

**Titulació:**

Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials

**Alumne:**

Irene Bernardino Sanchez

**Enunciat TFG:**

Estudi del control de trajectòria d'un vehicle autònom guiat per marcadors magnètics

**Director/a del TFG:**

Bernardo Morcego Seix

**Codirector/a del TFG:**

Vicenç Puig Cayuela

**Convocatòria de lliurament del TFG:**

28/09/2021



# MEMORIA

## Agraïments

---

Primerament agrair els meus director i codirector d'aquest projecte de final de grau, Bernardo Morcego Seix i Vicenç Puig Cayuela, per tota l'ajuda i temps que han dedicat per jo poder aconseguir realitzar aquest projecte.

Seguidament agrair al personal de l'edifici TR11 per donar-me accés al laboratori de Control Avançat per poder realitzar les proves amb el cotxe.

Finalment agrair a la meva família i els meus amics per donar-me recolzament i ànims no només durant aquest projecte si no durant tota la meva etapa universitària.

## Abstract

---

This project is born within the framework of the control section of another project. This final degree project aims to develop a controller capable of running an autonomous car model. Initially, it was thought that the input signal of this controller came from magnetic sensors, but due to a series of technical problems with them outside the scope of this project, the input signal had to be readapted.

In addition, a supervisor must be created to vary the behaviour of the car based on the value received as input. This supervisor will vary the steering or speed of the autonomous car model.

Once both systems have been developed, a series of tests will be carried out in the laboratory to determine their correct functionality. The results obtained in these tests will be studied in detail in this report.

## Resum

---

Aquest projecte neix dins del marc de l'apartat de control d'un altre projecte. Aquest treball de fi de grau té com a finalitat desenvolupar un controlador capaç de dirigir un model de cotxe autònom. Inicialment s'havia pensat que la senyal d'entrada d'aquest controlador arribés a partir d'uns sensors magnètics, però degut a un seguit de problemes tècnics amb ells fora de l'abast d'aquest projecte, es va haver d'adaptar la senyal.

A més, s'haurà de crear un supervisor, que a partir d'uns sensors puntuals faci variar el comportament del cotxe en funció del valor rebut com a entrada. Aquest supervisor farà variar la direcció o la velocitat del model de cotxe autònom.

Un cop desenvolupat tots dos sistemes es farà un seguit de proves al laboratori per determinar el seu funcionament. Els resultats obtinguts en aquestes proves s'estudiaran en detall en aquesta memòria.

## Índex

---

Índex .....	5
Índex d'il·lustracions .....	8
Índex de taules .....	10
1. Introducció.....	12
1.1. Objectiu.....	12
1.2. Abast .....	12
1.3. Requeriments .....	13
1.3.1. Model cotxe autònom (AutoNOMOS Model v3.1).....	13
1.3.2. Requeriments de software .....	13
1.4. Justificació .....	14
2. Estat de l'art.....	17
2.1. Història del cotxe autònom .....	17
2.2. Conceptes sobre el cotxe autònom.....	19
2.2.1. Nivells d'autonomia. Estàndar SAE J3016 .....	19
2.3. Tipus de controls de la trajectòria .....	22
2.3.1. Pure Pursuit Stanley .....	22
2.3.2. Model Predictive Control (MPC) .....	22
2.3.3. PID.....	23
2.3.4. Sliding Model Control (SMC).....	23
3. Solució per al control de la trajectòria.....	24
3.1. Plantejament i solució proposada .....	24
3.2. Metodologia seguida.....	25
4. Model cinemàtic .....	27
4.1. Equacions del moviment.....	28
4.2. Equacions de la direcció del cotxe.....	31

5.	Model de simulació .....	32
5.1.	Blocs simulació moviment del cotxe .....	32
5.1.1.	Bloc simulació direcció del cotxe.....	32
5.1.2.	Càlcul de la cinemàtica del cotxe .....	33
5.2.	Blocs control de la posició.....	33
5.2.1.	Càlcul de l'estat real i desitjat del cotxe .....	34
5.3.	Càlcul de la desviació .....	37
5.3.1.	Estudi del sentit de la desviació.....	38
6.	Resultats de la simulació del model cinemàtic .....	39
6.1.	Trajectòria lineal .....	39
6.1.1.	Velocitat de 2 m/s .....	40
6.1.2.	Velocitat de 3 m/s .....	41
6.1.3.	Velocitat de 4 m/s .....	42
6.1.4.	Velocitat de 5 m/s .....	43
6.1.5.	Valors dels paràmetres.....	44
6.2.	Trajectòria circular.....	45
6.2.1.	Velocitat de 2 m/s .....	45
6.2.2.	Velocitat de 3 m/s .....	47
6.2.3.	Velocitat de 4 m/s .....	48
6.2.4.	Velocitat de 5 m/s .....	49
6.2.5.	Valors dels paràmetres.....	50
6.3.	Trajectòria sinusoidal.....	51
6.3.1.	Velocitat de 2 m/s .....	51
6.3.2.	Velocitat de 3 m/s .....	53
6.3.3.	Velocitat de 4 m/s .....	54
6.3.4.	Velocitat de 5 m/s .....	55
6.3.5.	Valors dels paràmetres.....	56

6.4.	Conclusions.....	57
7.	ROS i MatLab.....	58
7.1.	Estructura de ROS .....	58
7.1.1.	Master node .....	58
7.1.2.	Publisher (publicador) .....	59
7.1.3.	Subscriber (subscriber).....	59
7.1.4.	Topics .....	59
7.2.	Comunicació entre MATLAB i Simulink amb ROS.....	60
7.3.	Controlador .....	61
7.3.1.	Posicionament del cotxe .....	61
7.3.2.	Càlcul de l'error.....	63
7.3.3.	P.ID.....	68
7.3.4.	Resposta del controlador .....	69
7.4.	Supervisor .....	71
7.4.1.	Cas missatge valor 1 .....	72
7.4.2.	Cas missatge valor 2 .....	73
7.4.3.	Cas missatge valor 3 .....	73
7.4.4.	Cas missatge valor 4 .....	74
8.	Resultats obtinguts al laboratori .....	75
8.1.	Resultats obtinguts pel controlador.....	75
8.2.	Resultats obtinguts pel supervisor .....	77
9.	Pressupost.....	79
10.	Conclusions .....	80
	Bibliografia.....	82



## Índex d'il·lustracions

---

<i>Il·lustració 1.1: Mapa de les zones pilot de C-Roads Spain [5]</i> .....	15
<i>Il·lustració 1.2: Esquema experiment de Volvo [6]</i> .....	16
<i>Il·lustració 2.1: Cotxe autònom de Google [12]</i> .....	18
<i>Il·lustració 2.2: Resum de la SAE sobre els diferents nivells d'autonomia [17]</i> .....	21
<i>Il·lustració 2.3: Geometria de direcció d'Ackermann [6]</i> .....	22
<i>Il·lustració 3.1: Diagrama de Grannt de les tasques realitzades</i> .....	26
<i>Il·lustració 4.1: Esquema model cinemàtic d'Ackerman [21]</i> .....	27
<i>Il·lustració 4.2: Esquema de la direcció del tipus Ackerman [21]</i> .....	31
<i>Il·lustració 5.1: Esquema del model de simulació a llaç tancat</i> .....	32
<i>Il·lustració 5.2: Bloc de la direcció del cotxe [22]</i> .....	32
<i>Il·lustració 5.3: Bloc de càlcul de la cinemàtica del cotxe</i> .....	33
<i>Il·lustració 5.4: Bloc per al càlcul de l'estat real i teòric del cotxe</i> .....	34
<i>Il·lustració 5.5: Esquema de l'interior del bloc del càlcul de l'estat</i> .....	34
<i>Il·lustració 5.6: Esquema posició de referència segons la trajectòria desitjada en les coordenades món</i> .....	35
<i>Il·lustració 5.7: Esquema interior del bloc del càlcul de la posició de referència</i> .....	36
<i>Il·lustració 5.8: Esquema de la desviació del cotxe en les coordenades cotxe</i> .....	37
<i>Il·lustració 5.9: Bloc de càlcul de l'error en les coordenades x i y del cotxe</i> .....	38
<i>Il·lustració 6.1: Trajectòria lineal de referència</i> .....	39
<i>Il·lustració 6.2: Trajectòria lineal realitzada pel cotxe a 2 m/s</i> .....	40
<i>Il·lustració 6.3: Trajectòria lineal realitzada pel cotxe a 3 m/s</i> .....	41
<i>Il·lustració 6.4: Trajectòria lineal realitzada pel cotxe a 4 m/s</i> .....	42
<i>Il·lustració 6.5: Trajectòria lineal realitzada pel cotxe a 5 m/s</i> .....	43
<i>Il·lustració 6.6: Trajectòria circular de referència</i> .....	45
<i>Il·lustració 6.7: Trajectòria circular realitzada pel cotxe a 2 m/s</i> .....	45
<i>Il·lustració 6.8: Trajectòria circular realitzada pel cotxe a 3 m/s</i> .....	47
<i>Il·lustració 6.9: Trajectòria circular realitzada pel cotxe a 4 m/s</i> .....	48
<i>Il·lustració 6.10: Trajectòria circular realitzada pel cotxe a 5 m/s</i> .....	49
<i>Il·lustració 6.11: Trajectòria sinusoidal de referència</i> .....	51
<i>Il·lustració 6.12: Trajectòria sinusoidal realitzada pel cotxe a 2 m/s</i> .....	52
<i>Il·lustració 6.13: Trajectòria sinusoidal realitzada pel cotxe a 3 m/s</i> .....	53

<i>Il·lustració 6.14: Trajectòria sinusoidal realitzada pel cotxe a 4 m/s .....</i>	54
<i>Il·lustració 6.15: Trajectòria sinusoidal realitzada pel cotxe a 5 m/s .....</i>	55
<i>Il·lustració 7.1: Esquema del funcionament del Master node [23].....</i>	59
<i>Il·lustració 7.2: Esquema del controlador en Simulink.....</i>	61
<i>Il·lustració 7.3: Hedge instal·lat al cotxe i beacons.....</i>	61
<i>Il·lustració 7.4: Mapa creat pels beacons del laboratori.....</i>	62
<i>Il·lustració 7.5: Càlcul de l'angle que formen la component x i y del cotxe en el sistema de referències del laboratori traslladat al centre de la circumferència .....</i>	63
<i>Il·lustració 7.6: Càlcul de l'angle que formen la component x i y del cotxe en el sistema de referències del laboratori traslladat al centre de la circumferència .....</i>	64
<i>Il·lustració 7.7: Possibles desviacions al primer quadrant.....</i>	65
<i>Il·lustració 7.8: Possibles desviacions al segon quadrant .....</i>	66
<i>Il·lustració 7.9: Possibles desviacions al tercer quadrant .....</i>	67
<i>Il·lustració 7.10: Possibles desviacions al quart quadrant.....</i>	67
<i>Il·lustració 7.11: Recta de regressió per convertir l'angle de direcció en graus a el valor del sistema del cotxe.....</i>	70
<i>Il·lustració 7.12: Col·locació del cotxe i els marcadors per rebre com a missatge 1....</i>	71
<i>Il·lustració 7.13: a) Bloc del supervisor a Simulink. b) Bloc Velocitat. c) Bloc Direcció .....</i>	72
<i>Il·lustració 7.14: Bloc missatge puntual amb valor 1 .....</i>	73
<i>Il·lustració 7.15: Bloc missatge puntual amb valor 2 .....</i>	73
<i>Il·lustració 7.16: Bloc missatge puntual amb valor 3 .....</i>	74
<i>Il·lustració 7.17: Bloc missatge puntual amb valor 4 .....</i>	74
<i>Il·lustració 8.1: a) Trajectòria realitzada pel cotxe al laboratori. b) Trajectòria de referència.....</i>	76

## Índex de gràfiques

---

<i>Gràfica 6.1: Error i resposta del PID per a una trajectòria lineal i una velocitat de 2 m/s.....</i>	<i>41</i>
<i>Gràfica 6.2: Error i resposta del PID per a una trajectòria lineal i una velocitat de 3 m/s.....</i>	<i>42</i>
<i>Gràfica 6.3: Error i resposta del PID per a una trajectòria lineal i una velocitat de 4 m/s.....</i>	<i>43</i>
<i>Gràfica 6.4: Error i resposta del PID per a una trajectòria lineal i una velocitat de 5 m/s.....</i>	<i>44</i>
<i>Gràfica 6.5: Error i resposta del PID per a una trajectòria circular i una velocitat de 2 m/s.....</i>	<i>46</i>
<i>Gràfica 6.6: Error i resposta del PID per a una trajectòria circular i una velocitat de 3 m/s.....</i>	<i>48</i>
<i>Gràfica 6.7: Error i resposta del PID per a una trajectòria circular i una velocitat de 4 m/s.....</i>	<i>49</i>
<i>Gràfica 6.8: Error i resposta del PID per a una trajectòria circular i una velocitat de 5 m/s.....</i>	<i>50</i>
<i>Gràfica 6.9: Error i resposta del PID per a una trajectòria sinusoidal i una velocitat de 2 m/s.....</i>	<i>52</i>
<i>Gràfica 6.10: Error i resposta del PID per a una trajectòria sinusoidal i una velocitat de 3 m/s.....</i>	<i>54</i>
<i>Gràfica 6.11: Error i resposta del PID per a una trajectòria sinusoidal i una velocitat de 4 m/s.....</i>	<i>55</i>
<i>Gràfica 6.12: Error i resposta del PID per a una trajectòria sinusoidal i una velocitat de 5 m/s.....</i>	<i>56</i>
<i>Gràfica 8.1: Gràfica error i resposta del PID .....</i>	<i>77</i>
<i>Gràfica 8.2: Resposta del supervisor per als diferents casos .....</i>	<i>78</i>

## Índex de taules

---

<i>Taula 4.1: Resum equacions de l'estat del cotxe en el sistema de referència món.....</i>	<i>30</i>
<i>Taula 6.1: Resultats dels paràmetres del controlador a una referència d'un graó unitari .....</i>	<i>44</i>
<i>Taula 6.2: Resultats dels paràmetres del controlador per a una trajectòria de referència circular de radi 10 m.....</i>	<i>50</i>
<i>Taula 6.3: Resultats dels paràmetres del controlador per a una trajectòria de referència sinusoïdal d'amplitud 2 m. ....</i>	<i>56</i>
<i>Taula 7.1: Comparació entre els valors de la simulació i la realitat .....</i>	<i>68</i>
<i>Taula 7.2: Taula comparativa entre els dos sistemes de mesura de l'angle de direcció</i>	<i>70</i>
<i>Taula 9.1: Cost total del projecte amb una llicència acadèmica.....</i>	<i>79</i>
<i>Taula 9.2: Cost total del projecte sense una llicència acadèmica .....</i>	<i>79</i>

## 1. Introducció

---

### 1.1. Objectiu

---

Aquest projecte neix d'un projecte previ anomenat "Desenvolupament d'un sistema redundat de seguretat de conducció en carreteres per a vehicles autònoms (SmartConductor) – SMARTMOVE"[1]. Tanmateix aquest Treball de Fi d'Estudis es centrarà en l'objectiu de desenvolupar un algorisme capaç de controlar la trajectòria creada per marcadors continus i puntuals per a un model de cotxe autònom.

L'objectiu és crear un algorisme capaç de controlar la trajectòria del cotxe de manera continua amb els marcadors de continu. I a més un segon algorisme capaç de canviar l'estat del cotxe dependent de la col·locació dels marcadors puntuals (per exemple fent que acceleri o freni).

### 1.2. Abast

---

Per tal d'aconseguir que un model de cotxe autònom segueixi un traçat creat per marcadors metàl·lics es desenvoluparà un algorisme on els sensors es comuniquin amb l'ordinador d'abord per tal de que aquest mantingui la trajectòria desitjada.

El model de cotxe ja està desenvolupat i per tant la seva creació no entra dins de l'abast d'aquest projecte. Així mateix, tampoc entra dins de l'abast d'aquest projecte la programació dels sensors Arduino que posseeix el cotxe per tal de captar la informació dels marcadors continus i puntuals.

Tanmateix, durant aquest projecte es desenvoluparà un format de missatge en sistema ROS, el qual es transmetrà entre els sensors i l'ordinador amb la informació que ha de rebre la CPU per tal de corregir la trajectòria del cotxe correctament. Aquest punt es treballarà conjuntament amb l'estudiant de doble grau que s'encarregarà de la captació d'informació per part dels sensors del cotxe.

Tal i com ja s'ha mencionat el punt principal d'aquest projecte serà la implementació d'un algorisme que sigui capaç de llegir els missatges rebuts pels sensors, i a continuació generar un seguit d'accions per tal d'aconseguir que el cotxe segueixi el traçat marcat pels marcadors metàl·lics. A més a més, tal i com es mencionava a l'objectiu s'haurà de desenvolupar un segon algorisme que haurà de ser capaç de

detectar trams on depenent de la col·locació dels marcadors puntuals (magnètics) el cotxe hagi d'actuar d'una manera determinada.

Finalment, es realitzaran un seguit de proves experimentals amb el model de cotxe automàtic que hi ha al laboratori. Amb aquestes proves s'haurà d'aconseguir verificar el correcte funcionament del software dissenyat.

D'altra banda durant el desenvolupament d'aquest projecte també es treballaran de manera teòrica els conceptes de: ROS (Robot Operating System), cotxe autònom i sistemes de control de la trajectòria.

### 1.3. Requeriments

#### 1.3.1. Model cotxe autònom (AutoNOMOS Model v3.1)

Aquest projecte està orientat a un model de cotxe autònom ja dissenyat per tant l'algorisme estarà dissenyat per aquest model. En altres paraules, l'algorisme vindrà condicionat pels actuadors i el tipus de sensors que ja posseeix aquest model. [2]

#### 1.3.2. Requeriments de software

- Sistema operatiu

Per poder utilitzar el marc de treball que és ROS, el qual servirà per estandarditzar els missatges, s'ha d'utilitzar Linux ja que aquest és el sistema operatiu amb el que treballa. Per tant a l'ordinador on es programi l'algorisme ha de tenir instal·lat el sistema operatiu Linux.

Pel que fa a la versió aquesta dependrà de la versió que es vulgui descarregar de ROS. En aquest projecte s'utilitzaran les versions ROS Kinetic i ROS Melodic, amb sistemes operatius Linux 16 i 18.04, respectivament. És important que el sistema operatiu que es descarregui sigui l'estable per a la versió que es vulgui fer servir de ROS, en cas contrari pot donar error.

- ROS

Per a la comunicació entre sensors, ordinador i la direcció serà necessari la utilització de ROS. Ja que, tal i com es comenta en el següent subapartat, la comunicació s'establirà

entre missatges de ROS. Per tant és necessari tenir instal·lat aquesta estructura de programari per tal de que els components del cotxe interactuïn correctament entre ells.

- **Format missatges**

Durant aquest projecte es desenvoluparà un format de missatges per tal de que l'ordinador i els sensors es comuniquin de manera adequada. Aquest consens és necessari per evitar possibles problemes com una mala lectura de les dades rebudes.

#### 1.4. Justificació

En un futur es preveu que la conducció automàtica suposi una millora en la prevenció d'accidents de trànsit, la reducció d'emissions i l'estalvi d'energia, a més d'altres factors. I és que per exemple a Colorado ja existeix el projecte CDOT, el qual monitoritza l'estat de les seves carreteres per tal de donar informació als conductors i així evitar possibles embussos i/o accidents. [3]

Pel que fa al control de la trajectòria del cotxe, ja s'han desenvolupat diferents models de control. En la majoria d'aquests casos l'ús de la intel·ligència artificial és fonamental per al funcionament d'aquests controls. La intel·ligència artificial decideix la manera d'actuar en funció del tipus de control i de la informació que rep dels sensors. D'altra banda també existeix el control de la trajectòria a través de les senyals GPS i el posicionament del cotxe.

Actualment a l'hora de dissenyar el control de la conducció del cotxe autònom s'ha de tenir en compte que aquest durant el seu trajecte interactuarà amb diferents factors. En altres paraules, els dissenyadors i fabricants tenen en compte la interacció del cotxe amb els vianants, amb altres cotxe i amb la infraestructura.

Gràcies al desenvolupament de noves tecnologies, la intel·ligència artificial i el big data han aconseguit crear models de control de trajectòria basats en la informació que els hi arriba dels sensors. A partir de sensors com el LIDAR, o les càmeres que té el cotxe instal·lades s'aconsegueix que a partir de diferents models matemàtics la intel·ligència artificial calculi una trajectòria en funció de les senyals rebudes. Aquest tipus de sistema permet la interacció del cotxe amb tots els factors mencionats anteriorment.

Tot i així un dels majors condicionats d'aquests sistemes és la il·luminació que hi pugui haver en aquell moment on es troba circulant el cotxe. Per tant en situacions meteorològiques on la visibilitat es redueixi el sistema pot perdre certesa i arribar a ser perillós. [1]

L'altre sistema de control de trajectòria conegut és el basat en posicionament a través de senyals GPS. A través d'aquestes senyals es calcula la posició a temps real del cotxe i coneixent la carretera o via per la que hi circula es calcula la trajectòria que aquest ha de seguir. Pel que fa a aquest tipus de sistema no interactua amb l'entorn, és per aquest motiu que es fusionen la intel·ligència artificial amb el posicionament a partir de senyals GPS per tal d'aconseguir un millor control. [4]

A més a més, tot i que la gran majoria de carreteres de l'estat tenen accés als senyals 3G i 4G, encara hi ha carreteres on no hi arriba cap senyal. Aquest fet limita l'ús de la utilització del control de trajectòria per GPS.

Degut a les limitacions que poden patir els sistemes mencionats poden suposar un perill per a la conducció, fet que es contraposa amb un dels principals objectius de la conducció autònom. És en aquest àmbit on els marcadors magnètics poden significar una solució per a la interacció del vehicle amb la infraestructura independent de la situació meteorològica en que s'hi troba la via.



*Il·lustració 1.1: Mapa de les zones pilot de C-Roads Spain [5]*

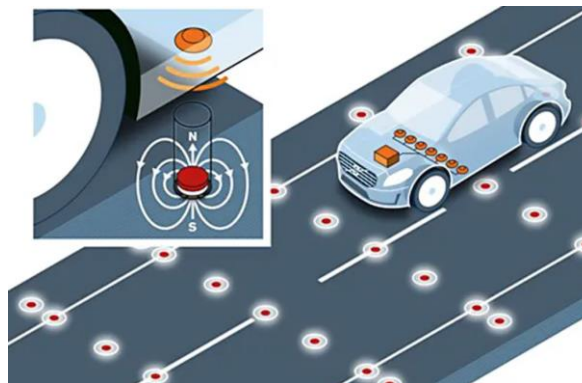
Pel que fa a la xarxa de carreteres de l'estat espanyol, aquesta no està construïda per a la circulació de vehicles autònoms. Tot i així ja hi ha una plataforma, C-Roads Spain, que s'està encarregant de fer pilots de carreteres intel·ligents les quals es comuniquin amb la DGT (Veure il·lustració 1.1). Aquests pilots de carreteres es troben en punts concrets a Espanya on hi ha dos fases del projecte.



La primera fase consisteix en donar informació a la DGT sobre l'estat de la via i un sondeig de dades dels vehicles. D'altra banda, la segona part es centra més en els usuaris, ja que s'informaria sobre l'aparcament, el tràfic, usuaris vulnerables a la calçada i sobre zones de repostatge. [5]

Aquesta darrera iniciativa pot trigar molt de temps en ser implementada en totes les carreteres d'Espanya, ja que tal i com s'ha mencionat anteriorment, no totes les carreteres de l'estat posseeixen una bona cobertura de senyal. En aquest cas l'ús de marcadors magnètics pot suposar un avantatge ja que la implementació d'aquests a les vies es pot fer a l'hora que es produeix el manteniment d'aquestes. Per tant, la implementació de carreteres amb marcadors magnètics és molt més ràpida que la implementació d'un sistema intel·ligent de trànsit.

A més a més, tot i que la idea d'utilitzar marcadors magnètics va néixer per controlar la trajectòria de robots mòbils a les fàbriques, Volvo ha provat la seva utilitat per al control de la trajectòria i el posicionament del cotxe. Amb una precisió de 10 cm el sistema era capaç de posicionar el cotxe en la carretera i seguir la trajectòria dels marcadors magnètics que hi havia implementats al terra (Veure il·lustració 1.2). [6]



*Il·lustració 1.2: Esquema experiment de Volvo [6]*

## 2. Estat de l'art

---

### 2.1. Història del cotxe autònom

---

La idea de vehicle autònom va néixer fa ja casi més de cent anys, quan al 1925 Francis P. Houdina va dissenyar el primer cotxe radio controlat. Però no va ser fins un any després que començaria la seva creació. Aquest primer cotxe autònom havia de ser seguit per un altre cotxe on hi havia algú que anava controlant-lo. Aquesta primera idea no s'assemblava gaire al concepte que es té ara de cotxe autònom.

