



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Escola Politècnica Superior d'Enginyeria
de Manresa



Treball Final de Grau

Control de velocitat d'un robot mòbil

**Grau en Enginyeria Electrònica
Industrial i Automàtica**

Curs 16/17

Autor: Nil Ollé Lamiel

Director: Teresa Escobet

Data: 07/07/2017

Localitat: Manresa

RESUM DEL PROJECTE

En aquest projecte s'ha dut a terme la implementació d'un control de velocitat i posició en una plataforma robòtica mòbil.

Al llarg del projecte es repassa la història de la robòtica autònoma, la seva evolució i el moment en el que es troba. Es defineixen diferents mètodes de control de posició i velocitat, així com els sensors utilitzats per a prendre les mesures. També es fa un repàs sobre les tècniques més utilitzades per a fer el control de posició i la selecció de trajectòries en els vehicles autònoms.

Seguidament es fa una descripció de la plataforma robòtica utilitzada, descrivint-la físicament i anomenant els components. S'explica com es fa la comunicació entre el controlador i el robot, així com les modificacions que s'han fet en aquest per a satisfer millor les necessitats del projecte. S'explica el procediment seguit per a fer el control de velocitat i posició, detallant el procés per parts i mostrant la implementació final de tot el control.

Per finalitzar, s'analitzen els resultats dels experiments realitzats sobre el funcionament del robot i s'estudien els errors resultants.

RESUM DEL PROJECTE (en anglès)

In this project I apply a velocity and position control in a mobile robotic platform.

First of all, I talk about the past in autonomous robots, its evolution and present. I define different methods for position and velocity control, and the sensors that measure it.

After that I define the robotic platform and explain the methods I use to do the control.

At the end, I do an experiment and take the conclusions about it.

ÍNDEX

1. INTRODUCCIÓ	3
1.1. MOTIVACIÓ	3
1.2. OBJECTIUS	3
1.3. METODOLOGIA	3
2. DEFINICIONS I ESTAT DE L'ART	4
2.1. QUÈ ÉS UN ROBOT INTEL·LIGENT AUTÒNOM?	4
2.2. HISTÒRIA I ORÍGENS	4
2.3. LOCALITZACIÓ	5
2.3.1. Mapes	5
2.3.2. Sensors	6
2.3.3. Posicionament dels robots autònoms	7
2.4. GENERACIÓ I SEGUIMENT DE TRAJECTÒRIES	8
2.4.1. Generació de trajectòries	8
2.4.2. Seguiment de trajectòria	10
3. DESCRIPCIÓ DEL ROBOT	12
3.1. DESCRIPCIÓ FÍSICA	12
3.2. SENSORS DISPONIBLES	14
3.3. SISTEMA DE CONTROL	15
4. CONTROL A BAIX NIVELL	22
4.1. ENCÒDERS I TENSIÓ APLICADA A LES RODES	22
4.2. DISSENY DEL CONTROL DE VELOCITAT	25
4.3. CÀLCUL DE POSICIÓ DEL ROBOT	28
4.3.1. Càlcul de la posició a partir dels encòders	28
4.3.2. Càlcul de la posició a partir de l'acceleròmetre de la myRIO	32

4.4. IMPLEMENTACIÓ DEL PROGRAMA DE CONTROL	34
5. RESULTATS.....	39
6. CONCLUSIONS.....	45
7. BIBLIOGRAFÍA	47

ÍNDIX DE FIGURES

Figura 2-1: Relació entre el sistema de referència del robot i global.....	8
Figura 3-1: Vista superior del robot.....	12
Figura 3-2: Vista inferior del robot.....	13
Figura 3-3: Convertidor de voltatge	13
Figura 3-4: Detall del sistema d'alimentació	14
Figura 3-5: Esquema encòder d'efecte Hall	15
Figura 3-6: Senyal típica d'encòder	15
Figura 3-7: Esquema DRV8801	16
Figura 3-8: Connexions DRV8801	17
Figura 3-9: NI myRIO-1900.....	18
Figura 3-10: myRIO detall port C	18
Figura 3-11: Detall ports A, B i C de la myRIO.....	19
Figura 3-12: Connexions placa circuit imprès.....	19
Figura 3-13: Connexions myRIO-Roomba	21
Figura 4-1: Esquema de control.....	22
Figura 4-2: Panell de control	24
Figura 4-3: Control de la velocitat en LabView per a una roda	25
Figura 4-4: Llaç obert en LabView	26
Figura 4-5: Vista en detall de la resposta dels motors envers la consigna.....	26
Figura 4-6: Vista de la resposta dels motors envers la consigna.....	27
Figura 4-7: Llaç tancat en LabView	27

Figura 4-8: Càlcul de velocitats en LabView	28
Figura 4-9: Càlcul de posició en LabView	30
Figura 4-10: Exemple d'implementació del càlcul de posició i control de velocitat mitjançant l'encòder	31
Figura 4-11: Exemple de panell del càlcul de posició i control de velocitat mitjançant l'encòder	31
Figura 4-12: Representació de les velocitats del robot	33
Figura 4-13: Implementació de la integració del les mesures de l'acceleròmetre	34
Figura 4-14: Icones dels Sub VI.....	35
Figura 4-15: Implementació del control i el càlcul de velocitat de les rodes.....	36
Figura 4-16: Implementació del càlcul de posició a partir de les dades obtingudes a l'encòder	36
Figura 4-17: Panell de control per al control de velocitat i la posició	37
Figura 4-18: Implementació del càlcul de velocitat i posició del robot mitjançant l'acceleròmetre	37
Figura 4-19: Vista del panell de control del càlcul de velocitat i posició del robot mitjançant l'acceleròmetre	38
Figura 5-1: Recorregut efectuat pel robot.....	39

1. INTRODUCCIÓ

1.1. Motivació

Els robots autònoms cada dia es fan servir més, però encara hi ha molt de camp per estudiar. La realització d'aquest projecte pretén adentrar-se en el camp de la robòtica modelant el comportament dinàmic d'un robot per al seu posterior ús com a eina d'estudi i treball en el camp dels robots autònoms.

1.2. Objectius

En aquest projecte els objectius marcats són estudiar el model dinàmic del robot per a poder crear un sistema de control de velocitat i posició que serveixi per a un posterior treball en el camp dels robots autònoms.

1.3. Metodologia

Primerament es farà un repàs sobre quina és la situació actual amb els robots autònoms. A partir d'aquí s'efectua una descripció completa del robot, amb les seves parts físiques, les modificacions efectuades i les plaques de control i intercomunicació. En aquest apartat es detalla quina és la funció de cada part del robot, així com la manera en que s'interconnecten. Seguidament es parlarà sobre la modelització del llaç de control i la implementació del programa de control de velocitat i de càlcul de posició. Per finalitzar, s'exposaran els resultats acompanyats d'unes conclusions.

2. DEFINICIONS I ESTAT DE L'ART

Cada vegada es fan servir més robots autònoms. En trobem, per exemple, a la nova planta d'Amazon que s'està construint al Prat de Llobregat (VilaWeb, 2017), on els robots s'encarreguen del transport de l'stockatge pel magatzem. Apart de les aplicacions industrials, també veiem com grans empreses estan apostant per desenvolupar la tecnologia de cotxes autònoms (RAC1, 2017), però també els trobem en situacions més comunes com poden ser els robots aspiradora (LabView 2016 help, 2016) .

2.1. Què és un robot intel·ligent autònom?

Un robot autònom és un robot que desenvolupa tasques amb un alt grau d'autonomia. Hi ha robots que únicament són autònoms en el seu entorn immediat, com els robots de fàbriques. Una de les àrees d'investigació més important en el camp de la robòtica és la que estudia com permetre al robot interactuar i adaptar-se al medi on opera. Això permet al robot treballar en ambients canvians o compartits amb altres robots o persones.

Un robot autònom és capaç de:

- Obtenir informació del seu entorn.
- Operar durant un temps extens sense la intervenció humana.
- Moure's tot o parts d'ell en la seva zona de treball sense assistència humana.
- Evitar situacions perilloses per a les persones, per a les propietats o per a ell mateix.

Hi ha robots autònoms que son capaços d'aprendre de l'entorn i adquirir nous coneixements per tal de poder adaptar-se als canvis del medi (Autonomous Robots).

2.2. Història i orígens

Els inicis dels robots autònoms van ser molt simples. Els primers sistemes es basaven en seguir un camí prefixat sense importar el que hi hagués pel mig (Fernández Caramés, 2012). En un principi per definir els camins s'utilitzaven les línies elèctriques, a les quals el robot anava enganxat, aquests han evolucionat fins a l'ús de balises, enteses com a conjunt de senyals, visibles o invisibles, disposats per a indicar el camí a seguir. En un principi les balises eren reflectors que el robot detectava mitjançant emissors, tant de llum com de so, però també n'hi ha que emeten la seva posició mitjançant ones (Ortiz).

El tret més destacable d'aquests robots autònoms primigenis és la poca o nul·la possibilitat d'adaptar-se al medi. Molts robots que seguien camins predefinitos són incapaços de detectar si un obstacle els hi impedeix el pas, i si ho fan, l'únic que poden fer és aturar-se per evitar la col·lisió. A més a més, és costós haver de recolocar les balises per a traçar un nou camí cada vegada que es vol canviar la trajectòria del robot.

Per això, la investigació en el camp de la robòtica autònoma ha seguit els camins de la adaptabilitat i l'autonomia. És necessari que el robot sigui capaç de percebre el seu entorn i identificar els obstacles que li impedeixen el pas, així com d'adaptar-se a aquestes situacions i generar noves trajectòries per tal d'evitar la col·lisió. El robot també ha de poder ubicar la seva posició en l'entorn, per tal de poder arribar als punts de destí (Dias Semedo, Veiga, & Teixeira).

2.3. Localització

La localització del robot és imprescindible per tal que se li puguin assignar destins diferents. Si es vol establir una ruta nova, primer s'ha de conèixer l'entorn on s'operarà per tal d'escollir el recorregut més adient a la situació i les demandes.

Els mapes i els sensors són les eines que té un robot per tal d'identificar l'entorn, però degut a la inexactitud en les mesures i a les interferències de l'entorn, cal un mètode per depurar aquesta localització, com pot ser el filtre de Kalman (Dias Semedo, Veiga, & Teixeira) (Fernández Caramés, 2012). També és necessari adaptar les mesures que fa el robot al mapa, adaptant les coordenades robocèntriques a coordenades globals.

2.3.1. Mapes

Els mapes són representacions de l'espai, però actualment no hi ha cap estàndard per a fer aquesta representació degut a la gran varietat d'entorns d'operació i a la variació dels sensors d'un robot a un altre. Tot i això, hi ha unes propietats generals que tot bon mapa ha de complir (Fernández Caramés, 2012):

- **Escalabilitat:** L'escalabilitat és la habilitat de poder créixer en mida sense perdre la qualitat en els serveis oferts. Així, un mapa escalable no presentarà efectes adversos o negatius en augmentar de mida.
- **Compatibilitat amb l'ésser humà:** Els mapes han d'oferir una representació de l'entorn similar a la que fem servir els humans. Ha d'estar organitzat jeràrquicament i ha de permetre la informació semàntica.

- **Interoperabilitat:** Degut a la variació de sistemes de navegació i sensors integrats en els robots, un bon mapa ha de poder ser interpretat per diferents robots. D'aquesta manera un mateix mapa servirà per diferents màquines.

Hi ha un sistema de representació que compleix aquestes característiques sobradament, i són els SIG, Sistemes d'Informació Geogràfica (Andalucia, 2010). Els SIG són un conjunt integrat de hardware, software i dades geogràfiques dissenyat per capturar, emmagatzemar, actualitzar, manipular, analitzar i mostrar qualsevol tipus d'informació geogràficament referenciada. Combina elements de cartografia, anàlisi estadístic i bases de dades. Permet als usuaris crear busques interactives, analitzar la informació espacial, editar dades i mapes i representar el resultat de les operacions a través d'una interfície comprensible per als humans.

2.3.2. Sensors

Els sensors són les eines que tenen els robots per percebre l'entorn que els envolta. També els fan servir per comprovar el resultat de les accions de control sobre els seus actuadors. Quan els sensors mesuren el comportament del robot s'anomenen propioreceptius, i acostumen a estar en els eixos dels motors actuadors. Per altra banda, quan els sensors mesuren l'entorn s'anomenen exteroreceptius, i n'hi ha de molts tipus (Comillas).

