



EPS

Escola Politècnica

UdG Superior

Projecte/Treball Fi de Carrera

Estudi: Enginyeria Tècn. Ind. Electrònica Ind. Pla 2002

Títol: CONSTRUCCIÓ D'UN ROBOT RASTREJADOR AMB CONTROL DE VELOCITAT

Document: 1.MEMÒRIA

Alumne: JESÚS FONT FUENTES

Director/Tutor: ALBERT FIGUERAS/JOSEP REIXACH

Departament: Enginyeria Elèctrica, Electrònica i Automàtica

Àrea: E.S.A

Convocatòria (mes/any): Juliol/2012

ÍNDIX

1. INTRODUCCIÓ.....	5
1.1. Antecedents.....	5
1.2. Objecte.....	6
1.3. Especificacions i abast.....	6
2. DISSENY DEL CIRCUIT.....	8
2.1. Alimentació.....	8
2.1.1. Bateria de Li-Po.....	9
2.1.2. Reguladors de tensió.....	11
2.2. Sensors.....	16
2.3. Adaptadors de senyal.....	18
2.4. Motors.....	20
2.4.1. Reductors.....	20
2.4.2. Encoders.....	21
2.4.3. Modulació d'ample de pols.....	23
2.4.4. Etapa potència de control.....	23
2.5. Mòdul bluetooth.....	24
2.6. Microcontrolador PIC.....	27
2.6.1. Timers.....	28
2.6.2. Conversor A/D.....	30
3. PROTOTIP ROBOT RASTREJADOR.....	31
4. SISTEMA DE CONTROL.....	33
4.1. Sistema primer ordre.....	33
4.2. Identificació paramètrica sistema primer ordre.....	34
4.2.1. Simulació i validació models.....	37
4.2.2. Linealització models funció transferència.....	39
4.3. Controladors.....	40
4.3.1. Controlador PI continu.....	42
4.3.2. Simulació i sintonització controladors PI continus.....	44
5. IMPLEMENTACIÓ CONTROL DIGITAL.....	46
5.1. Algoritme controlador PI digital.....	46
5.2. Controlador PI discret.....	48
5.2.1. Simulació i sintonització controladors PI discrets.....	49
5.3. Control trajectòria.....	51
6. RESULTATS.....	52
6.1. Resultats motors amb velocitat desitjada.....	52
6.2. Resultats velocitat lineal robot.....	54
6.3. Resultats velocitat lineal robot amb pertorbació.....	56

6.4.	Resultats velocitat lineal robot amb trajectòria	58
7.	RESUM DE PRESSUPOST	59
8.	CONCLUSIONS.....	60
9.	RELACIÓ DE DOCUMENTS	62
10.	BIBLIOGRAFIA.....	63
11.	GLOSSARI	64
A.	CÀLCULS DISSENY CIRCUIT	66
A.1.	Càlcul dimensionat A/D	66
A.2.	Càlculs reguladors de tensió.....	66
A.3.	Càlculs sensors	67
A.4.	Càlculs adaptadors	67
A.5.	Càlcul reductor	68
B.	MOSTRES RESPOSTES DELS MOTORS.....	69
B.1.	Mostres respostes motors amb cicle de treball 20%	69
B.1.1.	Mostra nº1	69
B.1.2.	Mostra nº2	70
B.1.4.	Mostra nº4	73
B.1.6.	Mostra nº6	77
B.1.7.	Mostra nº7	78
B.1.8.	Mostra nº8	80
B.1.9.	Mostra nº9	82
B.1.10.	Mostra nº10	83
B.1.11.	Funció transferència motor dret amb cicle de treball 20%.....	85
B.1.12.	Funció transferència motor esquerra amb cicle de treball 20%.....	85
B.2.	Mostres respostes motors amb cicle de treball 30%	86
B.2.1.	Mostra nº1	86
B.2.2.	Mostra nº2	87
B.2.3.	Mostra nº3	89
B.2.4.	Mostra nº4	90
B.2.5.	Mostra nº5	91
B.2.6.	Mostra nº6	93
B.2.7.	Mostra nº7	94
B.2.8.	Mostra nº8	95
B.2.9.	Mostra nº9	97
B.2.10.	Mostra nº10	98
B.2.11.	Funció transferència motor dret amb cicle de treball 30%.....	99
B.2.12.	Funció transferència motor esquerra amb cicle de treball 30%.....	100
B.3.	Mostres respostes motors amb cicle de treball 40%	100
B.3.1.	Mostra nº1	100

B.3.2.	Mostra nº2	102
B.3.3.	Mostra nº3	103
B.3.4.	Mostra nº4	105
B.3.5.	Mostra nº5	106
B.3.6.	Mostra nº6	108
B.3.7.	Mostra nº7	109
B.3.8.	Mostra nº8	111
B.3.9.	Mostra nº9	112
B.3.10.	Mostra nº10	114
B.3.11.	Funció transferència motor dret amb cicle de treball 40%.....	115
B.3.12.	Funció transferència motor esquerra amb cicle de treball 40%.....	116
B.4.	Mostres respostes motors amb cicle de treball 50%	116
B.4.1.	Mostra nº1	116
B.4.2.	Mostra nº2	118
B.4.3.	Mostra nº3	119
B.4.4.	Mostra nº4	120
B.4.5.	Mostra nº5	122
B.4.6.	Mostra nº6	123
B.4.7.	Mostra nº7	124
B.4.8.	Mostra nº8	126
B.4.9.	Mostra nº9	127
B.4.10.	Mostra nº10	128
B.4.11.	Funció transferència motor dret amb cicle de treball 50%.....	130
B.4.12.	Funció transferència motor esquerra amb cicle de treball 50%.....	130
B.5.	Mostres respostes motors amb cicle de treball 60%	130
B.5.1.	Mostra nº1	131
B.5.2.	Mostra nº2	132
B.5.3.	Mostra nº3	133
B.5.4.	Mostra nº4	135
B.5.5.	Mostra nº5	136
B.5.6.	Mostra nº6	137
B.5.7.	Mostra nº7	139
B.5.8.	Mostra nº8	140
B.5.9.	Mostra nº9	141
B.5.10.	Mostra nº10	143
B.5.11.	Funció transferència motor dret amb cicle de treball 60%.....	144
B.5.12.	Funció transferència motor esquerra amb cicle de treball 60%.....	144
C.	CÀLCULS DISSENY CONTROLADORS PI CONTINUS	145
C.1.	Disseny controlador PI continu motor esquerra model 1	145

C.2.	Disseny controlador PI continu motor esquerra model 2.....	146
C.3.	Disseny controlador PI continu motor dret model 1.....	147
C.4.	Disseny controlador PI continu motor dret model 2.....	148
D.	CÀLCULS DISSENY CONTROLADORS PI DISCRETS.....	150
D.1.	Disseny controlador PI discret motor esquerra model 1.....	150
D.2.	Disseny controlador PI discret motor esquerra model 2.....	151
D.3.	Disseny controlador PI discret motor dret model 1.....	152
D.4.	Disseny controlador PI discret motor dret model 2.....	153
E.	PROGRAMACIÓ.....	155
E.1.	Codi programa.....	155

1. INTRODUCCIÓ

De forma general, la robòtica es defineix com el conjunt de coneixements teòrics i pràctics que permeten concebre, realitzar i automatitzar sistemes basats en estructures mecàniques, dotats d'un determinat grau d'intel·ligència i destinats a la producció industrial o a la substitució de l'home en moltes tasques. Un sistema robòtic es pot descriure com aquell que és capaç de rebre informació, de comprendre l'entorn que l'envolta, de formular, d'executar plans i de controlar o supervisar la seva operació. La robòtica és pluridisciplinària i es recolza en gran mesura en els progressos de la microelectrònica i de l'informàtica, així com en les noves disciplines com pot ser el reconeixement de patrons i d'intel·ligència artificial.

Sent la robòtica mòbil una àrea de la robòtica dedicada a la navegació d'entorns, el robot ha de realitzar les seves tasques en un entorn dinàmic, canviant i en molts casos desconegut.

Així doncs el projecte es basa en la realització d'un robot rastrejador mòbil de línies que de manera autònoma sigui capaç de seguir una línia negra sobre fons blanc amb control de velocitat gràcies a l'ajuda de diferents dispositius electrònics i un programa informàtic.

1.1. Antecedents

Avui en dia la robòtica no està contemplat com una especialització de la nostra carrera, l'Enginyeria Industrial especialitzat en Electrònica Industrial, però hi està molt lligada. Reuneix disciplines com mecànica, electrònica, comunicacions i informàtica. Tot i això no es considera una carrera pròpia ja que el seu desenvolupament està en procés i el seu ús no va més enllà de braços robòtics de muntatges d'automòbils i algunes aplicacions d'intel·ligència artificial.

En el cas de l'autor del projecte, la robòtica ha estat molt lligat des dels inicis dels estudis d'electrònica al llarg d'aquests 5 anys, constituint la robòtica com una afició, una passió, que entre altres beneficis, l'ha portat a posar en pràctica la majoria dels seus coneixements adquirits en els seus estudis i a la vegada adquirir-ne de nous a mesura que es va evolucionant el projecte.

1.2. Objecte

L'objecte del projecte es tracta de construir amb els diferents dispositius electrònics, mecànics i informàtic un robot rastrejador de línia que sigui capaç de seguir una línia negra sobre fons blanc a una velocitat constant ordenada des del nostre PC de manera autònoma i poder concursar als diferents certàmens de robots rastrejadors que es celebra a diferents localitats.

Es pretén aconseguir un prototip d'un robot rastrejador a partir del disseny electrònic i mecànic de manera que per a la comunicació entre el PC i el robot sigui sense fils, de manera que evitem l'ús de cable de comunicació sèrie o USB per a l'adquisició de dades i control del robot

Ser capaç d'implementar un control digital de velocitat en un PIC a partir del disseny del controlador i simulació del control de velocitat.

El robot ha de ser capaç de realitzar la trajectòria d'un circuit aleatori a una velocitat constant desitjada des del nostre ordinador a través de bluetooth.

1.3. Especificacions i abast

Per a la realització d'aquest projecte comprèn des del disseny i construcció d'un robot rastrejador de línia fins a la implementació d'un control de velocitat digital en un PIC.

Per aconseguir els objectius comentats en l'apartat anterior es dotarà el robot de sensors infrarojos per a la visualització de la línia a seguir, dos motors de corrent continu per permetre el moviment del nostre robot. Tot controlat per un PIC que realitzarà les diferents tasques segons el programa que implementem.

S'utilitzarà el software Altium Design 6 pel disseny de circuits en esquemàtic i pcb per llavors procedir al muntatge i construcció del robot rastrejador.

El programa informàtic per controlar el robot es programarà en llenguatge 'C', software CCS.

Per a l'adquisició de dades i control sobre el robot es realitzarà sense fils mitjançant el protocol de comunicació bluetooth per l'hyperterminal del sistema operatiu de Windows XP.

Pel disseny i sintonització del controlador, abans d'implementar-ho al PIC, es simularà els resultats obtinguts teòricament amb l'ajuda del simulink del Matlab 2007 que ens permetrà visualitzar les dades adquirides del robot mitjançant bluetooth, i un cop confirmats els resultats en simulació, implementar-ho en un PIC.

La pista de circuit en les que es realitzarà les pertinents proves de trajectòria del robot serà sobre un tauler de fusta melaminat blanquejat amb un determinat circuit indicat per una cinta aïllant negra.

2. DISSENY DEL CIRCUIT

Es dissenya el circuit per a realitzar el robot rastrejador que compleixi amb els objectius esmentats anteriorment.

A l'hora de realitzar el disseny del circuit, una manera de començar és realitzar un diagrama de blocs (Figura 1) que ens permet visualitzar de manera global i ràpida, sense entrar en detalls, el que necessitem per assolir els objectius.

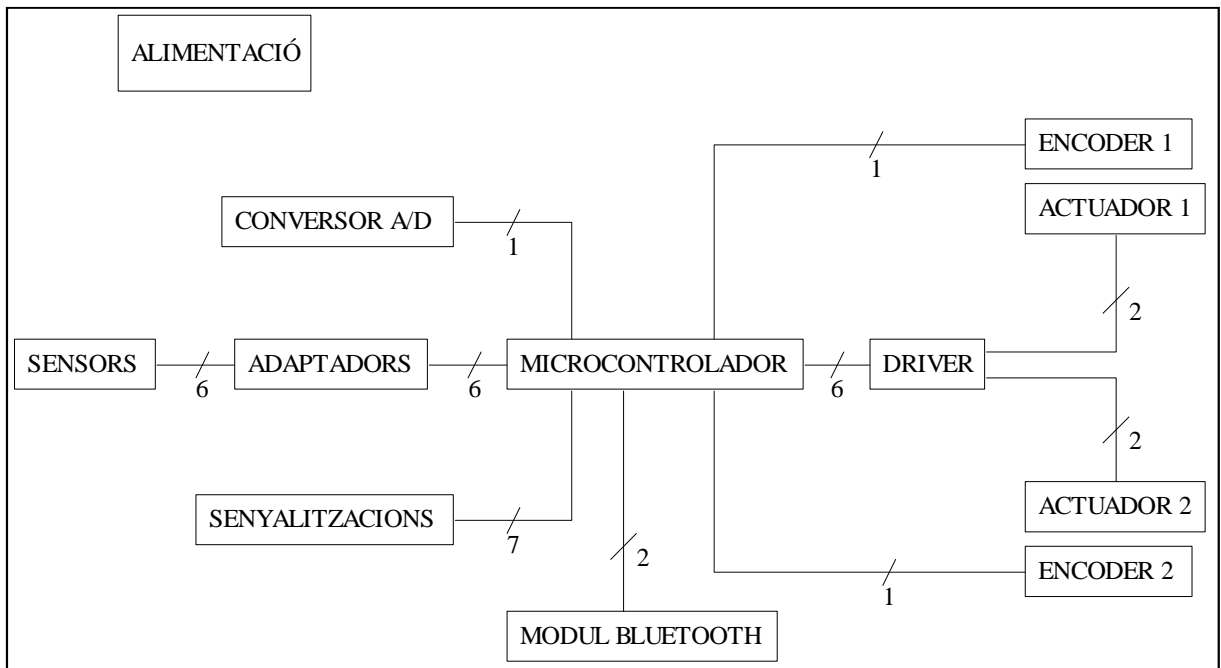


Figura 1. Diagrama de blocs

De manera resumida, tenim tots els diferents blocs que conformen el robot, amb les seves connexions, alimentacions i número de fils que s'enllacen.

2.1. Alimentació

Com tot aparell electrònic, necessita una font d'alimentació que proporcioni la tensió necessària que permetin que el circuit funcioni de manera òptima. En el nostre cas necessitem una font d'alimentació emmagatzamable, de dimensions petites per minimitzar el seu espai en el circuit, de duració llarga i que pugui ser recarregable en poc temps quan aquesta es troba sense capacitat. I ha de ser capaç de proporcionar com a mínim 9 Volts a

la seva sortida, ja que el nostre circuit funciona a 3,3 Volts i 9 Volts pels motors de corrent continu.

Per tant el que necessitem és una bateria recarregable. En el mercat tenim diferents tipus de bateries vàlides pel nostre robot, de manera que ens basarem en els tipus de bateries que s'utilitzen especialment per a prototips o productes d'aeromodelisme.

A continuació hi tenim una comparativa dels tipus de bateries més utilitzades en prototips i aeromodelisme (taula 1) per facilitar la nostra elecció del que necessitem:

	NiCd	NiMH	Lead Acid	Li-ion	Li-Po
Densitat d'energia (Wh/kg)	45-80	60-120	30-50	110-160	100-130
Cicles de vida	1500	300-500	200-300	500-1000	500-1000
Temps en càrrega ràpida (h)	1	2-4	8-16	2-4	1-1,5
Descàrrega d'energia per mes	20%	30%	5%	20%	10%
Voltatge per cèl·lula (V)	1,25	1,25	2	3,16	3,7
Manteniment requerit (mesos)	1-2	2-3	3-6	No	No

Taula 1. Comparativa tipus bateries

Les bateries NiCd són les bateries més típiques i utilitzades per la societat, tenen un llarg cicle de vida, però tenen una densitat d'energia molt baixa, al igual que les de NiMH i Lead Acid de manera que aquestes bateries tindrien unes dimensions considerables comparats amb els de Li-ion i Li-po i ens ocuparien bastant espai, de manera que queden descartades.

Així doncs, centrant-nos entre les bateries de Li-ion i Li-po, podem observar que les seves característiques són bastant semblants, tret pel fet de que la diferència en una cèl·lula és de 0,6 Volts de diferència. Això comporta que amb el mateix nombre de cèl·lules les bateries de Li-Po tindran més potencial respecte a les de Li-ion.

D'aquesta manera, ens decidim per unes bateries de Li-Po.

2.1.1. Bateria de Li-Po

Pel funcionament del nostre robot, es necessita una tensió constant de 3.3 Volts pel circuit electrònic i 9 Volts pels motors de corrent continu.

A l'hora de l'elecció de les bateries de Li-Po ens basarem en les característiques del voltatge que pot donar (V), la capacitat d'intensitat (mAh) i les seves dimensions, ja que varia segons les característiques que tingui.