No va ser fins finals dels anys 80 quan l'alemany Ernst Dickmanns va aconseguir dissenyar una furgoneta Mercedes-Benz que conduís sense cap conductor i sense tràfic. Va aconseguir arribar a velocitat de fins a 100 km/h. Per desenvolupar aquest primer model de cotxe autònom, Dickmanns va combinar càlculs probabilístics amb la visió sacàdica, la qual consisteix en un escaneig ràpid de tot l'entorn [7][8]. Aquest projecte va ser adaptat per a un vehicle autònom amb un suport físic d'un Chevrolet als Estats Units. Aquest va arribar a ser testejat amb èxit en una carretera sense tràfic. [9]

Anys més tard, durant el 1987 i el 1995 va entrar en joc la participació de EUREKA, una organització intergovernamental encarregada de la coordinació en la investigació a Europa, en la història del cotxe autònom. S'hi van invertir 749 milions d'euros en el finançament del projecte PROMETEO [10]. Gràcies a aquesta elevada inversió, el projecte es va transformar en el major projecte de I+D que s'havia vist fins al moment en l'àmbit dels cotxes autònoms. Aquest projecte va involucrar la participació de nombroses institucions universitàries i fabricants d'automòbils. Es va utilitzar com a model de proves el VaMP14, un vehicle creat pel laboratori Dickmann. Aquest vehicle utilitzava un vídeo analògic amb senyals digitalitzables per detectar vehicles i carrils, a més d'altres sensors per gestionar la frenada, la temperatura i l'angle de gir. Finalment es va realitzar una prova a París, on es van recórrer 1000 quilòmetres en autopistes en condicions normals de trànsit, a més d'un viatge entre Munich i Copenhagen. [9]

Actualment diferents empreses en l'àmbit tecnològic participen en aquesta cursa per aconseguir el cotxe autònom més fiable. Google per exemple utilitza la visió LIDAR i l'ús de GPS per fer un mapeig amb alta precisió d'on es troba el cotxe. A la il·lustració 2.1 es pot observar aquest cotxe on al sostre s'hi troba el LIDAR mencionat. [9] [11]



*Il·lustració 2.1: Cotxe autònom de Google [12]*

D'altra banda, Google no és l'única empresa rellevant en el món tecnològic que aposta per aquest nou mode de transport. L'any 2015 Tesla va introduir al mercat dos sistemes de conducció autònoma nous, "Autopilot" i "Summon". El primer sistema consisteix en una conducció autònoma amb certs limitant però que permet la conducció sense haver de tocar el volant. Pel que fa al sistema "Summon" aquest consisteix en un sistema per poder aparcar i treure del garatge el cotxe a partir d'una aplicació mòbil. Pel que fa al primer sistema, la gent a qui es va provar la seva confiança amb ell va denotar que tot i que el cotxe es conduïa sol, seguia pendent de la carretera i el cotxe. [13] [9]

Aquí a Espanya l'any 2019 es va realitzar una prova amb dos prototips de cotxe autònoms a la ciutat de Vigo. Un es va comunicar amb un semàfor de la Gran Via, el qual l'indicava quan havia d'aturar-se, i amb una càmera instal·lada a la mateixa via per poder indicar-li al cotxe la presència de vianants. El sistema va ser dissenyat pel Centro Tecnológico de Automoción de Galicia (CTAG), mentre que el prototip va ser creat per PSA. [14]

L'altre sistema és semblant al "Summon" de Tesla. Consisteix en l'aparcament autònom del cotxe en un pàrquing de la ciutat. El conductor fent ús d'una aplicació seleccionaria una plaça d'aparcament disponible i automàticament el cotxe a l'arribar a l'estacionament s'aparcaria sol. Un cop es volgués tornar a utilitzar el cotxe no faria

falta anar al lloc d'estacionament, si no a un punt de recollida al qual arribaria de manera autònoma el cotxe.

## 2.2. Conceptes sobre el cotxe autònom

Un cotxe, o en general, un vehicle autònom, és un medi de transport el qual gràcies al hardware i software que porta incorporats és capaç de realitzar tasques de manera autònoma. Cal destacar que un cotxe autònom pot tenir diferents nivells d'autonomia, i és que al llarg de la història s'han anat introduint sistemes que actuen de manera autònoma dins del cotxe, com per exemple l'ABS, o l'aparcament automàtic.

### 2.2.1. Nivells d'autonomia. Estàndar SAE J3016 <sup>1</sup>

L'any 2014 la Society of Automotive Engineers (SAE) o en català, la Societat d'Enginyers de l'Automoció, van proposar una classificació dels nivells que podia tenir un vehicle autònom. Aquests es comprenen des del nivell 0 fins al nivell 5, on el nivell 0 no hi ha cap autonomia per part del cotxe i el nivell final suposo l'autonomia total. A continuació s'expliquen en més detall. [15] [16]

- **Nivell 0. No Driving Automation**

En aquest nivell no hi ha autonomia per part del cotxe, és el conductor qui ha de realitzar la tasca de controlar tant la velocitat com la direcció d'aquest. També és l'encarregat de controlar l'entorn en el que es mou el vehicle.

Cal destacar que dins d'aquest nivell sí que estan contemplats el vehicles que tenen sistemes de seguretat millorats. Com per exemple el frenat d'emergència o les alarmes que puguin aparèixer per el manteniment del cotxe.

- **Nivell 1. Driver Assistance.**

En aquest cas el conductor només s'ha de fer càrrec d'un dels controls, o bé el lateral (direcció del cotxe) o bé longitudinal (velocitat del cotxe). En cap cas tots dos controls es realitzen alhora.

Dins d'aquest nivell entrarien els cotxes que són capaços de mantenir una velocitat de creuer constant, o bé són capaços de mantenir la distància de seguretat amb el vehicle de

---

<sup>1</sup> S'ha adjuntat una còpia del SAE J3016 a l'annex I

davant, aquestes tasques entrarien dins del control longitudinal del cotxe. D'altra banda, si el cotxe fos capaç d'aparcar de manera autònoma aquest entraria dins del control lateral del cotxe. Tal i com s'ha mencionat, en cap cas es podrien produir tots dos controls alhora, ja que no pertanyerien a aquest nivell.

- **Nivell 2. Partial Driving Automation**

Dins d'aquest nivell sí que es pot produir el control de la velocitat i de la frenada del cotxe, alhora que es fa un control de la direcció d'aquest. És a dir, el nivell 2 permet el control simultani dels paràmetres laterals i longitudinals del cotxe. Dins d'aquest nivell hi podrien estar els cotxes amb un pilot automàtic que permetés que el cotxe es mogués per la via sense que el conductor hagués de dirigir-lo.

Tot i així, els nivells compresos entre el 0 i el 2, el conductor en cap moment perd la seva funció de controlar l'entorn del cotxe. Ja que els sistemes integrats per millorar l'autonomia del cotxe únicament es comuniquen amb el cotxe, en cap moment detecten problemes a la infraestructura o altre tipus d'esdeveniments que hi puguin succeir, com per exemple les senyalitzacions que hi ha. Tampoc es comunica amb els vianants del carrer, per tant en cap moment el cotxe és capaç d'actuar si un vianant creua la via.

- **Nivell 3. Conditional Driving Automation**

En aquest nivell el conductor ja no ha d'estar alerta de l'entorn que envolta el cotxe, ja que aquest incorpora un seguit de sistemes que actuen en funció de si detecten un esdeveniment a la carretera. Tot i així el conductor ha d'estar alerta per si aquest sistema fallés. Per tant, aquesta autonomia no és total ja que és condicionada pel seu correcte funcionament.

Com el sistema autònom pot fallar, el vehicle ha d'incorporar un seguit d'alarmes que adverteixin al pilot d'aquesta fallada. D'aquesta manera el conductor prendria el control del cotxe per complet i es perdria l'autonomia.

- **Nivell 4. High Driving Automation**

En aquest nivell es té en compte que el sistema pot fallar per tant hi ha un altre sistema que entraria en acció en cas que el principal fallés per qualsevol motiu. Tot i que en aquest cas el cotxe obtindria una autonomia total aquesta vindria condicionada per

diferents factors. Per exemple, el cotxe hauria de tenir la informació necessària de tota la xarxa viària per poder saber en tot moment com ha d'actuar.

- **Nivell 5. Full Driving Automation**

Aquest nivell suposa l'autonomia total del cotxe, en cap cas el conductor hauria de controlar cap paràmetre del cotxe, només introduir el destí. Aquest nivell suposa un repte tant per la societat com per l'avanç en tecnologia ja que, tota la xarxa viària i el mateix cotxe haurien d'estar en comunicació constant per poder aconseguir una autonomia total.

	SAE LEVEL 0	SAE LEVEL 1	SAE LEVEL 2	SAE LEVEL 3	SAE LEVEL 4	SAE LEVEL 5
<b>What does the human in the driver's seat have to do?</b>	You are driving whenever these driver support features are engaged – even if your feet are off the pedals and you are not steering  You must constantly supervise these support features; you must steer, brake or accelerate as needed to maintain safety			You are not driving when these automated driving features are engaged – even if you are seated in "the driver's seat"  When the feature requests, you must drive  These automated driving features will not require you to take over driving		
<b>What do these features do?</b>	These are driver support features			These are automated driving features		
	These features are limited to providing warnings and momentary assistance	These features provide steering OR brake/acceleration support to the driver	These features provide steering AND brake/acceleration support to the driver	These features can drive the vehicle under limited conditions and will not operate unless all required conditions are met	This feature can drive the vehicle under all conditions	
<b>Example Features</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• automatic emergency braking</li> <li>• blind spot warning</li> <li>• lane departure warning</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• lane centering OR</li> <li>• adaptive cruise control</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• lane centering AND</li> <li>• adaptive cruise control at the same time</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• traffic jam chauffeur</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• local driverless taxi</li> <li>• pedals/steering wheel may or may not be installed</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• same as level 4, but feature can drive everywhere in all conditions</li> </ul>
	For a more complete description, please download a free copy of SAE J3016: <a href="https://www.sae.org/standards/content/J3016_201806/">https://www.sae.org/standards/content/J3016_201806/</a>					

*Il·lustració 2.2: Resum de la SAE sobre els diferents nivells d'autonomia [17]*

## 2.3. Tipus de controls de la trajectòria

Tal i com ja s'ha mencionat en l'apartat anterior, existeixen dos tipus de control, el control longitudinal i el lateral. Alguns dels controladors que es presenten dins d'aquest apartat controlen tots dos tipus o bé només el lateral, ja que aquest projecte es centra principalment en el control lateral del cotxe. Alguns d'aquest sistemes de control de trajectòria en són: Pure Pursuit Stanley, el PID, el Model Predictive Control (MPC) entre d'altres. Però per poder controlar correctament l'error, la incertesa dels paràmetres i altres pertorbacions de l'exterior s'utilitzen altres tipus de controls basats en Sliding Mode Control (SMC) o robust MPC.

### 2.3.1. Pure Pursuit Stanley

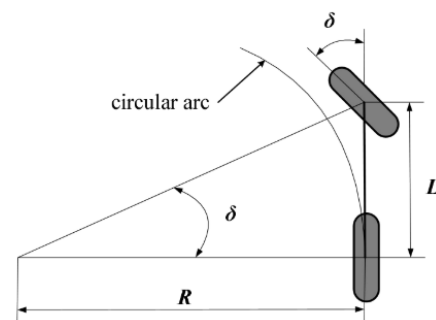
El cas del Pure Pursuit Stanley es basa en la geometria de direcció de Ackermann per poder predir quina ha de ser la desviació del cotxe (veure Il·lustració 2.3) per tal de corregir la trajectòria. L'objectiu d'aquest tipus de control consisteix en calcular l'arc de curvatura que ha de realitzar el cotxe per tal d'arribar a un punt de destí concret.

L'algorisme que segueix aquest controlador s'assembla al que s'utilitza durant aquest projecte, ja que primerament busca on es troba el cotxe, a continuació calcula el punt més proper al camí de la trajectòria desitjada. Un cop es coneixen tots dos punts es calcula l'arc que ha de realitzar el cotxe per tal d'estar al punt de destí. [18]

Tal i com es pot comprovar aquest tipus de control únicament serveix per al control lateral del cotxe, per tant, en cap moment es tenen en compte les pertorbacions que hi puguin aparèixer en aquest.

### 2.3.2. Model Predictive Control (MPC)

Un altre sistema de control és el Model Predictive Control o MPC. Aquest té com objectiu controlar en tot moment la dinàmica lateral del cotxe però tenint en compte diferents pertorbacions que pot tenir el sistema. Aquest tipus de control intenta imitar el comportament humà a partir de diferents controls en cascada i models matemàtics. [19]



Il·lustració 2.3: Geometria de direcció d'Ackermann [6]

Té la capacitat de produir alhora una predicció futura de la trajectòria amb les limitacions del sistema. Això fa que es minimitzi l'error entre la trajectòria calculada i la trajectòria real que està seguint el cotxe. Aquest tipus de control té en compte no només l'angle de gir de les rodes de direcció sinó també l'orientació del cotxe, paràmetres elèctrics d'aquest, i pertorbacions que hi puguin haver en el sistema.

### **2.3.3. PID**

---

Un sistema PID treballa amb una referència per calcular la desviació en la posició del cotxe i l'angle de desviació. Aquest tipus de control té poca versatilitat fet que fa que quan les condicions d'operació varien els paràmetres ja no són òptims. És per aquest motiu que molts cops s'utilitza un PID amb paràmetres variables. Aquest depenent dels diferents elements que fan variar els guanys del PID els va variant per tal d'aconseguir un correcte control de la trajectòria. [20]

Aquest tipus de control està limitat al control de la dinàmica lateral del cotxe, per tant en cap moment té en compte possibles pertorbacions que apareguin al llarg del trajecte. És bastant similar al Pure Pursuit Control, però es diferencia en que no necessita conèixer la posició real del cotxe, sinó que únicament necessita conèixer la desviació respecte al camí de referència.

### **2.3.4. Sliding Model Control (SMC)**

---

Un darrer sistema de control robust és el Sliding Model Control. Aquest tipus de control proporciona una resposta més ràpida als canvis d'intensitat dels paràmetres i altres pertorbacions, com per exemple una fallada en la direcció. Aquest tipus de control és molt útil per a situacions de no-linealitat, incertesa en els paràmetres i en la transmissió de carregues. [20]



### 3. Solució per al control de la trajectòria

---

En aquest capítol es justificarà quin tipus de control s'ha decidit utilitzar per realitzar el control de la trajectòria del cotxe. A més es detallarà quina ha sigut la metodologia per arribar als resultats obtinguts.

#### 3.1. Plantejament i solució proposada

---

Aquest projecte neix d'un projecte més gran que intenta utilitzar marcadors metàl·lics per tal de guiar als cotxes autònoms a les carreteres espanyoles. Alhora que es realitza aquest projecte també s'està realitzant la instal·lació i calibratge dels sensors encarregats de llegir la traça que marquen com a trajectòria els marcadors, a més de detectar imants puntuals que enviarien diferents missatges sobre accions puntuals que hauria de realitzar el cotxe.

Aquest projecte segons el seu abast ha de ser capaç de crear un controlador que amb el desviament que rep a partir dels sensors continus calculi una correcció que permeti que el cotxe torni a la seva posició de referència. A més ha d'haver un supervisor que actuï de manera puntual en la velocitat o l'angle de direcció del cotxe segons la informació que reb dels sensors puntuals. Per tant el controlador més adient per corregir la trajectòria en aquest cas serà un PID.

Tal i com s'explicava en el capítol de l'estat de l'art, l'únic controlador que no té en compte la posició del cotxe sinó un error com a paràmetre d'entrada és el PID. A més en aquest projecte no es tindrà en compte que hi puguin haver pertorbacions en el sistema.

Pel que fa al supervisor, es programarà un supervisor que actuarà en paral·lel al controlador PID que es dissenyi. Aquest haurà de llegir la informació que reb del cotxe i actuar sobre la velocitat o la direcció del cotxe depenent de la informació que reb.

### 3.2. Metodologia seguida

---

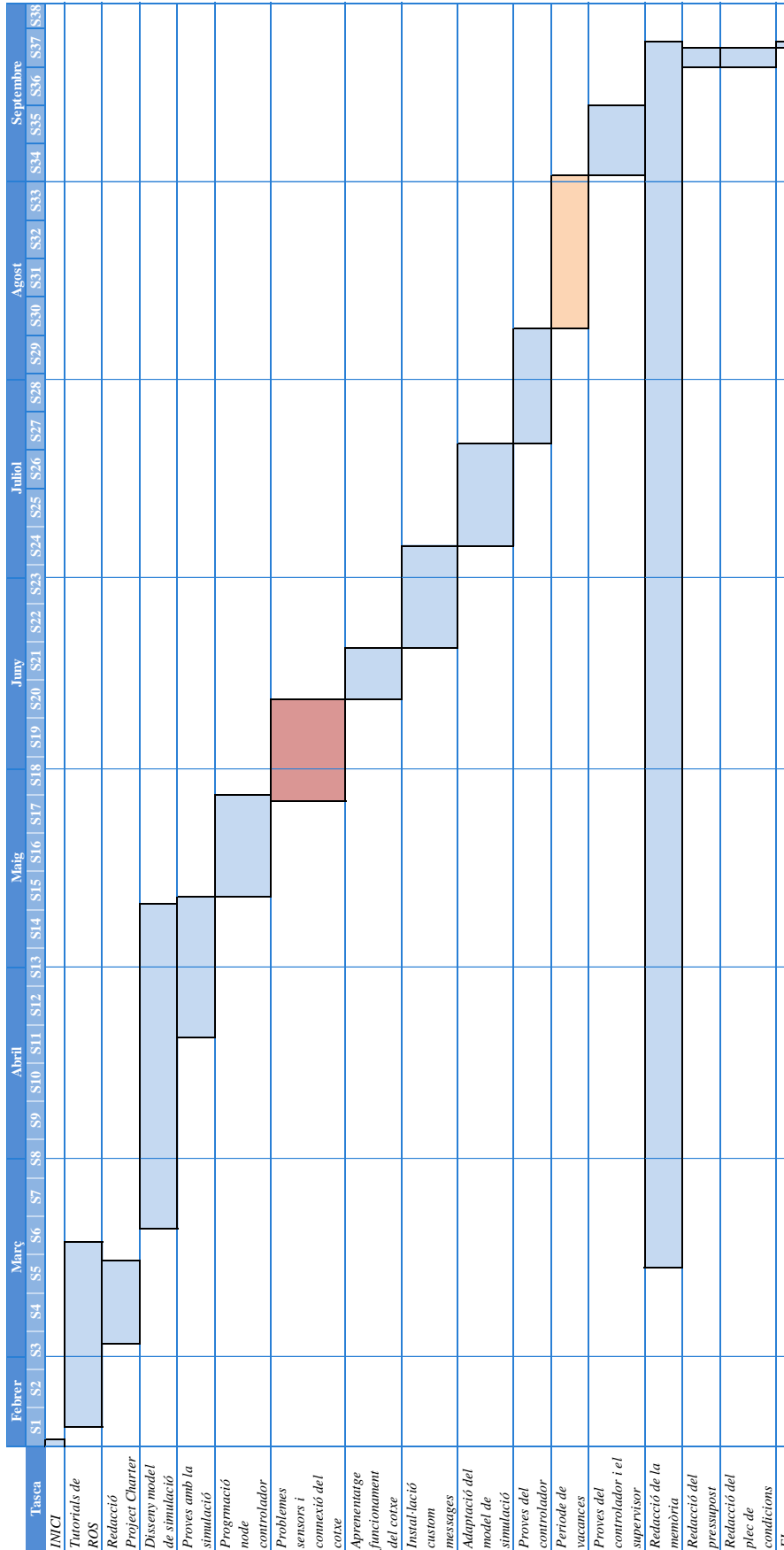
Per poder realitzar aquest projecte inicialment es va pensar en realitzar un seguit de tasques principals per poder programar correctament el controlador i supervisor al cotxe. Com el cotxe del laboratori funciona amb ROS es va realitzar un aprenentatge sobre la programació en ROS ja que no s'havia treballat abans amb aquest framework.

Alhora que s'acabava aquest aprenentatge es va començar a realitzar una simulació en MATLAB i Simulink per tal de calibrar els valors del PID abans de programar-ho tot en el cotxe. Aquesta simulació va trigar ja que els blocs utilitzats per realitzar el model del cotxe donaven problemes fins que no es va arribar a utilitzar el model adequat. Un cop realitzada la simulació per a diferents trajectòries es va disposar a començar la programació del cotxe.

En aquest moment, la persona encarregada de fer funcionar els sensors no havia sigut capaç de calibrar-los correctament, per tant no es podia utilitzar els marcadors metàl·lics per crear una trajectòria de referència. És per aquest motiu que es va utilitzar un sensor GPS indoor, el qual indicava la posició del cotxe dins del laboratori per poder crear a partir d'aquesta posició una trajectòria de referència tal i com s'havia fet en la simulació.

Arribat a aquest moment, i per agilitzar la programació, es va optar per utilitzar un complement de MATLAB i Simulink que comunicava el programa creat a la simulació amb l'ordinador del cotxe. Es va readaptar el programa utilitzat per a la simulació per que es pogués utilitzar com a controlador del cotxe. A més es va crear en aquest mateix programa un supervisor que treballava alhora que el controlador. No va ser necessària la programació en C++ necessària per crear els nodes de ROS, ja que els blocs de MATLAB i Simulink s'encarregaven d'aquesta tasca.

Finalment es va haver de tornar a ajustar els paràmetres del PID per al cotxe del laboratori. Aquest reajustament va durar més temps del desitjat ja que els valors obtinguts a la simulació discrepaven bastant dels valors que es van obtenir al laboratori, pels motius que s'expliquen en aquesta memòria. A continuació es troba el diagrama de Gantt de la realització de les tasques durant aquest projecte.



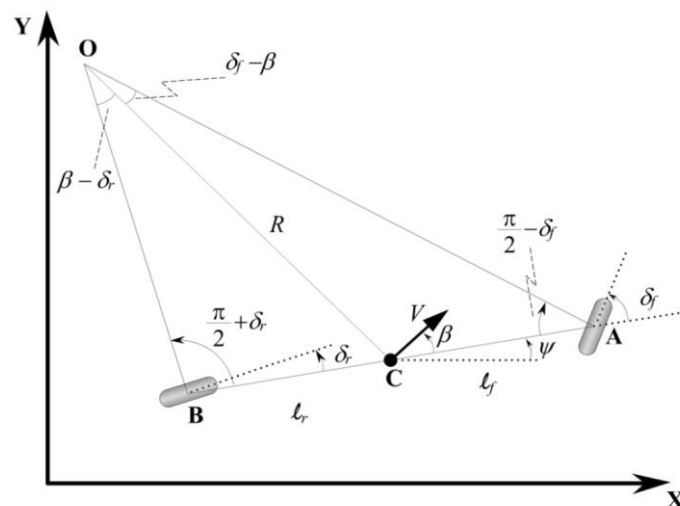
Il·lustració 3.1: Diagrama de Grannt de les tasques realitzades

## 4. Model cinemàtic

A la Figura 1.1 es mostra l'esquema del moviment d'un objecte bicicleta, ja que únicament posseeix una roda de direcció i una altra de tracció. Aquest esquema és la representació del model cinemàtic d'Ackerman on el cotxe es desplaça rotant en torn un punt O. Al punt A trobem la roda de direcció la qual forma un angle  $\delta_f$  respecte l'orientació del cotxe. Al punt B s'hi troba la roda de tracció la qual també forma un cert angle respecte l'orientació del cotxe, en el nostre cas es tindrà en compte que aquest angle és pràcticament 0.

D'altra banda el punt C és la localització del centre de gravetat, el qual es mou a una certa velocitat V desplaçada un cert angle  $\beta$ , l'angle de lliscament. Com es treballarà a velocitats baixes aquest angle serà pràcticament 0. Les distàncies  $l_r$  i  $l_f$  de la imatge són les distàncies de les respectives rodes fins al centre de gravetat, la suma d'elles serà L.

Finalment l'angle d'orientació del cotxe es representa amb  $\psi$ . Aquest angle varia respecte un eix X fixe. En aquest esquema l'angle de creuer per tant és  $\gamma = \beta + \psi$ , però en el nostre esquema serà  $\gamma = \psi$ . [21]



Il·lustració 4.1: Esquema model cinemàtic d'Ackerman [21]

## 4.1. Equacions del moviment

Per poder descriure el moviment del cotxe hi haurà un sistema fixe de referència que s'anomenarà món. Per referir-se a aquest sistema de referències s'utilitzaran majúscules, mentre que quan es faci referència al sistema de referències associat al cotxe s'utilitzaran minúscules.

El desplaçament lineal del cotxe en el sistema de referències món serà:

$$\dot{X} = V \cdot \cos(\gamma) \quad (4.1)$$

$$\dot{Y} = V \cdot \sin(\gamma) \quad (4.2)$$

Per tant, tenint en compte que com no hi ha lliscament  $\gamma = \psi$  el desplaçament serà:

$$X = X_0 + \dot{X} \cdot t = X_0 + V \cdot \cos(\psi(t)) \cdot t \quad (4.3)$$

$$Y = Y_0 + \dot{Y} \cdot t = Y_0 + V \cdot \sin(\psi(t)) \cdot t \quad (4.4)$$

D'altra banda l'angle d'orientació del cotxe variarà en funció de la velocitat de rotació del cotxe. Segons la cinemàtica:

$$\dot{\psi} = \frac{V}{R} \quad (4.5)$$

on  $R$  és la distància entre el centre de gravetat del cotxe i el centre instantani de rotació, tal i com es pot observar a la il·lustració 4.1. Aquesta distància no és una dada coneguda però si ho són els angles de les rodes.