El soroll és un problema quan parlem de sensors. Aquest pot ser degut a diferents motius, com poden ser una velocitat angular massa alta als eixos dels motors per al període de mostreig dels encòders o a l'error intrínsec als sensors. Podem suposar que aquest soroll és soroll blanc gaussià, de manera que l'error en una lectura no afecta de cap manera a les altres.

Hi ha molts sensors diferents que es poden fer servir per percebre l'estat del sistema i el medi en el que es mou. D'entre ells alguns dels més utilitzats són els següents:

- **Encòders:** Els encòders serveixen per mesurar el gir dels eixos. Consisteixen en uns discos perforats que s'instal·len al voltant dels eixos de gir i un emissor de raigs infrarojos i un receptor que se situen en perpendicular al disc perforat, de manera que quan l'eix gira s'obté un pols en el receptor. Fent servir aquests polsos que s'obtenen del receptor es pot calcular la velocitat de gir dels eixos si es coneix la quantitat de perforacions que té el disc. Si només permeten mesurar la velocitat de gir, s'anomenen encòders relatius, però hi ha encòders absoluts, que permeten determinar també el sentit de gir. Això es fa incorporant un segon cercle de perforacions en el disc, desfasat un 50%. Segons es rebin abans els polsos del cercle de perforacions primari o del secundari podem determinar el sentit de gir.

- **Sensors làser:** Els sensors làsers es basen en la velocitat de propagació de la llum per calcular distàncies. Porta incorporat un emissor làser que projecta el raig i un receptor làser que rep el raig reflectit sobre una superfície. Sabent el temps que triga la llum en anar i tornar podem saber la distància que separa el sensor de l'obstacle mitjançant un càlcul senzill com és $d = (c \cdot t)/2$, on d és la distància, c és la velocitat de la llum i t el temps de reflexió (Font Llagunes, 2007).
- **Càmeres:** Les càmeres digitals actuals funcionen amb sensors CMOS/CCD, i representen l'entorn 3D en una imatge 2D. Es fan servir models matemàtics per determinar la posició d'aquests punts de l'entorn 3D. Hi ha diferents models, però un dels més utilitzats per la seva senzillesa envers els seus competidors és el model de càmera estenopeica (Cámara estenopeica, 2017).
- **GPS:** Aquest sistema serveix per a localitzar els robots que operen en espais oberts. Mitjançant la posició coneguda de 24 satèl·lits que orbiten la Terra, els quals emeten una ona que es captada pel receptor, i el temps que triga aquesta ona en fer el trajecte, es fa servir una tècnica anomenada trilateració per a determinar la posició del receptor (Font Llagunes, 2007).

Per a poder fer servir les dades dels sensors cal establir el seu sistema de referència, i després traslladar les mesures d'aquest sistema de referència al del robot. D'això se'n diu calibrar. Més endavant parlarem sobre les coordenades robocèntriques i les globals i del calibratge.

Cada sensor és útil per algunes mesures i presenta inconvenients per altres, per això és bo que el robot compti amb més d'un sistema sensor exteroreceptors. Quan el robot complementa la informació d'un sensor amb al informació proporcionada per un altre per tal d'obtenir informació més robusta en diem fusió sensorial (Fernández Caramés, 2012).

2.3.3. Posicionament dels robots autònoms

Tal i com he explicat abans, per tal d'utilitzar la informació que s'obté dels sensors cal adaptar-la al mapa de l'entorn.

Quan els sensors efectuen una mesura, ho fan en base a unes coordenades robocèntriques, però aquestes coordenades no serveixen per orientar-se en el mapa de l'entorn del que disposa el robot. Les coordenades robocèntriques acostumen a tenir com a punt de partida el punt central del robot o el centre d'un dels sensors.

Per fer la conversió cal saber com es representa la posició del robot en el mapa. Aquesta representació es fa seguint el model $p(x, y, \theta)$, on x representa la posició del centroide del

robot en la coordenada X , y representa la posició del centroide del robot respecte la coordenada Y i θ representa l'angle entre l'eix de desplaçament del robot i l'eix de coordenades y .

En la *Figura 2-1* que segueix al paràgraf estan representades les coordenades robocèntriques $p_{\text{coordenades robocèntriques}} = (x_r, y_r)$. Les coordenades globals es representen per $p_{\text{coordenades globals}} = (x_k, y_k, \theta_k)$ en els eixos globals X_G i Y_G .

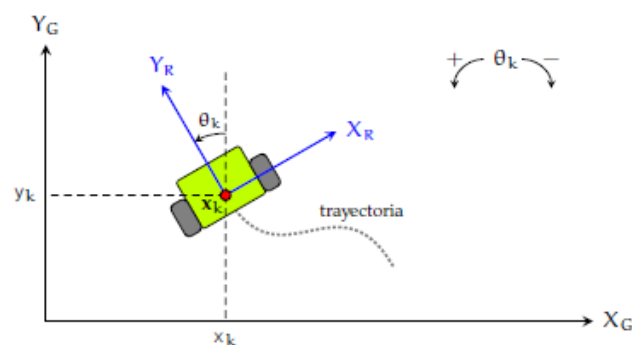


Figura 2-1: Relació entre el sistema de referència del robot i global

En base a aquesta representació es pot crear una matriu de rotació que permeti conèixer la ubicació del robot en base a les coordenades globals i contrastar la informació obtinguda mitjançant els sensors amb la informació compresa en el mapa, de manera que es pugui corregir la posició i conèixer amb més exactitud la ubicació del robot.

2.4. Generació i seguiment de trajectòries

2.4.1. Generació de trajectòries

Per poder assolir un objectiu marcat, el robot ha de ser capaç de crear una trajectòria per arribar-hi. Aquest camí no pot ser qualsevol, ja que els robots hauran de complir una sèrie de condicions a l'hora de moure's. Un vehicle que transporti persones no pot fer moviments laterals molt sobtats ni acceleracions brusques, igual que un vehicle que porti incorporat un remolc no pot fer girs molt tancats. Per tal que es compleixin aquestes condicions de moviment cal utilitzar un model cinemàtic dinàmic, cosa que requereix molts recursos. Per a solucionar això, diversos autors proposen descompondre el

moviment en les seves components longitudinal i lateral per fer els càlculs de manera separada i tornar-los a ajuntar un cop obtinguts els resultats individuals.

Generalment, per a generar una trajectòria es segueixen els següents passos (Hult & Sadegi Tabar, 2013):

- **Definició dels *endpoints*:** Per tal de poder calcular la trajectòria per arribar al destí, el robot primer ha de marcar un seguit d'objectius de ruta, els *endpoints*. Aquests *endpoints* formaran la base a partir de la que calcular la trajectòria. Els *endpoints* es defineixen en base a una norma. Depenent de l'entorn de treball i de les condicions d'operació del robot, es poden variar la quantitats d'*endpoints* per metre o la distància que hi ha d'haver entre aquests i els límits de l'espai de treball.
- **Càlcul de la trajectòria:** Un cop ubicats els *endpoints*, es calculen un seguit de trajectòries com a solució. El resultat és una col·lecció de punts al llarg de cada trajectòria, que representen discretització del resultat calculat. Tal i com s'ha dit abans, per facilitar el càlcul es poden descompondre en components laterals i longitudinals de la trajectòria.
 - **Direcció lateral:** Es generen trajectòries que permeten arribar als diferents *endpoints*, les quals difereixen entre sí en el desplaçament lateral del robot.
 - **Direcció longitudinal:** Definir aquests *endpoints* és més complicat, ja que la trajectòria en aquesta direcció ve donada per una simulació que fa servir el model lateral calculat. La manera de controlar això és mitjançant els límits laterals. Tot i això, realitzar diferents iteracions per tal d'assolir un determinat *endpoint* requereix moltes simulacions, cosa que augmenta el consum computacional.

Per tal que les acceleracions no superin el límit establert, es defineixen els *endpoints* en funció de $a_{lateral} \leq a_{màxima}$. En les simulacions cal descartar aquelles en les que els *endpoints* es situïn fora de la zona de detecció dels *endpoints*.

- **Adaptació a la geometria de la via:** Les trajectòries definides son essencialment unidimensionals. Descriuen el moviment lateral respecte una coordenada fixa, descompondre el moviment longitudinal. Això fa que sigui necessària una línia al llarg de la direcció de la carretera. D'aquesta manera la trajectòria seguirà la curvatura de la via.

2.4.2. Seguiment de trajectòria

Un cop generades les diferents trajectòries possibles a l'hora d'assolir un objectiu, cal escollir-ne una, la que millor s'adapti a les necessitats imposades. Per tal de descobrir quina és la trajectòria més adequada se segueixen un seguit de passos (Hult & Sadegi Tabar, 2013):

- **Predicció de l'entorn:** Per tal de valorar les trajectòries generades cal poder predir el comportament dels obstacles. Això es fa mitjançant simulacions. També és necessari tenir modelat el comportament dels sensors dels que depenen les mesures.
Qualsevol trajectòria executada ha d'estar basada en la predicció dels obstacles. En aplicacions reals, això és bidireccional, ja que la trajectòria executada pel vehicle també farà variar la trajectòria d'alguns obstacles. Si a més afegim la variable humana, hem d'aplicar models probabilístics que compliquen molt els models.
- **Control de viabilitat:** Per tal d'assegurar la seguretat de la ruta, les trajectòries que passen properes a un obstacle o que se surten dels límits de l'espai de treball són descartades.
- **Assignació de puntuació:** Per a poder escollir la millor trajectòria, s'assigna una puntuació a cada recorregut en funció dels paràmetres desitjats. Per això es defineix una equació que permet descriure el comportament desitjat del vehicle i permet identificar la millor trajectòria. Definim J com la suma ponderada dels diferents paràmetres que es volen controlar.

Alguns dels aspectes que es poden tenir en compte en la equació poden ser:

Viratges: En aplicacions on el robot porti tripulants o que comparteixi l'espai de treball amb altres, es pot penalitzar la conducció agressiva.

Acceleració màxima: Igual que en l'anterior, es poden penalitzar les trajectòries que presenten pics d'acceleració.

Desviació de la línia: Es poden penalitzar les trajectòries els *endpoints* de les quals queden lluny de la línia desitjada.

Velocitat terminal: Es poden premiar les trajectòries amb velocitats d'*endpoints* pròximes a la velocitat desitjada.

Proximitat amb obstacles: Es poden penalitzar les trajectòries que en algun moment s'apropen massa a un obstacle.

Estacionalitat: Es poden premiar les trajectòries que completin trajectòries començades.

Filtrat: Si la única base per escollir la trajectòria és la puntuació, pot ser que la millor trajectòria variï molt en molt poc temps. Per tal d'evitar aquests problemes i el soroll, es pot aplicar un filtre passa baixos. A l'afegir el filtre s'afegeix una "memòria", de manera que la trajectòria prèvia influeix en la elecció de la següent.

Selecció: Per últim, un cop aplicat el filtre, s'aplica la trajectòria escollida. Tot aquest procés es va repetint cada cert temps, depenent de la necessitat del robot d'adaptar-se a l'entorn. Si l'espai de treball està ocupat per altres robots o obstacles mòbils, el procés s'ha de repetir cada poc temps.

3. DESCRIPCIÓ DEL ROBOT

3.1. Descripció física

Per a la implementació d'aquest projecte he fet servir un robot Roomba modificat, tal com es veu a la *Figura 3-1*. Aquest robot disposa de tres rodes, dues d'elles proporcionen tracció al robot i l'altre serveix per mantenir la estabilitat. En la *Figura 3-2* es poden veure les rodes.