Així doncs podem sobre dimensionar la tensió que necessitem, de manera que hauria de sobrepassar els 9 Volts com a mínim i amb marge, i una capacitat d'intensitat més que suficient i raonable per a que sigui capaç de donar al circuit el que necessita en un temps llarg. Sabent que cada cèl·lula és de 3,7 Volts i es connecten en sèrie fent que es vagin incrementant 3,7 Volts per cada cèl·lula connectada, s'arriba a la conclusió de que es decideix alimentar el circuit amb la bateria de 4 cèl·lules que s'il·lustra en la següent imatge (figura 2), que serà capaç de proporcionar-nos 14,8 Volts, més que suficients pels 9 Volts que es demana com a mínim i una capacitat d'intensitat de 1300mAh i unes dimensions ideals que ens permetrà ocupar poc espai, en comparació amb altres tipus de bateries amb les mateixes característiques.



Figura 2. Bateria Li-Po 14,8V(4S)-1300mAh

En aquestes bateries, s'ha de tenir en compte que no es poden deixar descarregar del tot, ja que a partir d'una tensió les cèl·lules es descarreguen en picat i es malmeten i llavors són pràcticament inutilitzables. Per tant cal controlar la seva tensió per evitar-ho. Així doncs en el nostre robot es decideix controlar la seva tensió mitjançant un conversor A/D del microcontrolador en el que apliquem un divisor de tensió, tal com es mostra en la figura 3, de manera que linealitzem proporcionalment la tensió de la bateria entre 0 Volts i 3,3 Volts.

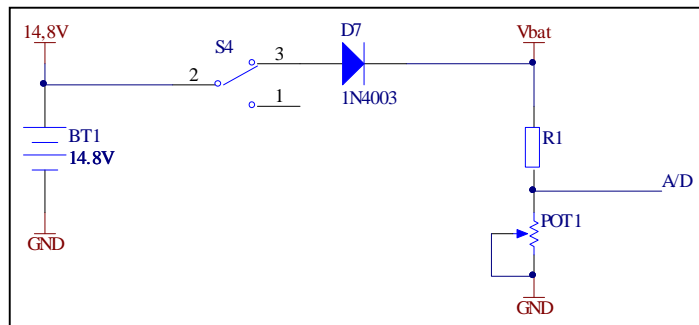


Figura 3. Control tensió bateria Li-po per conversor A/D

Els valors de les resistències del divisor de tensió per dimensionar la tensió de la bateria a 0 i 3,3 Volts segons la tensió de la bateria ve donat per l'equació 1, que amb els càlculs aconseguits a l'annex A.1 del present projecte, s'obté els valors de 10KΩ per R1 i 2,8KΩ que s'ajustarà mitjançant el potenciòmetre POT1, que serà un potenciòmetre multivolta de 5KΩ.

$$V_{A/D} = V_{bat} \times \frac{POT1}{R1 + POT1} \tag{Eq. 1}$$

2.1.2. Reguladors de tensió

Necessitem regular la tensió que ens proporciona la bateria de Li-Po, 14,8 Volts, a 3,3 Volts pel nostre circuit electrònic i 9 Volts per alimentar els motors de corrent continu de manera segura i eficient. Això ho podem aconseguir amb l'ajuda reguladors de tensió. En electrònica es pot classificar en dos grans grups de fonts, lineals i commutades.

Les fonts lineals controlen la tensió de sortida ajustant contínuament la caiguda de tensió en un transistor de potencia. Aquest transistor opera com una resistència variable (zona lineal) que és accionada per la senyal d'error que apareix de comparar la tensió de sortida amb una tensió de referència (Figura 4).

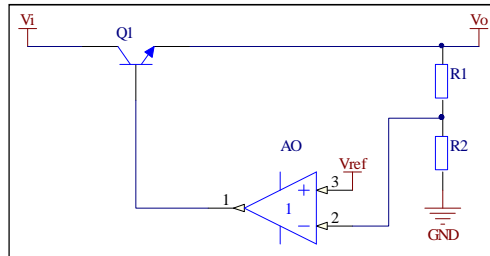


Figura 4. Esquema típic font lineal

I l'altre grup són les fonts commutades que controlen la tensió de sortida mitjançant un transistor de potència d'alta freqüència, que treballa com a interruptor (en tall i saturació) activat per una senyal de control PWM que prové de comparar entre la tensió de sortida i una tensió de referència (Figura 5).

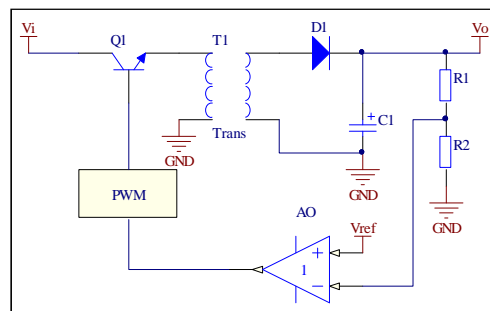


Figura 5. Esquema típic font commutada

A l'hora d'escollir entre una font lineal o font commutada, es fa una comparació global (Taula 2) entre elles.

LINEALS	COMMUTADES
Robustes	Sofisticades
Pesades	Lleugeres
Disseny simple	Disseny elaborat
Es calenten	Fredes
Baix rendiment	Alt rendiment
Baixa potència	Alta Potència

Taula 2. Comparativa lineals/commutades

Es decideix regular la tensió de la bateria de Li-Po a partir de fonts commutades. Si sabem que la bateria ens proporciona una tensió de 14,8 Volts i necessitem que ens reguli a 3,3 Volts i 9 Volts, necessitem un regulador commutada tipus Step-Down (reductor) que ens reduirà la tensió d'entrada als voltatges esmentats anteriorment.

En la figura 6, es mostra un diagrama simplificat d'un típic regulador Step-Down.

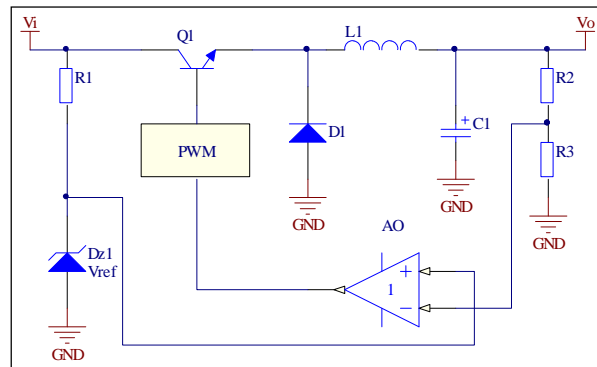


Figura 6. Esquema simplificat regulador Step-Down

El circuit treballa de manera que el transistor (Q1) és utilitzat com un interruptor, en la qual té intervals de T_{on} i T_{off} controlats per un modulador d'ample de pols (PWM) que treballa variant el cicle de treball del transistor segons el resultat del AO que compara l'error entre la tensió de sortida i la de referència.

En el interval del PWM en el qual és T_{on} , el transistor (Q1) es comporta com un interruptor tancat (Figura 7), de manera que el díode (D1) es troba inversament polaritzat (no condueix) i la tensió d'entrada proporciona energia a la inductància (L1) i a la sortida (Vo), de manera que el corrent de la bobina augmenta linealment.

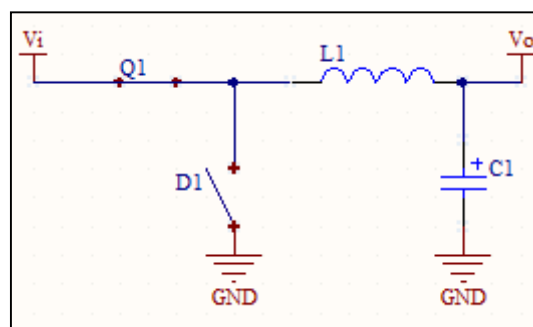


Figura 7. Step-Down en T_{on}

Un cop el PWM passa a Toff, el transistor (Q1) es comporta com un interruptor obert (Figura 8) provocant que la tensió en la inductància (L1) s'inverteixi bruscament de manera que l'energia emmagatzemada a la inductància es descarregui a través del díode (D1), ja que es troba polaritzat, i el corrent vagi disminuint linealment fins a que el PWM torni a estar en Ton i es repeteix el cicle.

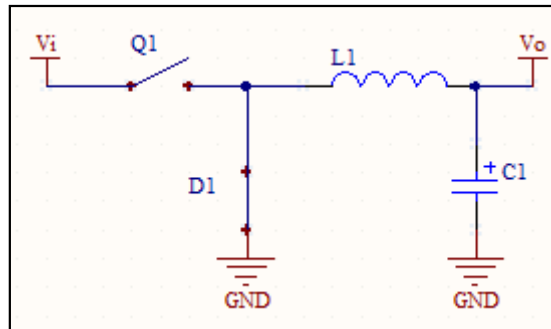


Figura 8. Step-Down en Toff

En la figura 9 que es mostra a continuació hi tenim una gràfica en la que es pot visualitzar el procés explicat anteriorment sobre el funcionament del regulador Step-Down.

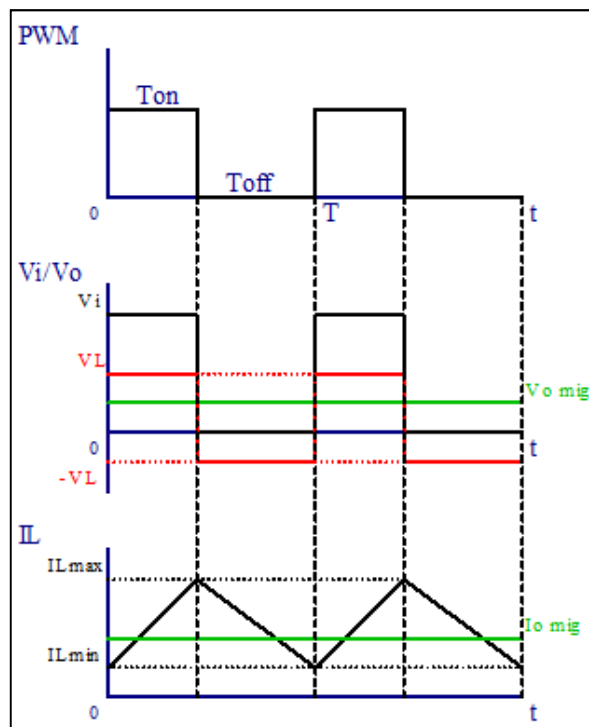


Figura 9. Gràfiques Step-Down

De les propostes que hi han en el mercat de reguladors de tensions commutades, es decideix utilitzar reguladors de la família LM2575, que són reguladors integrats commutats del tipus Step-Down, que ens permetrà regular a partir d'una tensió d'entrada que pot estar comprès entre 4 i 40 Volts a una tensió de sortida desitjada i amb un corrent de sortida de com a màxim 1 Ampers, més que suficient pel nostre robot rastrejador.

Per obtenir les tensions que necessitem, 3,3 Volts i 9 Volts, la mateixa família ens ofereix el LM2575-3.3 i LM2575-ADJ amb les seves configuracions i connexions que ens proporciona el fabricant en la que es pot visualitzar en la figura 10. Amb 2 interruptors, són capaços de proporcionar, en el primer cas, 3,3 Volts fixes, i en el segon cas, una tensió ajustable en la que podem fixar els 9 Volts, que indicaran el seu estat mitjançant 2 leds indicatius per cada tensió.

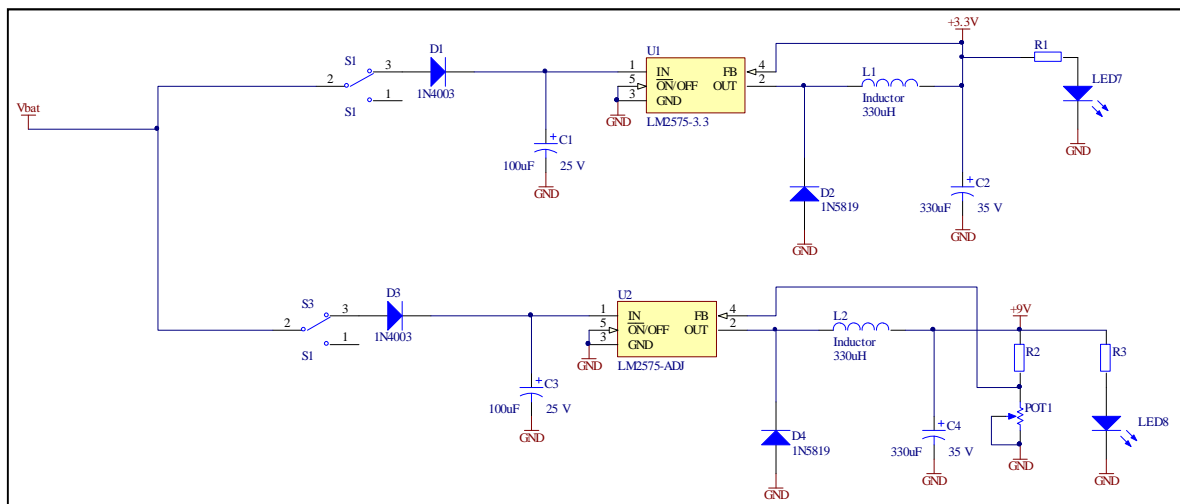


Figura 10. Connexionat reguladors commutades

Per obtenir una tensió fixa de 9 Volts en el regulador ajustable, es pot aconseguir aplicant l'equació 2 que ens proporciona el fabricant.

$$V_{out} = V_{ref} \times \left(1 + \frac{R2}{POT1} \right) \tag{Eq. 2}$$

Segons els càlculs indicats en l'annex A.2 del mateix projecte, per aconseguir una tensió fixa de 9 Volts els valors teòrics de les dues resistències (POT1 i R2) seran de 1,5KΩ i 10KΩ respectivament, utilitzant en el cas de POT1 un potenciòmetre multivolta de 5KΩ per tal d'aconseguir un ajustatge més precís.

Tot seguit s'implementa els dos reguladors commutats aconseguint els resultats que es mostra en la taula 3 següent:

REGULADOR	TENSIÓ
LM2575-3.3	3,26 V
LM2575-ADJ	9 V

Taula 3. Valors pràctics reguladors

2.2. Sensors

El nostre robot rastrejador recorrerà un itinerari determinat marcat amb cinta aïllant de color negra sobre una plataforma que consisteix en una taula de fusta melaminat blanquejat. La informació sobre el trajecte a realitzar ens la proporcionarà un sensor optocobrador d'infrarojos reflexiu que ens distingirà entre el blanc i el negre.

Un sensor d'infrarojos reflexiu consisteix en dues parts, l'emissor i el receptor, tal com es pot observar en la figura 11. L'emissor es tracta d'un led infrarojos que emet més o menys llum depenent de la intensitat que hi circuli per la branca i el receptor està constituït per un fototransistor sensible a la llum infrarojos, és a dir, el transistor condueix depenent de la intensitat que rep de la senyal d'infrarojos a la seva base. L'emissor i receptor no estan encarats frontalment, sinó que estan dirigits a una mateixa direcció de manera que el fototransistor, enlloc de rebre la llum directe del led, la rep a través del reflex d'aquesta llum sobre una superfície.

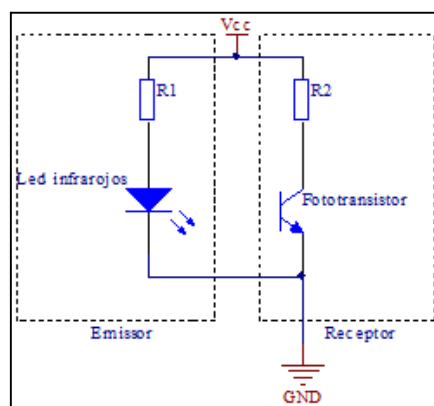


Figura 11. Optocobrador infrarojos reflexiu

Tal com s'ha esmentat anteriorment, la pista es tracta d'una fusta melaminada blanquejat amb un itinerari marcat amb cinta aïllant de color negra. Així la superfície contindrà dues gammes de colors diferents a distingir, el blanc i el negre.

El comportament del reflex de la llum infraroja sobre una superfície blanca o negra varia, ja que en una superfície blanca és més reflexiva que en el cas d'una superfície negra, és a dir, el color negre absorbeix més la llum que en el cas de color blanc que la rebota més. Això fa que el fototransistor conduirà més si el led emissor d'infrarojos es troba sobre una superfície blanca que en una de negra.

Els sensors infrarojos reflexius decidits pel nostre robot seran els QRD1113, que ens proporcionen amb un mateix encapsulat el led infraroig i el fototransistor. L'alimentació serà de 3.3 Volts i el fototransistor estarà dissenyat en mode emissor comú tal com s'il·lustra en la figura 12 següent:

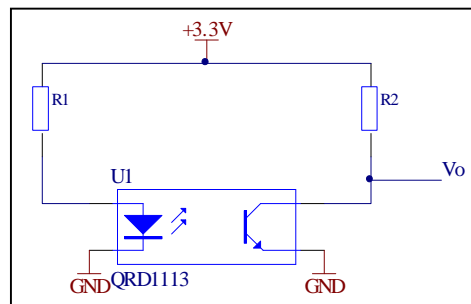


Figura 12. Connexionat sensors

Els valors de les resistències s'han calculat per llei d'Ohm (equació 3), tenint en compte les especificacions del fabricant.

$$V = R \times I \quad (\text{Eq. 3})$$

Mitjançant els càlculs que es proporcionen en el punt A.3 del present document, s'ha obtingut 470Ω per la resistència que limita el corrent a circular pel led infraroig (R1) i 4,7KΩ per la resistència del col·lector del fototransistor (R2) que actua com a resistència push-pull.