Aplicant la regla del sinus per al triangle que formen centre instantani de rotació (O), el centre de gravetat (C) i el punt on es troben les rodes frontals (A), s'obté que:

$$\frac{\sin(\delta_f)}{l_f} = \frac{\sin(\frac{\pi}{2} - \delta_f)}{R} = \frac{\cos(\delta_f)}{R} \quad (4.6)$$

I aplicant la mateixa regla però en aquest cas amb el punt on es troben les rodes posteriors, s'obté:

$$\frac{\sin(-\delta_r)}{l_r} = \frac{\sin(\frac{\pi}{2} + \delta_r)}{R} = \frac{\cos(\delta_r)}{R} \quad (4.7)$$

En el cas de la equació (4.6) es multiplica per  $\frac{l_f}{\cos(\delta_f)}$  tots dos costats de l'equació:

$$\frac{\sin(\delta_f)}{\cos(\delta_f)} = \frac{l_f}{R} \quad (4.8)$$

i de la mateixa manera per a l'equació (4.7) es multiplica per  $\frac{l_r}{\cos(\delta_r)}$  tots dos costats:

$$\frac{\sin(-\delta_r)}{\cos(\delta_r)} = \frac{l_r}{R} \quad (4.9)$$

Sumant les equacions (4.8) i (4.9) s'obté que:

$$\tan(\delta_f) - \tan(\delta_r) = \frac{l_f + l_r}{R} \quad (4.10)$$

Tenint en compte que en el cas del robot del laboratori es suposarà que l'angle de desviació de les rodes posteriors és aproximadament 0, per tant aïllant R de l'equació (4.10):

$$R = \frac{l_f + l_r}{\tan(\delta_f)} \quad (4.11)$$

I substituint l'equació (4.11) a l'equació (4.5) s'obté que:

$$\dot{\psi} = \frac{v}{l_f + l_r} \tan(\delta_f) \quad (4.12)$$

Finalment l'angle de rotació serà:

$$\psi = \psi_0 + \frac{v}{l_f + l_r} \tan(\delta_f) \cdot t \quad (4.13)$$

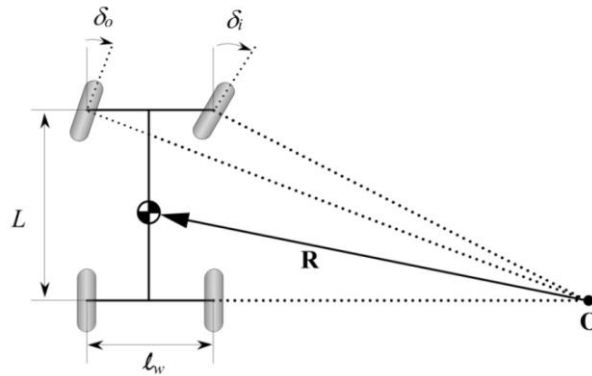
Per tant les equacions que descriuen el moviment del cotxe seran:

Variable	Equació
Variació de la posició en l'eix X del sistema món	$\dot{X} = V \cdot \cos(\gamma)$
Variació de la posició en l'eix Y del sistema món	$\dot{Y} = V \cdot \sin(\gamma)$
Variació de l'angle de rotació	$\dot{\psi} = \frac{V}{l_f + l_r} \tan(\delta_f)$
Desplaçament en l'eix X del sistema món	$X = X_0 + \dot{X} \cdot t = X_0 + V \cdot \cos(\varphi(t)) \cdot t$
Desplaçament en l'eix Y del sistema món	$Y = Y_0 + \dot{Y} \cdot t = Y_0 + V \cdot \sin(\varphi(t)) \cdot t$
Angle d'orientació del sistema món	$\psi = \psi_0 + \frac{V}{l_f + l_r} \tan(\delta_f) \cdot t$

*Taula 4.1: Resum equacions de l'estat del cotxe en el sistema de referència món*

## 4.2. Equacions de la direcció del cotxe

L'esquema de la il·lustració 4.1 està pensat per a un cotxe on les rodes de direcció formen el mateix angle de direcció, però en la realitat les dues rodes formen diferents angles de direcció tal i com es mostra a la il·lustració 4.2.



*Il·lustració 4.2: Esquema de la direcció del tipus Ackerman [21]*

En aquest cas l'angle de direcció del cotxe serà  $\delta$ , i com es considera que no hi ha lliscament aquest angle serà equivalent a:

$$\delta = \frac{L}{R} \quad (4.14)$$

Tal i com es pot veure a la il·lustració 4.2, els radis de les rodes són diferents per tant:

$$\delta_o = \frac{L}{R + \frac{l_w}{2}} \quad (4.15)$$

$$\delta_i = \frac{L}{R - \frac{l_w}{2}} \quad (4.16)$$

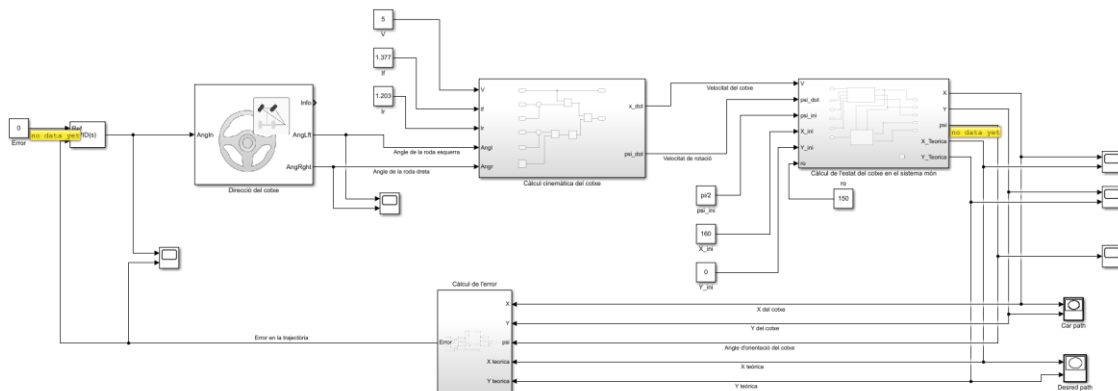
on  $l_w$  és la distància entre les rodes de direcció o tracció. D'aquesta manera es pot observar que l'angle de direcció que segueix el cotxe serà la mitjana aritmètica d'aquests dos angles:

$$\delta = \frac{\delta_o + \delta_i}{2} \quad (4.17)$$



## 5. Model de simulació

En aquest cas s'han utilitzat els programes de MatLab i Simulink per poder realitzar la simulació del control de la trajectòria del cotxe. S'han introduït les mesures del cotxe del laboratori per a que el resultat fos el més significatiu. Per poder dur a terme la simulació s'han utilitzat diferents bloc els quals s'explicaran en més detall en aquest apartat.

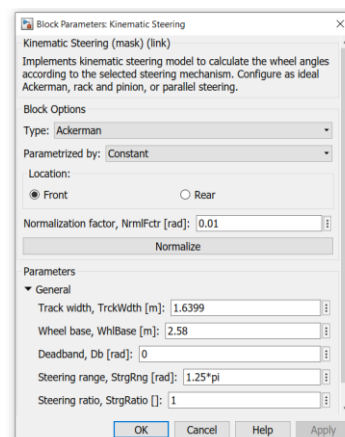
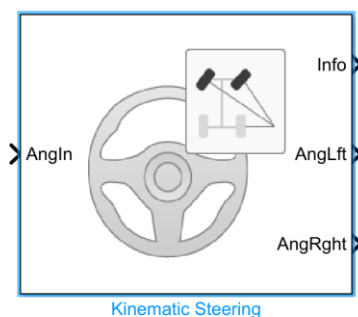


Il·lustració 5.1: Esquema del model de simulació a llaç tancat

### 5.1. Blocs simulació moviment del cotxe

#### 5.1.1. Bloc simulació direcció del cotxe

Aquest bloc és un subsistema on s'hi entra per paràmetre l'angle de direcció que es vol realitzar i dóna com a sortida els angles que han de realitzar les rodes per realitzar aquest gir. Aquest bloc fa servir les equacions (4.5), (4.6) i (4.7).

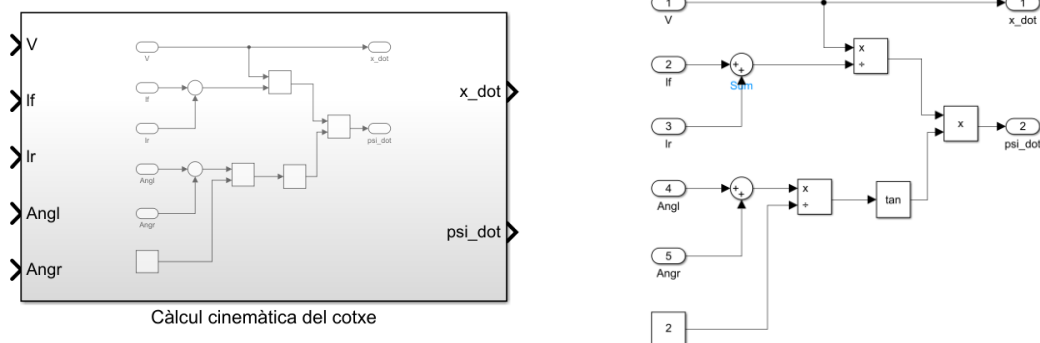


Il·lustració 5.2: Bloc de la direcció del cotxe [22]

Aquest bloc pertany a un a la llibreria de MatLab anomenada Vehicle Dynamics Blockset. Aquest bloc es pot seleccionar entre diferents tipus de direccions, com el model cinemàtic utilitzat és l'Ackerman és el tipus de direcció que s'ha seleccionat en aquest bloc. També s'han introduït com a paràmetres la distància entre les rodes frontals i les de tracció del cotxe, i la distància entre les rodes de tracció. Finalment, el rati de direcció és igual a 1 per tal de que l'angle que s'introdueixi com a angle de direcció desitjat sigui el que realitzi el cotxe.

### 5.1.2. Càlcul de la cinemàtica del cotxe

Aquest bloc s'encarrega de calcular l'angle de direcció del cotxe segons l'equació (4.17) a partir dels angles de les rodes frontals, i la velocitat de rotació del cotxe segons l'equació (4.12). Per tant com a paràmetres d'entrada la velocitat del cotxe, les distàncies de les rodes frontals i posteriors fins al centre de gravetat del cotxe i els angles de les rodes frontals.



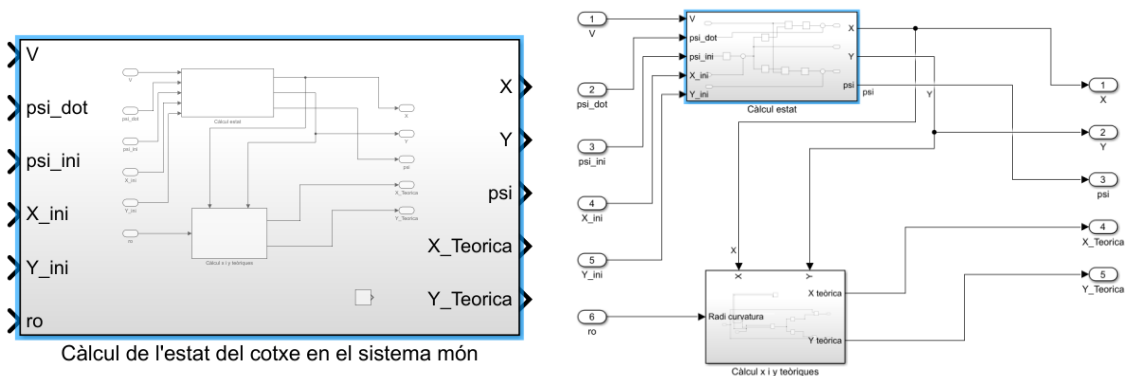
Il·lustració 5.3: Bloc de càlcul de la cinemàtica del cotxe

## 5.2. Blocs control de la posició

Per poder fer un control de la trajectòria s'ha de conèixer la posició del cotxe a les coordenades món, per tant s'ha de fer un canvi de referència. A continuació a partir de la posició real del cotxe es calcularà la posició de referència d'aquest i finalment per poder calcular la desviació es tornarà a fer un canvi de referència al sistema de referència del cotxe.

### 5.2.1. Càlcul de l'estat real i desitjat del cotxe

A partir de les sortides del bloc anterior i les condicions inicials que s'introdueixen com a paràmetre es pot calcular la posició del cotxe en el sistema de referències inercial. A partir de les equacions (4.3), (4.4) i (4.13) es pot conèixer la posició del cotxe en el sistema món.

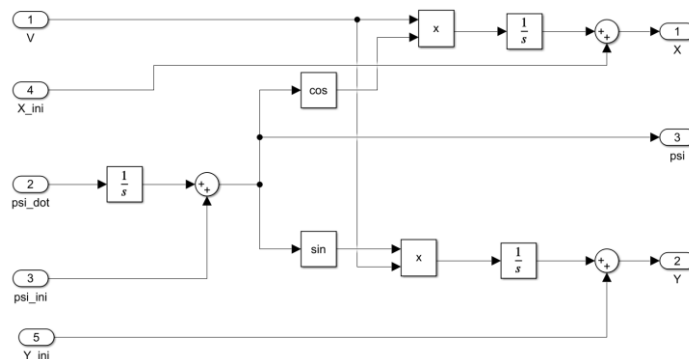


*Il·lustració 5.4: Bloc per al càlcul de l'estat real i teòric del cotxe*

Dins del bloc que es mostra a la il·lustració 5.4 hi ha dos subsistemes més encarregats de calcular la posició de referència del cotxe i la posició real del cotxe en el sistema inercial.

- Càlcul de l'estat real del cotxe

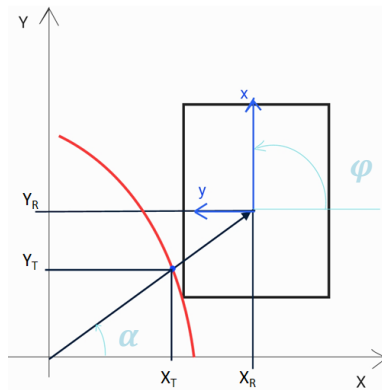
En aquest cas tal i com s'ha mencionat s'utilitzen les equacions (4.3), (4.4) i (4.13) per establir l'estat del cotxe en el sistema de referències món. Es necessiten, per tant, com a paràmetres d'entrada la velocitat del cotxe, la velocitat de rotació i els estats inicials de cada posició.



*Il·lustració 5.5: Esquema de l'interior del bloc del càlcul de l'estat*

- Càlcul de l'estat desitjat del cotxe

Tanmateix la posició real del cotxe no té per que ser la mateixa que la que defineix la trajectòria desitjada, per tant s'haurà de calcular la posició de referència que hauria de tenir el cotxe segons la trajectòria desitjada (veure il·lustració 5.6).



*Il·lustració 5.6: Esquema posició de referència segons la trajectòria desitjada en les coordenades món*

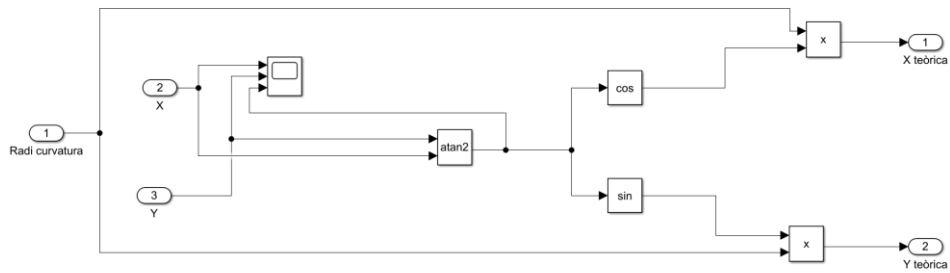
Com es coneix la posició del cotxe en les coordenades genèriques es pot calcular l'angle al que es troben respecte de l'eix d'abscisses tal i com es mostra la figura.

$$\alpha = \operatorname{arctg}\left(\frac{Y_R}{X_R}\right) \quad (5.1)$$

Coneixent aquest angle i el radi de la trajectòria es pot conèixer la posició de referència del cotxe, és a dir:

$$\begin{pmatrix} X_T \\ Y_T \end{pmatrix} = \rho \cdot \begin{pmatrix} \cos(\alpha) \\ \sin(\alpha) \end{pmatrix} \quad (5.2)$$

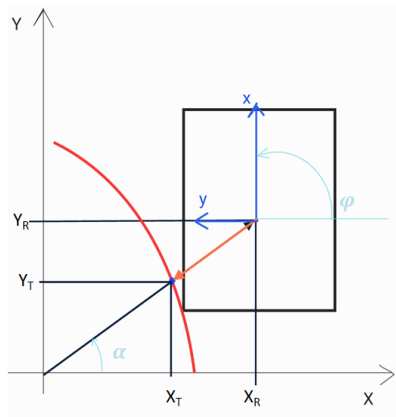
El subsistema que es mostra a la figura 5.7. Utilitza les equacions 5.1 i 5.2 per calcular les coordenades de les posicions de referència en el sistema món. S'introdueixen per tant com a paràmetres les posicions  $X_R$  i  $Y_R$  i el radi de la trajectòria. Com a sortida s'obtenen les posicions de referència  $X_T$  i  $Y_T$ .



*Il·lustració 5.7: Esquema interior del bloc del càlcul de la posició de referència*

### 5.3. Càlcul de la desviació

Per poder realitzar el control de la trajectòria s'ha de calcular la desviació del cotxe. Aquesta desviació després s'haurà de passar al sistema de referència del cotxe ja que ha de ser el cotxe el que rectifiqui la trajectòria respecte del seu moviment (veure il·lustració 5.8).



*Il·lustració 5.8: Esquema de la desviació del cotxe en les coordenades cotxe*

Tal i com es pot observar en la il·lustració 5.8 el vector en coordenades inercials serà:

$$\begin{pmatrix} X_e \\ Y_e \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_T \\ Y_T \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} X_R \\ Y_R \end{pmatrix} \quad (2.3)$$

El mòdul del vector definit per  $X_e$  i  $Y_e$  en el sistema inercial serà el mateix que el mòdul del desviament de la trajectòria vist des de el sistema de referències del cotxe i per tant serà el paràmetre que rebí com a error el controlador. Però cal tenir en compte que el mòdul del desviament sempre serà positiu per aquest motiu s'ha d'estudiar el signe que ha de tenir depenent de la situació de la trajectòria respecte del cotxe.

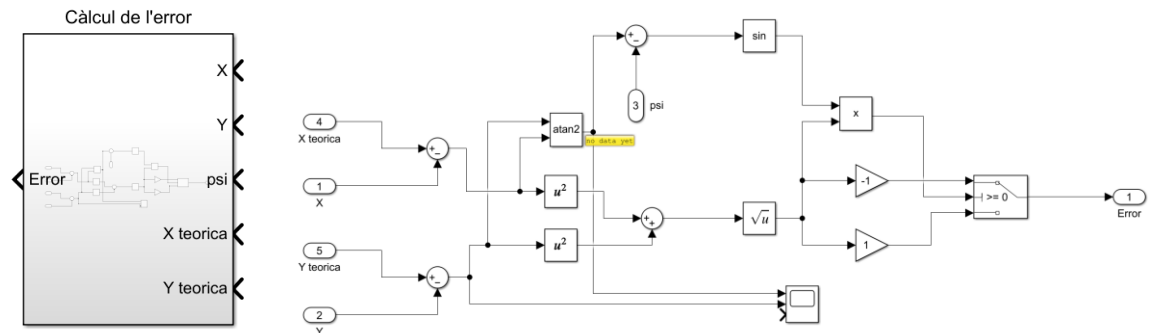
Per poder estudiar el sentit del gir a realitzar, cal projectar el vector de desviament en el eix y del sistema del cotxe. L'angle que forma el vector de desviament amb l'eix x del sistema del cotxe serà:

$$\theta = \arctan\left(\frac{Y_e}{X_e}\right) - \psi \quad (2.4)$$

Per tan la projecció en l'eix de coordenades del cotxe serà:

$$y_e = \sqrt{(X_e)^2 + (Y_e)^2} \cdot \sin(\theta) \quad (2.5)$$

El subsistema que es mostra a la il·lustració 5.9 s'encarrega de calcular la projecció del vector de desviació en l'eix de coordenades y del cotxe, a més del seu mòdul. El switch que es pot observar que hi ha s'encarrega de estudiar el signe del mòdul.



*Il·lustració 5.9: Bloc de càlcul de l'error en les coordenades x i y del cotxe*

### 5.3.1. Estudi del sentit de la desviació

Com l'error es calcula a partir del mòdul de la distància entre el cotxe i el punt desitjat de la trajectòria, aquest valor sempre serà positiu. És per aquest motiu que s'ha de realitzar un estudi del sentit de l'error.

- **Quan el cotxe es troba a la dreta de la trajectòria**

Tal i com es pot veure a la figura 5.8 en aquest cas la projecció de la desviació en el eix y del cotxe serà en sentit positiu, a més el gir del cotxe haurà de ser en sentit antihorari, el qual en el sistema de referències del cotxe és el sentit de gir. Per tant, la resposta del PID haurà de ser positiva. És per aquest motiu que l'error que arribarà haurà de ser negatiu.

- **Quan el cotxe es troba a l'esquerra de la trajectòria**

En aquest segon cas la projecció de la desviació en el eix y del cotxe serà negativa i a més el cotxe haurà de girar en sentit horari, és a dir en el sentit oposat de gir del sistema de referències del cotxe. Per tant, la resposta del PID en aquest cas serà negativa i per tant l'error haurà de ser positiu.

A partir d'aquests dos casos es pot establir que quan el valor de la desviació projectada en l'eix y del cotxe és menor que 0 l'error haurà de ser major o igual a 0. I quan la desviació projectada en l'eix y sigui major que 0, l'error haurà de ser menor o igual a 0.

Aquesta decisió es té contemplada amb el switch que es mostra a l'esquema del Simulink de la figura 5.9.

## 6. Resultats de la simulació del model cinemàtic

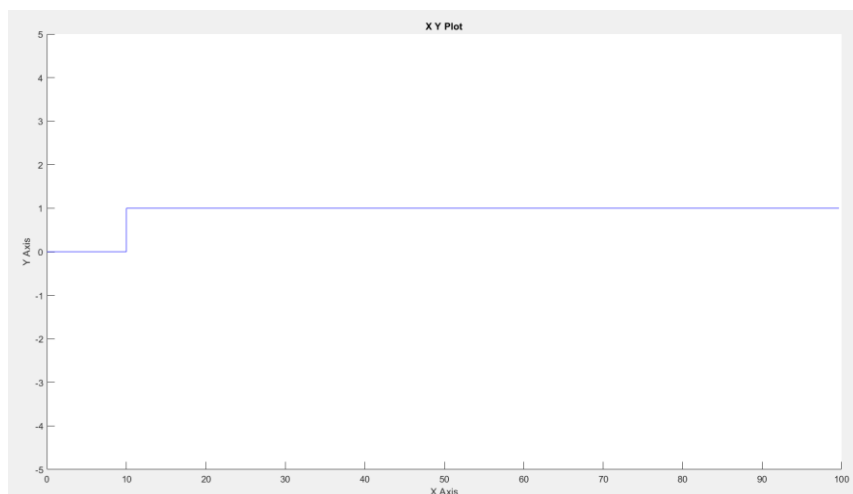
Per poder ajustar els paràmetres del controlador abans de procedir a la programació del cotxe, s'han realitzat un seguit de proves amb el simulador dissenyat amb Simulink. S'han provat diferents trajectòries com a referència i a continuació es discuteixen els resultats.

Cal destacar que en totes les trajectòries de referència s'ha utilitzat com a rang de velocitats de creuer les compreses entre 2 m/s i 5 m/s. S'ha utilitzat aquest interval ja que són les velocitats reals a les que pot arribar el cotxe real del laboratori.

### 6.1. Trajectòria lineal

Per començar a ajustar el controlador s'hi va introduir com a referència un graó. El moviment en l'eix d'abscisses del sistema de referència fix era un moviment rectilini uniforme, mentre que a l'eix de les ordenades variava amb un graó amb diferents guanys.

Per tal de procurar una certa coherència amb el que es provaria al laboratori els guanys amb els que es va simular eren entre de 1 m, 1,5 m i 2 m. A continuació es mostra els resultats obtinguts per a un guany de 1 m i les diferents velocitats.

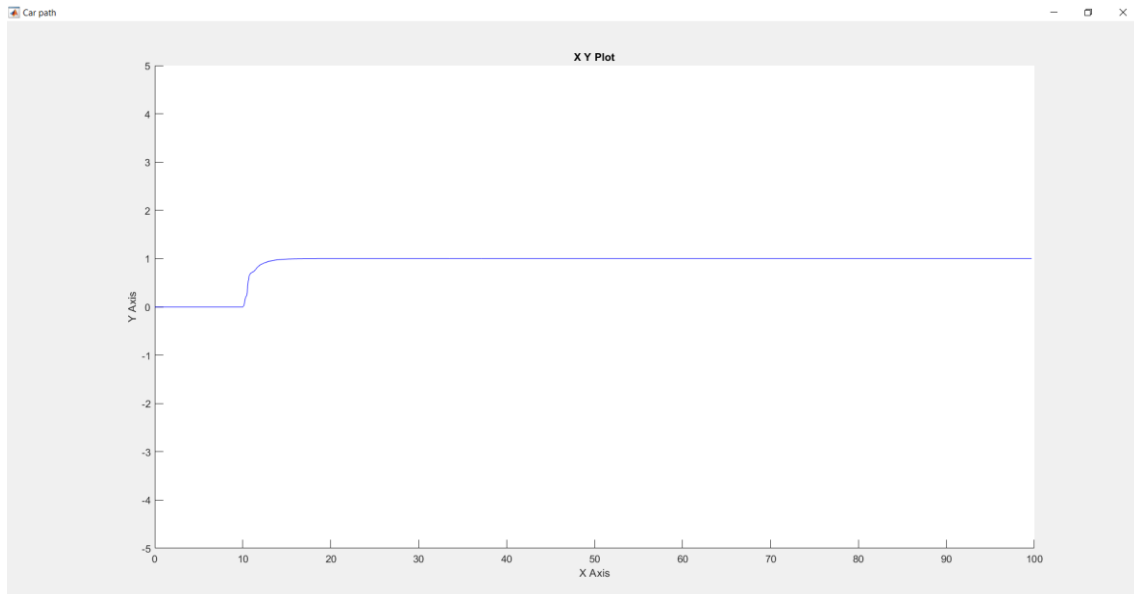


*Il·lustració 6.1: Trajectòria lineal de referència*



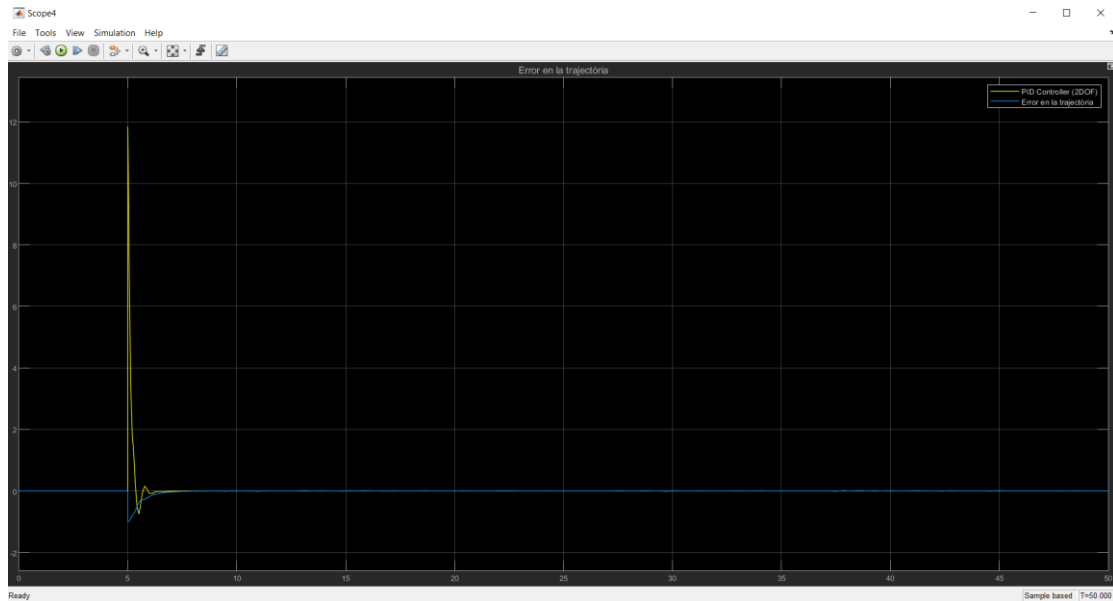
### 6.1.1. Velocitat de 2 m/s

En aquest cas es pot observar com el controlador gira bruscament la direcció del cotxe degut al graó unitari que se l'introdueix com a referència. Tanmateix quan està arribant a la trajectòria desitjada l'adaptació a aquesta trajectòria és suau, és a dir, no es produeixen esses en la trajectòria del cotxe.