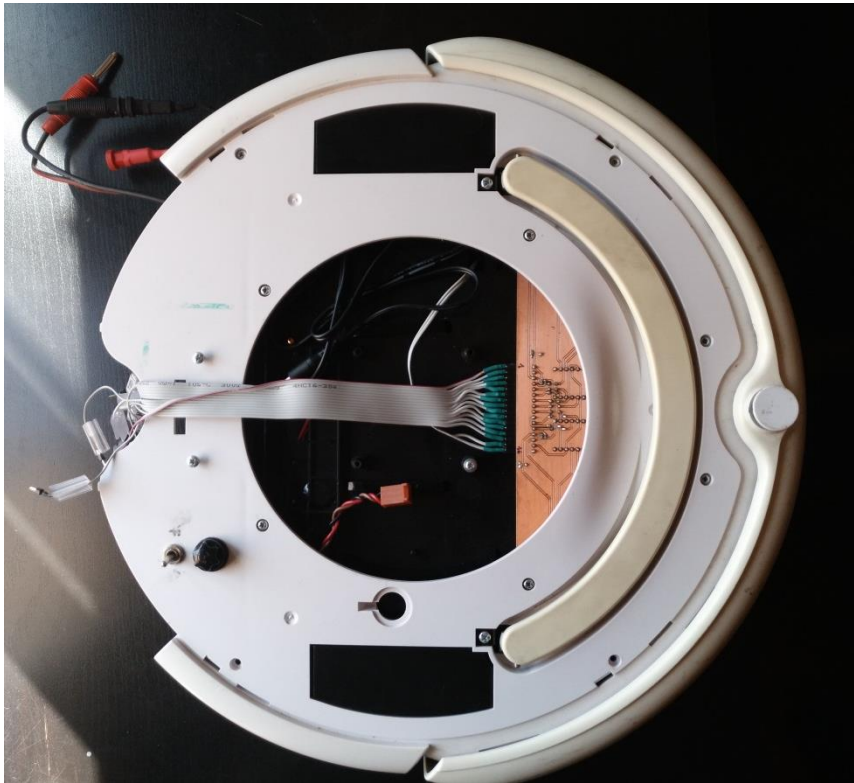


Figura 3-1: Vista superior del robot

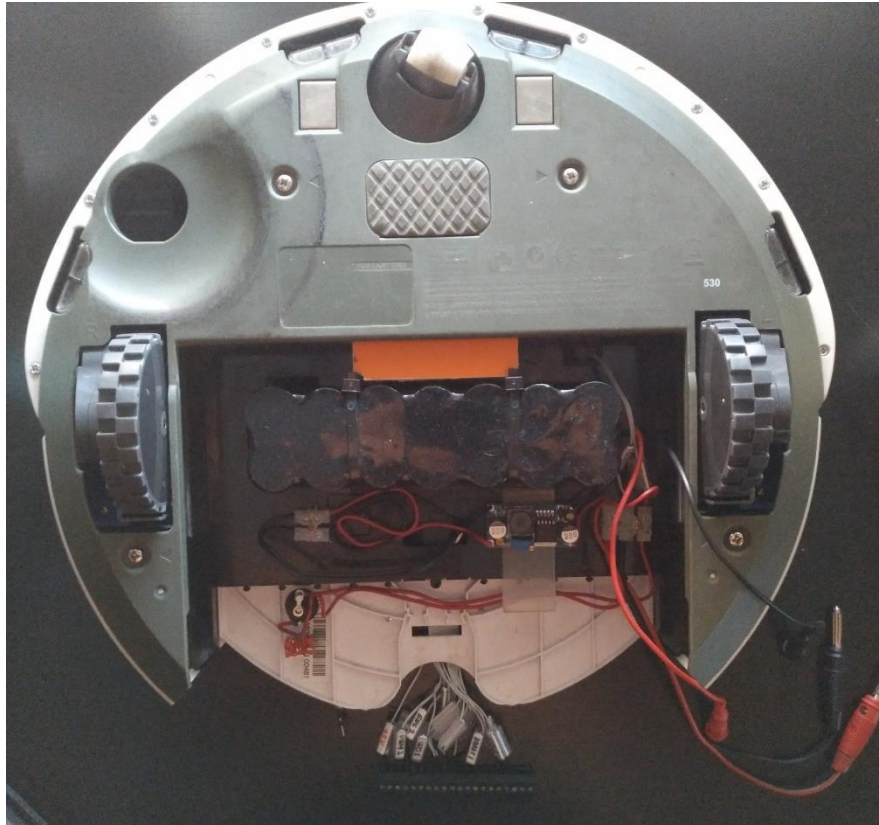


Figura 3-2: Vista inferior del robot

L'alimentació del robot es fa mitjançant una bateria muntada al ventre, tal i com es veu en la *Figura 3-4*. La bateria està formada per 14 piles que proporcionen 18V. Per a fer la càrrega de la bateria s'aplica una tensió DC de 20V durant 16h, que és el que dura el cicle de càrrega. Per a proporcionar un voltatge adient per alimentar la placa de control es fa servir un convertidor de voltatge tipus buck LM2596 com el de la *Figura 3-3*, basat en un convertidor DC-DC step down. Aquest convertidor és capaç de conduir fins a 3A i la seva sortida té un arissat de tensió baix. El mòdul és una font d'alimentació commutada, de manera que té una eficiència alta en comparació amb els convertidors lineals.



Figura 3-3: Convertidor de voltatge

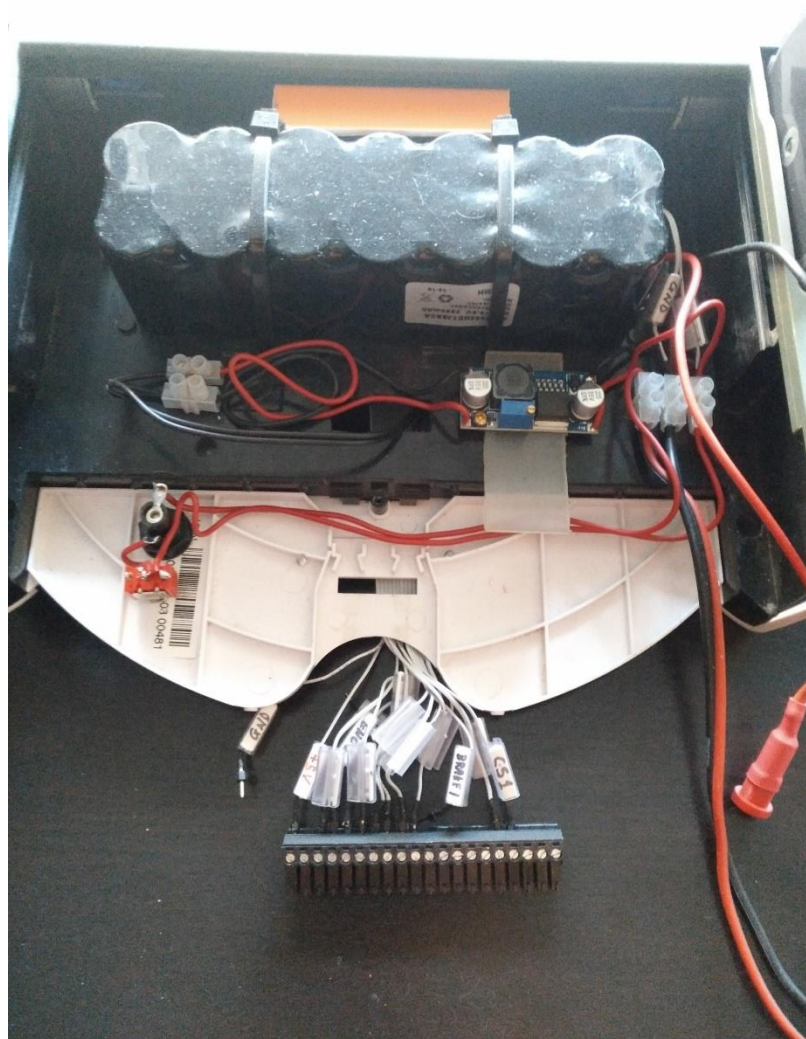


Figura 3-4: Detall del sistema d'alimentació

3.2. Sensors disponibles

El Roomba disposa de diversos sensors que són útils per a la localització del robot i dels obstacles.

- **Sensors infrarojos:** Es basen en el temps que triga la llum en reflexar-se contra una superfície. Els sensors infrarojos del robot estan apuntant cap a terra, de manera que són capaços de detectar si sota seu hi ha una superfície.
- **Encòders:** Els encòders dels motors estan basats en sensors d'efecte Hall digital, que emeten una senyal quan estan pròxims a un material ferromagnètic. Per això el motor disposa d'un disc acoblat a l'eix, el qual té diferents imants repartits pel

perímetre. El sensor d'efecte Hall, que segueix l'esquema bàsic representat en la *Figura 3-5*, detecta els imants quan passen per davant seu, de manera que si sabem quants imants hi ha en total, és a dir, el nombre de polsos que emet el sensor en una volta, podem saber la quantitat de voltes per unitat de temps. D'aquesta manera, els encòders ens permeten conèixer la velocitat de gir dels motors. En la *Figura 3-6* es veu la senyal típica d'un encòders d'efecte Hall.

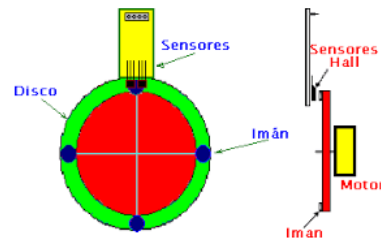


Figura 3-5: Esquema encòder d'efecte Hall

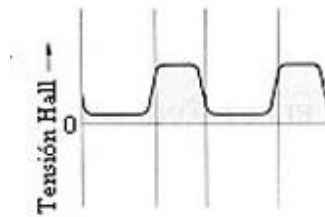


Figura 3-6: Senyal típica d'encòder

- **Sensors de pressió:** Aquests sensors fan servir uns contactes de final de carrera per determinar quan la roda està recolzada a terra. Quan la roda toca a terra, el pes del propi robot fa que cedixin els amortidors i que s'activi el contacte. En deixar d'estar en contacte amb el terra, els amortidors s'estiren i el contacte s'obre.
- **Acceleròmetre:** Addicionalment als sensors propis del Roomba, s'hi afegeix un acceleròmetre integrat a la placa de control. L'acceleròmetre mesura els moviments produïts en els plans cartesianes a partir de la compressió d'uns cristalls piezoelèctrics, els quals produeixen una càrrega elèctrica proporcional a la força aplicada (Omega, 2005).

3.3. Sistema de control

Per tal que el robot pugui assolir velocitats més elevades i es pugui fer un control més acurat del moviment de les rodes s'ha modificat el driver de control. El driver utilitzat és el

DRV8801, l'esquema del qual es pot veure en la *Figura 3-7* (Pololu, 2003), que es capaç de controlar la velocitat i el sentit de gir d'un motor. Aquest proporciona 1A de corrent de forma contínua i en un rang de 8 a 36V DC.

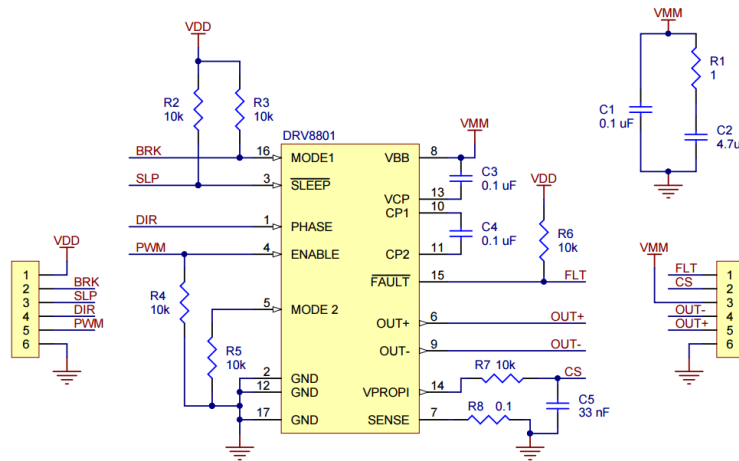


Figura 3-7: Esquema DRV8801

Aquest driver únicament requereix dues línies d'Entrades/Sortides digitals (I/O digitals), una per la direcció (PHASE) i una altre per a la velocitat (ENABLE), modulada mitjançant PWM. Apart d'aquestes dues I/O, també hi ha la línia de BREAK (MODE1).

L'integrat té diferents pins, i són els següents:

- MODE1: Correspon a la entrada digital BRAKE, la qual determina si el motor volta en punt mort (0) o frena (1) quan la entrada PWM val zero.
- SLEEP: Aquesta entrada digital habilita el mode de baix consum del DRV8801 quan està connectada a nivell alt i l'inhabilita si està a nivell baix.
- PHASE: Quan aquesta entrada està a nivell alt el motor gira cap endavant, i gira cap endarrere quan està a nivell baix.
- ENABLE: Correspon a la senyal PWM, que modula la velocitat del motor.
- GND: Serveix com a massa de l'integrat.
- FAULT: És una sortida digital que es posa a nivell alt quan es produeix un sobre-corrent. És una senyal d'estat.
- CS: Correspon a una sortida analògica que dona un voltatge proporcional al corrent del motor (aproximadament 500mV/A).