S'ha procedit a implementar en circuit real mitjançant placa protoboard, obtenint els resultats en la taula següent:

SUPERFÍCIE	SENSOR
Blanca	1,16 V
Negra	3,17 V

Taula 4. Resultats sortida QRD1113

Així doncs es decideix dotar de 6 sensors d'infrarojos reflexius QRD1113 a la part més davantera del robot rastrejador, formant una línia recta (vegeu plànol nº5 de components placa 1) i amb una distància al més mínim possible entre els sensors i la superfície amb l'ajuda d'una bola morta unidireccional. Els dos sensors centrals marcaran la línia a seguir, mentre que els 4 sensors dels extrems serviran per corregir la trajectòria davant de corbes.

2.3. Adaptadors de senyal

Els sensors esmentats anteriorment, tal com es pot comprovar mitjançant els resultats, ens proporciona una sortida analògica, condicionat per la llum reflexionada que rep el fototransistor, fent que a la sortida hi tinguem una variació de tensions depenent del nivell d'excitació que rep la base del fototransistor.

Aquestes senyals analògiques han de ser discretitzades, ja que hauran de ser interpretades per un microcontrolador, de manera que distingeixi d'una superfície blanca a una de negra mitjançant nivells lògics 0 i 1.

Per aconseguir una sortida discretitzada a nivell lògics 0 i 1 segons la superfície, es pot aconseguir mitjançant un disparador schmitt (Figura 13) en el que a la seva sortida (V_o) només pot tenir dos estats marcats per l'alimentació de l'amplificador operacional ($+V_{cc}$ i GND). El disparador referenciat a una tensió (V_{ref}) de manera que ens permeti desplaçar l'histèresis al llarg de les abscisses X. La seva funció és comparar la senyal variable d'entrada (V_i) i una tensió (V_{th}) que varia, segons la senyal de sortida (V_o), en dues tensions diferents (V_{th1} i V_{th2}), que marquen el marge de canvi d'estat, anomenat histèresis.

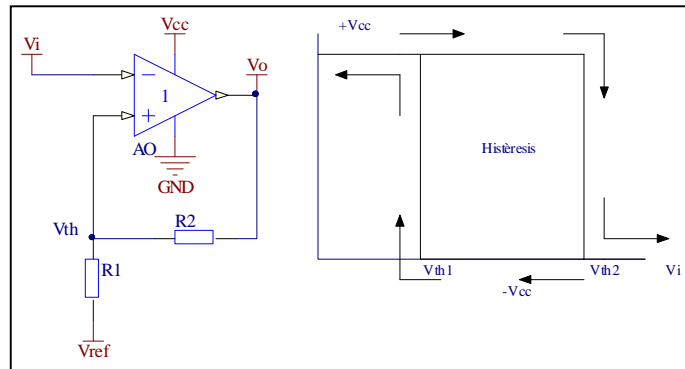


Figura 13. Disparador schmitt inversor

En el nostre prototip, usarem el xip integrat HEF40106B, que ens dóna en el mateix encapsulat 6 triggers schmitt inversors explicat anteriorment pels 6 sensors que fem servir en el robot rastrejador. Aquest xip, alimentat a 3,3 Volts, ens permetrà convertir la senyal analògica dels sensors infrarojos reflexius en senyals TTL de 0 i 3,3 Volts (Figura 14) que ens facilitarà a l'hora d'interpretar la informació dels sensors com a nivells lògics 0 i 1. A la vegada, en la mateixa sortida del trigger, s'implementarà un led per facilitar-nos la visualització i el bon funcionament d'aquests.

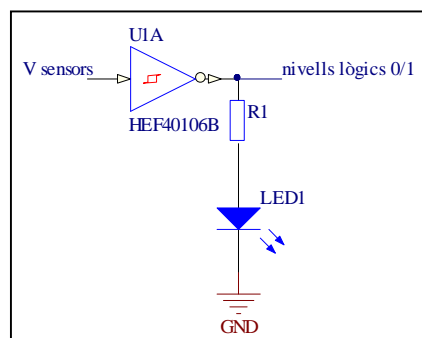


Figura 14. Trigger schmitt

Els valors de les resistències dels leds es calcularan amb l'equació de la llei d'Ohm esmentat en l'equació 3 del punt anterior, obtenint uns valors de 2,2K Ω segons els càlculs facilitats en el punt A.4 de l'annex.

En la taula 5, que es pot veure a continuació, es mostra la comprovació i resultats obtinguts en placa protoboard al adaptar una senyal analògica que ens proporciona un sensor amb un trigger schmitt que porta incorporat el xip HEF40106B.

SUPERFÍCIE	SENSOR	TRIGGER	NIVELL LÒGIC
Blanca	1,11 V	3,26 V	1
Negra	3,08 V	0 V	0

Taula 5. Resultats sortida HEF40106B

2.4. Motors

Per realitzar el moviment de la trajectòria del robot rastrejador, es dotarà de dos motors de corrent continu. S'ha escollit dos motors DC de la marca Maxon amb les característiques de la taula següent:

Motor maxon DC RE-16	
Potència nominal	2 W
Tensió nominal	9 V
Intensitat nominal	236 mA
Velocitat nominal	4580 rpm
Parell nominal	2,37 mNm

Taula 6. Característiques motor

2.4.1. Reductors

La velocitat nominal dels motors és de 4580 rpm, per tant s'hi afegirà un reductor amb una relació 1:19, que operant amb l'equació 4 i els càlculs obtinguts en l'apartat A.5, s'obté una velocitat de 241 rpm a l'eix de gir de la sortida del motor.

$$Vel_{\text{reductor}} = Velocitat_{\text{nominal}} \times Relació_{\text{reductor}} \quad (\text{Eq. 4})$$

2.4.2. Encoders

Per a tenir informació sobre la velocitat del nostre robot rastrejador, es decideix implementar un encoder. Els encoders són sensors que generen senyals digitals en resposta al moviment. Es poden classificar en dos tipus segons la lectura.

Per una part es troben els encoders incrementals que es basen en comptar el número d'impulsos que es genera quan un emissor emet un raig de llum que és travessat per finestretes d'un disc unit a l'eix, i un fototransistor com a receptor.

I també trobem els encoders absoluts que consisteix en un disc que conté varies bandes disposades en forma de corones circulars concèntriques, disposats de tal forma que el rotor queda dividit en sectors, amb marques opaques i transparents codificat en codi Gray.

Els nostres motors estaran dotats d'encoders incrementals alimentats a 3,3 Volts, que tal com es mostra en la figura 15 que ens proporciona el fabricant, estan dotats per un emissor led d'infrarojos, que a través d'una màscara i un disc unit a l'eix del motor, excitaran la base de tres fototransistors quan la llum sigui travessada al coincidir les finestretes de la màscara i el disc.

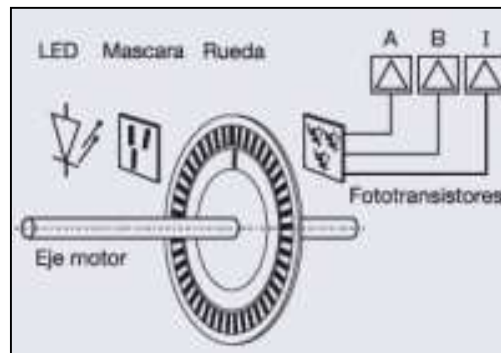


Figura 15. Disseny encoder incremental

Com es pot apreciar en la imatge anterior, l'encoder ens proporciona tres canals (A, B i I) segons les respostes dels fototransistors. Aquestes senyals, representades en la figura 16 de la documentació del fabricant, són senyals digitals d'ones quadrades que es processa pel comptatge de polsos (velocitat), o posicionament de precisió. El desfase entre les senyals dels canals A i B permeten la seva comparació amb el propòsit de determinar el seu sentit de gir i el canal I pot ser utilitzat com a punt de referència per a determinar amb precisió l'angle de rotació del recorregut.

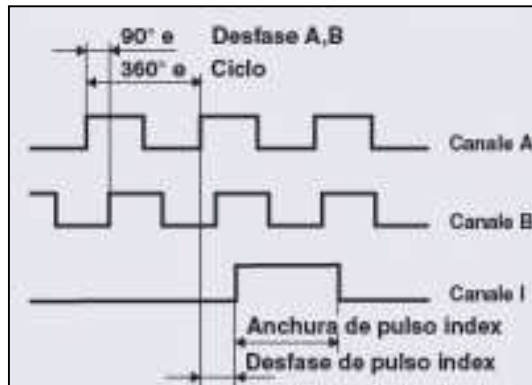


Figura 16. Representació senyals sortida encoder

Per a la nostra aplicació, els motors del nostre robot només tindran un sentit de gir, per tant s'arriba a la conclusió que per determinar la velocitat dels motors tan sols s'utilitzarà la senyal del canal A, que ens proporcionarà una cadena de polsos de 0 a 3,3 Volts que podran ser interpretades mitjançant comptatge. Aquest encoder tindrà una resolució de 32 polsos/volta a l'eix del motor de manera que unit amb el reductor de relació 1:19 ens proporcionarà 608 polsos/volta a les rodes del robot rastrejador en el qual tenen un diàmetre de 56mm.

2.4.3. Modulació d'ample de pols

El control de modulació d'ample de pols, (Figura 17), es basa en generar una senyal quadrada a un període fixa (T), de manera que tan sols variem el temps en el que l'ona quadrada està en nivell alt (T_{on}), sense variar el període total de l'ona quadrada.

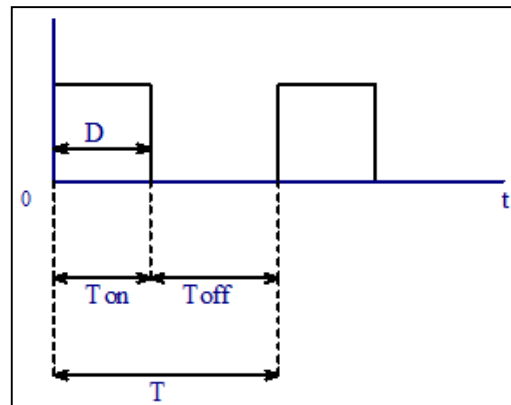


Figura 17. Senyal PWM

Així doncs pel control del moviment del nostre robot rastrejador de dos motors de corrent continu es controlarà mitjançant modulació d'ample de pols (PWM) a una freqüència de 4Khz.

Amb aquest sistema, a part de permetre'ns controlar les velocitats dels motors, també ens servirà per a controlar el gir del robot rastrejador variant el cicle de treball de cada motor, evitant utilitzar un servomotor.

2.4.4. Etapa potència de control

Els motors de corrent continu que utilitzem, consumeixen un corrent nominal de 236 mA, un valor bastant alt. Per tant es necessita dotar d'una etapa de potència de control pels motors que permeti entregar aquest corrent en condicions òptimes.

Per aconseguir-ho, s'utilitzarà el controlador de motors L293D que es tracta d'un circuit integrat conformat per 4 amplificadors, on hi té els díodes de protecció incorporats en el mateix xip, en el que són capaços d'entregar 600mA per canal. L'integrat, alimentat a 3,3 Volts per la part lògica i 9 Volts pels motors, seran configurats com a ponts H complets utilitzant 2 amplificadors (Figura 18), de manera que podrem realitzar el control i sentit dels dos motors, tot i que en el nostre robot només girarà en un sentit. El control, tal com s'ha

indicat en l'apartat anterior, es realitzarà mitjançant modulació d'ample de pols en el que habilitarà i deshabilitarà (EN1 i EN2) cada parell d'amplificadors a una freqüència de 4Khz. Pel sentit de gir del motor (IN1 a IN4), s'habilitarà mitjançant nivells lògics per aconseguir que els motors vagin a un sol mateix sentit.

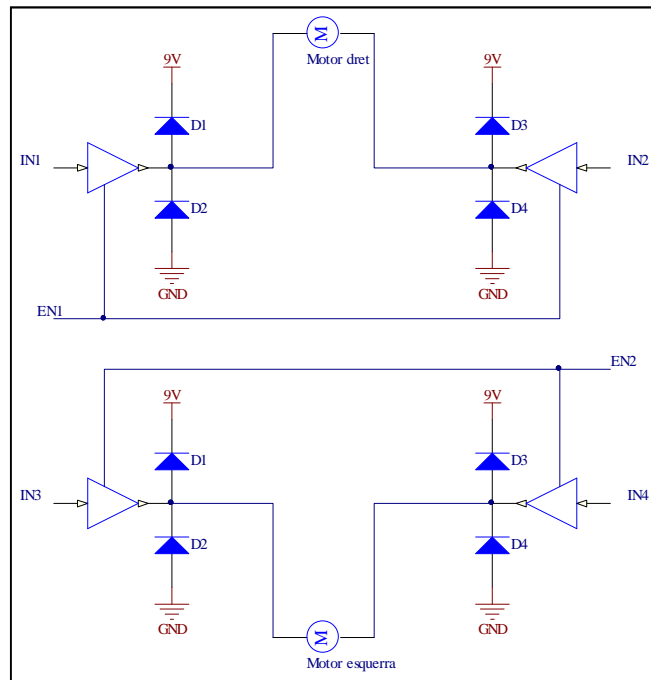


Figura 18. Connexió etapa potència de control

2.5. Mòdul bluetooth

Per aconseguir els objectius de tenir una comunicació entre el nostre PC i el robot per a l'adquisició de dades i el control sobre el nostre robot evitant l'ús de cables mitjançant la comunicació sèrie, es realitzarà mitjançant el protocol de comunicació sense fils de bluetooth.

El bluetooth està aplicat extensament en dispositius electrònics de telecomunicacions i de la informàtica personal, de manera que ens facilita molt la comunicació entre el robot i qualsevol dispositiu electrònic que contingui bluetooth, que en el nostre cas serà el nostre ordinador. Aquesta tecnologia bluetooth és una especificació industrial per xarxes sense fils d'àrea personal (WPAN), que permet la transmissió de dades a partir de radiofreqüències en la banda ISM de 2,4Ghz (bandes reservades de radiofreqüències per a ús no comercials).

Per aquest propòsit, s'incorporarà al microcontrolador un mòdul de comunicacions bluetooth Parani ESD-100V (Figura 19) que ens permetrà dotar el circuit de comunicació sèrie sense fils entre el nostre robot i l'ordinador que ja estarà dotat de tecnologia bluetooth genèric.



Figura 19. Parani ESD-100V2

Les seves principals característiques queden resumides en la taula següent:

Mòdul bluetooth Parani ESD-100V2	
Tensió	3,3 V
Consum	60 mA
Interfase	Serial UART
Compatibilitat	Bluetooth v2.0+EDR
Radi de treball	100 m

Taula 7. Característiques mòdul bluetooth

Per connectar el dispositiu i poder enviar i rebre dades entre el mòdul i el PC, s'ha de realitzar una sincronització entre els dos bluetooth que porten incorporats respectivament, de manera que cal configurar el mòdul bluetooth a partir de les comandes AT que el fabricant ens proporciona. Per a la configuració del mòdul, es connectarà al PC mitjançant el cable de comunicació sèrie RS232 i la placa que es pot observar en la figura 20 que ens permet anivellar els nivells de TTL del PC-mòdul amb el MAX3232.

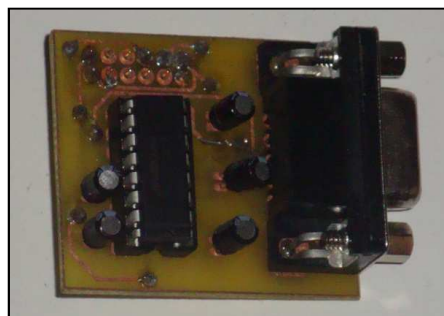


Figura 20. Comunicació sèrie RS232

El software per a la visualització de la comunicació entre el mòdul bluetooth i el PC es realitza mitjançant el hyperterminal que ens proporciona el sistema operatiu de windows XP, de manera que es configura el mòdul a les següents especificacions especificades en la taula 8.

Configuració Parani ESD-100V2	
Mode de treball	3
Baude Rate	9600
Bits	8
Paritat	1
Hardware flow control	No

Taula 8. Configuracions mòdul bluetooth

Amb les indicacions de la taula anterior, a partir de comandes AT enviades per hyperterminal, tal com es pot observar en la figura 21, es configura amb les especificacions desitjades.

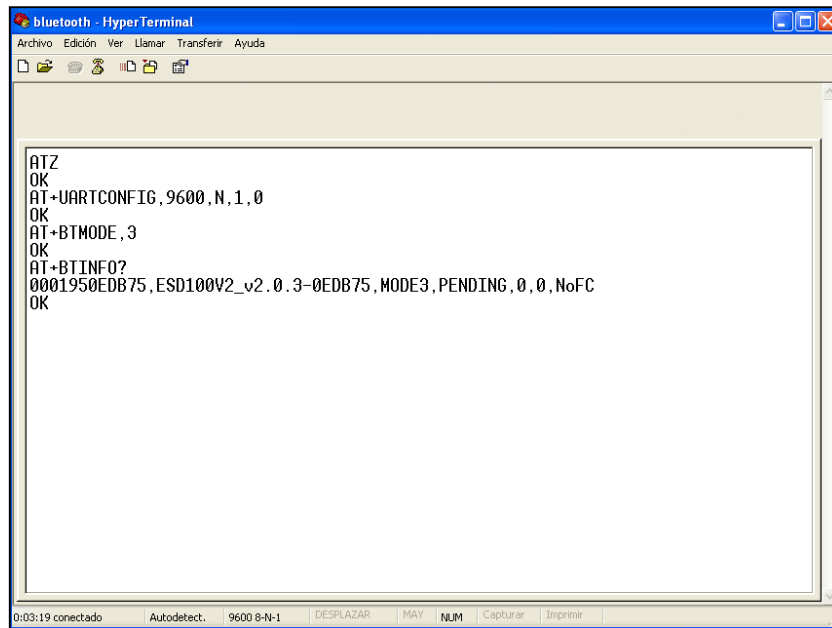


Figura 21. Configuració mòdul bluetooth per hyperterminal

2.6. Microcontrolador PIC

Abans de l'elecció del PIC, es decideix afegir en el disseny del circuit, 7 senyalitzacions indicatius mitjançant leds vermells, verds i grocs i un polsador. La intensitat dels leds estaran limitats per resistències de valor de $2,2K\Omega$ i el polsador mitjançant resistència pull-push de $4,7K\Omega$. El motiu és per si sorgeix alguna aplicació o si més no, per proves.