*Il·lustració 6.2: Trajectòria lineal realitzada pel cotxe a 2 m/s*

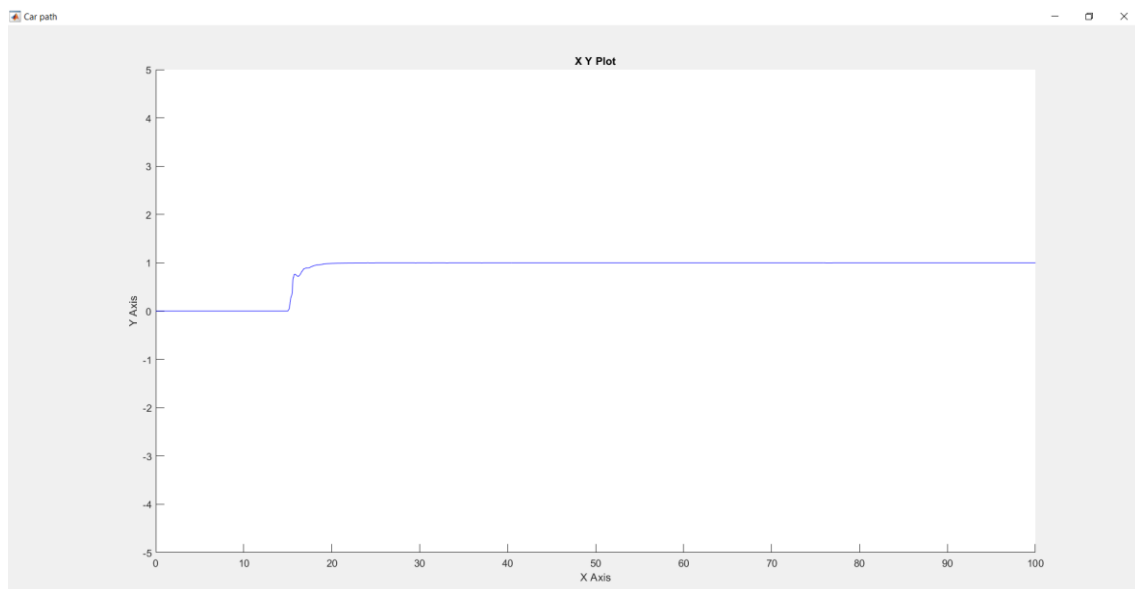
Finalment si observem l'error (línia groga) que es mostra en la Gràfica 6.1, en el moment que s'introdueix la variació en l'eix d'ordenades, la desviació es dispara. Aquest fet es pot veure en el pic que es produeix. Tanmateix la resposta del PID també es brusca però torna a una resposta nul·la de manera suau.



*Gràfica 6.1: Error i resposta del PID per a una trajectòria lineal i una velocitat de 2 m/s*

### 6.1.2. Velocitat de 3 m/s

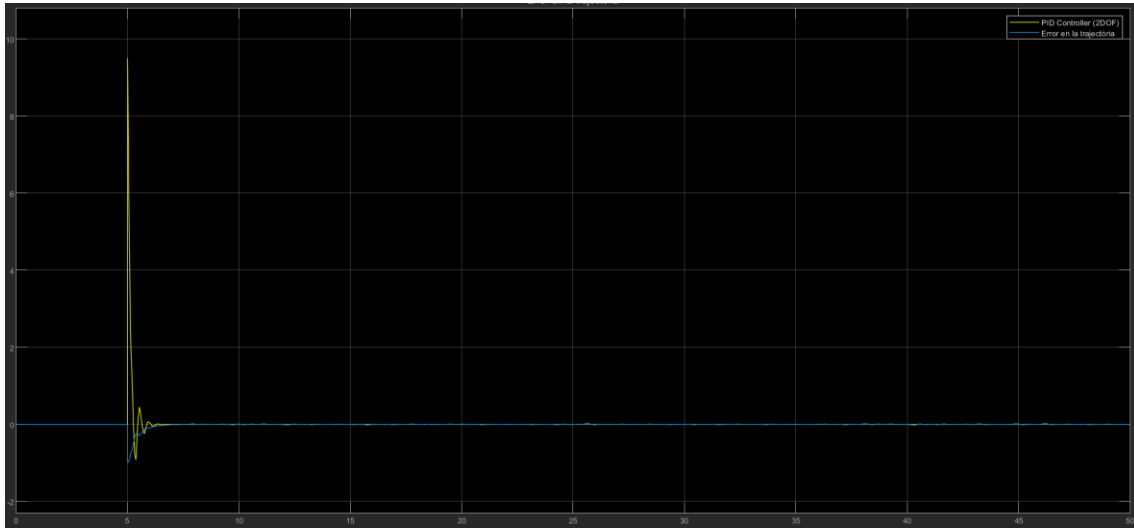
En aquest cas es pot comprovar que hi ha un cert ressalt més pronunciat però després d'ell el sistema tendeix a seguir la trajectòria de referència de manera més suau fins arribar a seguir-la completament. En aquest moment entra en un estat estacionari on l'error es pràcticament nul. Tampoc s'observa que la trajectòria del cotxe realitzi cap essa.



*Il·lustració 6.3: Trajectòria lineal realitzada pel cotxe a 3 m/s*

En comparació amb la situació anterior en aquest cas, es pot observar més inestabilitat en la zona transitòria. Tot i que la resposta del PID (zona blava) canvia bruscament a

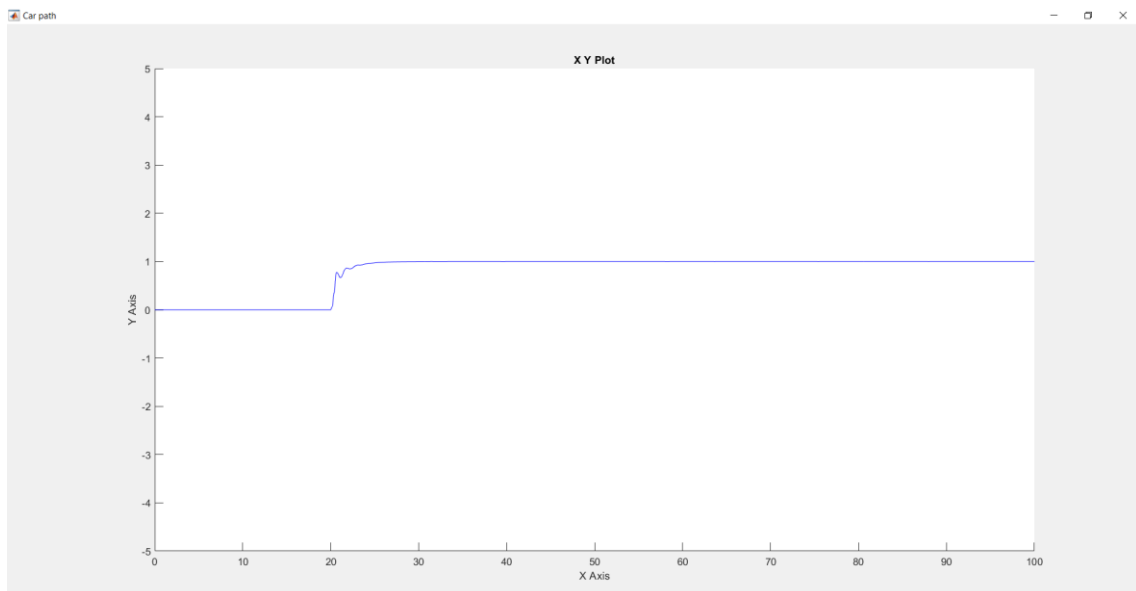
L'inici quan s'introdueix el canvi de posició de una  $y = 0$  m a una  $y = 1$  m, després d'aquest instant la resposta va disminuint de manera constant fins arribar a l'error nul.



*Gràfica 6.2: Error i resposta del PID per a una trajectòria lineal i una velocitat de 3 m/s*

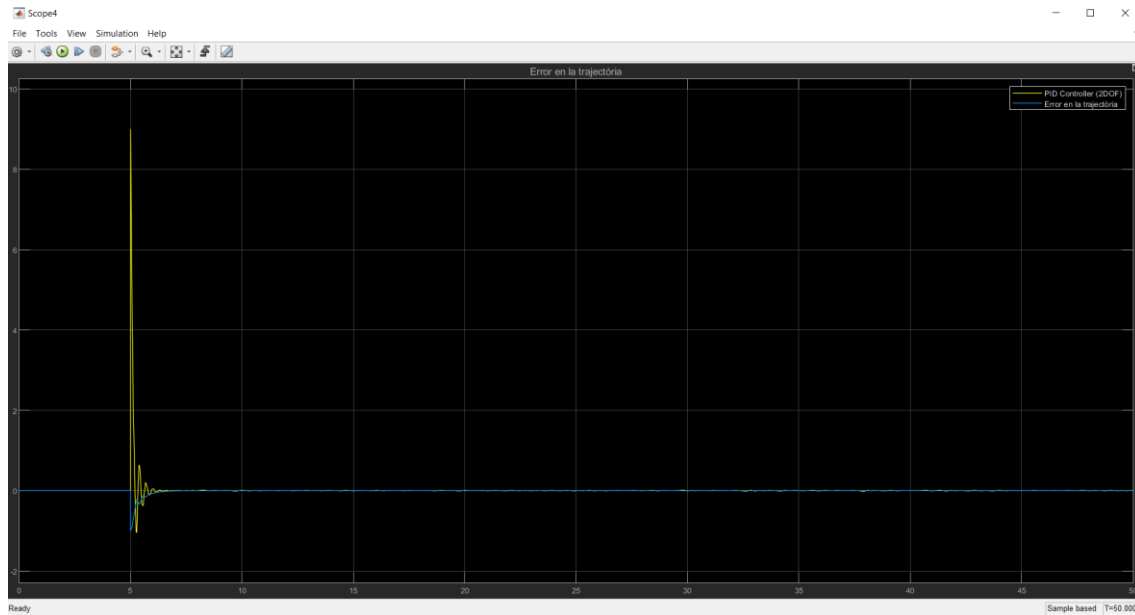
### 6.1.3. Velocitat de 4 m/s

El comportament del cotxe amb una velocitat de 4 m/s és semblant al comportament observat per a una velocitat de 3 m/s. Tot i que es pot comprovar que el ressalt en aquest cas és més destacable.



*Il·lustració 6.4: Trajectòria lineal realitzada pel cotxe a 4 m/s*

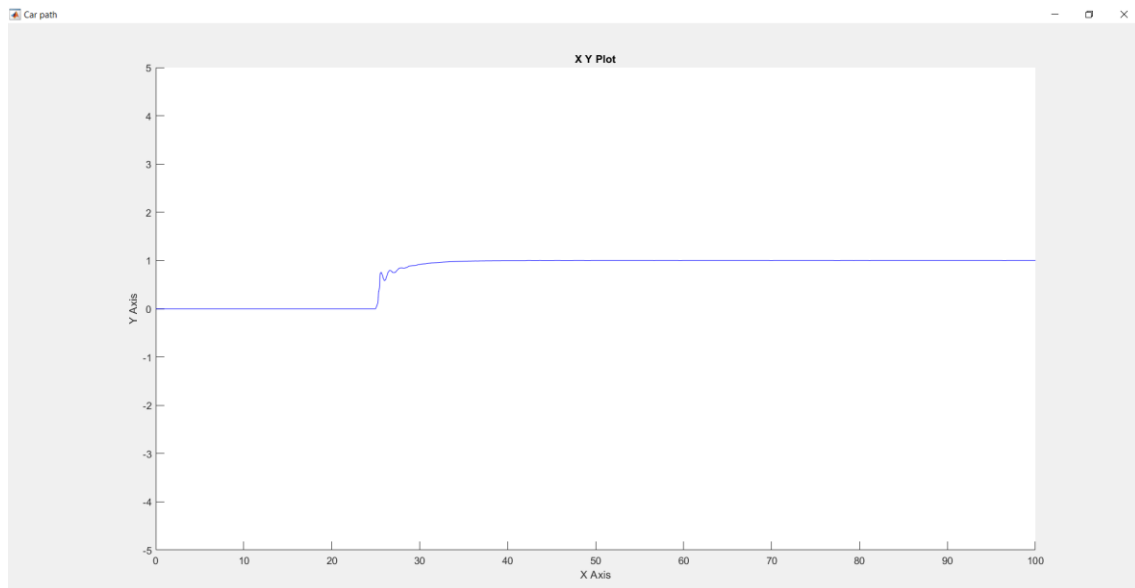
L'error en aquest cas es comporta de manera semblant que a l'error per a 3 m/s. Així mateix la resposta es comporta també d'una manera semblant.



*Gràfica 6.3: Error i resposta del PID per a una trajectòria lineal i una velocitat de 4 m/s*

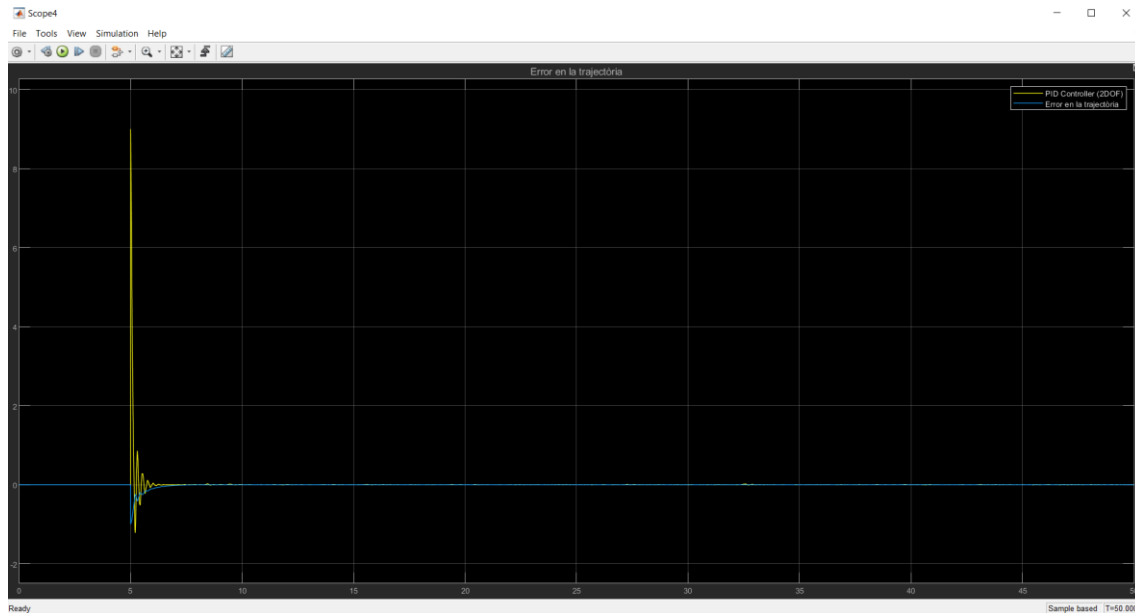
#### 6.1.4. Velocitat de 5 m/s

Finalment per a la velocitat màxima és on més inestabilitat s'hi pot observar. Tot i que el cotxe no realitza esses en la zona estacionària, el ressalt que es produïa en els casos anteriors ara és més pronunciat. Aquet fet fa que el cotxe realitzi unes esses pronunciades en la zona transitòria.



*Il·lustració 6.5: Trajectòria lineal realitzada pel cotxe a 5 m/s*

Així mateix, l'error per a aquesta velocitat és molt més inestable en la zona transitòria. Tanmateix tal i com succeïa en els casos anteriors un cop s'arriba a l'estat estacionari el cotxe realitza una trajectòria sense esses.



*Gràfica 6.4: Error i resposta del PID per a una trajectòria lineal i una velocitat de 5 m/s*

### 6.1.5. Valors dels paràmetres

Els valors obtinguts per als paràmetres del controlador PID per a les diferents velocitats han sigut els que es mostren a la taula de a continuació.

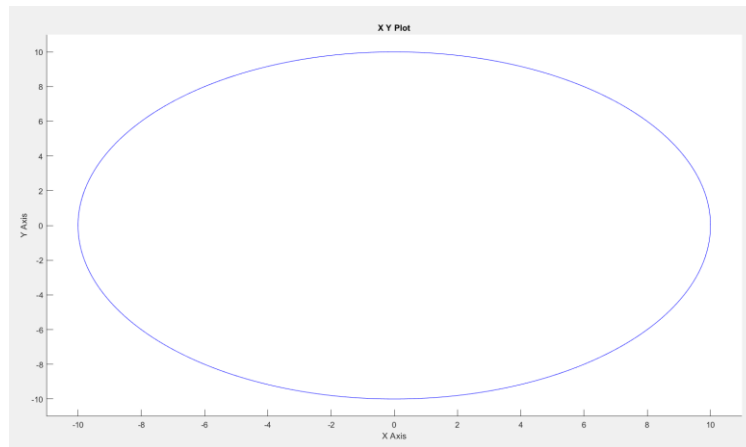
Velocitat (m/s)	Valors del controlador		
	Kp	Ki	Kd
2	1.85	0	1
2,5	2	0	0,85
3	2	0	0,75
3,5	2	0	0,7
4	2	0	0,7
4,5	1,5	0	0,7
5	1,5	0	0,75

*Taula 6.1: Resultats dels paràmetres del controlador a una referència d'un graó unitari*

Amb aquest tipus de trajectòria de referència el paràmetre integrador no actua ja que quan es va intentar provar d'utilitzar-lo el sistema es tornava inestable. També es pot observar que per a aquest rang de velocitats el guany de cada paràmetre no varia de manera notable.

## 6.2. Trajectòria circular

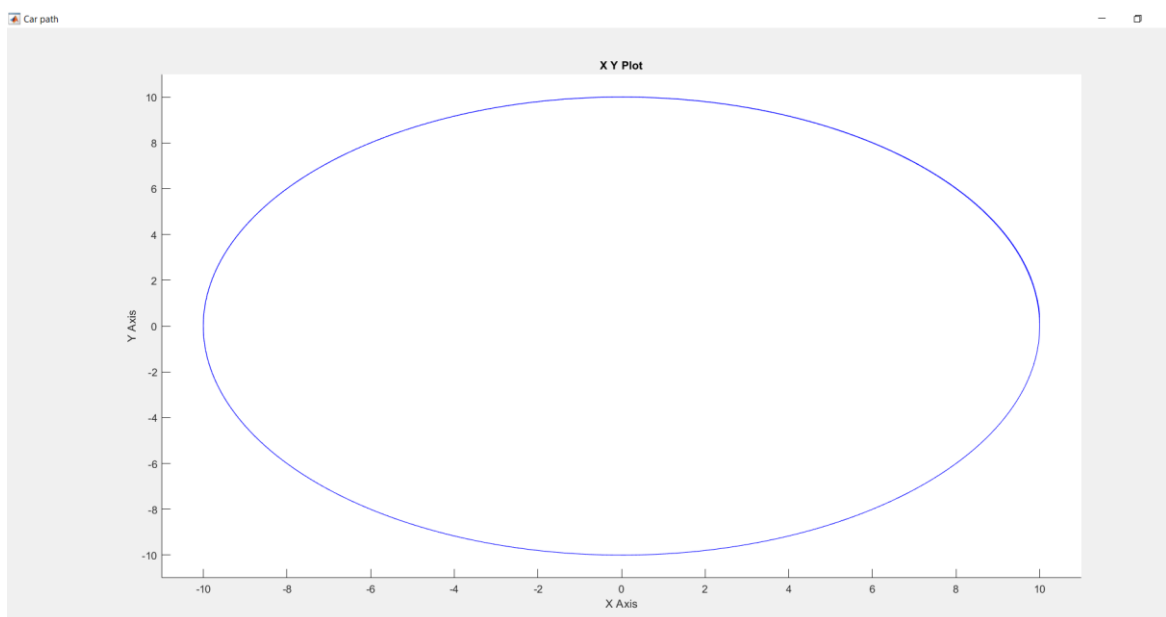
Seguidament es va provar com a trajectòria de referència una circular. Per tal d'introduir aquesta referència es va fer servir el bloc explicat en l'apartat 6.2.1. En aquest cas s'ha simulat amb el radi de 10 m per a les velocitats ja definides anteriorment. A continuació es mostra la trajectòria de referència utilitzada.



*Il·lustració 6.6: Trajectòria circular de referència*

### 6.2.1. Velocitat de 2 m/s

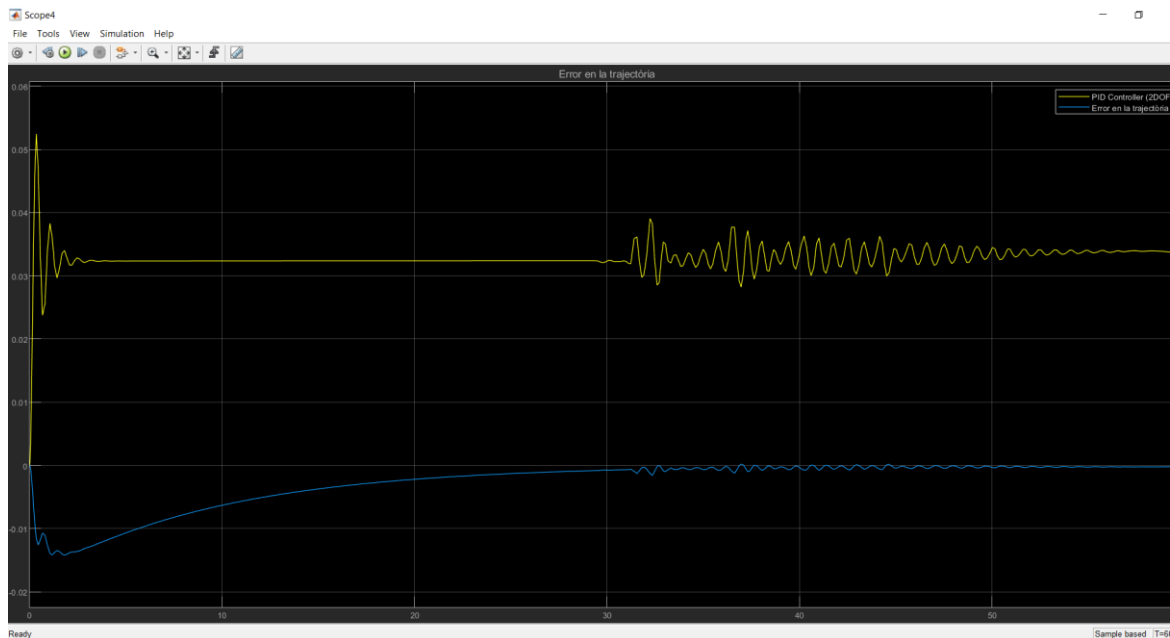
Utilitzant aquesta velocitat el cotxe realitza una trajectòria circular perfecte. Cal destacar que és important iniciar el cotxe orientat de manera adequada per tal que el controlador no es perdi. Si s'orienta de manera adequada el resultat és el que es mostra en la il·lustració 6.7.



*Il·lustració 6.7: Trajectòria circular realitzada pel cotxe a 2 m/s*

L'error i la resposta que es poden observar en aquest cas en la Gràfica 6.5, és molt diferents a l'error que s'obtenia per a la trajectòria lineal. Es pot observar que en cap moment la resposta del PID és 0, però si es pensa en el tipus de trajectòria desitjada té sentit, ja que és una trajectòria la qual es necessita que el cotxe estigui girant en tot moment.

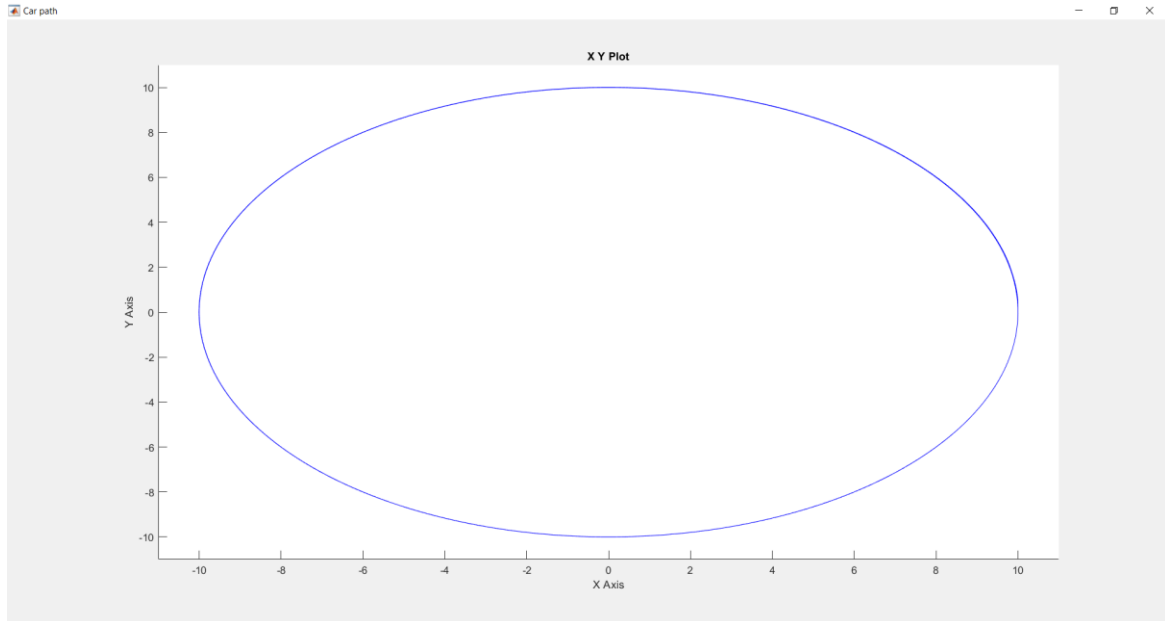
Inicialment l'error és de 0 així com la resposta del controlador. Tanmateix, com el cotxe es comença a desviar de la trajectòria de referència, aquest li indica que corregeixi l'error de manera brusca. Finalment quan l'error tendeix a 0, el cotxe ha d'anar rectificat l'angle de direcció ja que no hi ha un angle constant que li permeti realitzar la circumferència, això es deu a l'orientació que té el cotxe.