En la *Figura 3-8* es veuen els pins que corresponen al patillatge del driver:

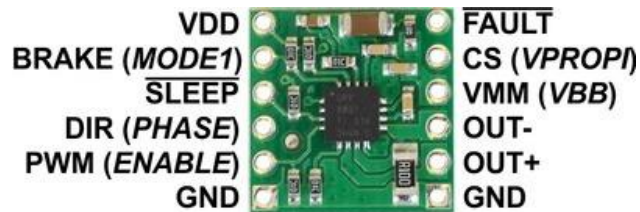


Figura 3-8: Connexions DRV8801

Segons les proves efectuades, l'integrat és capaç de proporcionar un corrent d'1A de manera constant durant cert temps sense que s'activi la protecció tèrmica. Aquestes proves es van fer utilitzant un cicle de treball del PWM del 100%, així que cal tenir en compte el sobreescalfament generat en funció de la freqüència del senyal.

El control del robot es fa mitjançant una placa myRIO-1900 de National Instruments com la que es veu en la *Figura 3-9*. La placa disposa de tres ports de connexió: A, B i C, representats en la *Figura 3-11*. Els ports A i B disposen de 34 pins cada un, amb diferents I/O, tant analògics com digitals. Disposen també de sortides de potència a +5V i a +3,3V, així com pins de GND. Tot i això, el port que s'ha fet servir és el C, el qual es pot veure en detall en la *Figura 3-10*, ja que el nombre d'I/O (20) és suficient. Aquest port disposa de 8 I/O digitals, de les quals dues permeten el control PWM, 2 sortides analògiques i 2 entrades analògiques diferencials, per les quals s'utilitzen quatre pins. Hi ha tres sortides de potència, a +15V, -15V i +5V, així com pins de GND. La placa compta també amb un acceleròmetre capaç de captar acceleracions en les tres direccions de l'espai.



Figura 3-9: NI myRIO-1900



Figura 3-10: myRIO detall port C

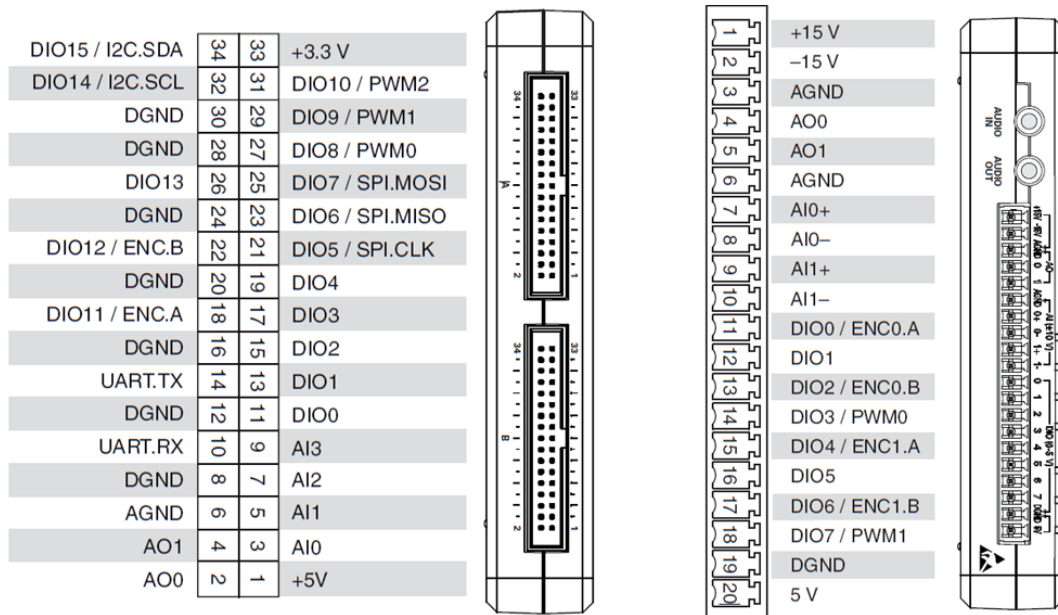


Figura 3-11: Detall ports A, B i C de la myRIO

Les entrades digitals es fan servir per a les lectures dels encòders dels motors i dels sensors de pressió de les rodes. Les entrades analògiques s'utilitzen per llegir la resposta al corrent que circula pel motor. Les sortides digitals es fan servir per a indicar el sentit de gir dels motors i per a regular la velocitat mitjançant la modulació PWM. Les sortides analògiques serveixen per alimentar el motor i per definir una massa comuna.

Per fer d'interfície entre la myRIO i el robot es fa servir una placa de circuit imprès que és l'encarregada de fer les connexions entre les diferents parts. Les connexions d'aquesta targeta es mostren a la *Figura 3-12*.

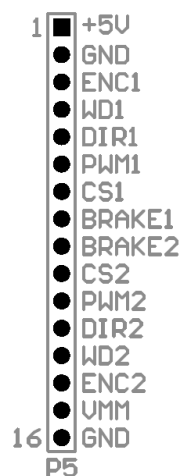


Figura 3-12: Connexions placa circuit imprès

Cadascuna de les connexions de la targeta correspon a una de les I/O de la myRIO, i es connecten mitjançant un connector com el de la *Figura 3-13*, a excepció de *VMM* i *GND*, que van connectades a la alimentació proporcionada per la bateria per tal de proporcionar corrent als motors. En la *Taula 3-1* es pot veure la correspondència entre les connexions del Roomba i els pins de la myRIO, així com una descripció d'aquestes.

Taula 3-1: Correspondència placa de circuit integrat-myRIO

Connector	Direcció (myRIO)	Descripció	Pin myRIO
+5V	AO	+5V	20
GND	-	Massa	19
ENC1	DI	Polsos encòders motor 1	13
WD1	DI	Sensor caiguda roda 1 (5V)	15
DIR1	DO	Direcció del motor 1 (5V)	12
PWM1	DO	Control velocitat motor 1 (5V)	14
CS1	AI	Proporcional corrent motor 1 (0..5V)	7
BRAKE1	DO	Frenar motor 2	
BRAKE2	DO	Frenar motor 2	
CS2	AI	Proporcional corrent motor 2 (0..5V)	9
PWM2	DO	Control velocitat motor 2 (5V)	18
DIR2	DO	Direcció del motor 2 (5V)	16
WD2	DI	Sensor caiguda roda 2 (5V)	11
ENC2	DI	Polsos encòders motor 2	17
VMM	AO	Alimentació motors	-
GND	-	Referència alimentació motors	-



Figura 3-13: Connexions myRIO-Roomba

4. CONTROL A BAIX NIVELL

La programació del robot es fa mitjançant LabView 2016, de National Instruments. LabView és un software de programació modular que compta amb connexió directa amb la myRIO, així com mòduls específics de la placa que fan més senzilla la programació (National Instruments, 2017).

El model de control del robot es mostra en el diagrama de blocs de la *Figura 4-1*.

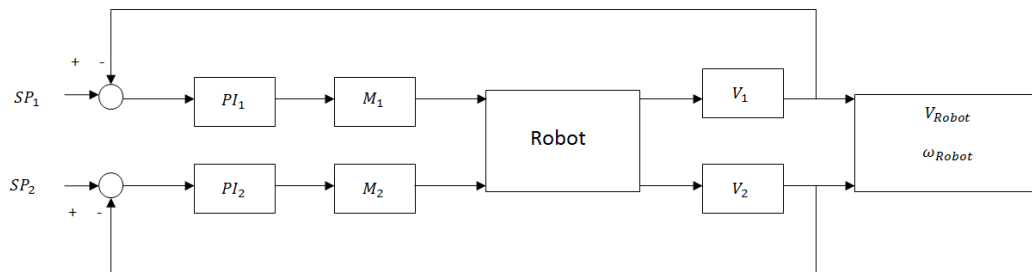


Figura 4-1: Esquema de control

A partir de les velocitats de consigna (setpoints) fixades per cada roda, representades per SP_1 i SP_2 , es proposa un llaç de control de velocitat en base a un controlador Proporcional-Integral (PI). Els encòders de cada roda permeten calcular la velocitat real de les rodes. Aquesta velocitat real es compara amb la velocitat de referència, de manera que s'obté la senyal d'error. L'error, un cop filtrat pel controlador PI, dona la senyal de control que actua sobre els motors per accelerar o frenar cada una de les rodes del robot. La velocitat real del robot permet calcular la posició real d'aquest. La posició real es pot expressada en coordenades robocèntriques (x_r, y_r) o en coordenades globals (x_k, y_k) . També permet determinar l'angle de desplaçament (θ_k) .

4.1. Encòders i tensió aplicada a les rodes

Per començar, cal calibrar els encòders dels motors. Aquest calibratge va en funció del temps de mostreig, ja que depenent d'aquest variarà el nombre de polsos per volta. Si es defineix el temps de mostreig en 100 ms, cada volta l'encòder genera 261 polsos. Això es pot mesurar fàcilment fent servir el mòdul *Encoder* de LabView i enllaçant-lo a un

comptador. D'aquesta manera la constant que converteix nombre de polsos a revolucions per minut, K_s , es calcula de la següent manera:

$$K_s = \frac{1 \text{ volta}}{261 \text{ polsos}} \times \frac{1000 \frac{ms}{s}}{100 \text{ ms}} \times \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}} = \frac{200}{87} \text{ RPM/polsos}, \quad (3.1)$$

Un cop calculat el factor de conversió de polsos a RPM, cal expressar la velocitat en unitats del SI. Per tal de fer la conversió, s'ha de mesurar l'arc de la roda. En el cas de les rodes del Roomba, el seu arc correspon a 219,91 mm. A partir d'aquesta dada és fàcilment deduïble la velocitat:

$$1 \text{ RPM} \times \frac{0,21991 \text{ m}}{1 \text{ volta}} \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} = 3,665 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}, \quad (3.2)$$

La constant que relaciona m/s amb polsos és la següent:

$$K'_s = K_s \frac{\text{RPM}}{\text{polsos}} \cdot 3,665 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m/s}}{\text{RPM}} = 8,425 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m/s}}{\text{polsos}}, \quad (3.3)$$

Un altre càlcul previ és la conversió velocitat – Duty Cicle (DC) PWM. Tal i com s'ha explicat anteriorment, el control de la velocitat dels motors es fa a través de modulació PWM, de manera que la tensió resultant depèn del cicle de treball d'aquest senyal. Per a fer aquesta conversió s'han de prendre mesures experimentals, segons les quals s'obtenen diversos valors de DC en funció de la velocitat:

$$1 \text{ DC} \rightarrow 0,56 \text{ m/s}$$

$$0,69 \text{ DC} \rightarrow 0,38 \text{ m/s}$$

$$0,30 \text{ DC} \rightarrow 0,16 \text{ m/s}$$

A partir d'aquests valors obtinguts es fàcil calcular una recta que relacioni una variable amb l'altre:

$$V = x \cdot DC + y$$

$$0,16 = x \cdot 0,3 + y \rightarrow y = 0,56 - x \rightarrow y = -0,01$$

$$0,56 = x \cdot 1 + y \rightarrow 0,16 = 0,3x + 0,56 - x \rightarrow x = 0,57$$

$$V = 0,57 \cdot DC - 0,01$$

$$K_v = \frac{0,01}{0,57} \cdot \frac{DC}{m/s'} \quad (3.4)$$

Aquesta funció té un problema, i és que en el moment que es regula la velocitat a 0, DC no val zero, de manera que sempre hi ha un senyal als motors.

Un cop efectuats els càlculs previs, es pot començar a programar les primeres funcions. La funció bàsica de control de velocitat està basat en tres mòduls: encòder, PWM i digital output (DO). El mòdul de DO es fa servir per seleccionar la direcció de rotació dels motors, que a l'estar enfrontats l'un amb l'altre ha de ser una la inversa de l'altre, el mòdul PWM serveix per regular la velocitat, i el mòdul d'encòder permet llegir la senyal dels encòders dels motors.

