possible assolir el control de la cadira amb ordres analògiques, tot i que és cert que les imperfeccions provoquen desviacions respecte a les consignes. Aquestes desviacions, però, són corregides per l'usuari de la plataforma amb un mínim entrenament tancant així el llaç de control.

10.2. Simulació de la plataforma

- S'ha aconseguit un model prou realista, ja que s'han emprat valors d'inèrcies i pesos realistes. A més s'ha simulat el moviment de tots els components (tant les rodes motores com les de tipus Caster). I no s'han observat comportaments anòmals durant l'ús del simulador.

- Pel que fa al control, s'ha obtingut una resposta desitjada de la plataforma, assolint retornar al mateix punt de partida amb un marge d'error prou bo (Com es veu visualment), es requereix, però un mínim d'entrenament per tal de fer-lo correctament.
- Pel que fa als moviments factibles de cada tipus de sensor, s'ha vist que amb dues cintes només no es pot fer marxa enrere (sense fer una combinació de moviments per a emular-lo). Això es resoluria afegint una cinta addicional per a fer aquest moviment, però aprendre a fer servir la plataforma, esdevé més complicat. El sensor tipus joystick, permet executar tots els tipus de moviments, però consumeix un circuit addicional respecte als 3 sensors tipus cinta. A més, durant el projecte s'ha vist que tal com està dissenyat, l'element conductor és bastant susceptible a trencaments si s'hi aplica una força excessiva.

Pel que fa al cost econòmic del projecte, es considera relativament reduït, en el sentit que la major part d'aquest (99%) prové únicament del personal (que és una despesa inevitable en tot projecte).

Per altra banda, els 16kg de CO₂ emès es poden equiparar a un trajecte en un cotxe compacte de 145km considerant unes emissions de 0,11 kg de CO₂/km. Tenint en compte la durada del projecte es pot considerar que aquestes emissions són relativament reduïdes. Aquestes emissions triguen un any a ser mitigades per un sol arbre.

L'elevat grau d'adaptabilitat dels sensors es considera positiu en tant que s'evita discriminar per les capacitats de l'usuari i pel seu gènere. A més suposa també permetre a persones amb menors recursos accedir a cadires de rodes elèctriques.

11. Agraïments

Primerament, vull agrair a Joaquim Minguella, el director del present treball de final de màster haver-me permès treballar en aquest projecte.

També vull expressar el meu especial agraïment a Laia Castellet de l'Espai de Fabricació digital de l'ETSEIB, que ha imprès les provetes que s'han necessitat i m'ha facilitat l'accés a l'espai per tal de poder fer les proves amb el banc d'assaig.

Addicionalment, vull expressar el meu agraïment a M3i controls, l'empresa en la qual treballa per la flexibilitat horària que m'han proporcionat per a poder fer el present treball.

Finalment, vull expressar el més profund agraïment tant a la meva família com als meus companys de pis i amics pel suport que m'han donat en la realització del projecte.

12. Bibliografia

Referències bibliogràfiques

- [1] Institute of Electrical and Electronics Engineers, "IEEE Standard Test Code for Resistance Measurement," IEEE, 1978.
- [2] G. Biondo y E. Sacchi, Manual de Electrónica y Telecomunicaciones, Barcelona: Ediciones Omega S.A., 1989.
- [3] S. W. Smith, The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing, San Diego: California Technical Publishing, 1999.
- [4] Escuela técnica superior de ingenieros industriales y de telecomunicación, «Instrumentación Electrónica de Comunicaciones,» Santander, 2005.
- [5] S. W. Harden, «ADC-10-F103C»: <https://github.com/swharden/ADC-10-F103C>
- [6] Arduino, «Arduino Uno R3 Product Reference Manual»: <https://docs.arduino.cc/resources/datasheets/A000066-datasheet.pdf>
- [7] J. Hamano, «GIT»: <https://git-scm.com/doc>
- [8] Open Robotics, «ROS»: <https://www.ros.org/>
- [9] Open Robotics, «Gazebo»: <https://gazebo.org/>
- [10] R. Haschke, «RVIZ»: <http://wiki.ros.org/rviz>
- [11] Š. Alexandr, P. Van Thuan, K. Vaclav y L. P. Khac, «Optimization of Fuzzy Logic Controller Used for a Differential,» *Applied Sciences*, 2021.
- [12] J. Rabassa Manzano, «Disseny i materialització d'un banc d'assaig per a experimentar amb peces multimaterial impreses en 3D de material conductor. Universitat Politècnica de Catalunya,» TFM: Julio2022.
- [13] BCN 3d technologies, «Sigma R19 Specifications,» 2019: <https://www.bcn3d.com/wp-content/uploads/2019/10/Datasheet-Sigma-R19-EN.pdf>