*Gràfica 6.5: Error i resposta del PID per a una trajectòria circular i una velocitat de 2 m/s*

### 6.2.2. Velocitat de 3 m/s

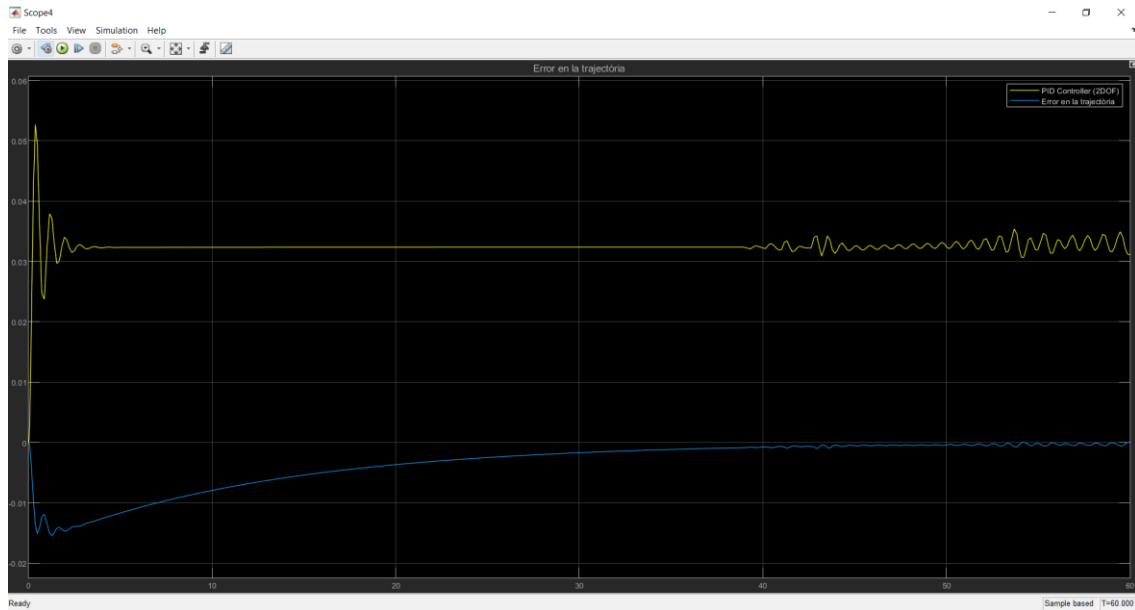
Variant els paràmetres del controlador respecte dels fets servir per a una velocitat de 2 m/s, s'obté una trajectòria tal i com es mostra en la il·lustració 6.8. En aquest cas també s'ha hagut de tenir en compte les condicions inicials i l'orientació inicial.



*Il·lustració 6.8: Trajectòria circular realitzada pel cotxe a 3 m/s*

Finalment si comparem l'error i la resposta per aquesta velocitat, es pot comprovar en la gràfica 6.6, que tots dos són més estables. A l'inici es comporta de manera semblant a la situació per a una velocitat de 2 m/s però un cop orienta de manera adequada el cotxe aquest realitza menys variacions d'angle que en el cas anterior. Cal destacar que el valor de l'error màxim és proper al valor de l'error màxim per a la velocitat inferior.

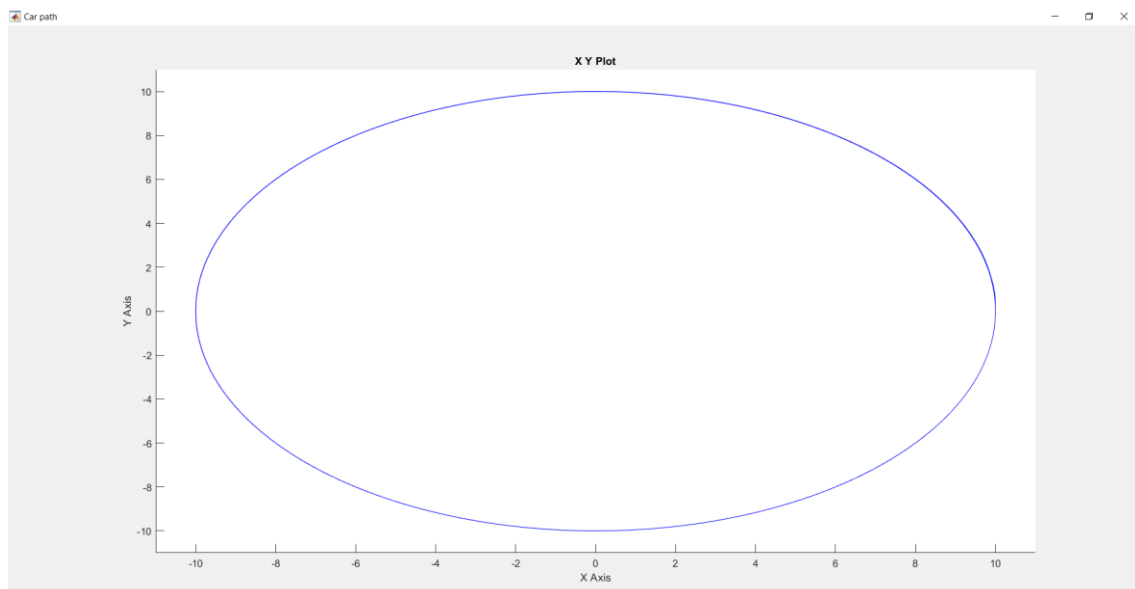




*Gràfica 6.6: Error i resposta del PID per a una trajectòria circular i una velocitat de 3 m/s*

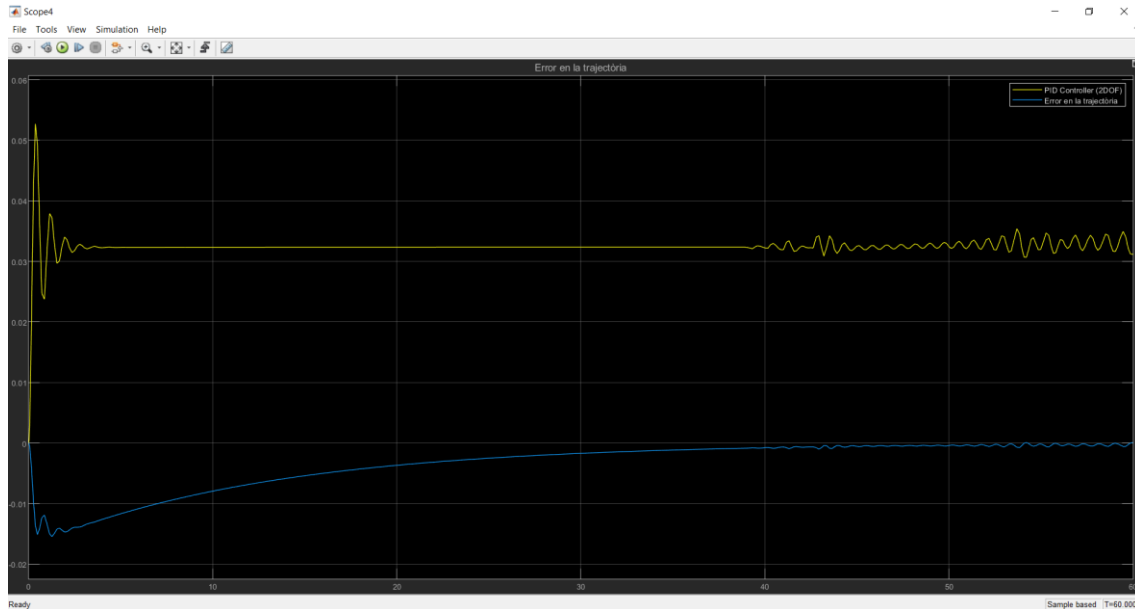
### 6.2.3. Velocitat de 4 m/s

Tal i com succeïa en el cas anterior, el cotxe realitza correctament la trajectòria circular a una velocitat constant de 4 m/s. Es pot veure que la línia de la trajectòria és més gruixuda en algunes zones, això es deu a que en el temps de simulació el cotxe realitza més d'una volta.



*Il·lustració 6.9: Trajectòria circular realitzada pel cotxe a 4 m/s*

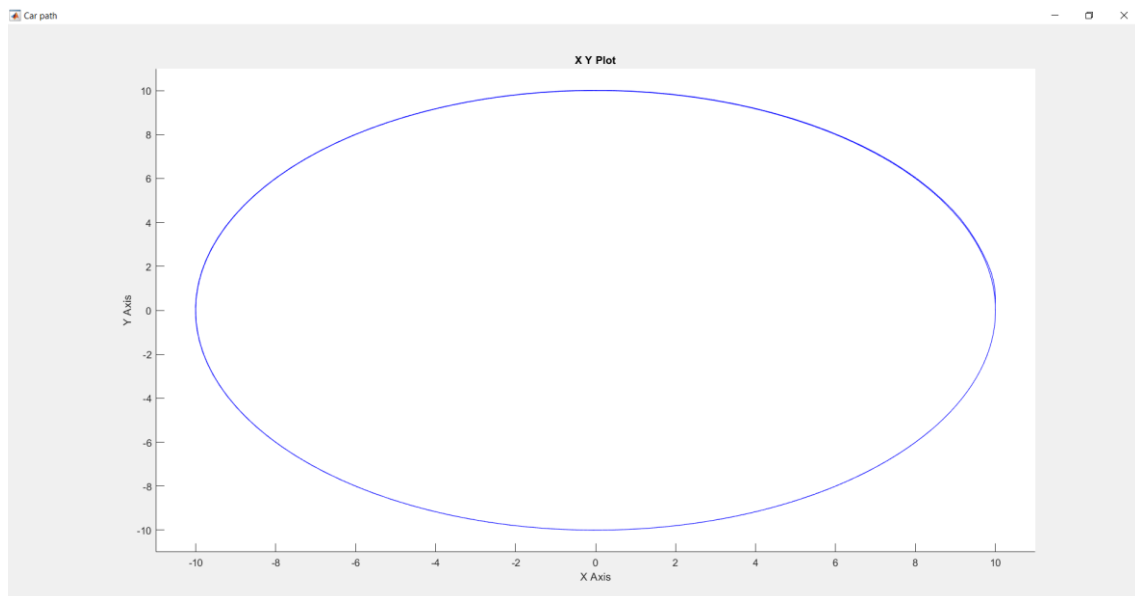
Pel que fa a l'error es pot observar que arribada a la zona estacionària el cotxe segueix tenint una inestabilitat. Tal i com succeïa per a una velocitat de 3 m/s, com no es controla l'orientació del cotxe, aquest no acaba d'estar orientat correctament per poder realitzar la trajectòria sense haver de fer girar les rodes de direcció.



Gràfica 6.7: Error i resposta del PID per a una trajectòria circular i una velocitat de 4 m/s

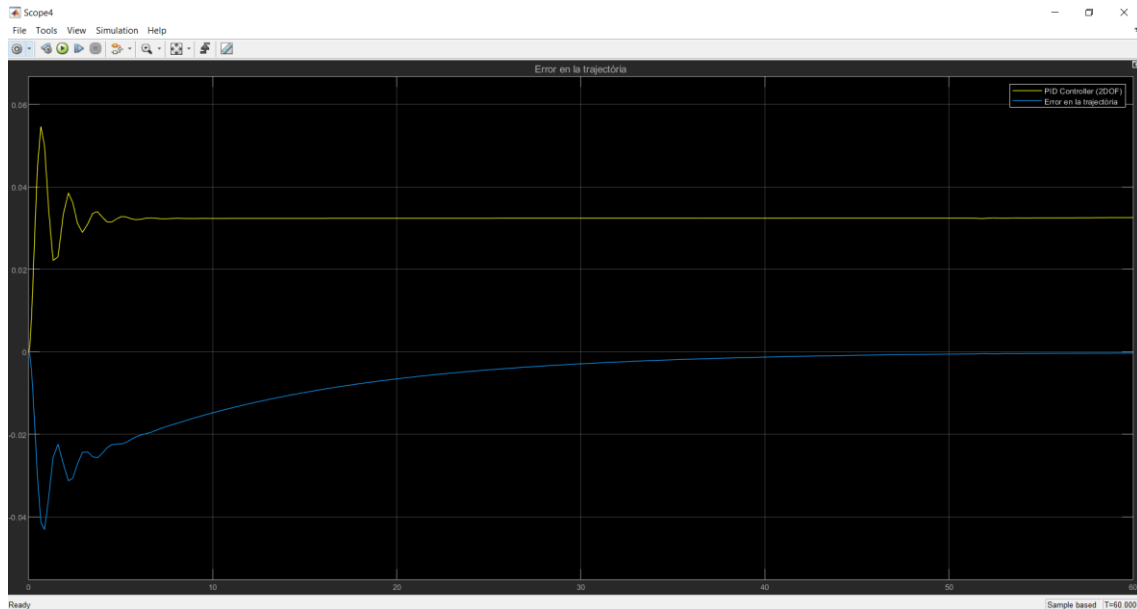
#### 6.2.4. Velocitat de 5 m/s

Finalment per a la velocitat màxima s'ha pogut comprovar que el cotxe realitzava correctament la trajectòria. Torna a haver una zona on la línia és més gruixuda degut a que el cotxe ha realitzat més d'una volta.



Il·lustració 6.10: Trajectòria circular realitzada pel cotxe a 5 m/s

Finalment en aquest cas la zona estacionària és estable. El cotxe està orientat de manera adequada i es manté com a resposta del PID un valor constant d'uns 0,03 radians. Així mateix, s'arriba a un error nul mantenint aquests graus de gir.



Gràfica 6.8: Error i resposta del PID per a una trajectòria circular i una velocitat de 5 m/s

### 6.2.5. Valors dels paràmetres

Els valors obtinguts per als paràmetres del controlador PID per a les diferents velocitats han sigut els que es mostren a la taula de a continuació.

Velocitat (m/s)	Valors del controlador		
	Kp	Ki	Kd
2	2	0,2	1
2,5	2	0,2	1
3	2	0,15	0,75
3,5	1,5	0,1	0,5
4	1,5	0,1	0,25
4,5	1,5	0,08	0,25
5	1	0,08	0,2

Taula 6.2: Resultats dels paràmetres del controlador per a una trajectòria de referència circular de radi 10 m

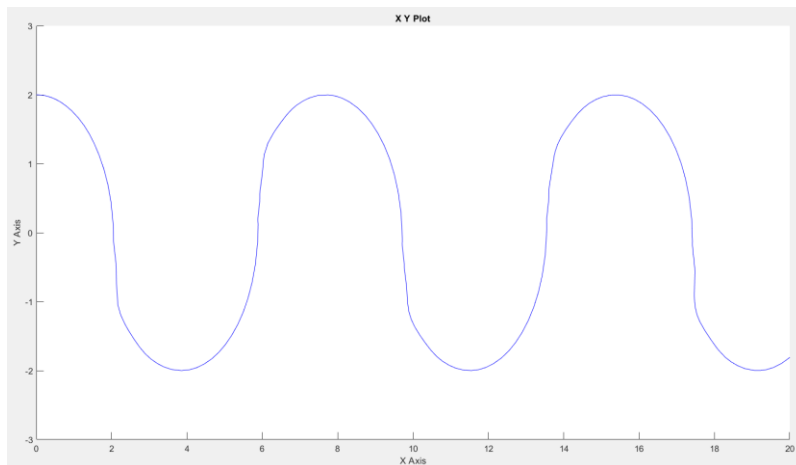
En aquest cas l'integrador era necessari per tal de que el cotxe corregís la seva trajectòria. Tanmateix els valors dels paràmetres varien notablement depenent de la velocitat de creuer del cotxe.

### 6.3. Trajectòria sinusoidal

Finalment es va voler introduir com a referència una senyal sinusoidal per tal de comprovar una trajectòria amb corbes i zones més lineals. L'amplitud de la senyal en aquest cas ha sigut de 2 m.

Així com en el cas de la trajectòria lineal s'ha utilitzat com a referència de la posició en les ordenades una senyal sinusoidal. Com a referència de la posició en les abscisses la mateixa posició que la del cotxe.

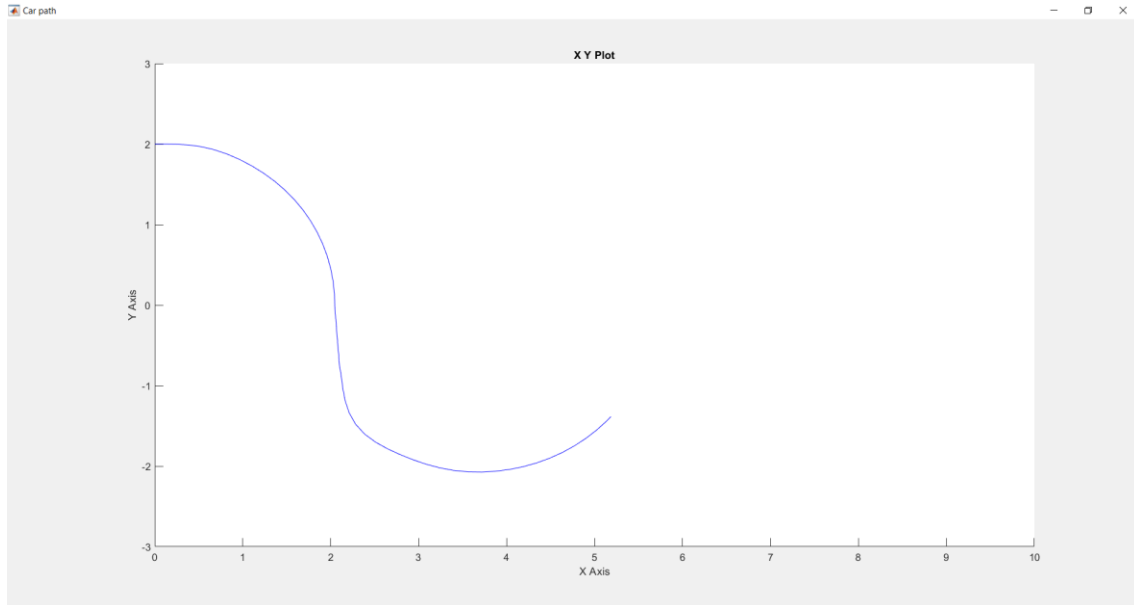
A continuació es mostra la trajectòria de referència utilitzada.



*Il·lustració 6.11: Trajectòria sinusoidal de referència*

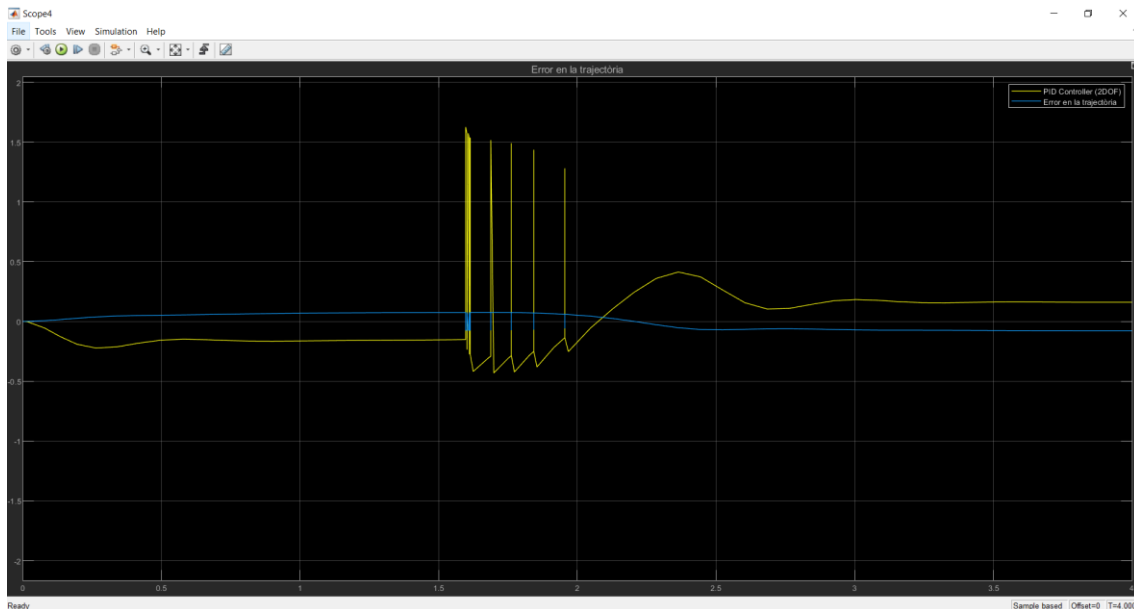
#### 6.3.1. Velocitat de 2 m/s

En la il·lustració 6.12 no es pot apreciar tot el recorregut que traça el cotxe ja que el simulador calcula més punts dels que és capaç de representar. És per aquest motiu que només s'ha pogut captar l'inici de la trajectòria. Si comparem aquest primer tram amb la trajectòria de referència de la il·lustració 6.11, es pot comprovar que aquesta es segueix de manera correcte.



**Il·lustració 6.12:** Trajectòria sinusoidal realitzada pel cotxe a 2 m/s

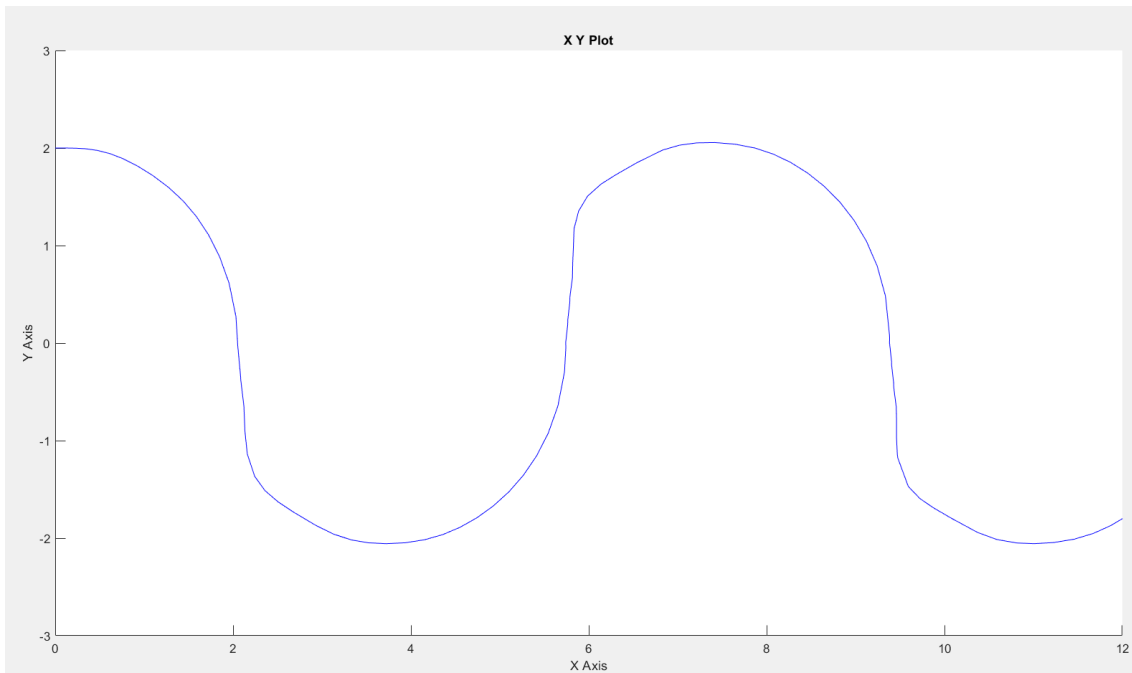
En aquest cas l'error i la resposta del PID es comporten de manera inestable. Això es pot deure a que l'ona sinusoidal té una part amb una curvatura pronunciada i una més lineal. Si s'observa la gràfica 6.9 quan el cotxe es troba a la zona amb la curvatura pronunciada l'error i la resposta del PID es inestabilitzen. Mentre que quan es troba a la zona lineal, aquest es manté amb una resposta constant.



**Gràfica 6.9:** Error i resposta del PID per a una trajectòria sinusoidal i una velocitat de 2 m/s

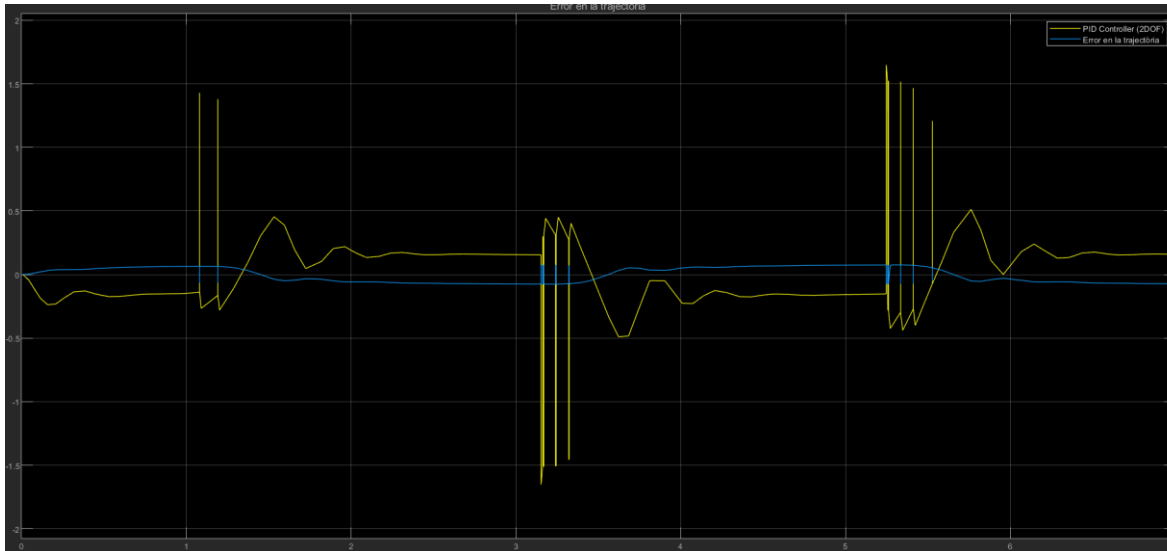
### 6.3.2. Velocitat de 3 m/s

En aquest cas el simulador ha permès que es pogués veure tota la trajectòria realitzada en el temps simulat. En aquest cas es pot comprovar que al començament de totes 3 curvatures, el cotxe està orientat de manera recta i ha de corregir la trajectòria per poder realitzar els girs dels màxims i mínims de la trajectòria.