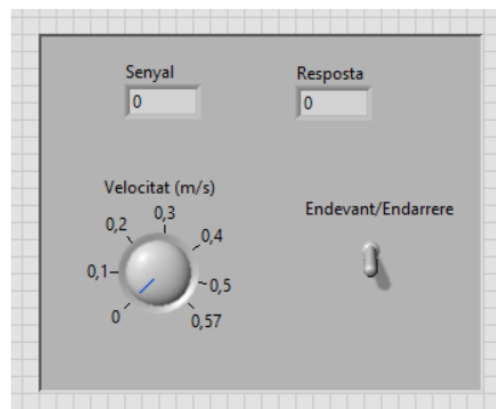


Figura 4-2: Panell de control

El panell de control, que es pot veure en la *Figura 4-2*, consta d'un regulador per a la velocitat, un interruptor per escollir el sentit de desplaçament i dos indicadors, un que representa el senyal d'entrada i l'altre que representa el senyal de sortida.

En la *Figura 4-3* es veu la implementació en LabView. La programació és simètrica en les dues rodes, ja que les dos tenen el mateix comportament. Es fa servir el mòdul d'Encoder, PWM i Digital Output, integrats en el pack de mòduls de la myRIO. El mòdul d'Encoder permet obtenir la lectura dels encòders de les rodes, de manera que serveix per determinar la velocitat de la roda, el mòdul PWM permet crear una senyal PWM per al control dels motors, i mòdul Digital Output permet determinar el valor d'una sortida, en aquest cas la sortida encarregada d'indicar el sentit de gir del motor.

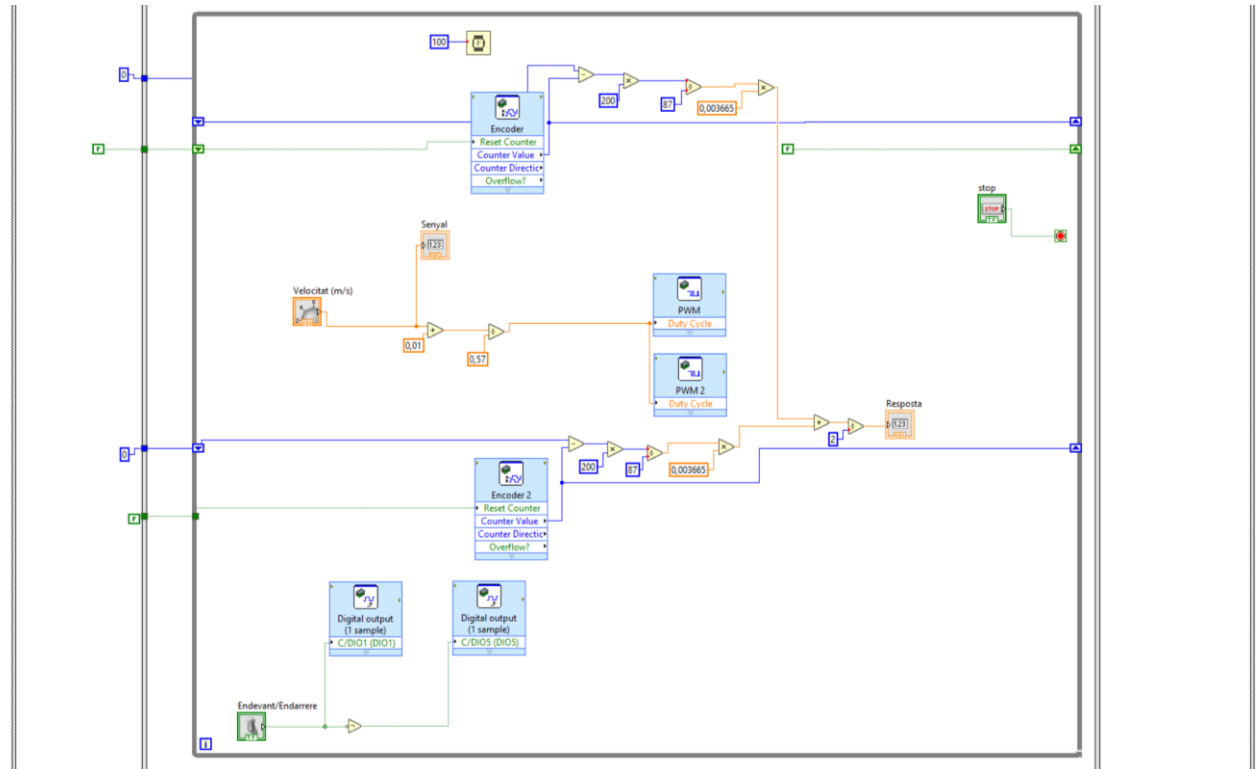


Figura 4-3: Control de la velocitat en LabView per a una roda

4.2. Disseny del control de velocitat

Per al control de velocitat de les rodes del motor cal sintonitzar un controlador Proporcional-Integral (PI). El procés de sintonia del controlador es realitza en un llaç obert, per la qual cosa es crea en LabView la funció de la *Figura 4-4*, que representa aquest llaç obert.

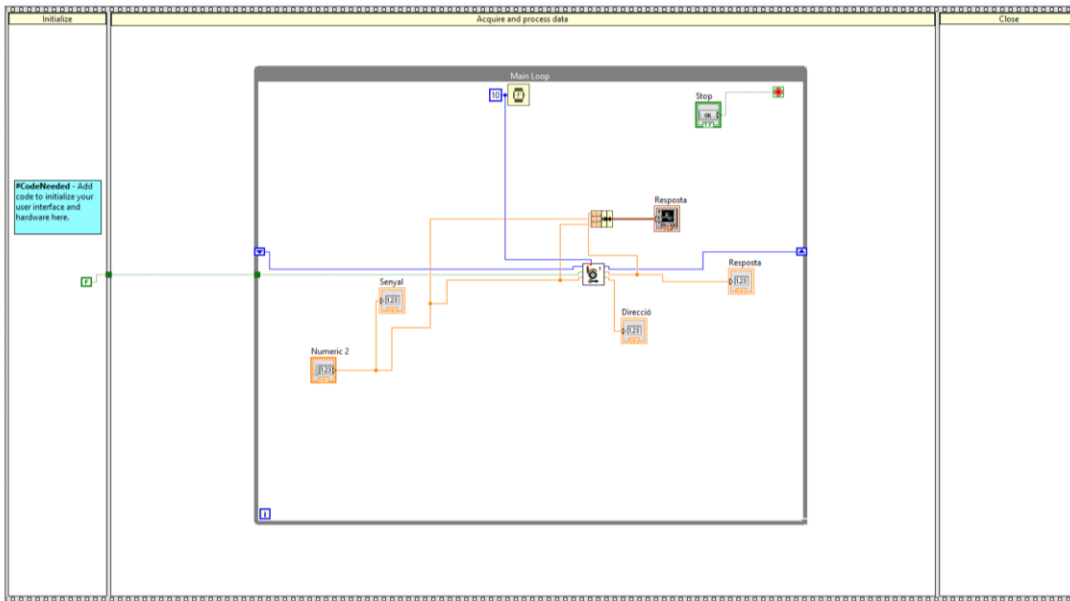


Figura 4-4: Llaç obert en LabView

S'aplica una entrada en forma de graó i s'observa la resposta del sistema. A partir de la representació gràfica de l'estimul i la resposta es pot trobar la constant de temps del sistema, τ , que és el temps que triga el sistema en assolir el 63,2% del valor de setpoint. En la *Figura 4-5* i la *Figura 4-6* s'observa la resposta del sistema:

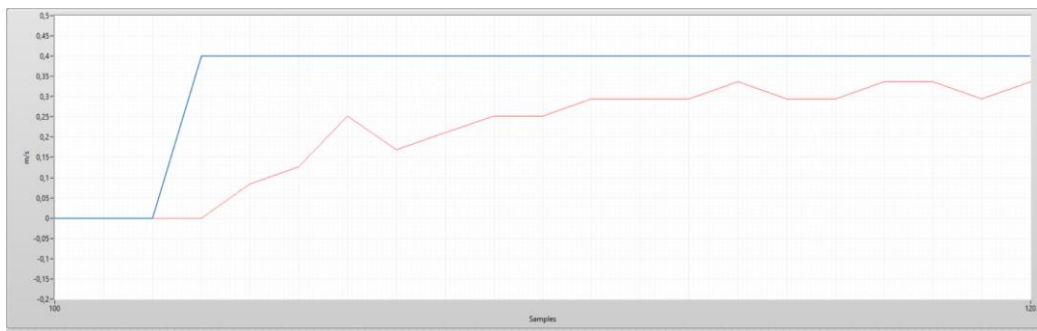


Figura 4-5: Vista en detall de la resposta dels motors envers la consigna



Figura 4-6: Vista de la resposta dels motors envers la consigna

En aquest sistema, la constant de temps correspon a 60ms. El guany del sistema, k , és calcula tal que $k = \frac{\Delta y}{\Delta u} = \frac{0,33}{0,4} = 0.825$, on Δu és el canvi que es produeix en la consigna, Δy és el canvi produït en el sistema a partir de la variació en la consigna. Un cop determinat el guany i la constant de temps s'aplica la tècnica de síntesi directa [18] per a calcular els paràmetres del PI. Podem calcular el temps d'integració per al PI: $T_i = \frac{\tau}{k \cdot \tau_{esperada}} = \tau = 60ms$. Un cop obtinguts els paràmetres del PI cal establir el llaç de control, representat en la *Figura 4-7*.

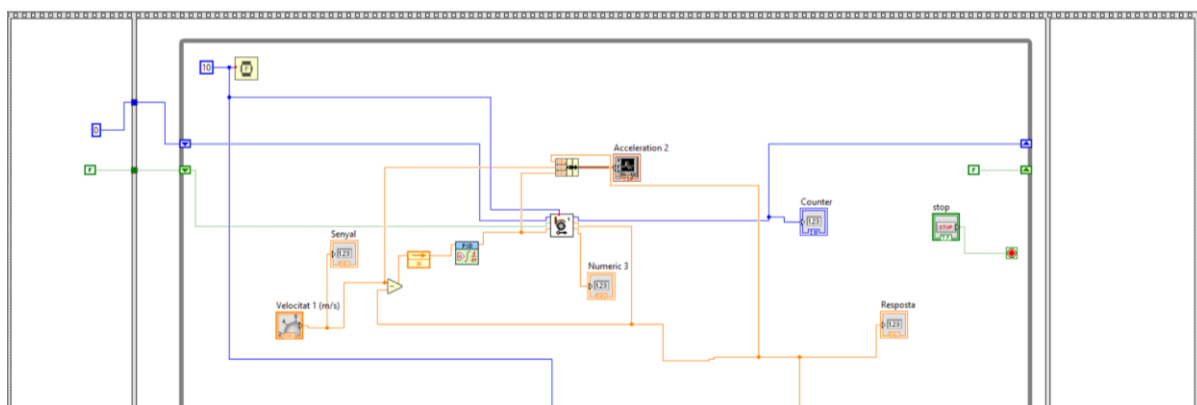


Figura 4-7: Llaç tancat en LabView

4.3. Càlcul de posició del robot

Per al càlcul de la posició es fan servir dos sensors diferents: els encòders de les rodes i l'acceleròmetre de la myRIO. A partir de les mesures obtingudes amb els dos sensors i aplicant els càlculs adequats, es creuen els resultats per obtenir una posició més acurada.

4.3.1. Càlcul de la posició a partir dels encòders

A partir de la resposta originada per les dues rodes (V_1, V_2) es pot calcular la velocitat lineal i angular del robot tal i com es mostra en les equacions 4.1 i 4.2.

$$V_{robot} = \frac{1}{2}(V_1 + V_2), \quad (4.2)$$

$$\omega_{robot} = \frac{1}{L}(V_1 - V_2), \quad (4.3)$$

on V_1 i V_2 es calculen a partir de la velocitat angular de cada roda a partir de la equació 4.3.

$$V = \omega \cdot r, \quad (4.3)$$

V_{robot} i ω_{robot} són la velocitat lineal i la angular del robot respectivament, i L és la distància entre les rodes del robot.

Tot això s'aplica a LabView com es veu en la *Figura 4-8*.