Així doncs el microcontrolador escollit és el PIC 18F452 de microchip de 40 pins. S'ha seleccionat aquest PIC després d'estudiar les exigències del disseny que queden reflectides en la taula següent:

Característiques	Disseny	PIC18F452
Alimentació	3,3 V	2 V - 5,5 V
E/S	25	34
A/D	1	8
Timers/Contadors	2/2	4/3
PWM	2	2
Interfase UART	Sí	Sí

Taula 9. Aportació PIC18F452 a les exigències del disseny

Vist que el PIC18F452 ens satisfà les nostres exigències, es decideix implementar el PIC dotant-lo d'un cristall oscil·lador extern mitjançant un cristall de quarz de 10Mhz amb els seus condensadors ceràmics de 33pF tal com es recomana en les especificacions del fabricant.

El PIC 18F452 tindrà reset per hardware mitjançant un polsador i resistència pull-push de $4,7K\Omega$.

A continuació s'observa la taula 10, en el que s'informa detalladament les assignacions dels diferents pins que ocuparan el nostre PIC amb la resta del disseny. Per les diferents connexions i enllaços dels circuits esmentats en els capítols anteriors amb el PIC 18F452 es contemplen en l'esquemàtic del plànol nº2 que s'adjunta en el present projecte.

PIN	DISTINCIÓ	APLICACIÓ	PIN	DISTINCIÓ	APLICACIÓ
1	MCLR/VPP	POLSADOR 3.3V RESET	21	RD2	IN3
2	RA0/AN0	LECTOR BATERIA	22	RD3	IN4
3	RA1/AN1		23	RC4/D-	
4	RA2/AN2		24	RC5/D+	
5	RA3/AN3		25	RC6/TX	BLUETOOTH RX
6	RA4/TOCK1	ENCODER DRET	26	RC7/RX	BLUETOOTH TX
7	RA5/AN4	POLSADOR PROVES	27	RD4	LED VERD
8	RE0/AN5	LED VERD BATERIA	28	RD5	LED GROC
9	RE1/AN6	LED GROC BATERIA	29	RD6	LED VERMELL
10	RE2/AN7	LED VERMELL BATERIA	30	RD7	LED GROC MIG
11	VDD	3.3V	31	VSS	GND
12	VSS	GND	32	VDD	3.3V
13	OSC1	CRISTALL 1 10Mhz	33	RBO/AN12	
14	OSC2	CRISTALL 2 10Mhz	34	RB1	SENSOR 6
15	RCO/T13CKL	ENCODER ESQUERRA	35	RB2	SENSOR 5
16	RC1		36	RB3	PWM2 EN1
17	RC2/CCP1	PWM1 EN2	37	RB4	SENSOR 4
18	VUSB		38	RB5	SENSOR 3
19	RD0	IN1	39	RB6	SENSOR 2
20	RD1	IN2	40	RB7	SENSOR 1

Taula 10. Assignacions pins PIC18F452

La programació serà en llenguatge C amb el compilador CCS. Pel programador de PICS s'utilitzarà un prototip de programador, sense ús comercial, que ens proporciona el departament d'enginyeria elèctrica, electrònica i automàtica de la universitat de Girona.

2.6.1. Timers

En el present projecte s'utilitzarà els 4 timers que ens ofereix el PIC.

Els Timers 0 i 1 s'utilitzaran com a comptadors per a la lectura del número de polsos que ens enviarà els encoders. Els polsos obtinguts a les rodes del robot durant el seu desplaçament seran tractats per programa amb un temps de mostreig de 100ms en el que es procedirà a la lectura dels comptadors de polsos per cada roda i es realitzarà la conversió

d'aquests polsos obtinguts cada 100ms a cm/s, per mitjà de l'equació 5 que es mostra a continuació.

$$\frac{n^{\circ}\text{polsos}}{100\text{ms}} \times \frac{1000\text{ms}}{1\text{s}} \times \text{reductor} \times \frac{1\text{volta}}{32\text{polsos}} \times \frac{2\pi r}{1\text{volta}} \quad (\text{Eq. 5})$$

De manera que el factor multiplicació per a la conversió de n° de polsos a cm/s serà de 0,2895.

S'utilitzarà el Timer2 per a generar una senyal PWM de 4Khz pels mòduls CCP que ens ofereix el microcontrolador. El mateix fabricant ens ofereix l'equació 6 pel càlcul de la freqüència que desitgem.

$$T = \frac{4}{\text{Freq.Oscil.}} \times \text{Pr eescala} \times (\text{T2R} + 1) \quad (\text{Eq. 6})$$

De manera que per obtenir una senyal PWM de 4Khz, amb un preescala del ordre 4, T2R serà de 155.

Per a l'obtenció de diferents cicles de treball, s'aconsegueix a partir de l'equació 7, en el que podem obtenir el valor en el qual el temps de la senyal PWM estarà en nivell alt.

$$D(\%) = \frac{\text{valor}}{4 \times (\text{T2R} + 1)} \times 100 \quad (\text{Eq. 7})$$

Finalment amb el Timer3 de 16 bits es realitzarà per programa una interrupció cada 25ms. Per aconseguir-ho, el fabricant ens proporciona l'equació 8, de manera que es calcula el valor de TMR3 per a que realitzi una interrupció cada 25ms.

$$T = \frac{4}{\text{Freq.Oscil.}} \times \text{Pr eescala} \times (2^n - \text{TMR3}) \quad (\text{Eq. 8})$$

Amb un preescala del ordre 4, s'obté el valor de TMR3 a 49911, que el seu valor en hexadecimal serà de 0xC2FA.

2.6.2. Conversor A/D

Per a la lectura del nivell de bateria, s'utilitzarà el conversor A/D de 10 bits que ens ofereix el microcontrolador, en el que aplicant l'equació 9 obtenim la resolució del conversor.

$$\text{Resolució} = \frac{V_{\text{ref}(+)} - V_{\text{ref}(-)}}{2^n} \quad (\text{Eq. 9})$$

Sabent que el conversor del PIC estarà referenciat a 3,3 Volts i 0 Volts respectivament, el conversor tindrà una resolució de 3,22mV/posició.

3. PROTOTIP ROBOT RASTREJADOR

Després del disseny que conformen el robot rastrejador s'ha procedit a la seva construcció i muntatge a partir de les plaques de circuit imprès que es mostren en els plànols 4 i 5 del document plànols, aconseguint el prototip que es mostra en les imatges que s'il·lustren en les figures següents, indicant les parts que conformen el robot rastrejador.

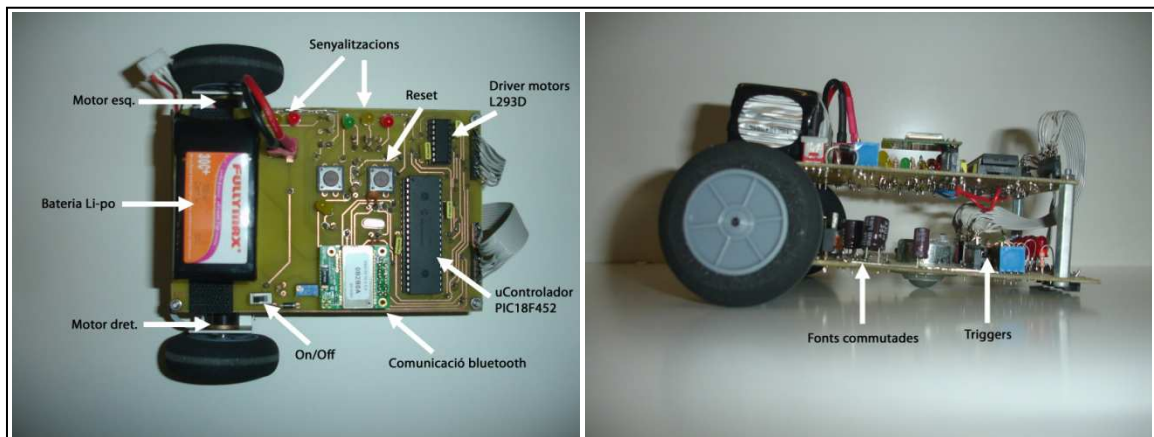


Figura 22. Prototip robot rastrejador superior i inferior

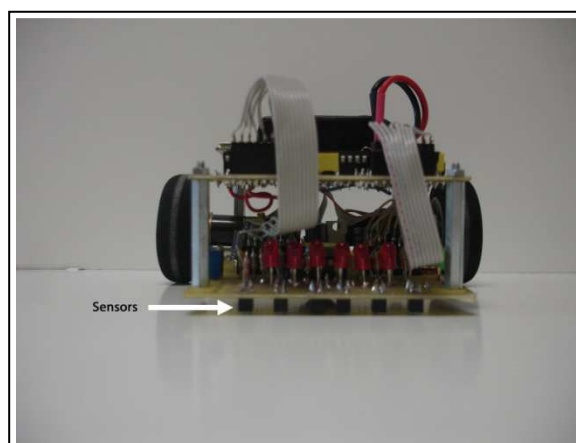


Figura 23. Prototip robot rastrejador frontal

Com es pot apreciar en les imatges anteriors, s'ha construït el robot rastrejador formant dues plantes amb els plànols del circuit imprès nº4 i 5 unint-los mitjançant passadors de 50x3mm amb cargols 5x3mm i femelles de 3mm de diàmetre col·locats en els vèrtex de les plaques de fibra de vidre.

S'ha distribuït la part de disseny que fa referència a les fonts commutades, els motors i els sensors amb els seus triggers en la part inferior del robot, mentre que en la part superior s'hi ha distribuït la part de control com pot ser el microcontrolador i el driver dels motors, la

comunicació bluetooth i finalment l'alimentació. S'ha unit les connexions entre les dues plaques mitjançant cables de cinta plana.

Els motors estan subjectats per una xapa galvanitzada de 90° a la part inferior del robot, en el que els eixos dels motors estan units a dues rodes d'espuma amb un diàmetre de 56mm.

El prototip té unes mides de 70mm d'altura, 140mm d'amplada i 150mm de llargada amb un pes de 470g.

4. SISTEMA DE CONTROL

En el present projecte, es pretén controlar la velocitat del robot rastrejador, per tant ens interessa determinar la resposta dinàmica dels motors de corrent continu al aplicar-hi una senyal d'entrada.

La resposta dinàmica d'un sistema es pot representar en termes de la figura 24, on $X(t)$ és una funció variable d'entrada, i $Y(t)$ és la resposta del sistema.

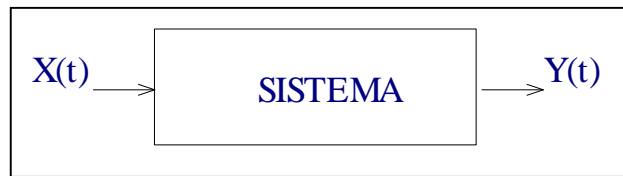


Figura 24. Resposta d'un sistema

4.1. Sistema primer ordre

La resposta dinàmica del nostre sistema, els motors de corrent continu, es pot representar com un sistema de 1er ordre mitjançant l'equació diferencial lineal que es representa en l'equació següent:

$$\tau \frac{dy}{dt} + y = K \cdot x(t) \quad (\text{Eq. 10})$$

De manera que desenvolupant l'equació anterior utilitzant la transformada de Laplace:

$$L\left\{\tau \frac{dy}{dt} + y\right\} = L\{K \cdot x(t)\} \quad (\text{Eq. 11})$$

$$L\tau \left\{\frac{dy}{dt}\right\} + L\{y\} = K \cdot L\{x(t)\} \quad (\text{Eq. 12})$$

$$\tau s \cdot Y(s) + Y(s) = K \cdot X(s) \quad (\text{Eq. 13})$$

$$(\tau s + 1) \cdot Y(s) = K \cdot X(s) \tag{Eq. 14}$$

On al coeficient $Y(s)/X(s)$ se l'anomena funció de transferència $F(s)$:

$$F(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{K}{\tau(s) + 1} \tag{Eq. 15}$$

On K és el guany del sistema en llaç obert i τ la constant de temps en llaç obert.

4.2. Identificació paramètrica sistema primer ordre

Tal com s'ha raonat en l'apartat anterior, es decideix modelar els models dels dos motors de corrent continu que disposa el robot rastrejador a un sistema de primer ordre identificant el guany (K) i la constant de temps (τ) de 10 mostres diferents de cada motor per cada cycle de treball. Les proves s'han realitzat sobre la mateixa pista de circuit de fusta melaminat, obtenint un model més acord a les condicions de pes, parell, força de fricció i inèrcia, que el robot rastrejador es trobarà a l'hora de realitzar el circuit.

Per a l'obtenció de les diferents mostres de respostes del motor, com a entrada $X(t)$ s'aplica una senyal PWM amb diferent cicles de treball per a cada mostra, compresos entre el 20% i 60% amb increments del 10%, a una freqüència de 4Khz, en el que es pot considerar una tensió continua mitja comprès entre 1,8 volts i 5,4 volts, tal com es mostra a la figura 25.

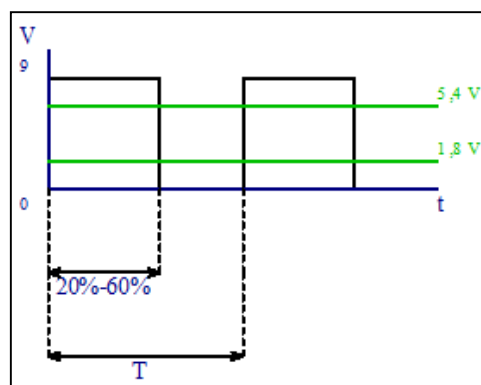


Figura 25. Senyal entrada

Com a resposta $Y(t)$ s'obté les velocitats dels motors (cm/s), mitjançant comptatge de polsos dels encoders.

L'adquisició de les dades de les velocitats dels motors es realitzen per via bluetooth, visualitzant-lo per hyperterminal que ens ofereix el Windows XP, amb un temps de mostreig de cada 100 ms.

Els resultats de les 10 mostres de cada motor segons el cicle de treball aplicat s'adjunten en el punt B de l'annex del present projecte.

La senyal obtinguda per l'adquisició de dades es tracta d'una senyal discreta amb un temps de mostreig de 100ms, pel que s'ha aproximat a una senyal continua, tal com es pot observar en les gràfiques que es proporcionen en el punt B de l'annex, en el que s'ha usat les comandes "stairs" i "plot" que ens facilita el Matlab per a la visualització de senyals discretes i contínues respectivament.

A partir de les gràfiques de les mostres obtingudes, per obtenir una aproximació del model equivalent del sistema d'una planta de primer ordre, s'utilitza la comanda "ident" del Matlab, en el que indicant la senyal d'entrada $X(t)$ d'un PWM amb el cicle de treball que s'escau, i la resposta $Y(t)$ aconseguida en les adquisicions de dades, ens identifica aproximadament el sistema equivalent de primer ordre amb un error inferior al 8%.

Pels resultats de les funcions transferències de totes les mostres aconseguides estan documentades en el punt B de l'annex, en el qual s'ha considerat fer una mitjana de les 10 funcions de transferència que conté cada cicle de treball i motor, de manera que en la taula 11 queda reflectida els resultats aconseguits de les mitjanes de les diferents funcions de transferència per cada cicle de treball i motor.

Cicle de treball	Motor esquerra	Motor dret
20%	$F_{E(20\%)}(s) = \frac{16,61}{0,66s + 1}$	$F_{D(20\%)}(s) = \frac{17}{0,675s + 1}$
30%	$F_{E(30\%)}(s) = \frac{16}{0,442s + 1}$	$F_{D(30\%)}(s) = \frac{16,4}{0,453s + 1}$
40%	$F_{E(40\%)}(s) = \frac{13,74}{0,325s + 1}$	$F_{D(40\%)}(s) = \frac{13,95}{0,329s + 1}$
50%	$F_{E(50\%)}(s) = \frac{11,95}{0,253s + 1}$	$F_{D(50\%)}(s) = \frac{12,14}{0,259s + 1}$
60%	$F_{E(60\%)}(s) = \frac{10,52}{0,212s + 1}$	$F_{D(60\%)}(s) = \frac{10,68}{0,218s + 1}$

Taula 11. Resultats funcions transferències

4.2.1. Simulació i validació models

Amb la funció de transferència dels motors aconseguits en l'apartat anterior, es procedeix a validar el model a partir de la simulació que ens ofereix el simulink del Matlab.

Per a la simulació s'implementa el circuit del sistema en llaç obert de la figura 26 en el simulink, aplicant al sistema aconseguït en els càlculs de la taula anterior una senyal PWM de 4 Khz de freqüència amb el seu cicle de treball corresponent, la mateixa que s'ha aplicat per aconseguir les mostres.