*Il·lustració 6.13: Trajectòria sinusoidal realitzada pel cotxe a 3 m/s*

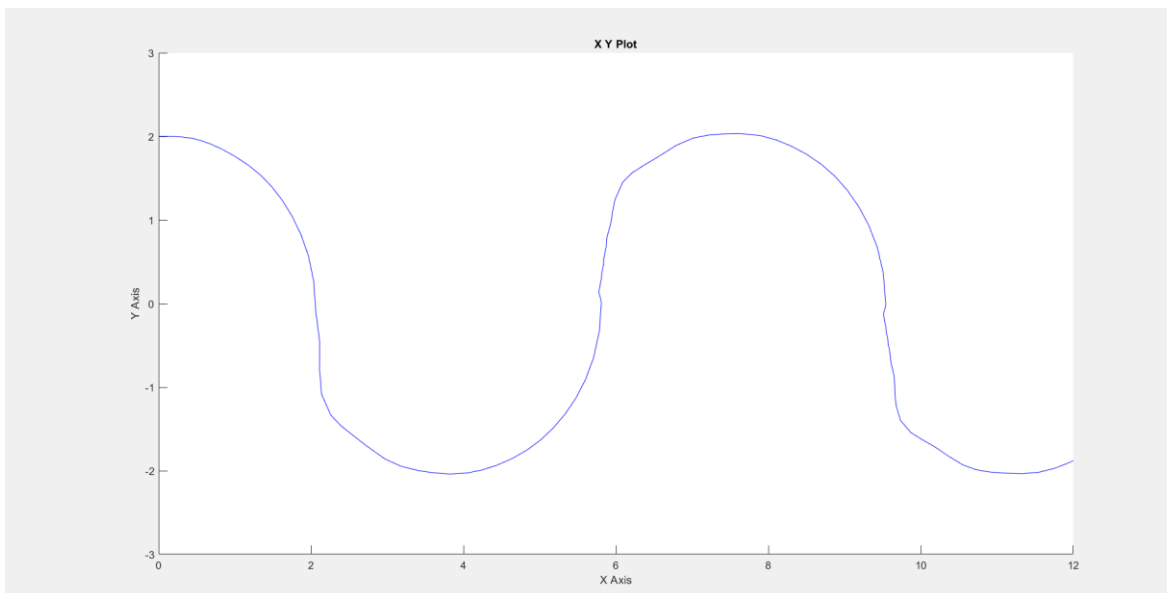
Tal i com s'ha comentat quan el cotxe arriba als màxims o a ls mínims de l'ona que marca la trajectòria de referència, aquest no està orientat adequadament. Aquest fet que fa que es desvii i s'observi uns pics en la resposta del controlador tal i com mostra la gràfica 6.10.



Gràfica 6.10: Error i resposta del PID per a una trajectòria sinusoidal i una velocitat de 3 m/s

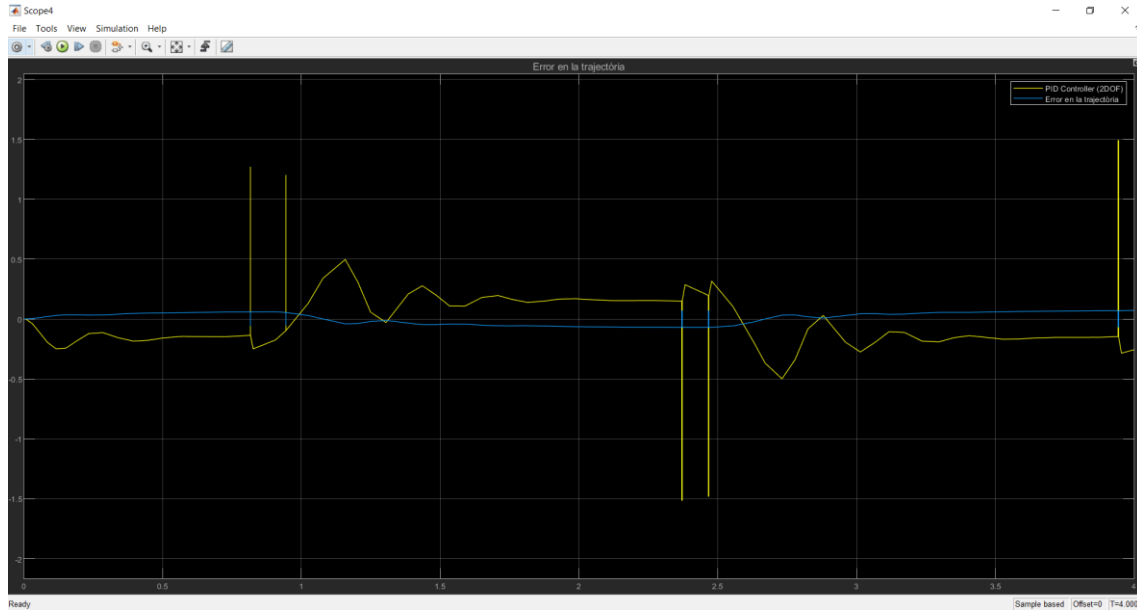
### 6.3.3. Velocitat de 4 m/s

Per a la velocitat de 4 m/s es pot comprovar a la il·lustració 6.14 que el cotxe es desvia un cop acaba de realitzar la curvatura i entra la part més lineal de la trajectòria. Tanmateix, el controlador és capaç de rectificar la seva trajectòria i ajustar-la a la de referència.



Il·lustració 6.14: Trajectòria sinusoidal realitzada pel cotxe a 4 m/s

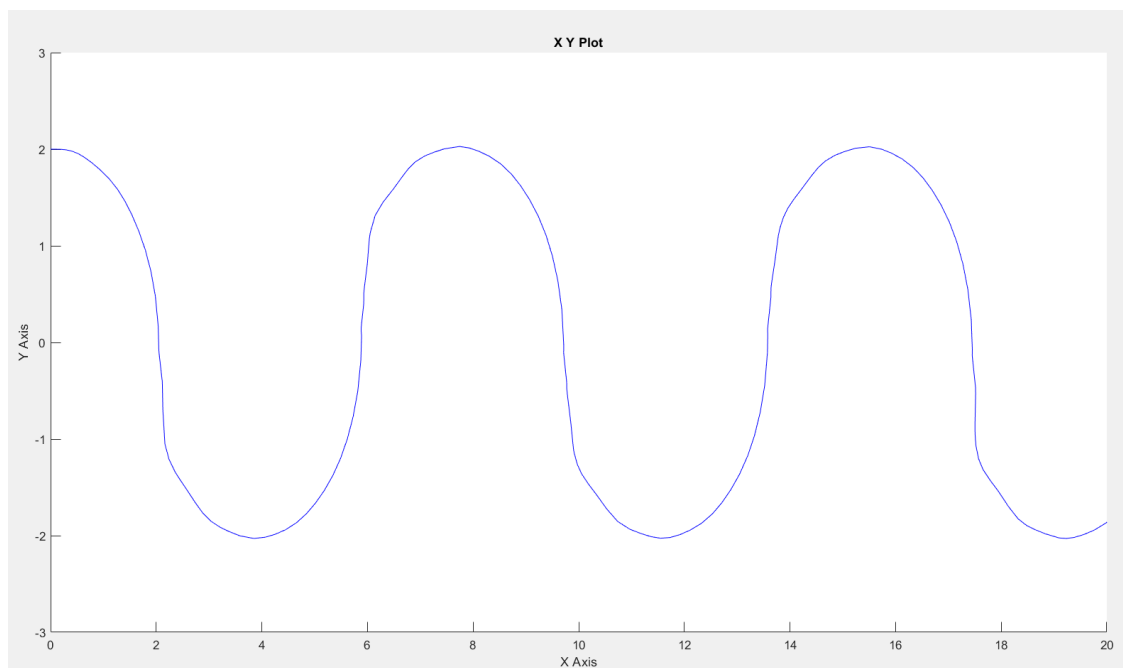
En la gràfica 6.11 es pot observar com tornen a aparèixer aquests pics quan el cotxe es troba en un màxim o un mínim de la trajectòria.



*Gràfica 6.11: Error i resposta del PID per a una trajectòria sinusoidal i una velocitat de 4 m/s*

#### 6.3.4. Velocitat de 5 m/s

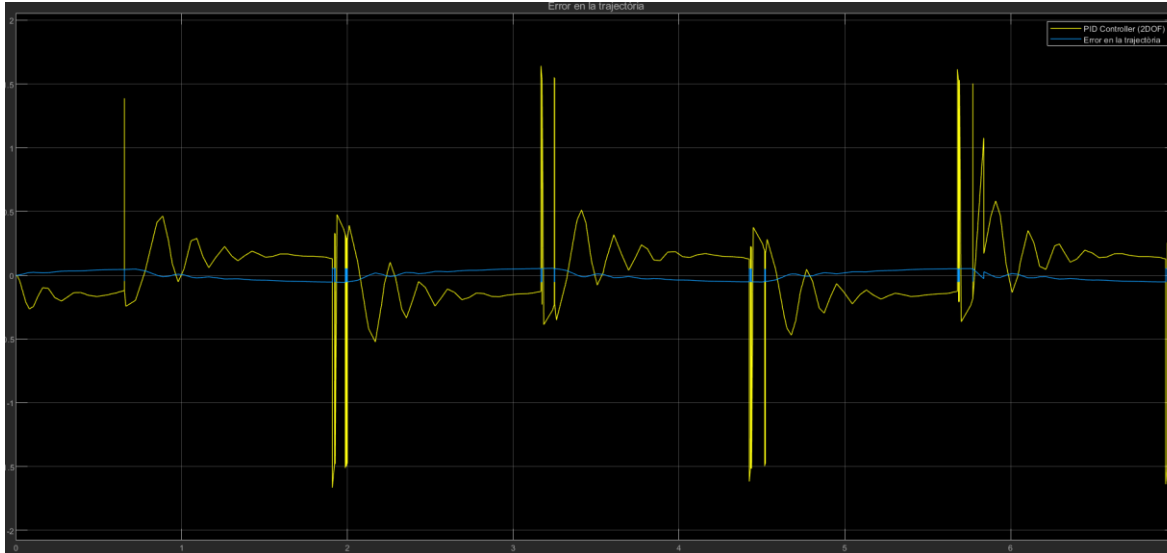
Finalment per a una velocitat de 5 m/s es pot comprovar que el cotxe realitza de manera correcte la trajectòria. Si que hi ha algunes zones, sobretot en les que el cotxe canvia d'orientació bruscament, on el cotxe es desvia més tal i com es pot veure en la il·lustració 6.15.



*Il·lustració 6.15: Trajectòria sinusoidal realitzada pel cotxe a 5 m/s*



A la resposta del PID es pot observar com el controlador ha de realitzar correccions brusques per tal de corregir la trajectòria del cotxe ja que aquest no està orientat adequadament per realitzar les corbes quan arriba a elles.



Gràfica 6.12: Error i resposta del PID per a una trajectòria sinusoidal i una velocitat de 5 m/s

### 6.3.5. Valors dels paràmetres

Els valors obtinguts per als paràmetres del controlador PID per a les diferents velocitats han sigut els que es mostren a la taula de a continuació.

Velocitat (m/s)	Valors del controlador		
	Kp	Ki	Kd
2	2	0	1
2,5	2	0	1
3	2	0	1
3,5	2	0	1
4	2	0	1
4,5	2	0	1
5	2	0	1

Taula 6.3: Resultats dels paràmetres del controlador per a una trajectòria de referència sinusoidal d'amplitud 2 m.

Cal destacar que per generar la senyal de referència s'ha hagut d'ajustar la freqüència d'aquesta en funció de la velocitat de creuer del cotxe.

## 6.4. Conclusions

---

Es pot observar que en dos dels tres casos els valors varien en funció de la velocitat a la que estigui circulant el cotxe. Tanmateix, es pot observar que a velocitats baixes, els paràmetres del controlador proporcional són iguals per a totes tres situacions.

D'altra banda a excepció de la trajectòria circular, es podria concloure que el controlador és un PD, ja que ni en la trajectòria lineal ni en la sinusoïdal, s'ha necessitat per realitzar correctament el control de la trajectòria. Tot i així, els valors del guany integral són petits en comparació als guanys de la part proporcional i derivativa. Això pot significar que en estat estacionari, el cotxe no té gaire error.

Observant la tendència dels valors, aquests tendeixen a disminuir quan s'augmenta la velocitat. Un fet poc intuïtiu, ja que com més ràpid anés el cotxe més desviació es pot produir per segon. Per tant, intuïtivament es podria pensar que els guanys han de ser majors a més velocitat.

## 7. ROS i MATLAB

---

Per poder realitzar el control de la trajectòria del cotxe i la lectura dels sensors puntuals s'ha de treballar amb ROS, ja que el cotxe es amb aquest framework amb el que treballa. [23] D'altra banda, per a la creació d'un controlador i un supervisor encarregats d'aquestes tasques s'ha utilitzat MATLAB i Simulink tal i com s'explica més endavant.

### 7.1. Estructura de ROS

---

Robotic Operating System (ROS) és un framework open-source que serveix com a sistema operatiu d'un robot. ROS proporciona un seguit de llibreries, eines i serveis que serveixen per a poder controlar el comportament del robot.

ROS ha implementat diverses versions, en aquest treball de fi d'estudis s'han utilitzat les versions de ROS Kinetic Kame i ROS Melodic Morenia. La primera versió mencionada s'ha utilitzat per a la programació del cotxe ja que era la versió instal·lada. D'altra banda s'ha utilitzat ROS Melodic per a l'aprenentatge d'aquest framework des de casa i la preparació del software per al laboratori des de casa.

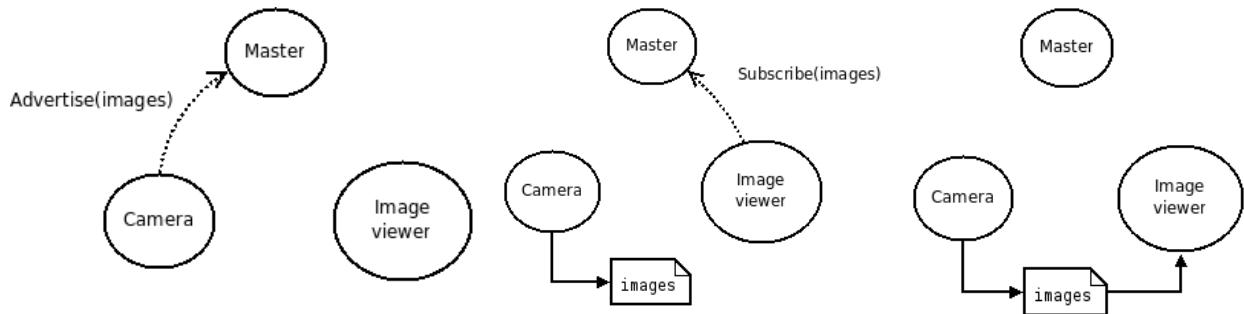
L'estructura de ROS es basa en paquets o packages, aquests contenen els nodes que són els encarregats d'executar les accions programades. Dins dels nodes hi trobem tres tipus:

#### 7.1.1. Master node

---

Per tal de gestionar la informació que es va enviant hi ha d'haver el master node activat. Aquest node s'encarrega d'anomenar i registrar la resta de nodes del sistema. Com els altres nodes desconeixen la ubicació de la informació és aquest node qui rastreja el topic al que està publicant un node o llegint la seva informació.

En el cas d'aquest treball, el master node ja està creat dins de l'ordinador del cotxe. Al arrencar el cotxe aquest s'activa automàticament, per tant no s'ha hagut de crear cap només s'ha tingut que tenir en compte a l'hora de configurar la comunicació entre el ROS i MATLAB.



*Il·lustració 7.1: Esquema del funcionament del Master node [23]*

### 7.1.2. Publisher (publicador)

Aquest tipus de node s'encarrega de publicar un missatge en un topic per tal de transmetre una informació determinada. Per exemple tal i com es mostra en la il·lustració 7.1, per tal de poder veure les imatges captades per la càmera, la qual seria el node publicador, aquesta hauria de publicar en un topic un missatge amb les imatges.

En el cas d'aquest treball, s'utilitzaran dos publicadors creats a partir d'un bloc de Simulink els quals determinaran l'angle de gir de les rodes del cotxe i la velocitat d'aquest.

### 7.1.3. Subscriber (subscriptor)

Pel que fa al subscriptor, aquest llegeix la informació del missatge publicat pel publicador. Prosseguint amb l'exemple de la càmera, per tal de veure les imatges captades per ella hi ha d'haver un missatge subscrit al topic "images" el qual conté les imatges publicades per la càmera. L'"image viewer" és en aquest cas el subscriptor.

Per a aquest treball s'han utilitzat fins a quatre subscriptors creats a partir d'un bloc de Simulink. Tal i com es menciona en el punt anterior, s'entrarà més en detall en els apartats 7.3 i 7.4.

### 7.1.4. Topics

Tal i com es s'han mencionat en els apartats anteriors d'aquest capítol, tant el Publisher com el Subscriber han d'estar connectats a un topic per tal de llegir els missatges. En aquest projecte els topics que s'han hagut d'utilitzar són els que s'expliquen a continuació:

- */speed*: Encarregat de gestionar la velocitat del cotxe. S'ha comprovat que la velocitat mínima a la que pot arribar a funcionar és de 1 m/s, que equival a publicar 30 en aquest topic, mentre que quan s'hi publica 0 el cotxe s'atura.
- */steering*: Encarregat de la direcció de les rodes del cotxe. S'ha observat que els 0° d'orientació de les rodes són equivalents a publicar 105 en aquest topic.
- */yaw*: En aquest topic s'hi publica o es pot llegir l'orientació que té el cotxe en tot moment. Cal destacar que l'orientació inicial depèn de l'orientació en la que es trobi el un cotxe a l'hora d'engegar l'ordinador d'aquest.
- */hedge\_imu\_fusion*: Aquest topic connecta amb els sensors de posició que s'han utilitzat. Dóna la posició en coordenades cartesianes on el sistema de referència és un mapa creat per beacons al laboratori de control avançat.
- */mensaje\_puntual* : Aquest topic publica si detecta marcadors puntuals i depenent de la distribució d'aquests marcadors el valor del missatge pot ser 1, 2, 3 o 4.

## 7.2. Comunicació entre MATLAB i Simulink amb ROS

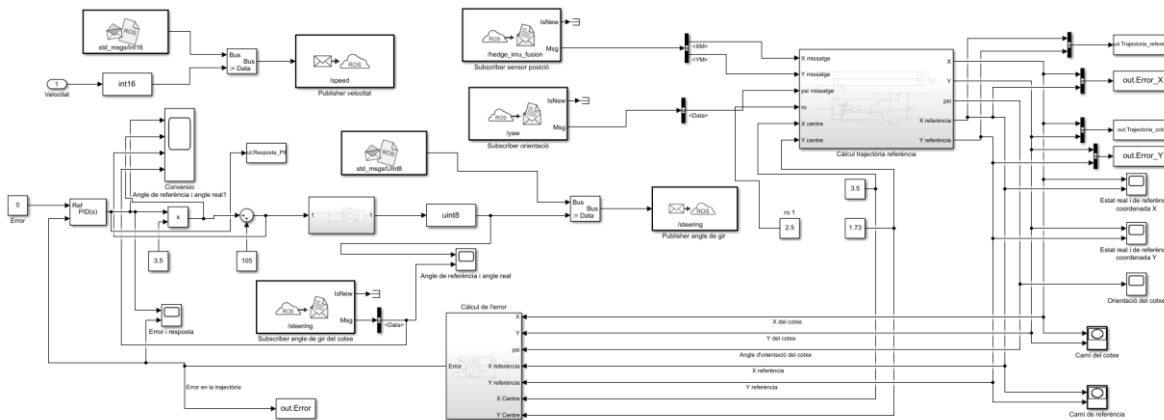
MATLAB és un entorn de treball creat per la companyia MathWorks [24]. Aquest serveix per a la realització de càlculs numèrics i la realització de diferents tipus de models. D'altra banda Simulink és un entorn de treball que treballa amb diagrames de blocs [25]. Les diferents llibreries que conté MATLAB permeten accedir a diferents blocs que poden arribar a simular diferents sistemes, com per exemple el volant d'un cotxe tal i com es mostra a l'apartat 6.1.1.

En aquest projecte s'ha utilitzat MATLAB i Simulink per a crear el controlador i supervisor, per al control de la trajectòria i dels sensors puntuals. Per poder-se comunicar amb el cotxe, MATLAB disposa d'una toolbox de ROS la qual proporciona una interfase que connecta MATLAB i Simulink amb una xarxa ROS [26].

Dins d'un arxiu de Simulink s'han creat dos subsistemes, un controlador i un supervisor, els quals es comuniquen amb els topics esmentats anteriorment per a realitzar el control de la trajectòria i actuar si es detecten cap marcador puntual. A continuació s'expliquen amb més detall cadascun.

### 7.3. Controlador

Aquest subsistema és l'encarregat de realitzar el control de la trajectòria del cotxe. Té un esquema molt semblant a l'utilitzat durant la simulació però s'han substituït i adaptat les parts que simulaven el cotxe per publicadors i subscriptors que es comuniquen a mb el cotxe del laboratori.

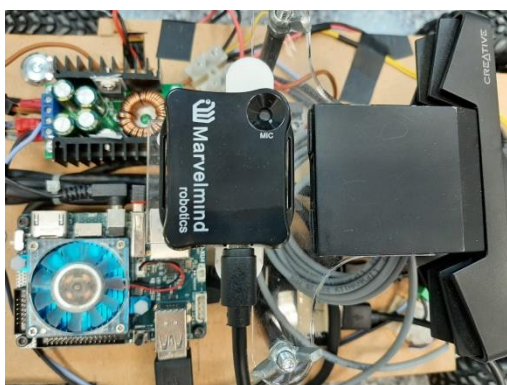


Il·lustració 7.2: Esquema del controlador en Simulink

#### 7.3.1. Posicionament del cotxe

Inicialment aquest projecte consistia en seguir un marcadors metàl·lics que traçarien la trajectòria a seguir pel cotxe. Degut a que els sensors continus no van funcionar correctament, per tal de poder comprovar el correcte funcionament del controlador dissenyat durant la simulació es va buscar una alternativa. En comptes d'utilitzar un sensor magnètic es va utilitzar sensors de posicionament.

a)



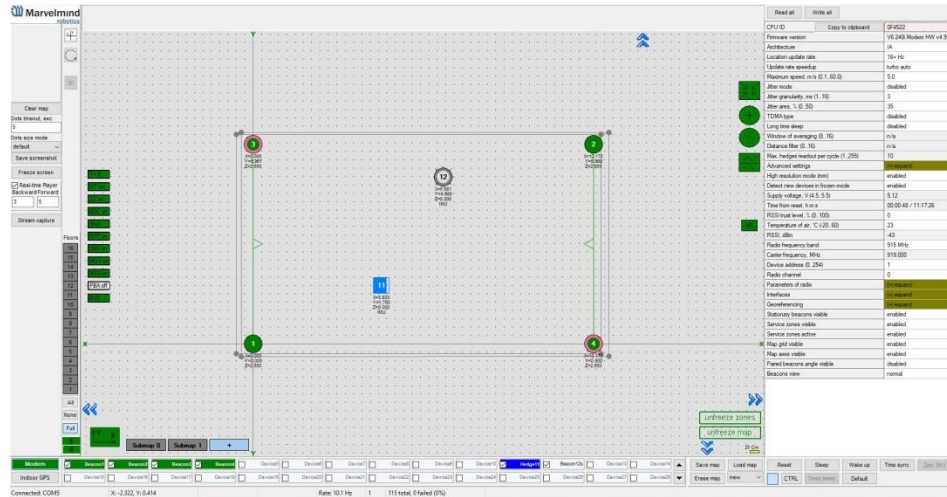
b)



Il·lustració 7.3: Hedge instal·lat al cotxe i beacons

Dins del laboratori de control avançat ja hi havia instal·lats un seguit de beacons que limitaven un mapa on s'hi pot detectar el hedge que porta incorporat el cotxe (Veure

il·lustració 7.4). Gràcies al modem els beacons es desperten i localitzen la posició del hedge en coordenades cartesianes. Aquest sistema també treballa en ROS i publica aquesta posició en un topic mencionat anteriorment, `/hedge_imu_fusion`.



*Il·lustració 7.4: Mapa creat pels beacons del laboratori*

Tal i com es pot observar a la il·lustració 7.2, hi ha un bloc subscript al topic de posicionament i al topic `/yaw`. Dins d'aquest bloc es calcula la posició de referència del cotxe tal i com s'explicava en l'apartat 5.2.1.

Cal destacar que com l'espai és limitat només s'ha pogut testear la trajectòria d'una circumferència. A més com el mapa creat pels beacons, el qual es pot observar en l'il·lustració 7.4, aquest marca que un punt 1 que és on es troba un dels beacons, com l'origen de coordenades en coordenades cartesianes. S'ha hagut de desplaçar el centre de la circumferència per tal de poder realitzar més d'un quart de circumferència. És per aquest motiu que a part del radi de la circumferència també s'introdueixen les coordenades del centre de la circumferència per tal de poder calcular la posició de referència.