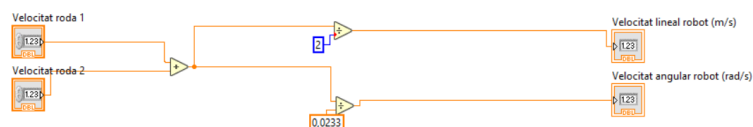


Figura 4-8: Càlcul de velocitats en LabView

Amb aquestes velocitats i coneixent la posició inicial del robot es pot conèixer la posició del robot. Per expressar aquesta posició cal descompondre la velocitat en les seves components cartesianes tal i com es veu en les equacions 4.4, 4.5, 4.6 i 4.7, i aplicar el diferencial de temps:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V(t) \\ \omega(t) \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

$$x(t) = x(t-1) + \frac{\Delta t}{2} (V_1(t-1) + V_2(t-1)) \cdot \cos(\theta(t-1)) \quad (4.5)$$

$$y(t) = y(t-1) + \frac{\Delta t}{2} (V_1(t-1) + V_2(t-1)) \cdot \sin(\theta(t-1)) \quad (4.6)$$

$$\theta(t) = \theta(t-1) + \frac{\Delta t}{L} (V_1(t-1) - V_2(t-1)) \quad (4.7)$$

a on $x(t), y(t)$ son les posicions del robot en els dos eixos cartesianes expressades en coordenades globals, $\theta(t)$ és l'angle que forma el frontal del robot respecte l'eix x de les coordenades globals, L és la distància entre les rodes del robot i Δt és el temps de mostreig.

Al programar aquest càlcul a LabView (*Figura 4-9*) es fan servir les funcions de sinus i cosinus, que expresen els resultats en radiants. Hi ha un càlcul per convertir el temps de mostreig, que està en milisegons, a segons, així com la resta de càlculs necessaris.

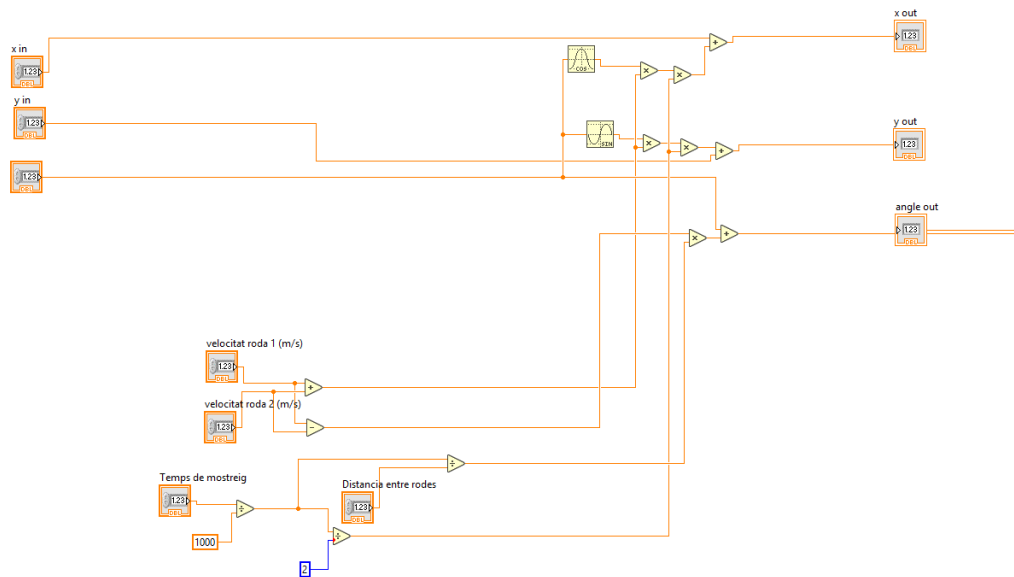


Figura 4-9: Càlcul de posició en LabView

Per exemplificar això s'ha realitzat un experiment en el qual el robot ha de recórrer el camí des de (0,0) fins a (1.5,0). Per a fer això se li indica un setpoint de velocitat de $V_{lineal\ del\ robot} = 0.25\ m/s$. El programa utilitzat és el que es veu en la [Figura](#), amb el panell de la [figura](#). En la [taula](#) es veuen els resultats obtinguts, on la columna *previst* indica el valor previst que haurien de tenir les mesures, la columna *càlcul* indica els resultats calculats pels encòders, i la columna *mesurat* indica les medicions efectuades sobre el terreny.

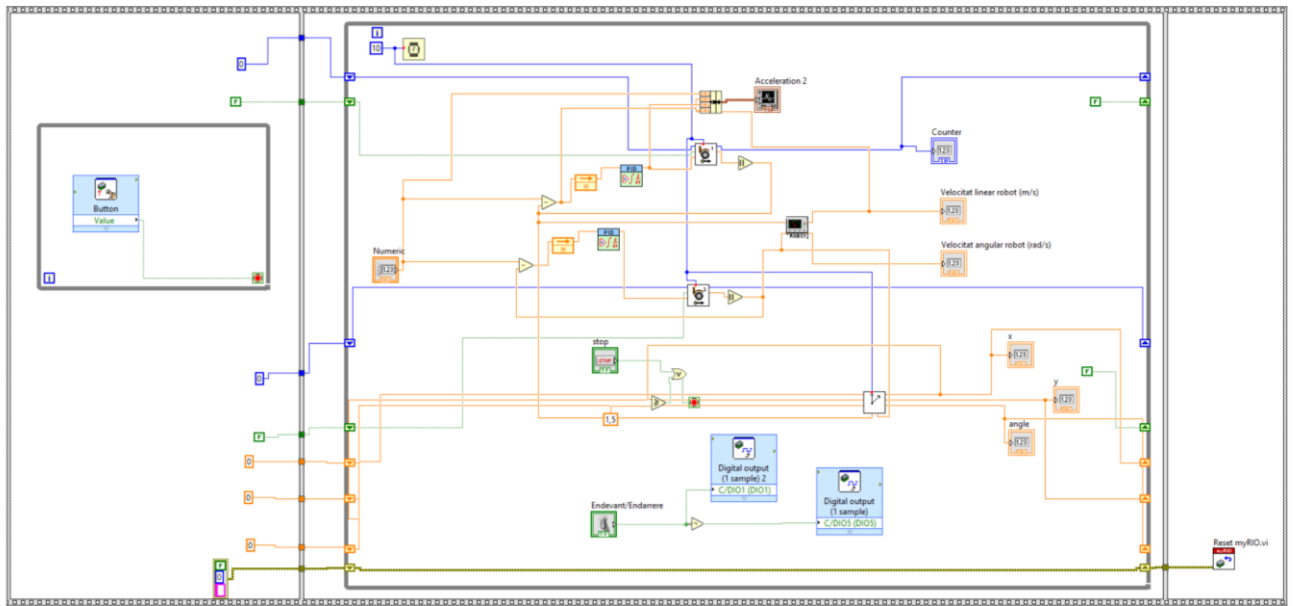


Figura 4-10: Exemple d'implementació del càlcul de posició i control de velocitat mitjançant l'encòder

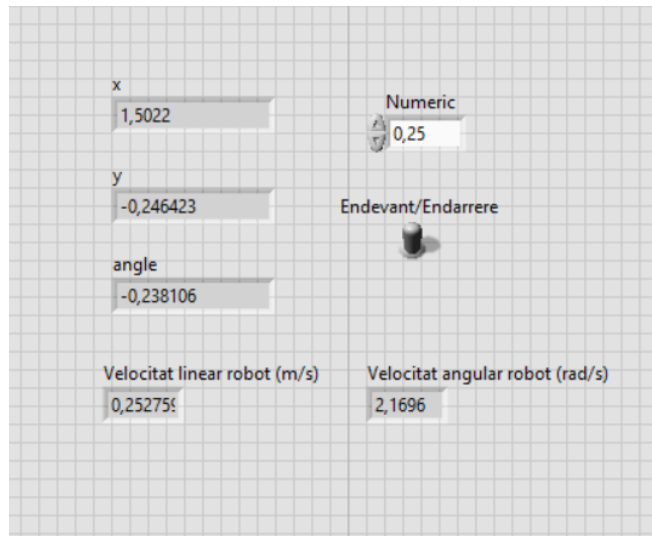


Figura 4-11: Exemple de panell del càlcul de posició i control de velocitat mitjançant l'encòder

	Posició (m)	Angle (rad)
Prevista	(1.5,0)	0
Calculada	(1.502,-0.246)	-0.238
Mesurada	(1.595,-0.294)	-0.182

Taula 4-1: Resultats de l'exemple de càlcul de posició mitjançant l'encòder

4.3.2. Càlcul de la posició a partir de l'acceleròmetre de la myRIO

Els acceleròmetres de la myRIO permeten conèixer la velocitat del robot, ja que

$$V_{robot} = \int a_{robot} dt. \quad (4.7)$$

Aquesta fórmula es pot aplicar als dos eixos cartesianes, de manera que amb les acceleracions en l'eix x i en l'eix y es coneixen les velocitats en aquests eixos,

$$V_x(t) = V_x(t-1) + \int_{t-1}^t a_x dt, \quad (4.7)$$

$$V_y(t) = V_y(t-1) + \int_{t-1}^t a_y dt. \quad (4.8)$$

On $V_x(t)$ i $V_y(t)$ representen la velocitat del robot en els eixos cartesianes, t el temps actual i a_x i a_y l'acceleració del robot en els eixos cartesianes.

Per determinar la velocitat lineal i l'angle de desplaçament es determinen a partir de les velocitats V_x i V_y (Figura 4-12) i mitjançant les operacions trigonomètriques següents:

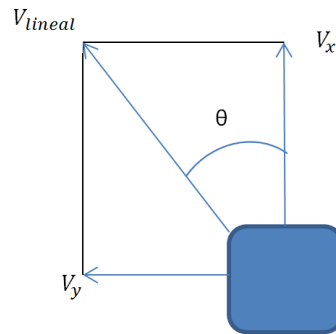


Figura 4-12: Representació de les velocitats del robot

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{V_y}{V_x}\right), \quad (4.9)$$

$$V_{lineal\ robot} = \sqrt{V_x^2 + V_y^2}. \quad (4.10)$$

Per a determinar les velocitats actuals, cal anar acumulant les velocitats obtingudes de la integració de la acceleració a la velocitat anterior. Un cop obtingudes les velocitats es torna a integrar per obtenir la posició aplicant les equacions (4.11), (4.12) i (4.13). Aquestes posicions estan referenciades en base a coordenades globals.

$$X(t) = X(t-1) + \int_{t-1}^t V_x(t) dt, \quad (4.11)$$

$$Y(t) = Y(t-1) + \int_{t-1}^t V_y(t) dt, \quad (4.12)$$

$$\theta(t) = \theta(t-1) + \tan^{-1}\left(\frac{V_y(t)}{V_x(t)}\right). \quad (4.13)$$

$X(t)$ i $Y(t)$ representen la posició del robot en coordenades globals, $\theta(t)$ és l'angle que forma el frontal del robot amb l'eix de coordenades x , $V_x(t)$ i $V_y(t)$ són les velocitats actuals del robot en els dos eixos cartesianes, i t és el temps actual.

Per a la implementació en LabView d'aquests càlculs integrals es fa de la mateixa manera que amb els encòders, aplicant la fórmula de la integral. Per a minimitzar el soroll que pot portar l'acceleròmetre de manera intrínseca i derivada de les vibracions del robot, s'aplica un filtre de tal manera que

$$y = 0.1 \cdot x_i + 0.9 \cdot x_{i-1},$$

sent i la mostra actual, de manera que la senyal sigui més estable.

A l'hora d'aplicar la formula d'integració, s'aplica que

$$y = (x_i + 3 \cdot x_{i-1} + 3 \cdot x_{i-2} + x_{i-3}) \cdot \frac{\Delta t}{8}, \quad (4.14)$$

per tal de minimitzar encara més els efectes del soroll i obtenir un resultat més fiable. Això en LabView queda implementat com mostra la *Figura 4-13*.