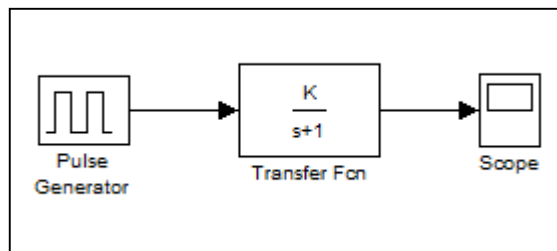


Figura 26. Simulació models llaç obert

En les següents figures es pot apreciar la comparació entre les mostres reals i els resultats de la simulació amb les mitjanes de les funcions de transferències aconseguïdes anteriorment. Es pot dir que les funcions de transferència estan ben aconseguïdes ja que s'acosten molt a les mostres reals, estan dintre de les diferents variacions i marges de senyals, per tant es pot considerar un bon model en tots els casos.

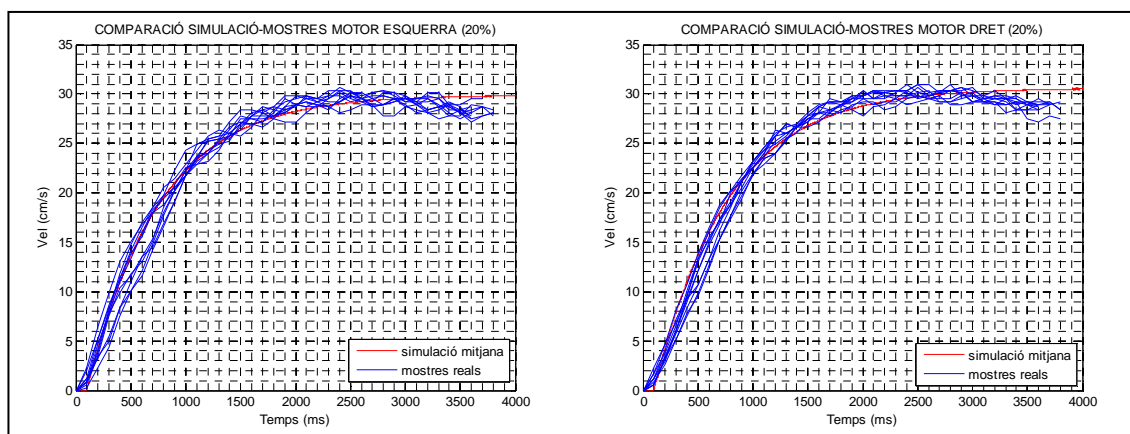


Figura 27. Validació motor esquerra i dret amb PWM al 20%

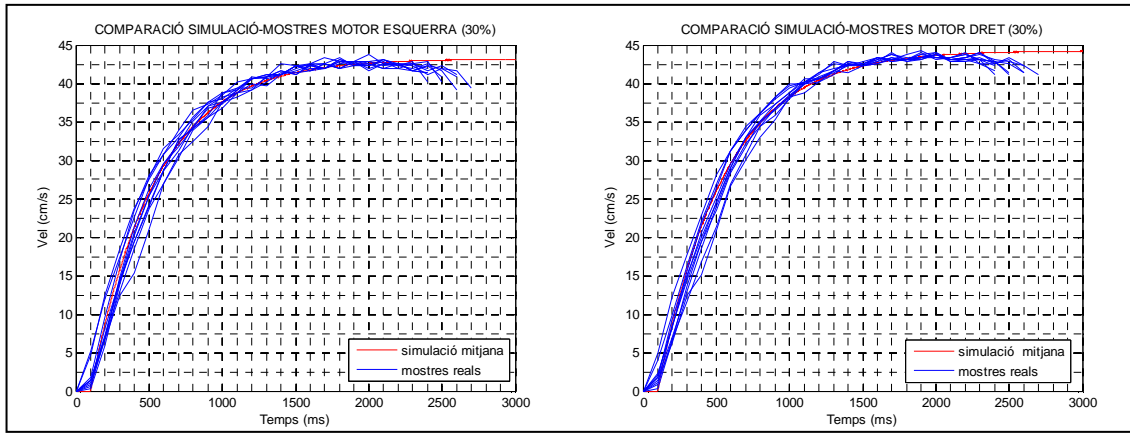


Figura 28. Validació motor esquerra i dret amb PWM al 30%

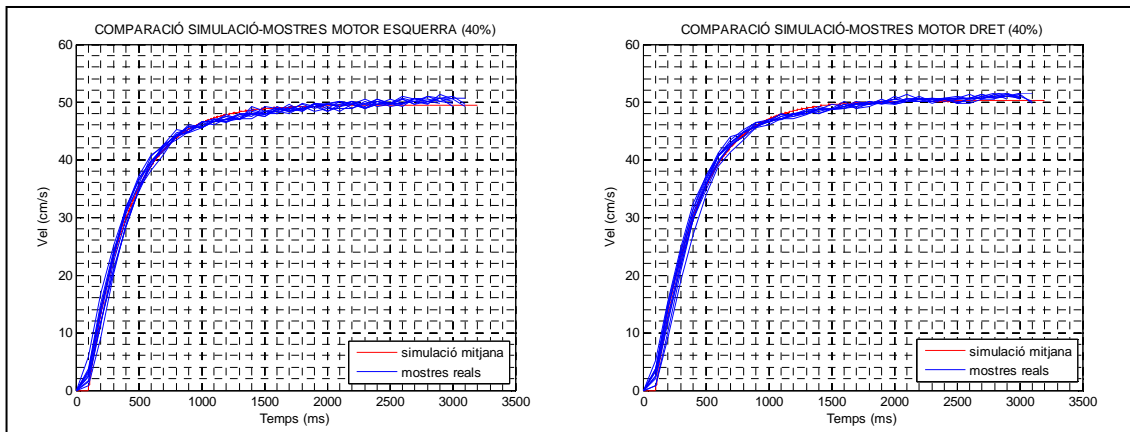


Figura 29. Validació motor esquerra i dret amb PWM al 40%

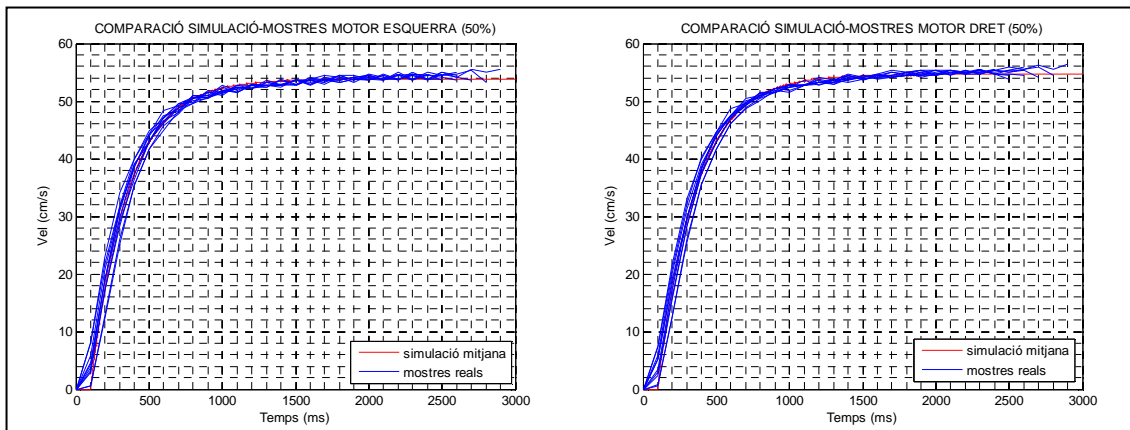


Figura 30. Validació motor esquerra i dret amb PWM al 50%

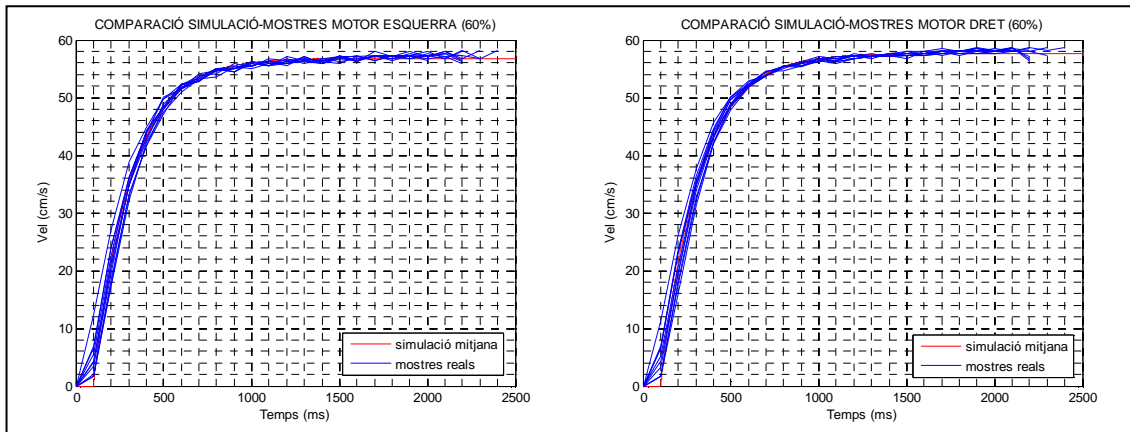


Figura 31. Validació motor esquerra i dret amb PWM al 60%

4.2.2. Linealització models funció transferència

Amb els resultats dels models de funció aconseguits, es pot comprovar que les funcions no són lineals, però s'ha considerat agrupar els diferents models que té cada cicle de treball, en dos models que ens serveixi per a diferents grups de velocitats.

A continuació es visualitza mitjançant la figura 32, la gràfica de resposta de velocitats segons el seu cicle de treball del PWM.

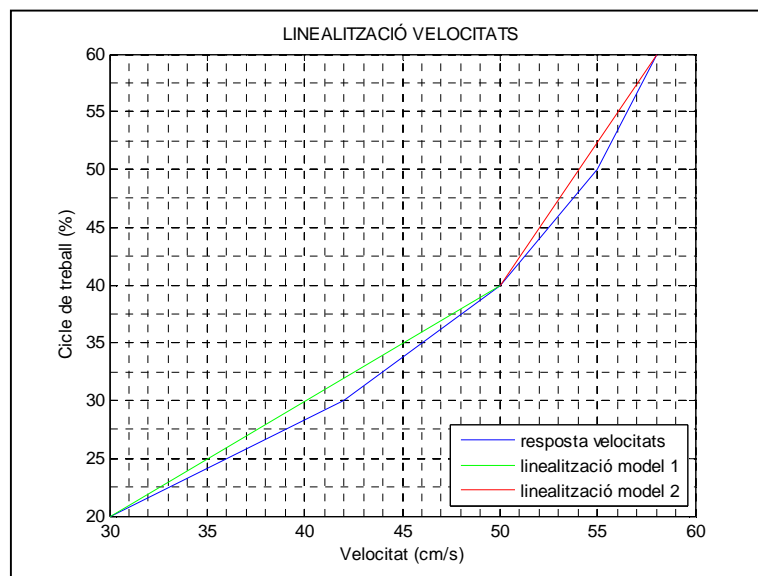


Figura 32. Linealització models

A partir de la gràfica mostrada en la figura anterior, es decideix unir les funcions de transferència dels diferents cicles de treball de la manera que queden reflectides en la taula següent:

Linealització	Motor esquerra	Motor dret
Model 1 30-50 cm/s	$F_{E1}(s) = \frac{16}{0,442s + 1}$	$F_{D1}(s) = \frac{16,4}{0,453s + 1}$
Model 2 50-60 cm/s	$F_{E2}(s) = \frac{11,95}{0,253s + 1}$	$F_{D2}(s) = \frac{12,14}{0,259s + 1}$

Taula 12. Linealització models

4.3. Controladors

La figura 33 que es mostra a continuació es tracta del sistema de control en llaç tancat en el que es controlarà la velocitat desitjada mitjançant un controlador, $C(s)$, que actuarà sobre la planta, $F(s)$, segons la diferència entre la velocitat desitjada i la velocitat real.

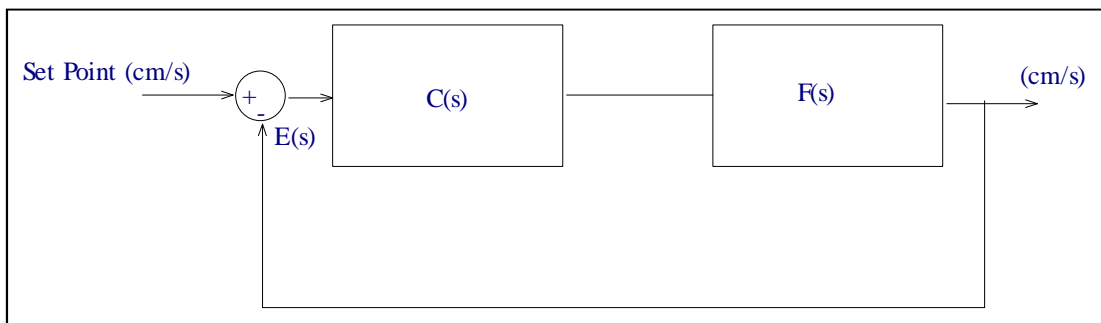


Figura 33. Sistema de control en llaç tancat

El controlador $C(s)$ pot tenir tres accions, el proporcional (P), integral (I) i derivatiu (D). Aquests controladors es poden combinar entre ells de manera que es pot formar un control P, I, PI, PD i PID.

El control proporcional (P) dóna una sortida del controlador que es proporcional a l'error, que descrit des de la seva funció transferència queda:

$$u(t) = K_p \times e(t) \rightarrow C(s) = K_p \quad (\text{Eq. 16})$$

On K_p és un guany proporcional ajustable. Pot controlar qualsevol planta estable, però és limitat i té un error en règim permanent.

El control integral (I) dóna una sortida del controlador que és proporcional a l'error acumulat, el que implica que és una manera de controlar lent.

$$u(t) = K_i \int_0^t e(\tau) \rightarrow C(s) = \frac{K_i}{s} \quad (\text{Eq. 17})$$

La senyal de control $u(t)$ té un valor diferent de zero quan la senyal d'error $e(t)$ és zero. Pel que es conclou que donat una referència constant, o pertorbacions, l'error en règim permanent és zero.

El control PI, es defineix mitjançant la següent equació:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau \rightarrow C(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (\text{Eq. 18})$$

Amb un control proporcional és necessari que hi hagi error per tenir una acció de control diferent de zero. Amb acció integral, un error petit positiu sempre ens donarà una acció de control creixent, i si fos negatiu, la senyal de control decreix. Això fa que l'error en règim permanent sigui sempre zero.

L'acció PD es defineix de la manera següent:

$$u(t) = K_p e(t) + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \rightarrow C(s) = K_p + K_p T_d s \quad (\text{Eq. 19})$$

Aquest control respon a la velocitat del canvi de l'error i corregeix abans que la magnitud de l'error es faci gran, provocant una millora en la precisió en estat estable.

I per últim, el control PID reuneix cada una de les avantatges de les tres accions de control individual. Aquesta acció combinada queda reflectida en la següent equació:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \rightarrow C(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (\text{Eq. 20})$$

4.3.1. Controlador PI continu

En el nostre robot, es decideix implementar un controlador PI, que tal com s'ha explicat en el punt anterior, ens permetrà assolir la velocitat desitjada amb un error en règim permanent nul.

Així doncs, el nostre controlador $C(s)$ tindrà el següent model:

$$C(s) = \frac{K_p s + K_i}{s} \quad (\text{Eq. 21})$$

On K_p és l'acció proporcional i K_i l'acció integral.

Pel disseny del controlador PI, es considera el sistema en llaç tancat que s'ha il·lustrat en la figura 33, on l'equació del sistema en llaç tancat ve donat per l'equació 22 que es mostra a continuació.

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{C(s) \times F(s)}{1 + C(s) \times F(s)} \quad (\text{Eq. 22})$$

On per determinar el comportament del sistema es pren com a equació característica del sistema el denominador de l'equació 22, quedant de la manera següent:

$$1 + C(s) \times F(s) = 0 \tag{Eq. 23}$$

Amb l'equació 23 esmentada, el comportament del sistema es pot igualar com el de la següent equació:

$$s^2 + 2\zeta W_n s + W_n^2 \tag{Eq. 24}$$

On depenent de les especificacions que imposem, obtenim els valors del factor esmorteïment (ζ) i W_n a partir de les equacions següents:

$$MP = e^{\frac{-\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}} \times 100 \tag{Eq. 25}$$

$$ts_{(2\%)} = \frac{4}{\zeta W_n} \tag{Eq. 26}$$

En la taula següent es visualitza els resultats del disseny dels controladors PI obtinguts en el punt C de l'annex del present document amb unes especificacions de sobrepic màxim igual o inferior al 25% ($MP \leq 25\%$) i un temps d'establiment amb criteri 2% igual o inferior a 1 segon ($ts \leq 1s$).

Linealització	Motor esquerra	Motor dret
Model 1	$C_{E1}(s) = \frac{0,16s + 2,76}{s}$	$C_{D1}(s) = \frac{0,16s + 2,76}{s}$
Model 2	$C_{E2}(s) = \frac{0,08s + 2,12}{s}$	$C_{D2}(s) = \frac{0,1s + 2,13}{s}$

Taula 13. Controladors PI continus teòrics

4.3.2. Simulació i sintonització controladors PI continus

A partir dels valors teòrics calculats, es simula pel simulink que ens ofereix el Matlab per tal d'acabar d'ajustar els controladors fins a aconseguir les respostes desitjades. Per la simulació s'ha utilitzat el sistema que es mostra en la figura 34.