Pel que fa a la orientació inicialment se li ha de sumar o restar un cert angle per tal de que la orientació del cotxe sigui la mateixa que la que marca el sistema de referència creat pel mapa dels beacons. Inicialment al encendre el cotxe aquest marca un angle d'orientació, en el cas experimental el cotxe sempre es trobava orientat a  $\frac{\pi}{2}$  radians, segons el sistema de referència del laboratori, abans d'arrencar-lo. Tanmateix l'angle inicial que marcava el cotxe just després d'encendre'l mai coincidia amb aquesta

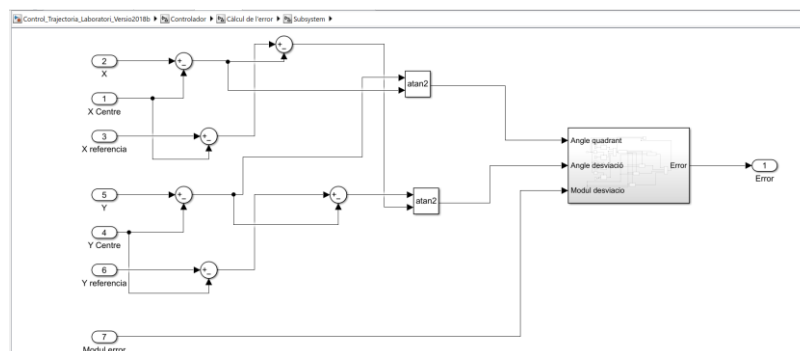
orientació i tendia a variar un certs radians cada cop que s'encenia. Per aquest motiu cada cop que s'encenia el cotxe s'ha de rectificar aquest angle que marcava el cotxe.

Com a sortida del bloc es tenen les posicions real i de referència del cotxe, a més de l'orientació d'aquest ja corregida. Totes aquestes dades es guarden en un fitxer .mat per tal de poder tractar les dades després de la prova.

### 7.3.2. Càlcul de l'error

Dins del controlador s'hi ha destinat un bloc que calcula l'error de desviació del cotxe en funció de la seva posició real i la posició de referència. El càlcul de la desviació o error del sistema, es calcula de manera semblant a com es calculava en l'apartat 5.3. Tanmateix, en aquest cas el sistema de referències món és el sistema de referència del laboratori el qual creen els beacons (veure apartat 7.3.1). A més com el centre de la circumferència que és la trajectòria, es troba desplaçat en aquest cas el vector de desviació també es troba desplaçat. És per aquest motiu que s'ha d'estudiar com es pot comportar el sistema i l'error que pot donar en cada quadrant de la circumferència. En tots els casos s'ha considerat que el cotxe es desplaçava en sentit antihorari, si el desplaçament fos horari el sentit de gir de resposta variaria.

Com la trajectòria de referència és una circumferència s'ha d'estudiar per a cada quadrant quin hauria de ser el sentit de gir del cotxe depenent del costat on es trobi de la trajectòria (interior o exterior). Dins del bloc de càlcul d'error en el controlador, hi ha un subsistema encarregat de calcular l'angle que formen la component x i la component y, rebudes per missatge de ROS, sobre l'eix traslladat a les coordenades del centre de la circumferència (Veure il·lustració 7.5). A partir d'aquest angle es pot saber en quin quadrant s'hi troba el cotxe.

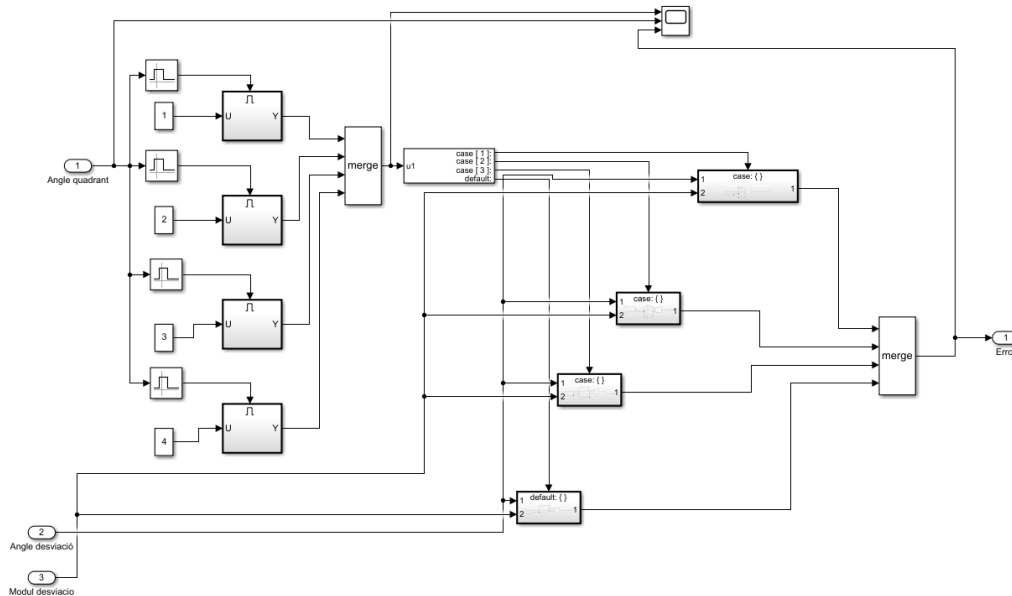


Il·lustració 7.5: Càlcul de l'angle que formen la component x i y del cotxe en el sistema de referències del laboratori traslladat al centre de la circumferència



És important ressaltar que com s'ha utilitzat el bloc atan2, per calcular aquest angle, s'ha de tenir en compte que la resposta d'aquest comprèn els valors de  $[-\pi, \pi]$  depenent dels valors de  $x$  i  $y$  [27]. Aquests límits marquen quins són els valors màxims i mínims per a cada quadrant.

A més aquest subsistema calcula l'angle de desviació, format per les coordenades de referència sobre el sistema de coordenades del laboratori. Aquest angle també s'ha calculat amb el bloc atan2 però en aquest cas l'únic que interessa d'ell és si és superior o igual a 0, o inferior a ell. Ja que depenent d'aquest valor s'haurà de girar cap a un sentit o cap a l'altre. En la il·lustració 7.6, es veu com es calcula el posicionament de l'angle.



**Il·lustració 7.6:** Càlcul de l'angle que formen la component  $x$  i  $y$  del cotxe en el sistema de referències del laboratori traslladat al centre de la circumferència

A continuació s'explica per a cada quadrant quins han de ser els valors d'aquests angles per a que la resposta del cotxe sigui girar cap a un sentit o l'altre.

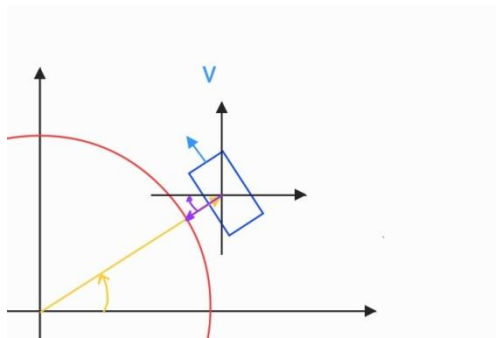
- Primer quadrant

En el cas del primer quadrant l'angle que defineix el quadrant ha de comprendre els valors de  $[0, \frac{\pi}{2})$  radians. Com el cotxe es desplaça del primer quadrant cap el segon quadrant, i tot i que l'angle de  $\frac{\pi}{2}$  és el límit de tots dos quadrants, s'ha considerat que quan el cotxe es trobi en aquesta situació es consideri que ja es troba en el segon quadrant.

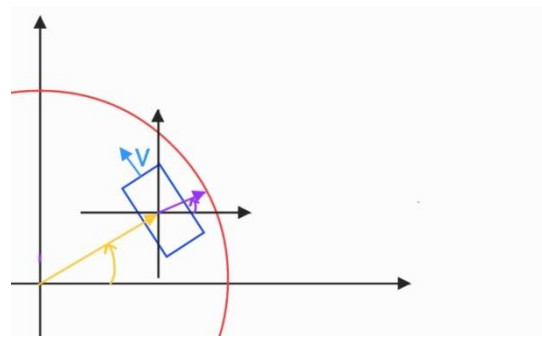
Pel que fa a la desviació, si el cotxe es trobés en l'exterior de la circumferència, l'angle de desviació es trobarà comprès entre els valors de  $[-\pi, 0)$ . Pel contrari, si el cotxe es troba en l'interior de la circumferència l'angle de desviació es trobarà comprès entre  $(0, \pi]$ .

Per tant si el cotxe es troba en l'exterior de la trajectòria haurà de girar en sentit antihorari, és a dir la resposta ha de ser positiva. Com l'entrada de l'error en el PID és negativa, ja que en realitat l'entrada del PID és la resta de la referència menys l'error. Com en aquest cas la referència és 0, l'error sempre és negatiu, per tant al mòdul de la desviació haurà de ser multiplicat per un guany unitari negatiu per indicar-li un sentit el qual faci que la resposta del PID sigui en sentit positiu de gir. I en el cas que el cotxe es trobés a l'interior de la trajectòria, el valor de la desviació ha de ser positiu, per a que la resposta sigui negativa.

a)



b)



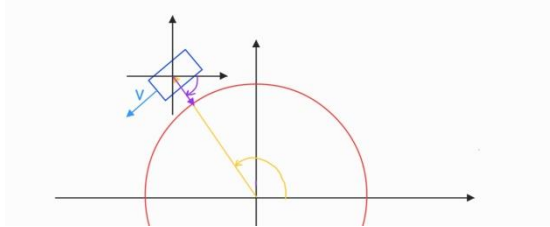
*Il·lustració 7.7: Possibles desviacions al primer quadrant*

- Segon quadrant

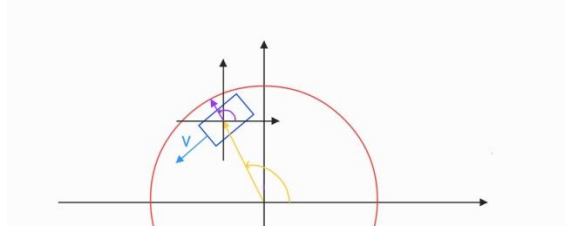
Pel que fa al segon quadrant, l'angle d'aquest es trobarà comprès entre els valors de  $[\frac{\pi}{2}, \pi]$  radians. A més, observant la il·lustració 7.8 es pot comprovar que els angles de desviació segueixen compresos entre  $[-\pi, 0)$  quan el cotxe es troba a l'exterior de la circumferència, i entre  $(0, \pi]$  en el cas contrari.

Per tant el signe de la desviació serà positiu quan el cotxe es trobi en l'interior de la trajectòria i negatiu quan es trobi a l'exterior de la trajectòria. Seguint el mateix raonament explicat per al primer quadrant.

a)



b)



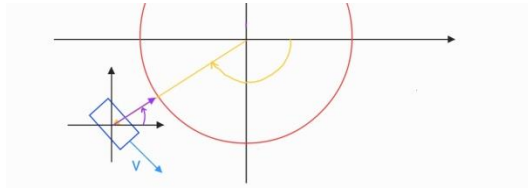
*Il·lustració 7.8: Possibles desviacions al segon quadrant*

- Tercer quadrant

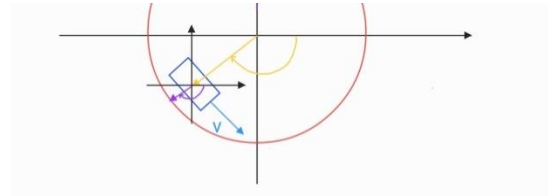
Quan el cotxe es troba en el tercer quadrant, el valor de l'angle de quadrant es trobarà entre els valors de  $[-\pi, -\frac{\pi}{2})$ . Seguint el mateix argument que per al primer quadrant, com el cotxe avança del tercer cap al quart quadrant, es considerarà que quan el cotxe es troba a  $-\frac{\pi}{2}$  està al quart quadrant.

D'altra banda observant la il·lustració 7.9 l'angle de desviació en aquest cas es comporta de manera inversa a com ho feia per al primer quadrant. Si el cotxe es troba a l'exterior de la circumferència l'angle de desviació serà un valor entre  $(0, \pi]$ . Mentre que en el cas contrari, si es troba a l'interior, el valor es trobarà entre  $[-\pi, 0)$ . Tot i així, es mantindrà que quan el cotxe es trobi a l'exterior haurà de girar en sentit antihorari les rodes de direcció, i en sentit horari quan es trobi a l'interior

a)



b)

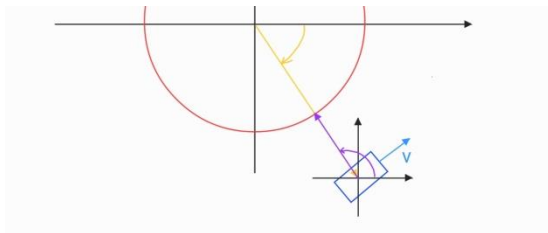


*Il·lustració 7.9: Possibles desviacions al tercer quadrant*

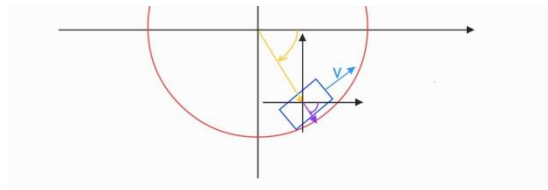
- Quart quadrant

Finalment al quart quadrant, l'angle que indica en quin quadrant s'hi troba valdrà entre  $[-\frac{\pi}{2}, 0]$ . A més observant la il·lustració 7.10, l'angle de desviació es comporta de la mateixa manera que en el tercer quadrant. És a dir, valdrà  $(0, \pi]$  quan es trobi a l'exterior de la trajectòria i  $[-\pi, 0)$  quan es trobi a l'interior.

a)



b)



*Il·lustració 7.10: Possibles desviacions al quart quadrant*

### 7.3.3. P.I.D

Finalment l'error es rebut al P.I.D. aquest tal i com succeïa a la simulació té com a referència un 0, ja que l'error que es vol aconseguir és 0. Inicialment es van provar els mateixos valors que els de la simulació per a la velocitat mínima de 2 m/s. Com l'espai al laboratori és reduït aquesta velocitat era massa elevada per poder controlar correctament el cotxe sense cap incident, per tant es va decidir de disminuir la velocitat a 1 m/s que és la velocitat mínima que s'ha observat que el cotxe assumeix.

Es van adaptar els valors del P.I.D. per a aquesta velocitat, ja que tal i com es va observar a la simulació, els valors del P.I.D. depenien de la velocitat. Tot i així, els valors que es van haver d'introduir per a aconseguir un correcte control del cotxe discrepaven bastant dels valors trobats a partir de la simulació.

Valors simulació			Valors del controlador		
P	I	D	P	I	D
2	0,2	1	90	1	0,5

*Taula 7.1: Comparació entre els valors de la simulació i la realitat*

Es pot comprovar que els valors obtinguts al laboratori difereixen molt dels valors obtinguts a la simulació. Per començar s'ha hagut d'augmentar considerablement el valor de la part proporcional ja que amb aquests valors el cotxe no girava suficient per corregir l'error. Aquesta diferència en els valors pot venir donada per dos motius. El primer és que en la simulació partia de la hipòtesis que el sistema amb el que es treballava era purament cinemàtic, per tant no entraven en consideracions els guanys dels motors que intervenen en fer girar les rodes. Aquesta primera observació podria haver tingut conseqüències a l'hora de realitzar les proves al laboratori i que abans no s'havien tingut en compte.

Pel que fa al segon motiu té a veure amb el sistema de valors dels angles de direcció del cotxe. Tal i com s'explica en l'apartat 8.1, es va observar que el cotxe no girava els graus que se li demanaven. És a dir, si per exemple el controlador donava com a resposta un angle de 5°, les rodes del cotxe giraven menys que el que es demanava. Per tant es va haver d'augmentar el proporcional per tal d'aconseguir que els angles que es volien en el sistema de graus, fossin els mateixos que en el sistema del cotxe.

D'altra banda el valor diferencial es va haver de baixar ja que al laboratori es va observar, que augmentava o disminuïa la resposta segons els bots que s'hi poguessin produir per la precisió dels sensors. Aquest fet únicament creava soroll en la resposta del controlador.

#### 7.3.4. Resposta del controlador

Tal i com s'ha mencionat en l'apartat 7.1.4., tant l'angle de direcció del cotxe com la velocitat d'aquest, funcionen amb valors diferents als del S.I. Per tant es van haver de fer un seguit de proves per tal de poder transformar el valor de resposta del PID en un valor que entengui el cotxe.

- **Velocitat**

Per tal d'evitar cap accident, s'hi va introduir un interruptor per aturar o engegar la velocitat del cotxe. Inicialment es desconeixia el valor de la velocitat mínima del cotxe ja que, el valor que s'havia de publicar era 30, però no es sabia a que equivalien aquests 30. Per tant es va fer un seguit de proves on es va col·locar el cotxe en línia recta dins del laboratori, es va engegar a aquesta velocitat i en la fase estacionària es va calcular la velocitat del cotxe segons:

Es va obtenir que de mitja el cotxe circulava a 1 m/s. A continuació es va provar per als valors de 60 i 120, els quals eren equivalents a 1,5 m/s i 2 m/s aproximadament cadascun. Com l'espai del laboratori és reduït, es va decidir que en comptes de treballar amb una velocitat de 2 m/s (120), era millor treballar a 1 m/s (30). És per aquest motiu que un dels valors de l'interruptor que engega o atura el cotxe és 30.

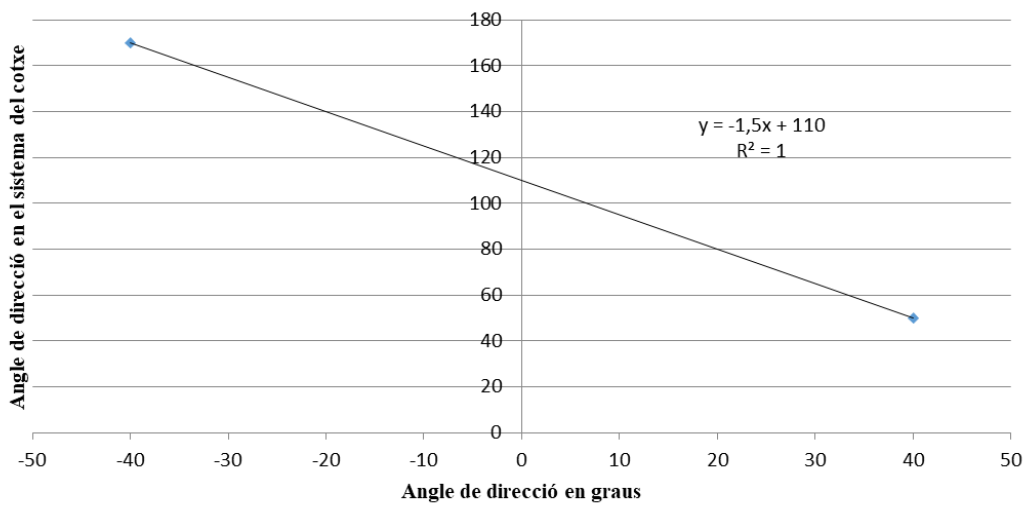
- **Angle de direcció**

Pel que fa a l'angle de direcció, es va observar que les rodes es mantien rectes quan el missatge que s'hi publicava al topic de /steering valia entre 105 i 110. Per tal d'obtenir una recta que transformés els angles en graus a el valor equivalent al del cotxe. Es van mesurar els angles límit per a cada sentit de gir que podien aguantar les rodes, els quals van ser els que es mostren a continuació (es pren 0, com l'angle en que les rodes es troben rectes):

	Angle en graus	Angle en el sistema del cotxe
<b>Límit gir en sentit antihorari</b>	40	50
<b>Límit gir en sentit horari</b>	-40	170

*Taula 7.2: Taula comparativa entre els dos sistemes de mesura de l'angle de direcció*

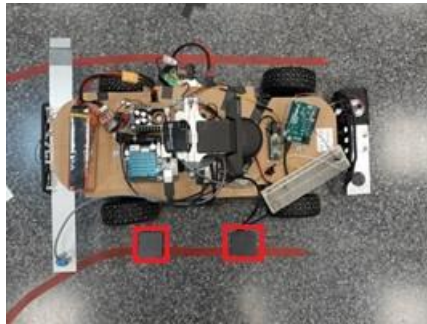
A continuació es mostra la recta de regressió que es va obtenir i s'ha utilitzat com a recta per transformar la resposta del PID en el valor del missatge que es publicava en el topic de /steering del cotxe.



*Il·lustració 7.11: Recta de regressió per convertir l'angle de direcció en graus a el valor del sistema del cotxe*

## 7.4. Supervisor

El supervisor s'encarrega d'estar subscript al topic on hi publica el sensor puntual, per tal d'actuar de diferents maneres depenent de si el cotxe ha detectat o no un marcador. Tal i com es pot veure a la il·lustració 7.12, els quadrats que es veuen al terra són els marcadors puntuals, que depenent de la seva posició poden significar, missatge: 1, 2, 3, 4. En cas de que el sensor detectes un marcador però no es seguís cap seqüència per enviar cap dels missatges anteriors, el sensors publicaria un missatge de -1.



**Il·lustració 7.12:** Col·locació del cotxe i els marcadors per rebre com a missatge 1

Al entorn de MATLAB i Simulink s'ha creat un subsistema, on entra com a paràmetre el valor que s'estigui publicant al topic */mensaje\_puntual*. Depenent d'aquest valor, s'ha decidit que per comprovar el correcte funcionament es va crear una funció on s'hi veuen els valors dels missatges que han sigut publicats.

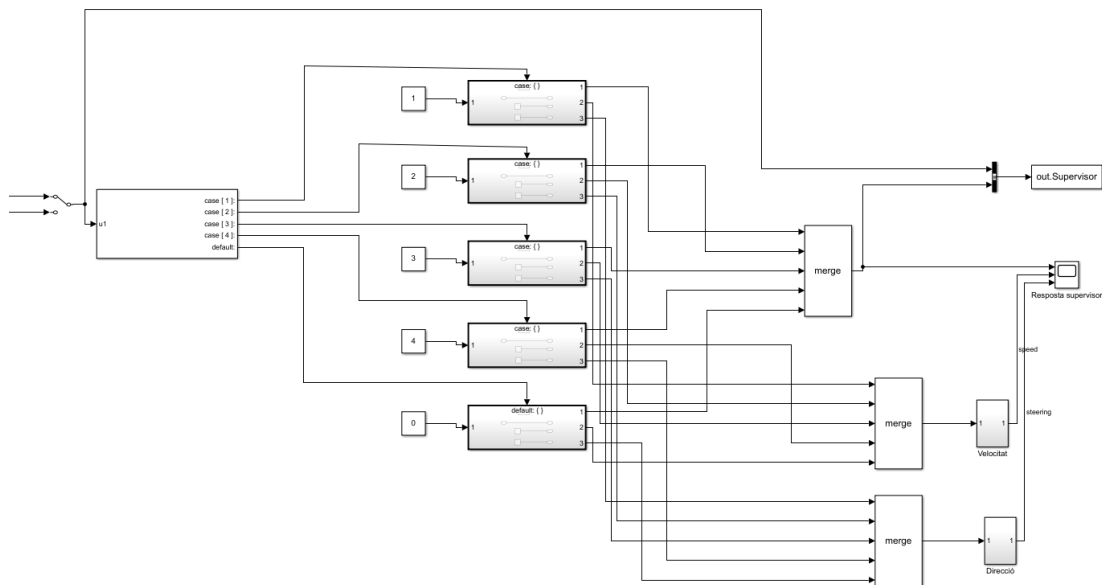
Prenent com exemple la situació de la il·lustració 7.12, en aquest cas quan el sensor no ha detectat cap marcador, la senyal marcarà 0. Un cop, el cotxe hagi passat pels marcadors que hi ha al terra, el valor del missatge serà 1. Per tant la senyal final valdrà 0 en tot moment fins que passa pels marcadors i comença a valer 1.

A la il·lustració 7.13, es pot observar aquesta selecció. Inicialment el missatge arriba i depenent del seu valor, s'activa un valor o un altre. Els valors que es poden modificar són els de la velocitat del cotxe o l'angle de direcció. L'estat per defecte equival a una velocitat de 0 m/s, es a dir el cotxe es troba aturat, i un angle de direcció de 90, que equival a que el cotxe segueixi una trajectòria recta. A continuació s'expliquen en més detall els altres nivells.

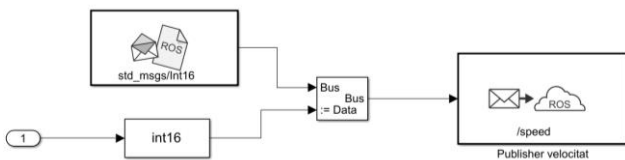


Un cop es selecciona el cas en el que es troba, es fa una fusió de totes les sortides amb els valors de la velocitat per a cada cas, i una altra fusió però en aquest cas amb els valors dels angles de direcció. Finalment dins dels blocs Velocitat i Direcció s'envia les dades al cotxe a través d'un missatge de ROS.

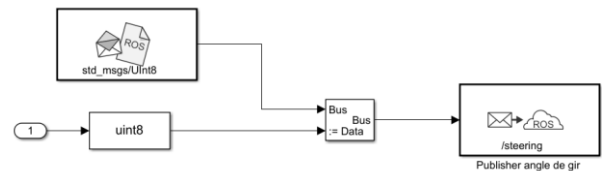
a)



b)



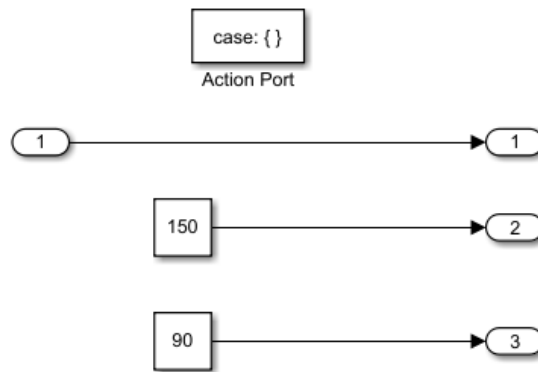
c)



*Il·lustració 7.13: a) Bloc del supervisor a Simulink. b) Bloc Velocitat. c) Bloc Direcció*

### 7.4.1. Cas missatge valor 1

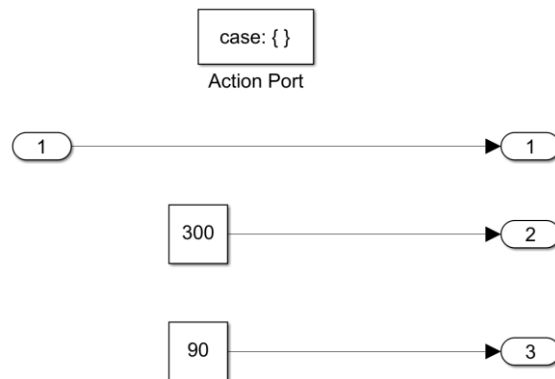
El cas del missatge 1 implica que la velocitat d'aquest vari. Passa d'estar aturat o a una velocitat més elevada, a una intermèdia. Cal destacar que per realitzar les proves del laboratori es va utilitzar un altre cotxe degut a problemes tècnics amb el cotxe que s'estava utilitzant. L'únic en que afecta és que la velocitat és de 150 en comptes de 30. Pel que fa a l'angle de direcció es manté el valor per defecte.