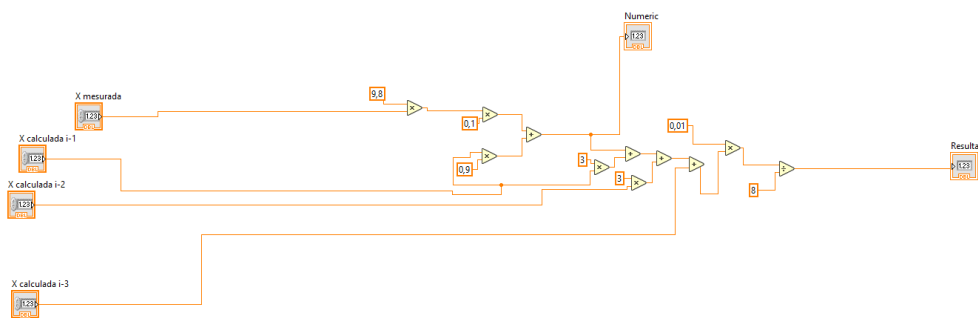


Figura 4-13: Implementació de la integració de les mesures de l'acceleròmetre

4.4. Implementació del programa de control

Un cop establerts els mecanismes de control de velocitat i de càlcul de posició del robot, cal implementar-ho tot en un programa que sigui l'encarregat de fer el control del robot registrant a l'hora la seva posició en l'espai.

Per a fer això es creen diversos Sub VI, que és una manera de compactar la programació, per a les funcions específiques. En la *Figura 4-14* es poden veure les icones dels diferents Sub VI.

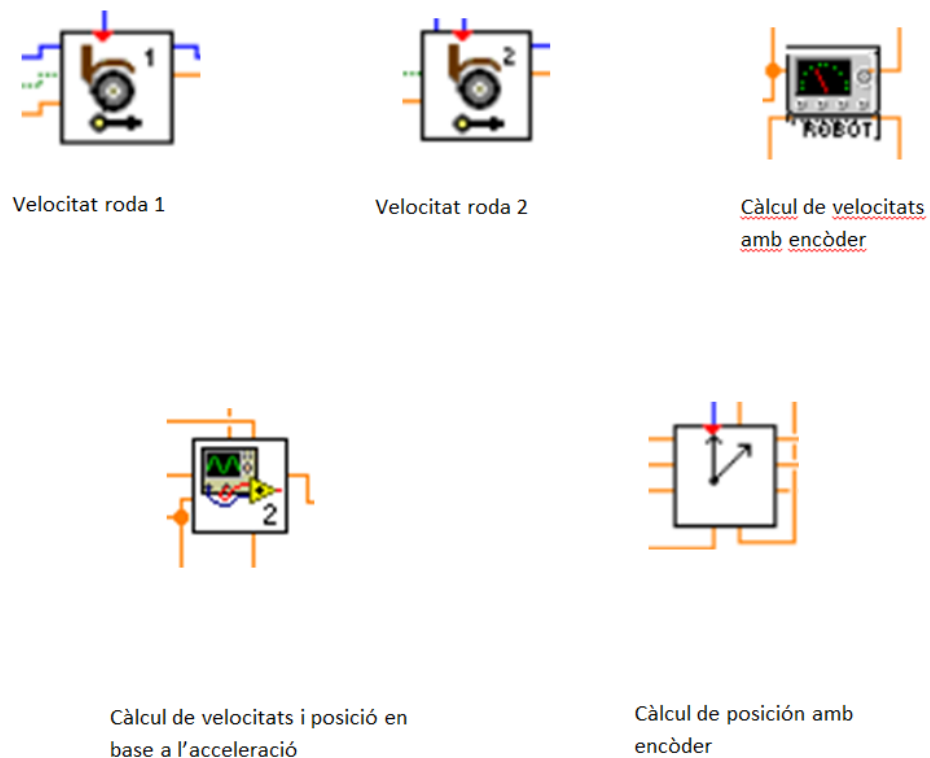


Figura 4-14: Icones dels Sub VI

A partir d'aquí es crea el programa principal dividit en petites parts, les representades en els diversos apartats anteriors.

L'esquema bàsic es crea a partir d'un bucle seqüència, de manera que es construeix com si fos una màquina d'estats, amb l'estat de posada en marxa, on s'inicialitzen les variables i els paràmetres, l'estat de marxa, en el qual s'implementen tot el relacionat amb el control del robot, i l'estat d'aturada, en el qual es fa un reset a la myRIO.

Primerament el control de velocitat, en el qual s'utilitzen els Sub VI del control de la velocitat de les rodes, juntament amb un PID per tal de tancar el llaç de control. També s'incorpora el Sub VI del càlcul de velocitat mitjançant encòders, ja que els Sub VI de la

velocitat incorporen les sortides dels encòders. En la *Figura 4-15* es pot veure la implementació en LabView d'aquesta part.

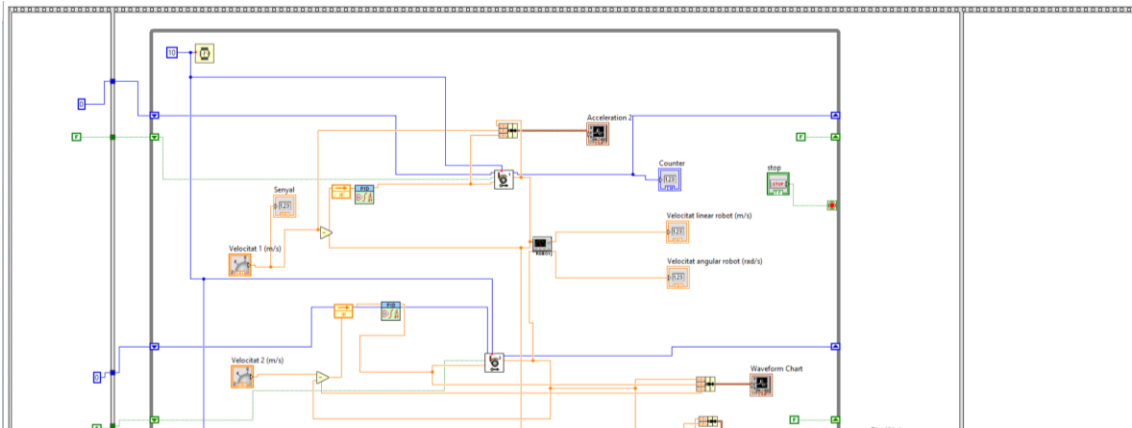


Figura 4-15: Implementació del control i el càlcul de velocitat de les rodes

Tal i com es veu a la *Figura 4-15*, les dues rodes són controlades independentment, de manera que les velocitats de gir poden ser diferents i els errors d'una no influeixen en l'altre. També hi ha incorporat un gràfic que imprimeix les senyals de consigna, control i resposta, per tal de poder avaluar el comportament del robot.

La següent part és la destinada al càlcul de la posició del robot a partir de les dades dels encòders, i es pot veure en la *Figura 4-16*.

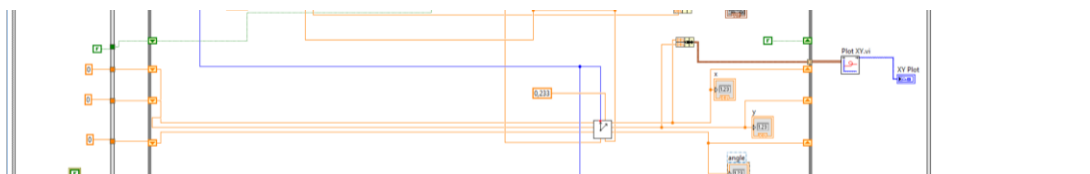


Figura 4-16: Implementació del càlcul de posició a partir de les dades obtingudes a l'encòder

En aquesta part, el Sub VI fa servir Shift registers per tal de poder anar actualitzant les dades amb les que realitza les operacions. Tal i com es pot apreciar en la *Figura 4-16*, la funció del càlcul de posició aporta els resultats com a coordenades cartesianes i un angle.

En el panell de control de la *Figura 4-17* està representada tota aquesta informació.

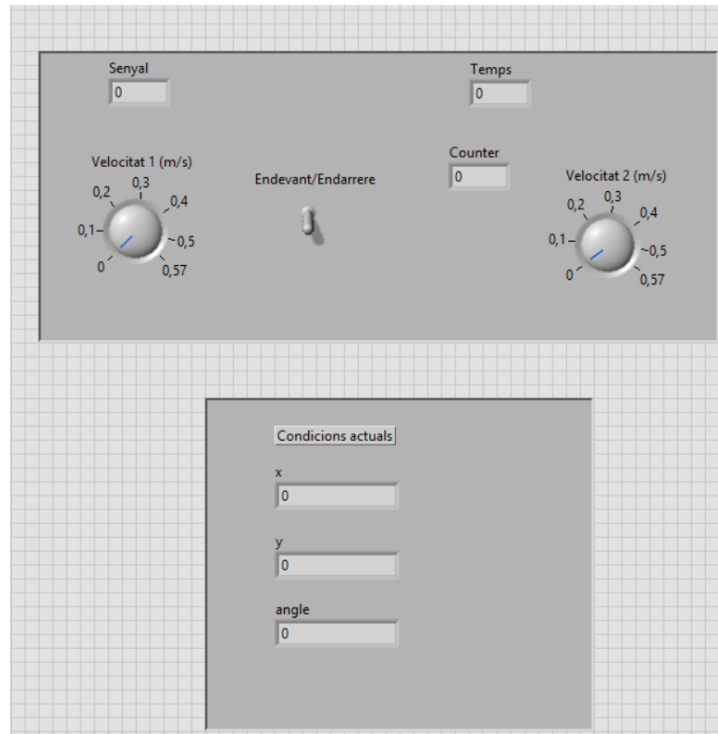


Figura 4-17: Panell de control per al control de velocitat i la posició

Per últim, el càlcul de posició a partir de l'acceleròmetre permet conèixer les mateixes dades que amb el càlcul mitjançant les dades obtingudes de l'encòder. En LabView queda representat tal i com es veu en la *Figura 4-18*.

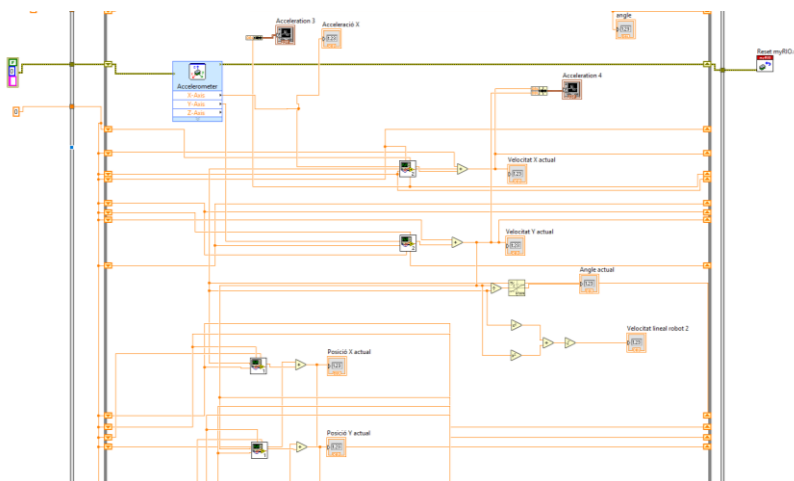


Figura 4-18: Implementació del càlcul de velocitat i posició del robot mitjançant l'acceleròmetre

En aquesta imatge es pot observar com es fa servir el mòdul de l'acceleròmetre que ve inclòs dins del conjunt de funcions de la myRIO. Aquest mòdul permet conèixer les diferents acceleracions (x, y, z) experimentades per l'acceleròmetre de la targeta. A partir d'aquí, el Sub VI del càlcul de posició i velocitat a partir de l'acceleròmetre representa aquests valors en el panell de comandament de la *Figura 4-19*.

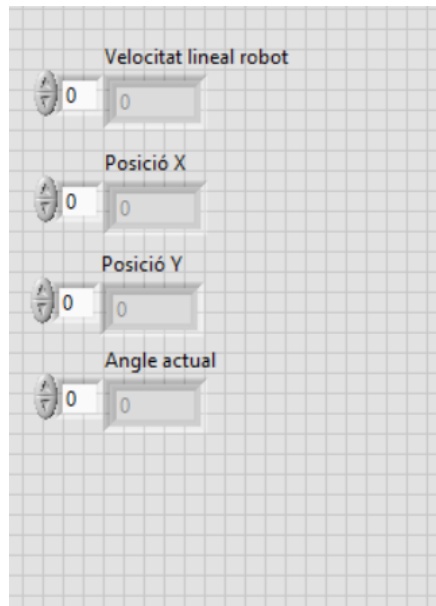


Figura 4-19: Vista del panell de control del càlcul de velocitat i posició del robot mitjançant l'acceleròmetre

D'aquesta manera ja tenim implementat tot el control de velocitat i el càlcul de posició del robot en un sol programa format per diversos Sub VI.