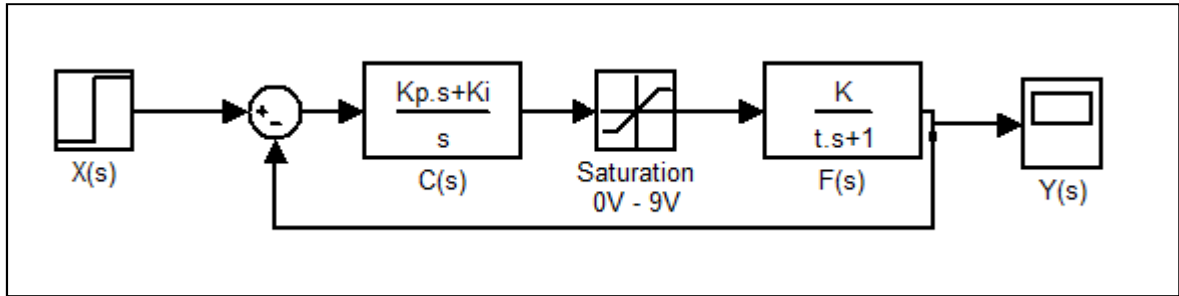


Figura 34. Simulació sistema llaç tancat per ajustatge de controladors continus

On X(s) hi apliquem una entrada referència, que serà la velocitat que desitgem, i Y(s) serà la resposta del sistema amb el controlador C(s) calculats en la taula 13 anterior i la funció transferència corresponent F(s). S'ha afegit un saturador, ja que els motors només poden estar alimentats entre 0 i 9 Volts.

Les figures que es mostren a continuació, són els resultats obtinguts de la simulació amb els ajustatges de Kp i Ki de manera que assolim les respostes idònies.

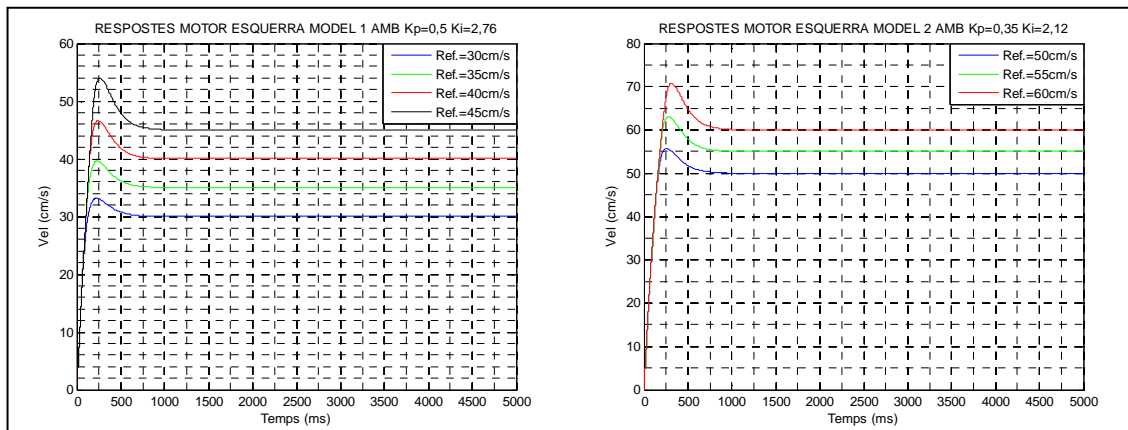


Figura 35. Respostes amb els controladors PI continus ajustats del motor esquerra

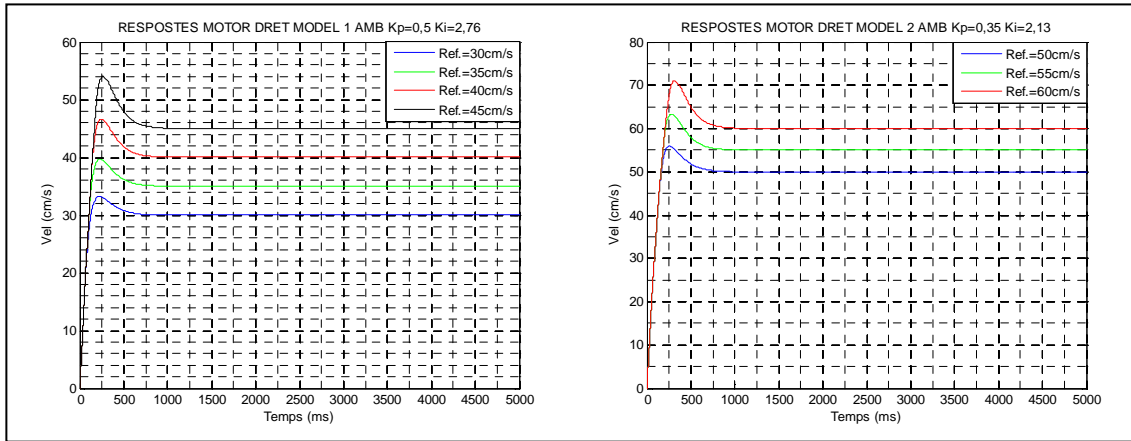


Figura 36. Respostes amb els controladors PI continus ajustats del motor dret

Per les gràfiques es pot comprovar que en tots els casos, es té un sobrepic inferior al 25% i un temps d'establiment amb el criteri del 2% inferior a 1 segon. Així doncs, en la taula 14, queda reflectida els controladors ajustats respecte als teòrics.

Linealització	Motor esquerra	Motor dret
Model 1	$C_{E1}(s) = \frac{0,5s + 2,76}{s}$	$C_{D1}(s) = \frac{0,5s + 2,76}{s}$
Model 2	$C_{E2}(s) = \frac{0,35s + 2,12}{s}$	$C_{D2}(s) = \frac{0,35s + 2,13}{s}$

Taula 14. Controladors PI continus ajustats

5. IMPLEMENTACIÓ CONTROL DIGITAL

El funcionament d'un microprocessador, sigui adquirir dades, controlar, filtrar, etc., el fa de forma discretitzada, és a dir, no ho fa contínuament, sinó en intervals de temps. En el capítol anterior, s'ha treballat en sistemes continus que treballen en el pla "s", de manera que en aquest apartat hem de convertir el sistema continu en sistemes discrets que treballin en el pla "z" de manera que el microprocessador ho pugui implementar.

5.1. Algoritme controlador PI digital

L'algoritme analògic d'un controlador PI ve donat per l'equació següent:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e dt \tag{Eq. 27}$$

On sabem que $u(t)$ és la sortida del controlador, $e(t)$ l'error del senyal i K_p i K_i són les constants del PI. L'algoritme de l'equació 27 amb la transformada de Laplace, queda expressada en l'equació 28.

$$U(s) = \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) E(s) \tag{Eq. 28}$$

El sistema de control digital en llaç tancat en el microprocessador queda il·lustrat en la figura 37, en el que s'observa que el microprocessador ha de realitzar diferents accions per cada T escollit (temps de mostreig).

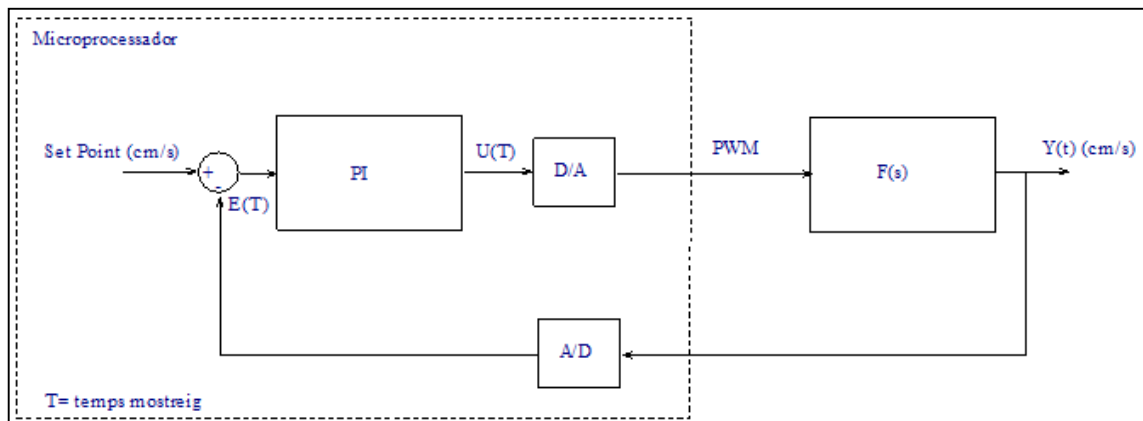


Figura 37. Control digital

Aquest temps de mostreig serà de 0.1 segons. S'ha decidit aquest temps d'acord amb la dinàmica de la planta i també per la resolució i precisió del nostre encoder, que no ens permet temps ràpids ja que llavors el comptatge de polsos de l'encoder seran erronis degut a que comptaria els mateixos polsos de manera continuada.

L'algoritme del PI en forma continua de l'equació 28, s'ha de convertir-la en forma discretitzada per a poder-lo implementar en el microprocessador. Mitjançant l'aproximació rectangle:

$$s = \frac{1-z^{-1}}{T} \quad (\text{Eq. 29})$$

Després de la seva substitució i tenint en compte que on hi ha z^{-1} correspon a una mostra anterior, l'algoritme queda reflectida en l'equació 30.

$$u(k) = u(k-1) + K_1 \times e(k) + K_2 \times e(k-1) \quad (\text{Eq. 30})$$

De manera que

$$K_1 = K_p + K_i T \quad (\text{Eq. 31})$$

$$K_2 = -K_p \quad (\text{Eq. 32})$$

Els coeficients K_1 i K_2 per substituir dins l'anterior equació 30, es troben a partir del domini z de l'equació característica del sistema en llaç tancat en el que el controlador PI discret queda expressada tal com es mostra en l'equació 33.

$$C(z) = \frac{K_1 + K_2 z^{-1}}{1 - z^{-1}} \quad (\text{Eq. 33})$$

5.2. Controlador PI discret

En aquest apartat es procedeix a calcular els valors de K1 i K2 del controlador PI discret descrit en l'equació 28 de l'apartat anterior.

Mitjançant la conversió que ens ofereix el Matlab amb la comanda "c2d" per passar de continu a discret, s'ha convertit les funcions de transferències continus dels motors a discrets, obtenint els resultats que es mostra en la taula 15.

Discretització	Motor esquerra	Motor dret
Model 1 30-50 cm/s	$F_{E1}(z) = \frac{3,24}{z - 0,797}$	$F_{D1}(z) = \frac{3,25}{z - 0,802}$
Model 2 50-60 cm/s	$F_{E2}(s) = \frac{3,9}{z - 0,673}$	$F_{D2}(z) = \frac{3,88}{z - 0,679}$

Taula 15. Discretització funcions de transferències planta motors

Amb els models aconseguits en la taula anterior, s'ha dissenyat i calculat els controladors PI discrets amb les mateixes especificacions indicades en el capítol anterior de $MP \leq 25\%$ i $ts(2\%) \leq 1s$, obtenint els resultats reflectits en la taula 16 a partir dels càlculs que es mostra en el punt D de l'annex del projecte.

Discretització	Motor esquerra	Motor dret
Model 1	$C_{E1}(z) = \frac{0,303 - 0,08z^{-1}}{1 - z^{-1}}$	$C_{D1}(z) = \frac{0,304 - 0,11z^{-1}}{1 - z^{-1}}$
Model 2	$C_{E2}(z) = \frac{0,22 - 0,058z^{-1}}{1 - z^{-1}}$	$C_{E1}(z) = \frac{0,22 - 0,06z^{-1}}{1 - z^{-1}}$

Taula 16. Controladors PI discrets teòrics

5.2.1. Simulació i sintonització controladors PI discrets

A partir dels valors teòrics calculats, es simula pel simulink que ens ofereix el Matlab per tal d'acabar d'ajustar els controladors fins a aconseguir les respostes desitjades. Per la simulació s'ha utilitzat el sistema que es mostra en la figura 38.

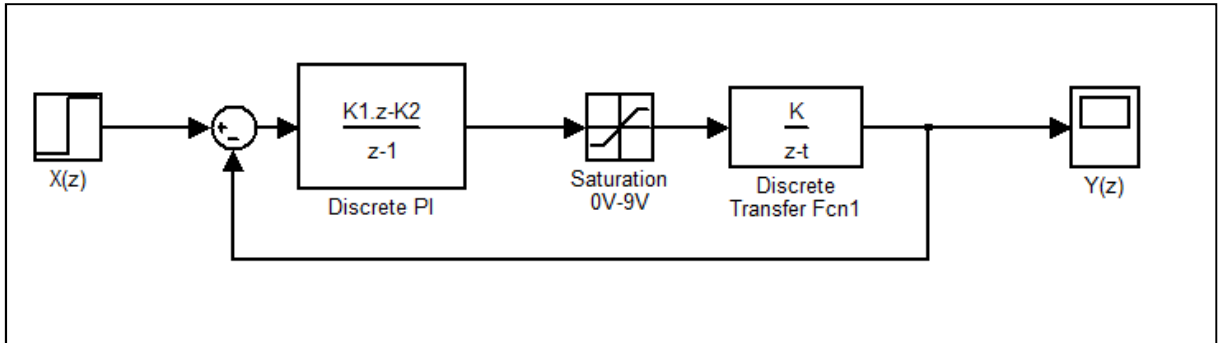


Figura 38. Simulació sistema llaç tancat per ajustatge de controladors discrets

On $X(z)$ hi apliquem una entrada referència, que serà la velocitat que desitgem, i $Y(z)$ serà la resposta del sistema amb el controlador $C(z)$ calculats en la taula 16 anterior i la funció de transferència corresponent $F(z)$. S'ha afegit un saturador, ja que els motors només poden estar alimentats entre 0 i 9 Volts.

Les figures que es mostren a continuació, són els resultats obtinguts de la simulació amb els ajustatges de $K1$ i $K2$ de manera que assolim les respostes idònies.

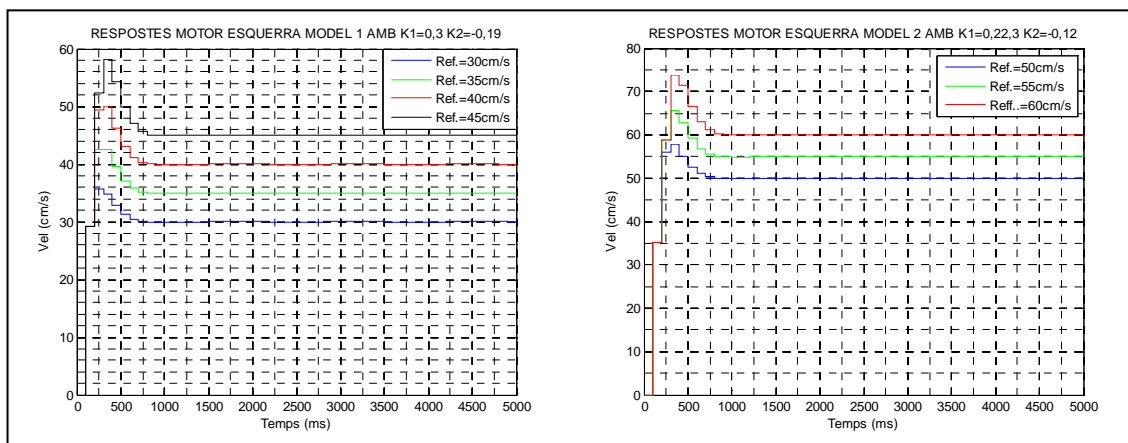


Figura 39. Respostes amb els controladors PI discrets ajustats del motor esquerra

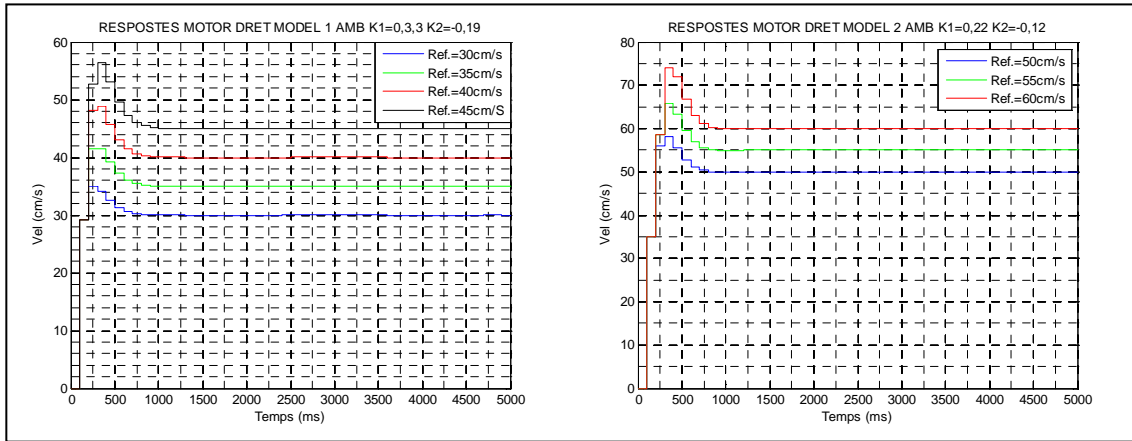


Figura 40. Respostes amb els controladors PI discrets ajustats del motor dret

Per les gràfiques es pot comprovar que en tots els casos, es té un sobrepic inferior al 25% i un temps d'establiment amb el criteri del 2% inferior a 1 segon. Així doncs, en la taula 17, queda reflectida els controladors ajustats respecte als teòrics.