*Il·lustració 7.14: Bloc missatge puntual amb valor 1*

### 7.4.2. Cas missatge valor 2

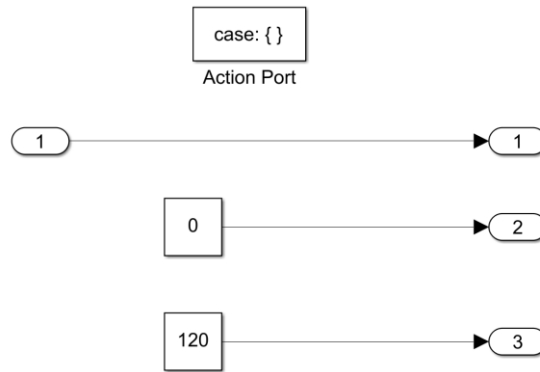
Aquest cas es comporta de manera semblant al cas del missatge 1, només fa variar la velocitat respecte els valors per defecte. En aquest cas la velocitat es duplica arribant a un valor de 300. Tal i com succeïa en el cas anterior, la direcció no varia en aquest cas. En la il·lustració 7.15. Es pot observar el subsistema de Simulink per aquest cas.



*Il·lustració 7.15: Bloc missatge puntual amb valor 2*

### 7.4.3. Cas missatge valor 3

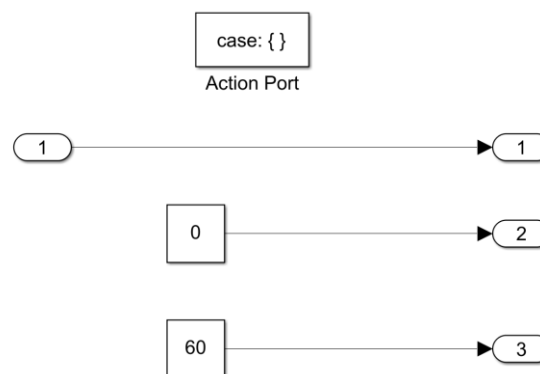
En el cas del missatge 3 es fa variar la direcció del cotxe mentre que el valor de la velocitat del cotxe es manté a 0 m/s. Tal i com es pot veure a la il·lustració 7.16 es fa girar les rodes el cotxe un angle de 120 segons el sistema del cotxe.



*Il·lustració 7.16: Bloc missatge puntual amb valor 3*

#### 7.4.4. Cas missatge valor 4

Així com el cas 2 es comportava de manera semblant al cas 1, el cas del missatge amb valor 4 es comporta de manera semblant al cas amb missatge amb valor 3. Tal i com es mostra a la il·lustració 7.17. La velocitat del cotxe es manté amb el valor per defecte però es fa girar les rodes de direcció un angle de 60 segons en el sistema del cotxe.



*Il·lustració 7.17: Bloc missatge puntual amb valor 4*

## 8. Resultats obtinguts al laboratori

---

En aquest capítol es discutiran els resultats obtinguts de les proves que s'han realitzat al laboratori amb el cotxe. Cal destacar que com els sensors puntuals tampoc van funcionar es va haver de provar el supervisor separat del controlador. És a dir, actualment com els sensors no funcionen correctament no s'ha pogut testejar el funcionament del controlador i el supervisor alhora.

### 8.1. Resultats obtinguts pel controlador

---

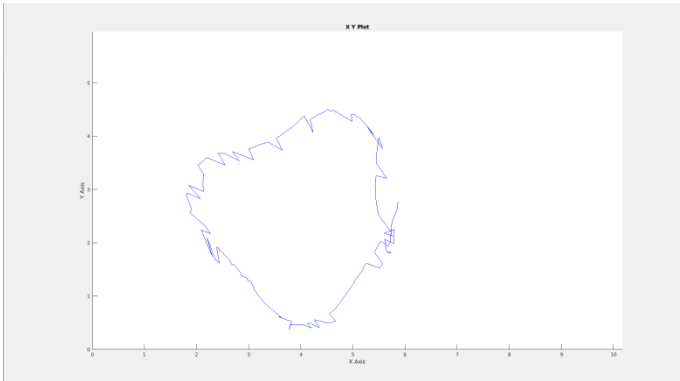
Durant les proves realitzades amb els valors que es van obtenir amb el simulador es va poder observar que la resposta del cotxe no era l'adequada. Per aquest motiu es va decidir variar els valors dels guanys del controlador. Cal destacar que el sistema d'angles que utilitza el cotxe no és el mateix que es feia servir a la simulació. A la simulació quan el controlador PID donava com a resposta un angle de  $5^\circ$  aquest es traduïa en un angle de  $5^\circ$  per a les rodes de direcció. Tanmateix, es va observar que per exemple si el controlador PID demanava un gir de  $5^\circ$  a les rodes de gir, aquestes realitzaven un angle molt més petit. Degut a aquest fet es va haver de realitzar una transformació posterior a la resposta del PID. A més, pot ser que per aquesta variació en el sistema de mesura dels angles s'hagi hagut d'incrementar el valor del controlador proporcional.

Al laboratori es va poder observar que arribat a un punt entre el segon i el tercer quadrant de la trajectòria, la posició que marcaven els sensors del cotxe no era del tot exacte a la real. En aquella zona hi ha un seguit de mobiliari que pot fer interferència entre els beacons i el hedge del cotxe. Malauradament es tractaven d'algun armari i cadires que no es podien moure. Si s'observa la il·lustració 8.1 es pot veure com hi ha molts salts de posició en el segon i tercer quadrant. Aquest fet podria ser una prova de que la comunicació en aquell punt no és la millor, tanmateix el controlador aconsegueix corregir la trajectòria.

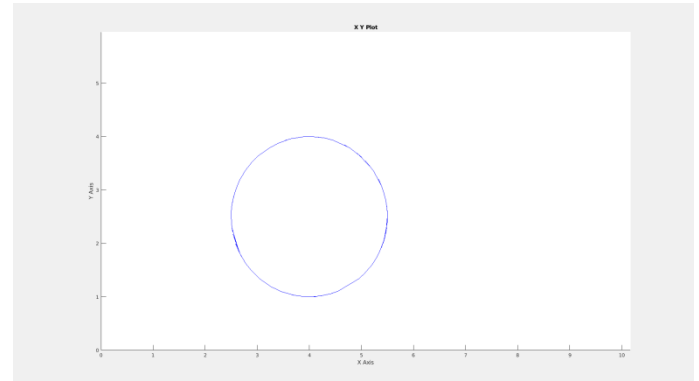
És important destacar que aquest controlador depèn molt de les condicions inicials. Es va observar que com més distanciat es trobi el cotxe a l'inici del control aquest es pot arribar a perdre, és a dir que el controlador indiqui una correcció errònia com girar cap una direcció incorrecte. O bé es pot donar el cas, que la resposta sigui tan elevada que la orientació del cotxe no sigui l'adequada per a la trajectòria de referència i comenci a fer

masses esses. És per aquest motiu que és important col·locar el cotxe en un punt proper a la trajectòria de referència i orientat segons la tangent de la trajectòria de referència per tal de poder realitzar un correcte control.

a)



b)

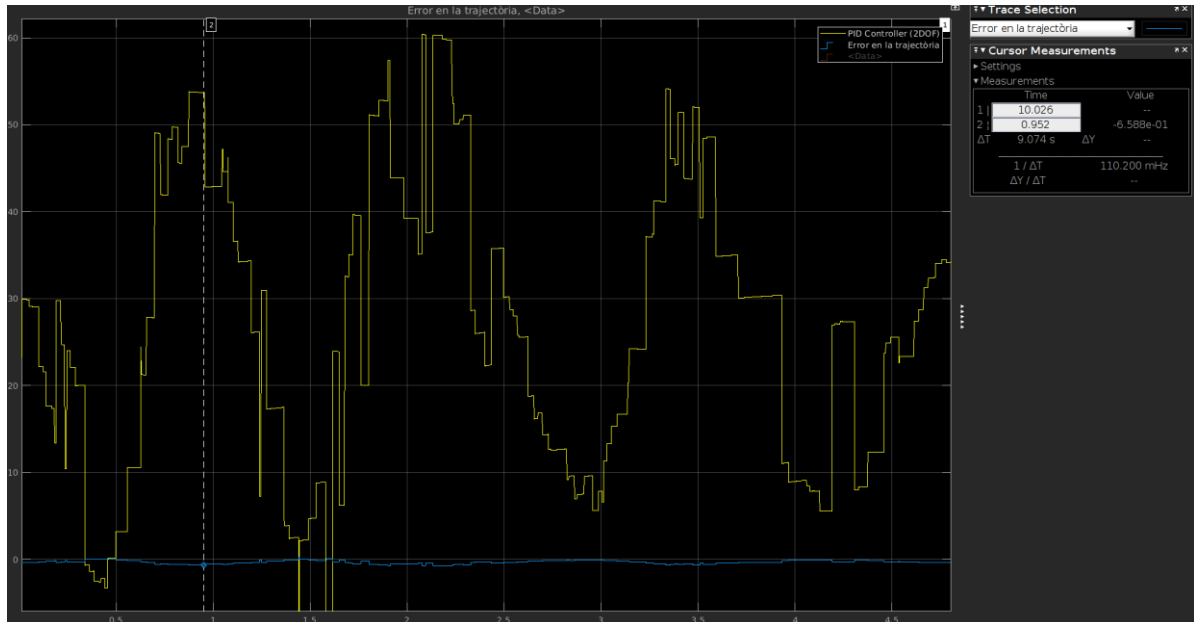


*Il·lustració 8.1: a) Trajectòria realitzada pel cotxe al laboratori. b) Trajectòria de referència*

Finalment només es va poder testejar com a trajectòria de referència la d'una circumferència, i els resultats són els que es poden observar a la il·lustració 8.1. En aquesta il·lustració es pot veure que hi ha molts salts de posició però aquests no representen la realitat si no els punts que indicaven el sensor de posició. En la realitat el que es va poder observar va ser una trajectòria molt més polida.

Arribats als 90° del primer quadrant es pot observar que la correcció de la trajectòria és tan gran que la orientació del cotxe fa que aquest quedi dins de la circumferència de referència. Per aquest motiu es pot observar que la correcció que realitza es de girar en sentit horari les rodes per tal tornar a la trajectòria de referència. Quan aconsegueix arribar a la trajectòria de referència l'orientació del cotxe fa que aquest s'allunyi de la trajectòria i es per aquest motiu que es pot observar que al segon i tercer quadrant hi ha un error elevat. A més tal i com s'ha comentat, en aquella zona la comunicació entre els beacons i el hedge no es bona, fet que complica el treball del controlador. Finalment el cotxe arriba a fer una volta sencera.

A la il·lustració 8.2 es pot observar la gràfica de l'error (línia blava) i la resposta del PID (línia groga). L'error màxim que s'obté amb aquest sistema és d'uns 65 cm. I es pot observar que pel temps és en el moment en el que es troba entre el segon i el tercer quadrant.



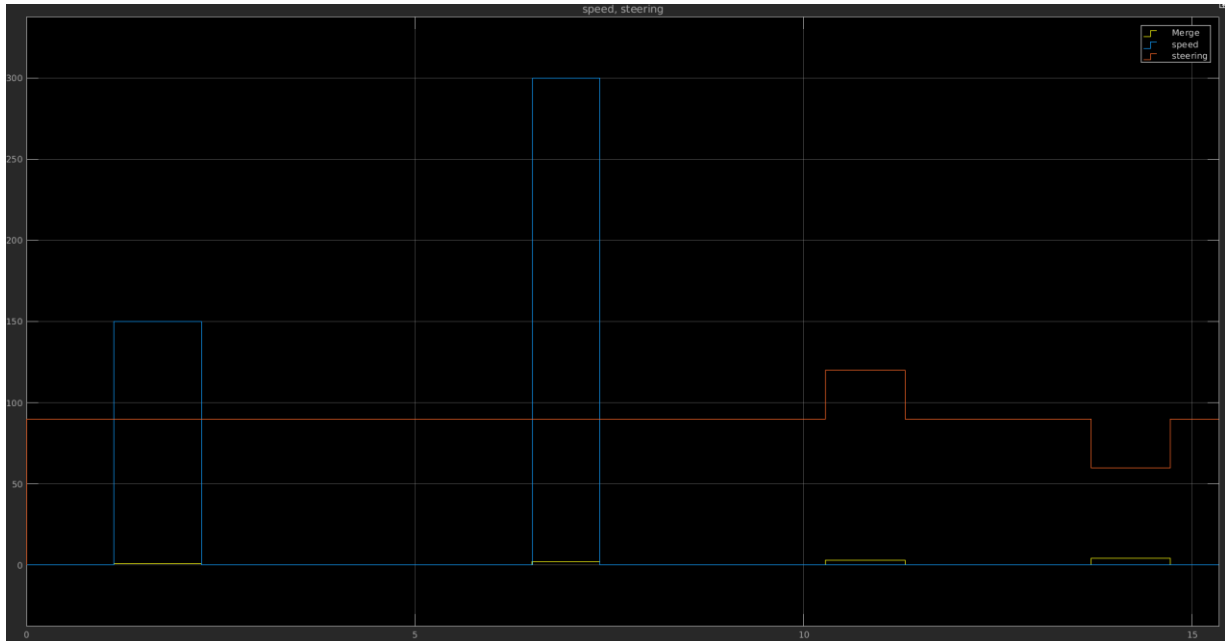
Gràfica 8.1: Gràfica error i resposta del PID

## 8.2. Resultats obtinguts pel supervisor

En el cas del supervisor es va introduir un interruptor que feia variar l'entrada del supervisor entre els valors -1, 1, 2, 3 i 4. Simulant d'aquesta manera el comportament que hauria d'haver tingut el cotxe en cas de que els sensors puntuals actuessin de manera correcta. Es va procedir a realitzar la seqüència d'entrada: -1, 1, -1, 2, -1, 3, -1, 4. D'aquesta manera es tornava a la posició per defecte entre cas i cas per tal de poder observar amb claredat els canvis en la velocitat i la direcció del cotxe.

Tal i com es pot observar en la il·lustració 8.3, inicialment la velocitat del cotxe és 0 i la direcció és d'un angle de 90 segons el sistema del cotxe. A continuació quan el valor d'entrada passa a ser 1, la velocitat (línia blava) varia i passa a ser 150, tal i com havia de succeir per el cas del valor 1. Seguidament torna a les condicions per defecte. A continuació quan el valor d'entrada passa a ser 2, la velocitat augmenta fins a 300, tal i com s'esperava. Un altre cop torna a l'estat per defecte. Fins al moment la direcció del cotxe s'ha mantingut constant amb els valors per defecte tal i com s'esperava. Un cop el valor d'entrada passa a ser 3 es veu com l'angle de direcció augmenta fins a 120,

mentre que la velocitat es manté constant. Un altre cop es torna als valors per defecte del cotxe fins que aquest llegeix 4 com a valor d'entrada, és en aquest moment quan es pot comprovar que el valor de l'angle de direcció és de 60.



*Gràfica 8.2: Resposta del supervisor per als diferents casos*

Pel que fa al comportament del cotxe observat al laboratori, tot i que durant alguna prova s'havia enviat el missatge i apareixia com a valor publicat al topic de velocitat o direcció però el cotxe no responia, en aquest cas es va comportar tal i com es demanava. En els casos que no va funcionar es va deure a que en comptes d'utilitzar un switch que manualment fes variar els valors, es va utilitzar un generador de senyals. La freqüència de la seqüència era massa elevada per al cotxe i aquest no responia tot i que al topic es publicués un valor. Un altre dels motius per els quals a vegades no funcionava era perquè en mig de la simulació es podia perdre la comunicació, ja que el node de l'Arduino del cotxe es tancava.

## 9. Pressupost

En aquest capítol es pretén fer un breu resum del pressupost necessari per realitzar aquest projecte. En aquest cas no s'ha tingut en compte el cost que pot suposar la fabricació del model del cotxe autònom ja que aquest va ser cedit.

En el pressupost s'ha contemplat com a costos el preu de la llicència de MATLAB i les hores dedicades al treball. En el document de pressupost està explicat en més detall les hores de treball que s'han dedicat i en que s'han dedicat. Cal afegir que es contemplen dos possibles costos finals depenent del tipus de llicència de MATLAB. En el cas que la llicència fos acadèmica el cost és inferior tal i com es poden observar a les taules 9.1 i 9.2.

Concepte	Productor	Cost (€)
Llicència MATLAB i Simulink	MathWorks	250 [28]
Total cost hores de treball	Irene Bernardino Sanchez	2.440
<b>TOTAL</b>		<b>2.690 €</b>

*Taula 9.1: Cost total del projecte amb una llicència acadèmica*

Concepte	Productor	Cost (€)
Llicència MATLAB i Simulink	MathWorks	800 [28]
Total cost hores de treball	Irene Bernardino Sanchez	2.440
<b>TOTAL</b>		<b>3.240 €</b>

*Taula 9.2: Cost total del projecte sense una llicència acadèmica*



## 10. Conclusions

---

Un cop finalitzat aquest projecte es pot respondre a l'objectiu principal d'aquest treball, el qual era realitzar un control de la trajectòria. Tal i com s'ha pogut veure en el capítol 8 sobre els resultats obtinguts al laboratori, aquests han sigut positius. Tot i no ser perfectes degut a les interferències, que sortien de l'àbast d'aquest projecte, els resultats demostren que es pot realitzar el control de la trajectòria d'un cotxe utilitzant un PID.

Cal tornar a destacar que la simulació i la realitat van discrepar en quan a resultats. Per començar el model pres per la simulació era purament cinemàtic, en el qual es van menysprear els efectes dinàmics, ja que es va considerar que per a les velocitats que s'utilitzarien al laboratori no s'hi podria produir lliscament amb el terra; i els efectes elèctrics com podien ser els guanys dels motors de les rodes tampoc es van tenir en compte. A la realitat, es va confirmar que no s'hi va produir cap lliscament amb el terra per tant es va confirmar la hipòtesis plantejada, però en els valors del PID si que es va observar que els guanys dels motors podrien haver sigut una causa de la discrepància en el valor de la part proporcional del controlador.

Així mateix, tampoc es va tenir en compte a la simulació que els angles de direcció del cotxe no equivalien exactament als angles que es podien mesurar amb un transportador. Tal i com s'ha comentat al llarg d'aquesta memòria es va haver d'augmentar el proporcional i realitzar una conversió per tal que els angles que donava per resposta el controlador coincidissin amb els equivalents del cotxe.

Seguint amb l'objectiu de realitzar un supervisor, tot i que aquest hauria d'haver funcionat amb els missatges que hagués rebut del sensor puntual, no va ser possible. Tanmateix per poder comprovar el correcte funcionament es va generar entrades manuals al supervisor i aquest va respondre adequadament a elles. Per tant es pot afirmar que el supervisor és totalment funcional i només cal que se li faci entrar una senyal amb sensors.

Pel que fa a l'objectiu de realitzar un algorisme programant en C++ nodes per realitzar les funcions de controlador i supervisor no es va poder realitzar. El motiu es deu a que la idea era haver comunicat aquests nodes amb els topics on publicuessin l'error de desviament i el valors dels missatges puntuals els sensors, però degut a que aquests no

van funcionar es va haver de canviar aquest aspecte. Per tant l'algorisme realitzat ha sigut amb MATLAB i Simulink, els quals ja tenien blocs programats per fer de subscriptors i publicadors per comunicar-se amb els topics del cotxe.

Es pot concloure per tant que el projecte s'ha pogut adaptar als problemes que sorgien fora de l'abast d'aquest. A més els resultats obtinguts validen la utilització del controlador i supervisor utilitzats. Per tant es podrien utilitzar marcadors metàl·lics per traçar la trajectòria i només caldria que el desviament anés a parar al controlador ja dissenyat. I pel que fa al supervisor, tal i com està programat permet que es pugui fer canviar les opcions d'actuació del cotxe segons les entrades que arribin.

## Bibliografia

---

- [1] I. D. Experimental, «MEMÒRIA TÈCNICA Desenvolupament d ' un sistema redundant de seguretat de conducció en carreteres per a vehicles autònoms», 2017 (accedit març 8, 2021).
- [2] V. Gps i B. Ros, «ADC 2018 Workshop», núm. May, 2018 (accedit març 8, 2021).
- [3] «Homepage — Colorado Department of Transportation». <https://www.codot.gov/> (accedit març 08, 2021).
- [4] V. Milanés, J. E. Naranjo, C. González, J. Alonso, R. García, i T. De Pedro, «Positioning system for autonomous vehicles», *RIAI - Rev. Iberoam. Autom. e Inform. Ind.*, vol. 5, núm. 4, p. 36-41, oct. 2008, doi: 10.1016/s1697-7912(08)70175-4 (accedit març 04, 2021).
- [5] «C-Roads Spain». <https://www.c-roads.es/c-roads-spain> (accedit març 08, 2021).
- [6] «Volvo Thinks Magnetic Roads Will Guide Tomorrow's Autonomous Cars | WIRED». <https://www.wired.com/2014/03/volvo-magnets-autonomous/> (accedit març 08, 2021).
- [7] F. Xavier i C. Macarrón, «Pasado, presente y futuro del coche autónomo MEMORIA Autor» (accedit març 04, 2021).
- [8] C. T. Gómez, «Adaptación de la ciudad de Barcelona para la implantación de vehículos autónomos», 2017 (accedit març 08, 2021).
- [9] A. Luis i T. Rodríguez, «Una aproximación general al desarrollo de los coches autónomos», vol. 16, 2020 (accedit març 08, 2021).
- [10] L. Alberti Piulachs Xing Pan, «ACTITUDES ESPAÑ OLES ACERCA DE LOS COCHES AUTÓ NOMOS» (accedit març 04, 2021).
- [11] P. Verma, «The Google Autonomous Car - Research Paper Wiki», oct. 02, 2012. <https://sites.google.com/site/parthvermapaper/home/the-google-car> (accedit set. 15, 2021).

- [12] «Google's AI becomes first non-human to qualify as a driver». <https://www.dezeen.com/2016/02/12/google-self-driving-car-artificial-intelligence-system-recognised-as-driver-usa/> (accedit set. 15, 2021).
- [13] C. Burns i M. Dikmen, «Trust in Autonomous Vehicles», *2017 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*, Banff, oct. 2017 (accedit set. 15, 2021).
- [14] «El coche autónomo se adapta a la presencia de semáforos y peatones en su primera prueba en el centro de Vigo», jul. 16, 2019. <https://www.europapress.es/galicia/noticia-coche-autonomo-adapta-presencia-semaforos-peatones-primera-prueba-centro-vigo-20190716145929.html> (accedit set. 14, 2021).
- [15] G. Estaña García, «El estándar SAE J3016: Despliegue del piloto automático en los automóviles y automatización del tráfico rodado», 2017 (accedit set. 14, 2021).
- [16] SAE International, «SURFACE VEHICLE RECOMMENDED PRACTICE». 2014 (accedit set. 18, 2021).
- [17] «SAE J3016 automated-driving graphic». <https://www.sae.org/news/2019/01/sae-updates-j3016-automated-driving-graphic> (accedit set. 18, 2021).
- [18] G. \* Carnegie, «Implementation of the Pure Pursuit Path bracking Algorithm», 1992 (accedit març 18, 2021)..
- [19] H. Wang, B. Liu, X. Ping, i Q. An, «Path Tracking Control for Autonomous Vehicles Based on an Improved MPC», *IEEE Access*, vol. 7, p. 161064-161073, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2944894 (accedit març 04, 2021)..
- [20] Q. Yao, Y. Tian, Q. Wang, i S. Wang, «Control Strategies on Path Tracking for Autonomous Vehicle: State of the Art and Future Challenges», *IEEE Access*, vol. 8, p. 161211-161222, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3020075 (accedit març 04, 2021).
- [21] R. Rajamani, *Vehicle Dynamics and Control*, Second Edi. Minneapolis, MN 55455, USA, 2012 (accedit maig 05, 2021).

- [22] «Kinematic steering for Ackerman, rack-and-pinion, and parallel steering mechanisms - Simulink - MathWorks España». [https://es.mathworks.com/help/vdynblks/ref/kinematicsteering.html?searchHighlight=Kinematic Steering&s\\_tid=srchtitle](https://es.mathworks.com/help/vdynblks/ref/kinematicsteering.html?searchHighlight=Kinematic%20Steering&s_tid=srchtitle) (accedit maig 05, 2021).
- [23] «ROS - ROS Wiki». <http://wiki.ros.org/ROS> (accedit juny 11, 2021).
- [24] «MATLAB - El lenguaje del cálculo técnico - MATLAB & Simulink». <https://es.mathworks.com/products/matlab.html> (accedit ago. 31, 2021).
- [25] «Simulink - Simulación y diseño basado en modelos - MATLAB & Simulink». [https://es.mathworks.com/products/simulink.html?s\\_tid=srchtitle\\_simulink\\_1](https://es.mathworks.com/products/simulink.html?s_tid=srchtitle_simulink_1) (accedit ago. 31, 2021).
- [26] «ROS Toolbox - MATLAB». [https://es.mathworks.com/products/ros.html?s\\_tid=srchtitle\\_ROS\\_1#roscom](https://es.mathworks.com/products/ros.html?s_tid=srchtitle_ROS_1#roscom) (accedit ago. 31, 2021).
- [27] «Four-quadrant inverse tangent - MATLAB atan2 - MathWorks España». <https://es.mathworks.com/help/matlab/ref/atan2.html> (accedit set. 09, 2021).
- [28] «Pricing and Licensing - MATLAB & Simulink». <https://es.mathworks.com/pricing-licensing.html?prodcode=ML&intendeduse=edu> (accedit set. 22, 2021).