5. RESULTATS

S'han realitzat un experiment per analitzar les dades obtingudes pel robot i fer un estudi de l'error d'aquestes.

L'experiment consisteix en un recorregut rectangular efectuat a dues velocitats diferents: 0.25m/s i 0.4m/s. El robot parteix del punt de coordenades (0,0) i efectua el recorregut representat en la *Figura 5-1*, desplaçant-se seguint $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow A$.

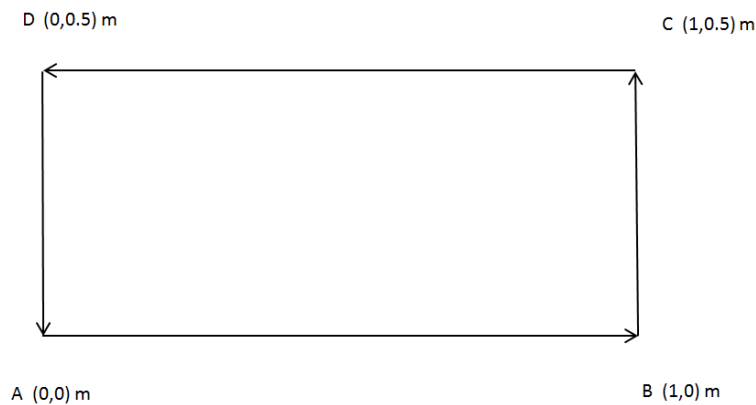


Figura 5-1: Recorregut efectuat pel robot

Per a analitzar els resultats es registra la posició final de tres maneres diferents: mitjançant el càlcul dels encòders, el càlcul de l'acceleròmetre i el càlcul manual. Els resultats estan representats en la *Taula 5-2* i la *Taula 5-2*. La posició prevista és la posició que hauria de tenir el robot si efectués tots els desplaçaments de manera exacta, la posició calculada per l'encòder és la mesura de la posició que fa l'encòder, la posició calculada per l'acceleròmetre és la mesura de la posició feta per l'acceleròmetre i la posició mesurada és la posició real del robot mesurada sobre el terreny. A partir d'aquests resultats es calcula l'error absolut entre: posició predita i posició calculada pels encòders, posició predita i posició calculada per l'acceleròmetre, posició mesurada i posició calculada amb els encòders i posició mesurada i posició calculada amb l'acceleròmetre. D'aquesta manera es pot avaluar la precisió dels diferents sistemes de mesura.

0.25 m/s				
Experiment	Posició prevista	Posició calculada per l'encòder	Posició calculada per l'acceleròmetre	Posició mesurada
1	(0,0)	(-0.099,-0.172)	(0.052,-0.094)	(0.045,-0.31)
2	(0,0)	(-0.097,-0.173)	(0.061,-0.093)	(0.095,-0.3)
3	(0,0)	(0.098,-0.176)	(0.056,-0.096)	(0.028,-0.31)
4	(0,0)	(-0.101,-0.178)	(0.058,-0.099)	(0.069,-0.36)

Taula 5-1: Posició final del recorregut efectuat a 0.25 m/s

0.40 m/s				
Experiment	Posició prevista	Posició calculada per l'encòder	Posició calculada per l'acceleròmetre	Posició mesurada
1	(0,0)	(-0.255,-0.238)	(-0.324,-0.357)	(-0.06,-0.481)
2	(0,0)	(-0.179,-0.24)	(-0.328,-0.361)	(0.075,-0.413)
3	(0,0)	(-0.172,-0.237)	(-0.331,-0.359)	(0.05,-0.425)
4	(0,0)	(-0.183,-0.235)	(-0.325,-0.353)	(0.085,-0.440)

Taula 5-2: Posició final del recorregut efectuat a 0.4 m/s

Els errors es calculen seguint les equacions (5.1) i (5.2). En aquestes equacions es representa a la vegada els quatre errors que es poden calcular: Posició predita-Posició encòders, Posició mesurada-Posició encòder, Posició predita-Posició acceleròmetre i Posició mesurada-Posició acceleròmetre.

$$Error_{absolut} = posició_{predita/mesurada} - posició_{encòder/acceleròmetre}, \quad (5.1)$$

$$Error_{relatiu} = \frac{Error_{absolut}}{Posició_{predita/mesurada}} \quad (5.2)$$

Els errors es troben representats en la *Taula 5-3*, la *Taula 5-4*, la *Taula 5-5* i la *Taula 5-6*.

Taula 5-3: Error absolut dels càlculs de l'encòder envers les posició prevista i mesurada

Error Absolut Encòder				
Experiment	Posició prevista – Posició calculada per l'encòder		Posició mesurada - Posició calculada per l'encòder	
	0.25 m/s	0.4 m/s	0.25 m/s	0.4 m/s
1	(0.099,0.172)	(0.255,0.238)	(0.144,-0.138)	(0.195,-0.243)
2	(0.097,0.173)	(0.179,0.24)	(0.192,-0.127)	(0.254,-0.173)
3	(0.098,0.176)	(0.172,0.237)	(0.126,0.134)	(0.222,-0.188)
4	(0.101,0.178)	(0.183,0.235)	(0.170,-0.182)	(0.268,-0.205)
Mitjana	(0.096,0.174)	(0.197,0.237)	(-0.015,-0.174)	(0.234,-0.202)

Taula 5-4: Error relatiu dels càlculs de l'encòder envers la posició prevista i mesurada

Error Relatiu	Encòder			
	Posició prevista – Posició calculada per l'encòder		Posició mesurada - Posició calculada per l'encòder	
Experiment	0.25 m/s	0.4 m/s	0.25 m/s	0.4 m/s
1	<u>Inf</u>	<u>Inf</u>	(320%,44.5%)	(433%,78.3%)
2	<u>Inf</u>	<u>Inf</u>	(202%,42.3%)	(267%,57.6%)
3	<u>Inf</u>	<u>Inf</u>	(450%,43.2%)	(792%60.6%,)
4	<u>Inf</u>	<u>Inf</u>	(246%,50.5%)	(388%,56.9%)

Taula 5-6: Error absolut dels càlculs de l'acceleròmetre envers la posició prevista i mesurada

Error Absolut Acceleròmetre				
Experiment	Posició prevista – Posició calculada per l'acceleròmetre		Posició mesurada - Posició calculada per l'acceleròmetre	
	0.25 m/s	0.4 m/s	0.25 m/s	0.4 m/s
1	(0.052,-0.094)	(-0.324,-0.357)	(-0.077,-0.223)	(0.264,-0.124)
2	(0.061,-0.093)	(-0.328,-0.361)	(0.034,-0.207)	(0.403,-0.052)
3	(0.056,-0.096)	(-0.331,-0.359)	(-0.028,-0.214)	(0.381,-0.066)
4	(0.058,-0.099)	(-0.325,-0.353)	(0.011,-0.261)	(0.41,-0.087)
Mitjana	(0.056,0.095)	(-0.327,-0.357)	(-0.015,-0.174)	(0.272,-0.031)

Taula 5-5: Error relatiu dels càlculs de l'acceleròmetre envers la posició prevista i mesurada

Error Relatiu Acceleròmetre				
Experiment	Posició prevista – Posició calculada per l'acceleròmetre		Posició mesurada - Posició calculada per l'acceleròmetre	
	0.25 m/s	0.4 m/s	0.25 m/s	0.4 m/s
1	<u>Inf</u>	<u>Inf</u>	(-171%,71.9%)	(586%,40%)
2	<u>Inf</u>	<u>Inf</u>	(35.7%,69%)	(424%,17.3%)
3	<u>Inf</u>	<u>Inf</u>	(-100%,69%)	(1360%,21.2%)
4	<u>Inf</u>	<u>Inf</u>	(15.9%,72.5%)	(594%,24.1%)

Tal i com es pot observar en les taules que fan referència als errors relatius (*Taula 5-4* i *Taula 5-5*), és impossible determinar l'error relatiu quan comparem les posicions calculades per l'encòder i l'acceleròmetre amb la posició prevista, ja que si apliquem la fórmula de l'error relatiu (*Equació 5.2*) obtenim que $Error_{relatiu} = \frac{Error_{absolut}}{Posició_{predita}} = \frac{Error_{absolut}}{0}$, de manera que el resultat és una indeterminació que tendeix a +Infinit.

6. CONCLUSIONS

En base a les dades recollides, es pot dir que:

1. En velocitats petites, l'acceleròmetre és més precís que l'encòder a l'hora de mesurar distàncies.
2. Els dos mètodes de càlcul de distàncies tenen errors absoluts petits, si considerem que el robot ha recorregut 3m en el circuit, i errors relatius grans, cosa que vol dir que són bons per a càlculs de distàncies grans però dolents en el càlcul de distàncies petites.

A partir de la observació del robot en moviment s'aprecia també que l'error més gran és l'efectuat durant els girs.

Els errors de càlcul en l'encòder es deuen a la baixa resolució d'aquest, que fa que les mesures siguin imprecises. En el cas de les mesures preses per l'acceleròmetre, el fet d'haver d'integrar el resultat de l'acceleració dues vegades (una per a obtenir la velocitat i una altre per obtenir la posició) comporta errors importants. Per aquest motiu, si es vol fer servir aquesta plataforma caldria complementar-la amb altres sensors que permetessin millorar la precisió en el càlcul de la posició.

Un cop realitzat aquest projecte, la plataforma robòtica mòbil ja disposa d'un control de velocitat i posició, que eren els objectius plantejats. D'aquesta manera, la plataforma es pot fer servir en un futur per a la implementació d'un sistema de generació de trajectòries per a una conducció autònoma.

7. BIBLIOGRAFIA

- Andalucia, J. d. (2010). *Sistemas de información geográfica, tipos y aplicaciones empresariales*. Consultat el 15 / 05 / 2017, a <http://sig.cea.es/SIG>
- Comillas, A. (sense data). *Sensores para robots móviles*.
- Dias Semedo, J., Veiga, J., & Teixeira, L. (sense data). *Vehicle Path Planning and Autonomous Trajectory Following*.
- Fernández Caramés, C. (2012). *Técnicas de navegación para un robot móvil utilizando sistemas de razonamiento espacial*. Salamanca: Universidad de Salamanca.
- Font Llagunes, J. M. (2007). *Contribució al posicionament dinàmic de robots mòbils per mitjà d'un sistema làser*. Girona: Universitat de Girona.
- Hult, R., & Sadegi Tabar, R. (2013). *Path planning for highly automated vehicles*. Gothenburg, Sweden: Master's Thesis.
- Instruments, N. (2016). *LabView 2016 help*. Consultat el 31 / 05 / 2017, a <http://zone.ni.com/reference/en-XX/help/371361N-01/>
- Omega. (2005). *Acelerómetro. ¿Que es un acelerómetro?* Consultat el 25 / 06 / 2017, a <http://es.omega.com/prodinfo/acelerometro.html>
- Ortiz, A. (sense data). *Navegación para robots móviles*. Universitat de les Illes Balears.
- Pololu. Robotics & Electronics. (2003). *DRV8801 Single Brushed DC motor driver carrier*. Consultat el 27 / 05 / 2017, a <https://www.pololu.com/product/2136>
- RAC1. (19 / juny / 2017). *El cotxe del futur serà autònom, elèctric i estarà connectat*. . Recollit de <http://www.rac1.cat/programes/via-lliure/20170305/42557121752/cotxe-futur-autonom.html>
- VilaWeb. (19 / juny / 2017). *Com funcionen els robots d'Amazon que operen als magatzems de Catalunya*. Recollit de <http://www.vilaweb.cat/noticies/com-funcionen-els-robots-damazon-que-operen-als-magatzems-de-catalunya/>
- Wikipedia. (03 / 04 / 2017). *Cámara estenoipeica*. Consultat el 20 / 06 / 2017, a https://es.wikipedia.org/wiki/C%C3%A1mara_estenoipeica

Wikipedia. (sense data). *Autonomous Robots*. Consultat el 19 / 06 / 2017, a https://en.wikipedia.org/wiki/Autonomous_robot