Discretització	Motor esquerra	Motor dret
Model 1	$C_{E1}(z) = \frac{0,3 - 0,19z^{-1}}{1 - z^{-1}}$	$C_{D1}(z) = \frac{0,3 - 0,19z^{-1}}{1 - z^{-1}}$
Model 2	$C_{E2}(z) = \frac{0,22 - 0,12z^{-1}}{1 - z^{-1}}$	$C_{E1}(z) = \frac{0,22 - 0,12z^{-1}}{1 - z^{-1}}$

Taula 17. Controladors PI discrets ajustats

5.3. Control trajectòria

Per a que el robot rastrejador sigui capaç de seguir el circuit marcat per una línia negra, es decideix implementar en el PIC el control que es reflecteix en la figura 41.

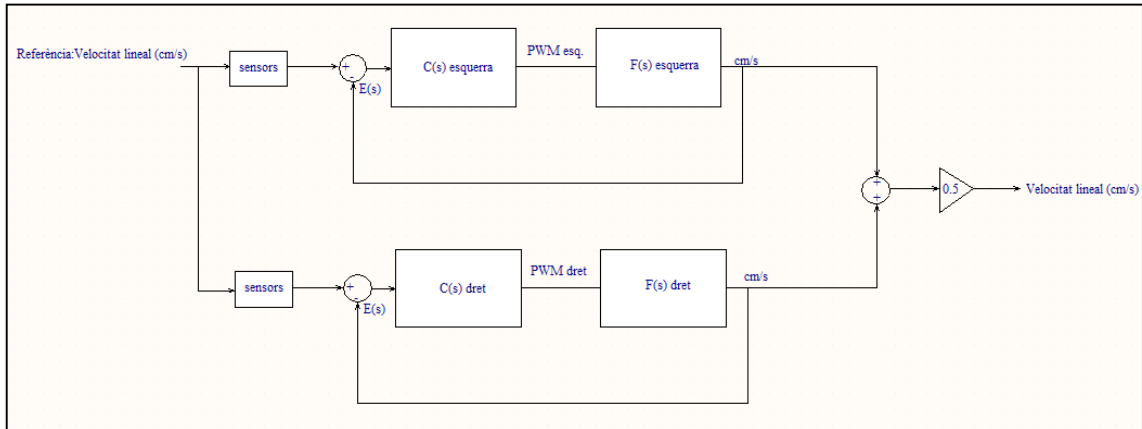


Figura 41. Control trajectòria robot rastrejador

D'aquesta manera, des del nostre PC ordenarem, per via bluetooth, que el robot rastrejador realitzi la trajectòria del circuit a una velocitat constant. Per enviar la velocitat desitjada, es realitza a través del teclat de l'ordinador, els números compresos entre "1" i "7", que correspondran a les velocitats de 30cm/s a 60cm/s amb increments de 5cm/s cada tecla.

El comportament del robot rastrejador davant de corbes estaran controlats pels 6 sensors que es disposa, en el que per cada situació dels sensors s'ha estimat l'angle de gir mitjançant l'equació 34, on D és la distància entre les dues rodes, 14cm, i respectant l'equació 35, de manera que compleixi la velocitat lineal del robot rastrejador.

$$\theta = \frac{Vel.\text{lineal}_{dret} - Vel.\text{lineal}_{esquerra}}{D} \tag{Eq. 34}$$

$$Vel.\text{lineal}_{robot} = \frac{Vel.\text{lineal}_{dret} + Vel.\text{lineal}_{esquerra}}{2} \tag{Eq. 35}$$

D'aquesta manera, segons la lectura dels sensors, s'aplicarà una velocitat de referència determinada a cada motor controlats pel control PI implementats en el capítol anterior. I aplicant l'equació 34 anterior, es visualitza el resultat de la velocitat lineal del robot pel hyperterminal a través de bluetooth.

6. RESULTATS

En aquest apartat s'ha implementat el control PI digital en el PIC 18F452 amb l'algorisme del PI mostrat en el capítol anterior i ajustant els valors simulats de K1 i K2 de la taula 17, aconseguint els resultats pràctics que es mostren en els apartats següents. L'adquisició de dades de les velocitats i les ordres donades de velocitat desitjada, es realitza a través del software de comunicació hyperterminal amb comunicació per bluetooth.

6.1. Resultats motors amb velocitat desitjada

S'han aplicat unes velocitats de referència compreses entre 30 cm/s i 60 cm/s amb increments de 5 cm/s a través de bluetooth des del teclat del nostre PC, aconseguint els resultats que es mostren en les figures següents amb els valors de K1 i K2 ajustats.

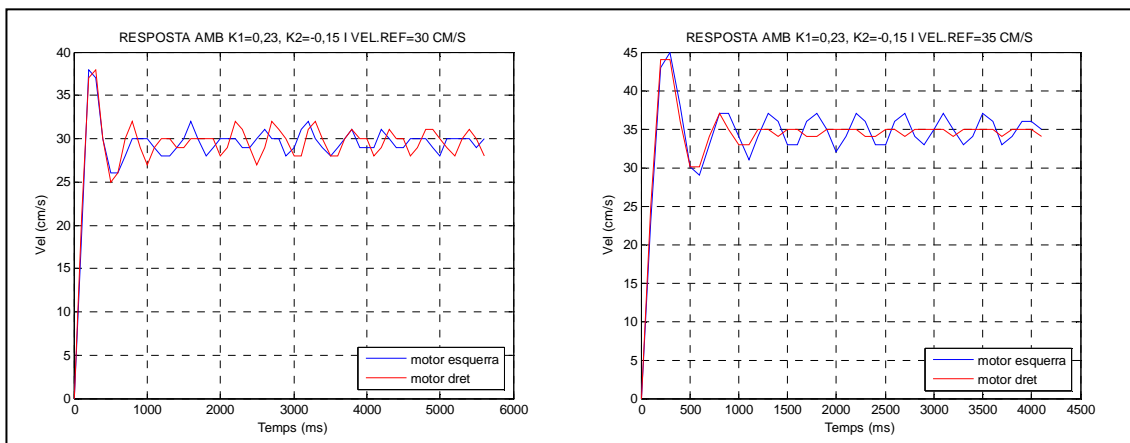


Figura 42. Resposta motors amb ref. 30cm/s i 35cm/s

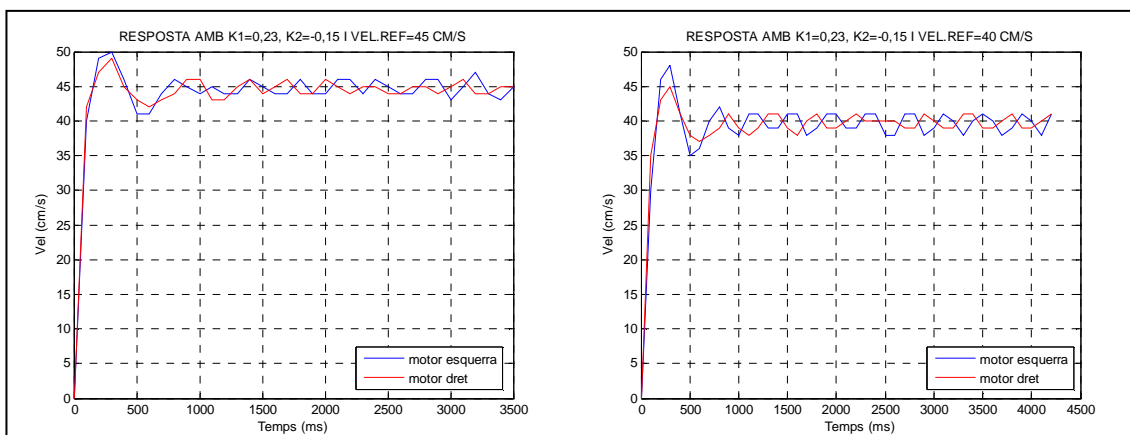


Figura 43. Resposta motors amb ref. 40cm/s i 45cm/s

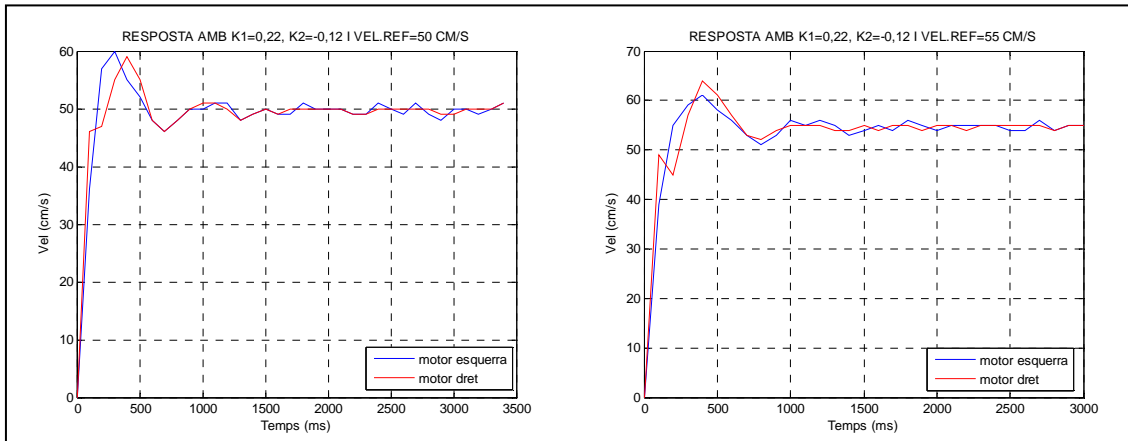


Figura 44. Resposta motors amb ref. 50cm/s i 55cm/s

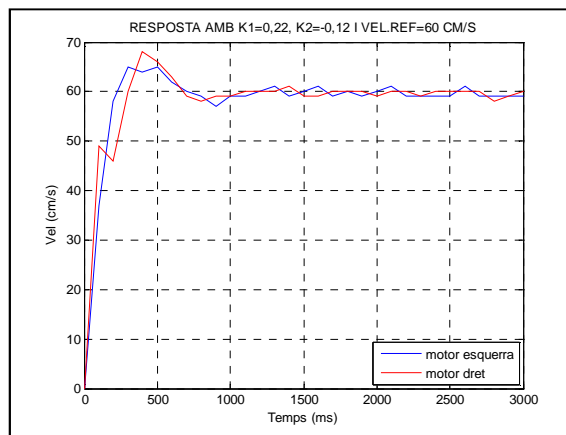


Figura 45. Resposta amb ref. 60cm/s

Es pot dir que s'aconsegueix en tots els casos, que el sobrepic sigui igual o inferior al 25% i amb un temps d'establiment d'aproximadament a 1 segon, tal com s'ha especificat en les especificacions desitjades.

També es pot apreciar que en la resposta transitòria fins a que s'estabilitza, hi ha unes petites variacions de velocitats per cada motor, que fa que el robot rastrejador al principi pateixi canvis de gir fins a estabilitzar-se.

6.2. Resultats velocitat lineal robot

Els resultats d'aquest apartat consisteix en que el robot segueixi una línia recta amb una velocitat lineal desitjada des del nostre PC per via bluetooth, compresos entre 30cm/s i 60cm/s amb increments de 5cm/s. S'aconsegueix que el sobrepic sigui igual o inferior al 25% i amb un temps d'establiment aproximadament d'un segon. També es pot apreciar que un cop establitzat, segueix la línia recta a la velocitat desitjada, amb unes variacions mínimes de ± 1 cm.

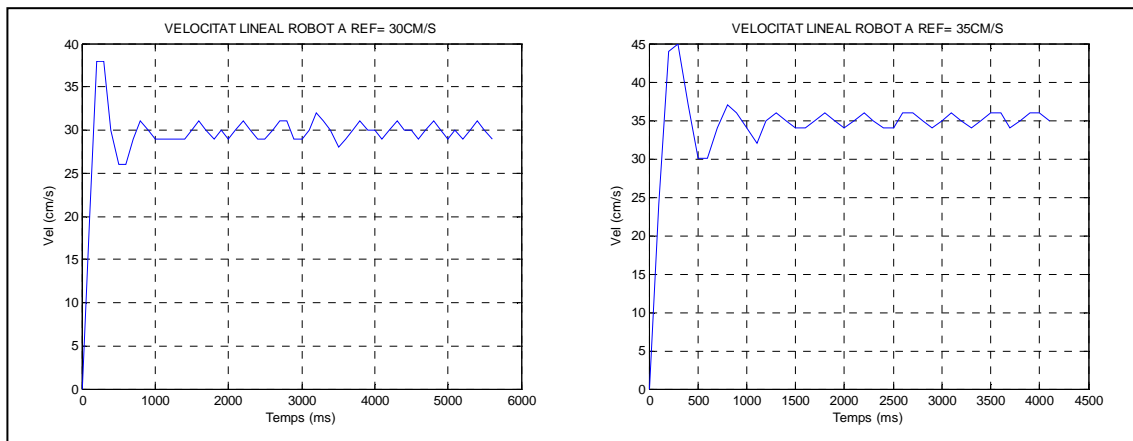


Figura 46. Velocitat lineal robot a 30cm/s i 35cm/s

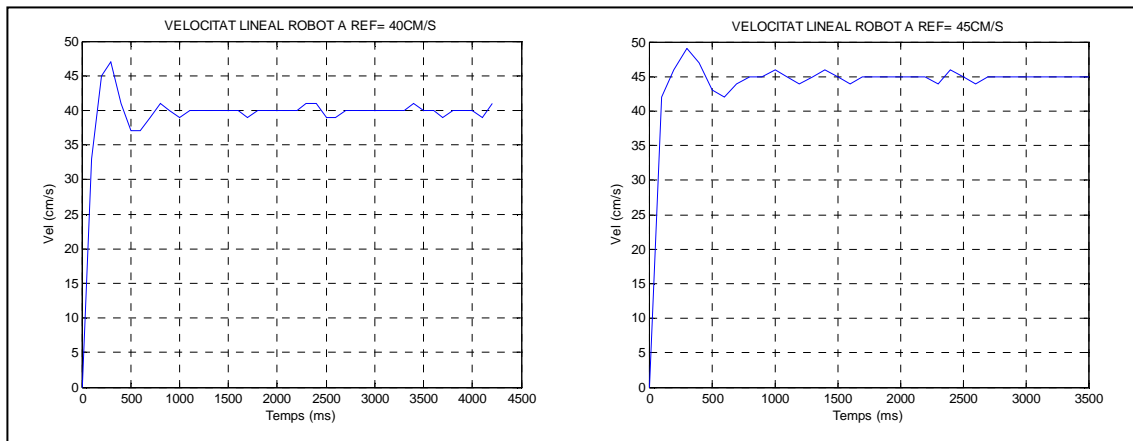


Figura 47. Velocitat lineal robot a 40cm/s i 45cm/s

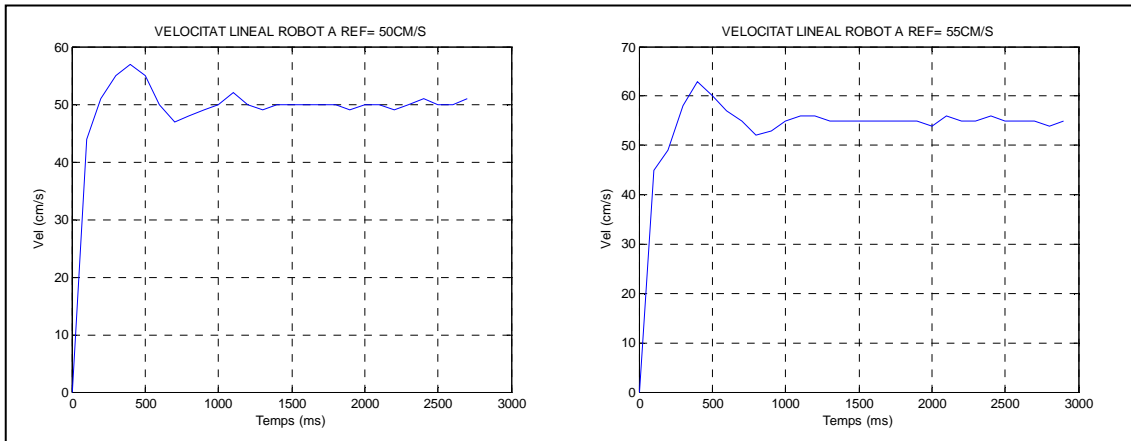


Figura 48. Velocitat lineal robot a 50cm/s i 55cm/s

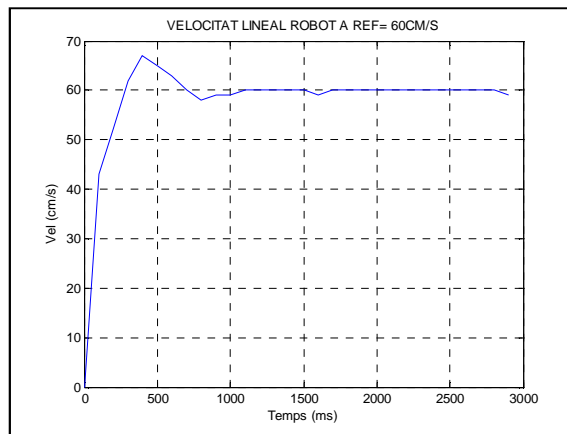


Figura 49. Velocitat lineal robot a 60cm/s

6.3. Resultats velocitat lineal robot amb pertorbació

Els resultats que es mostren en les següents figures, són els aconseguits de manera que el robot rastrejador segueix una línia recta a unes velocitats desitjades entre 30cm/s i 60 cm/s amb increments de 5cm/s, ordenats des de l'ordinador a través de bluetooth, i en aquesta mateixa recta, s'ha col·locat un obstacle, un llibre amb un pes de 190g, com a pertorbació per veure el comportament del control PI.

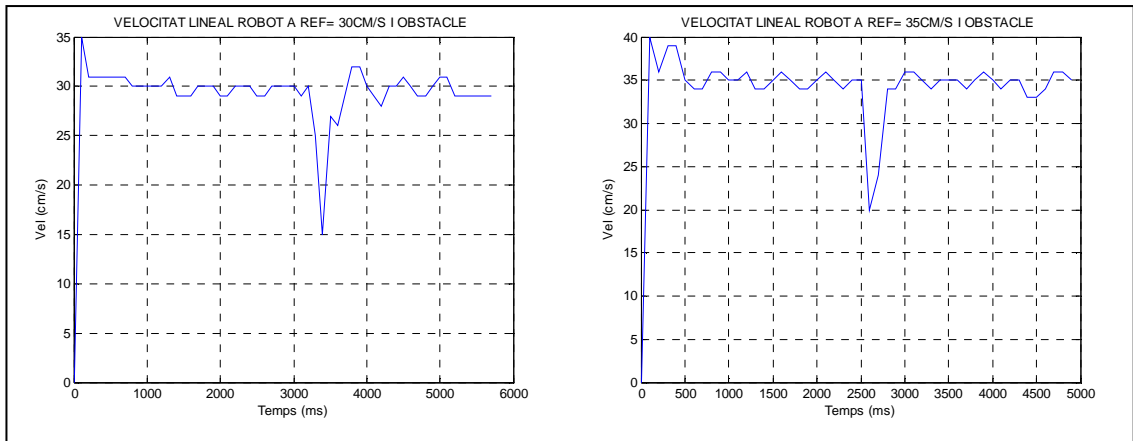


Figura 50. Resposta amb pertorbació a 30cm/s i 35cm/s

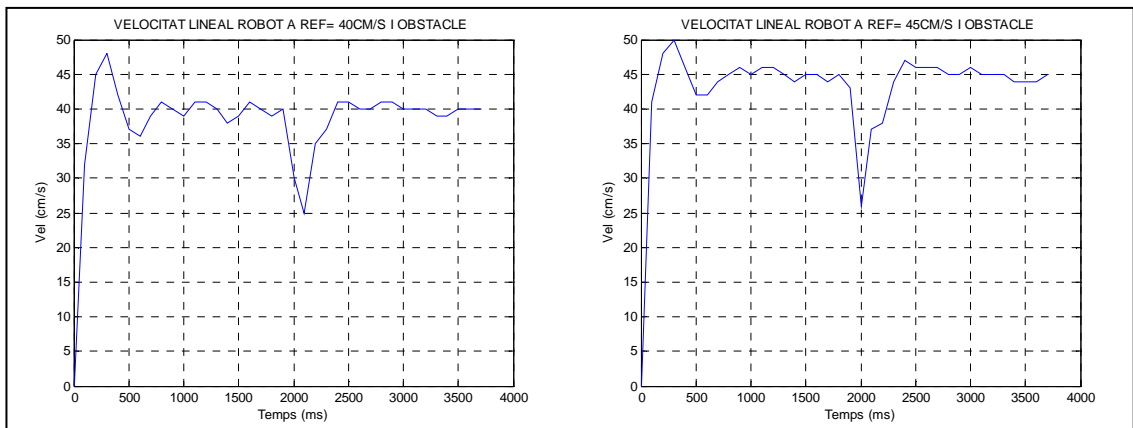


Figura 51. Resposta amb pertorbació a 40cm/s i 45cm/s

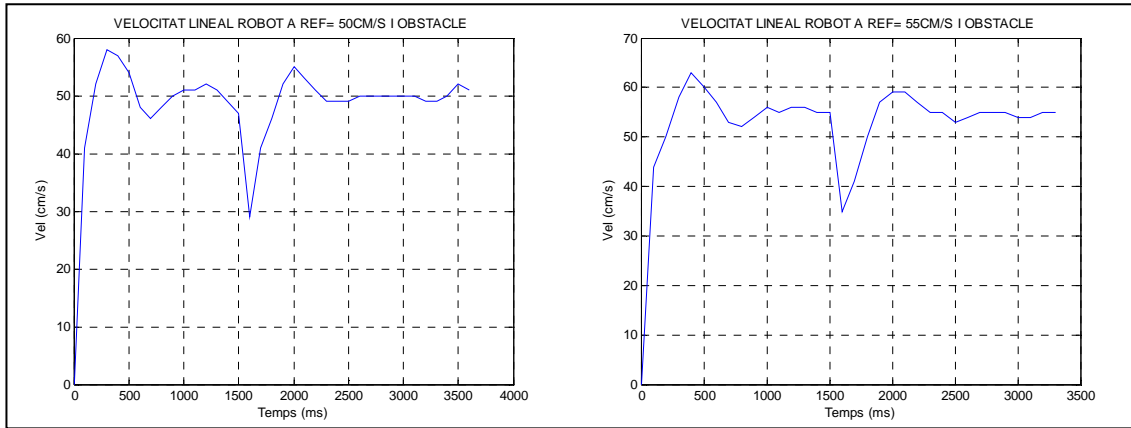


Figura 52. Resposta amb pertorbació a 50cm/s i 55cm/s

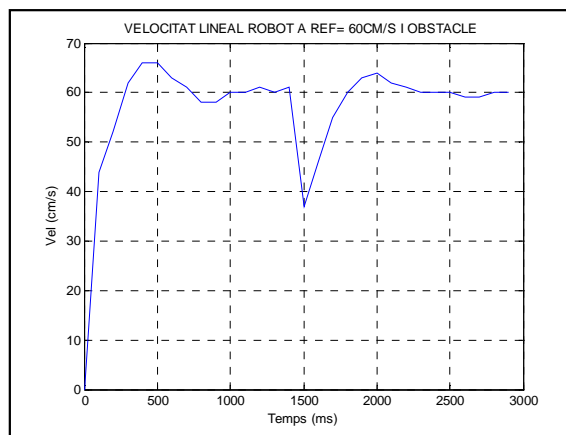


Figura 53. Resposta amb pertorbació a 60cm/s

Es pot comprovar que, un cop el robot rastrejador xoca amb l'obstacle que es troba en el seu camí, la seva velocitat es veu reduïda considerablement, però el mateix controlador PI rectifica aquesta variació de velocitat fins a aconseguir la velocitat desitjada arrossegant l'obstacle durant el seu recorregut.

6.4. Resultats velocitat lineal robot amb trajectòria

S'ha realitzat un circuit determinat sobre el taulell de fusta melaminat blanc marcat amb cinta aïllant negra que es mostra en la figura 54, de manera que des de l'ordinador per via bluetooth, s'ha indicat que realitzi a cada volta una velocitat constant desitjada seguint la línia marcada negra. Aquestes velocitats són de 30cm/s, 40cm/s i 50cm/s.



Figura 54. Circuit trajectòria

Tal com s'ha dit, les velocitats de 30cm/s, 40cm/s i 50cm/s es realitza a través de bluetooth teclejant les tecles 1, 3 i 5 respectivament, visualitzant les velocitats lineals del robot per hyperterminal. Els resultats aconseguits per l'hyperterminal es visualitza en la figura 55 que es pot veure a continuació.

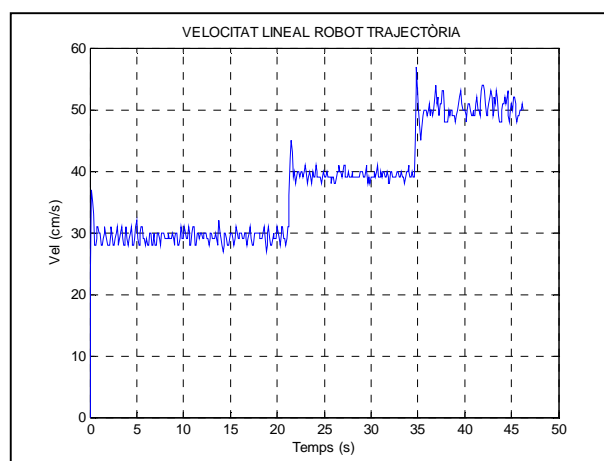


Figura 55. Resposta amb trajectòria

Es pot comprovar que el robot rastrejador realitza el circuit amb les velocitats desitjades que hem ordenat a través de l'hyperterminal per via bluetooth satisfactòriament.

7. RESUM DE PRESSUPOST

El cost total del projecte, IVA no inclòs, és de nou cents noranta euros amb set cèntims.

8. CONCLUSIONS

Amb el disseny electrònic i mecànic proposat, s'ha aconseguit que el robot rastrejador respongui satisfactòriament el que ens hem proposat.

S'ha aconseguit de manera òptima una comunicació per bluetooth entre el robot rastrejador i l'ordinador, de manera que ens ha facilitat a l'hora de donar ordres des de l'ordinador, i també de les adquisicions de dades de les velocitats i lectura de nivell de bateria sense l'ús de cables, que ens haguessin dificultat a l'hora del modelatge dels motors.

Els models simplificat dels motors aconseguits no són uns models perfectes, però sí que podem considerar vàlids per l'aplicació que necessitem.

El control PI ens ha satisfet les demandes que necessitàvem per a que controlés les velocitats dels motors de manera autònoma davant de l'ordre donada de velocitat desitjada i enfront a pertorbacions que es pugui trobar en el camí del robot rastrejador

Les simulacions dels controladors per simulink, és una bona manera per donar un punt de partida a l'hora d'implementar el control digital en un PIC, de manera que ens facilita el procés.

Es podria aconseguir un ajustatge més precís dels valors de K_p i K_i a base de "prova i error" per a aconseguir un control més eficient, tot i que amb els valors trobats, compleixen els objectius proposats.

S'ha aconseguit que el robot rastrejador realitzi la trajectòria d'un circuit determinat a una velocitat constant desitjada des de l'ordinador per via bluetooth. Tot i que a altes velocitats tenim les limitacions dels girs, que ve condicionat per la distància entre les dues rodes, pel que una solució seria reduir aquesta distància a l'hora del muntatge de manera que aconseguiríem més gir en un temps curt.

Una altra solució seria modificar la part mecànica basant-se solament en un motor per les dues rodes com a tracció i un servomotor per controlar l'angle de gir del robot rastrejador, tot amb control de velocitat i gir.

Jesús Font Fuentes

Enginyer Tècnic Industrial especialitzat en Electrònica Industrial

Olot, 2 d' Abril del 2012

9. RELACIÓ DE DOCUMENTS

El present projecte consta dels documents de memòria, plànols, plec de condicions, estat d'amidament i pressupost.

10. BIBLIOGRAFIA

BARRIENTOS CRUZ, ANTONIO. Control de Sistemas Continuos. Primera edición. Editorial McGrawHill. Madrid. 1996.

MALVINO, ALBERT PAUL. Principios de Electrónica. Sexta edición. Editorial McGrawHill. Madrid. 2000.

OGATA, KATSUHIKO. Sistemas de Control en Tiempo Discreto. Segunda edición. Editorial Prentice Hall. España. 1996.

REINOSO GARCÍA, OSCAR. Control de Sistemas Discretos. Primera edición. Editorial McGrawHill. Madrid. 2004.

11. GLOSSARI

Altium Design: Programa informàtic per a l'elaboració d'esquemàtics i circuits impresos.

AT: Comandes AT, són instruccions codificats Hayes que conformen un llenguatge de comunicació entre l'home i un terminal mòdem.

Banda ISM: Bandes de radiofreqüències reservades per a ús no comercial.

c2d: Comanda que s'aplica al Matlab per a la conversió de sistemes continus a discrets.

CCS: Software per a la programació en llenguatge en "C".

Hyperterminal: Software de comunicació que incorpora el windows XP.

Ident: Comanda que s'aplica al Matlab per a l'identificació paramètrica d'un sistema.

Li-ion: Bateria recarregable de ions de liti.

Li-Po: Bateria recarregable de liti-polímer.

Matlab: Software matemàtic que ofereix un entorn de desenvolupament integrat amb llenguatge de programació propi.

NiCd: Bateria recarregable de níquel i cadmi.

NiMH: Bateria recarregable de níquel i Hidrur metàl·lic.

Pcb: Printed circuit board, la part de circuit imprès.

PWM: Pulse width modulation, modulació d'ample de pols.

RS232: Recommended Standard 232, interfase per l'intercanvi de dades binaris.

Simulink: Software de simulació que incorpora el software Matlab.

Step-Down: Pas reductor, fonts commutades reductors.

TTL: transistor-transistor logic, és una família lògica transistor a transistor.

WPAN: Area de xarxa personal, xarxa per la comunicació entre diferents dispositius.

A. CÀLCULS DISSENY CIRCUIT

En aquest apartat es mostra els càlculs obtinguts dels dissenys dels diferents circuits que conformen el robot rastrejador.

A.1. Càlcul dimensionat A/D

$$V_{A/D} = V_{bat} \times \frac{POT1}{R1 + POT1} \quad (\text{Eq. 36})$$

On els valors coneguts són els següents:

$$V_{A/D} = 3,3V$$

$$V_{bat} \cong 15V$$

$$R1 = 10K\Omega$$

Substituint i calculant l'equació 36 obtenim el valor de POT1:

$$POT1 \cong 2,8K\Omega$$

A.2. Càlculs reguladors de tensió

$$V_{out} = V_{ref} \times \left(1 + \frac{R2}{POT1} \right) \quad (\text{Eq. 37})$$

On els valors són els següents:

$$V_{out} = 9V$$

$$V_{ref} = 1,23V$$

$$R2 = 10K\Omega$$

Substituint i calculant l'equació 37 obtenim el valor de POT1:

$$POT1 \cong 1,5K\Omega$$

A.3. Càlculs sensors

$$V = R \times I \tag{Eq. 38}$$

En el cas de l'emissor, es recomana no sobrepassar una intensitat de 50mA segons les especificacions, per tant es limita la intensitat a 10 vegades menys el corrent màxim admès.

Per tant els valors són els següents:

$$V = 3,3V$$

$$I_{\max} = 5mA$$

$$V_{LED} = 0,7V$$

Substituint i resolent l'equació 38 obtenim el valor de la resistència de l'emissor:

$$R \cong 470\Omega$$

A.4. Càlculs adaptadors

$$V = R \times I \tag{Eq. 39}$$

Ens servirà per limitar a 1 mA el corrent a circular pels leds indicatius dels triggers, de manera que sabent els valors següents:

$$V = 3,3V$$

$$I_{\max} = 1mA$$

$$V_{LED} = 0,7V$$

Substituint i calculant l'equació 39 s'obté el valor de la resistència dels leds indicatius:

$$R \cong 2,2K\Omega$$

A.5. Càlcul reductor

$$Vel_{\text{reductor}} = Velocitat_{\text{nominal}} \times Relació_{\text{reductor}} \quad (\text{Eq. 40})$$

On els valors que sabem són els següents:

$$Velocitat_{\text{nominal}} = 4580\text{rpm}$$

$$Relació_{\text{reductor}} = \frac{1}{19}$$

On substituïm els valors anteriors i resollem l'equació 40, obtenint la velocitat nominal:

$$Vel_{\text{reductor}} \cong 241\text{rpm}$$

B. MOSTRES RESPOSTES DELS MOTORS

En aquest apartat es procedeix a ordenar les mostres aconseguides en els motors segons el seu cicle de treball i les seves funcions de transferències respectives.

B.1. Mostres respostes motors amb cicle de treball 20%

A continuació es mostra els resultats de les 10 mostres aconseguides del motor esquerra i dret aplicant un PWM d'un cicle de treball del 20%.

B.1.1. Mostra nº1

MOSTRA Nº1		
TEMPS (ms)	VEL. MOTOR ESQ. (cm/s)	VEL. MOTOR DRET (cm/s)
0	0.00	0.00
100	0.86	1.15
200	3.76	3.47
300	7.81	6.07
400	11.00	9.26
500	13.31	12.15
600	15.92	14.76
700	18.23	16.79
800	19.39	19.97
900	20.55	21.42
1000	21.71	22.58
1100	23.44	23.73
1200	25.47	25.18
1300	25.76	26.05
1400	26.05	26.63
1500	25.76	26.63
1600	26.63	27.21
1700	28.08	28.08
1800	27.50	28.95
1900	27.21	28.37
2000	27.21	27.79
2100	28.08	28.66
2200	28.95	28.95
2300	28.66	29.52
2400	28.08	28.95
2500	28.37	29.23
2600	28.95	29.52
2700	28.95	29.81
2800	27.79	28.95
2900	27.79	28.95
3000	28.66	29.23

Taula 18. Mostra nº1 amb D=20% de 0 a 3000ms

MOSTRA N°1		
TEMPS (ms)	VEL. MOTOR ESQ. (cm/s)	VEL. MOTOR DRET (cm/s)
3100	28.37	29.23
3200	28.08	29.23
3300	27.50	28.08
3400	27.79	28.37
3500	28.37	28.37
3600	28.08	28.95

Taula 19. Mostra n°1 amb D=20% de 3100ms a 3600ms

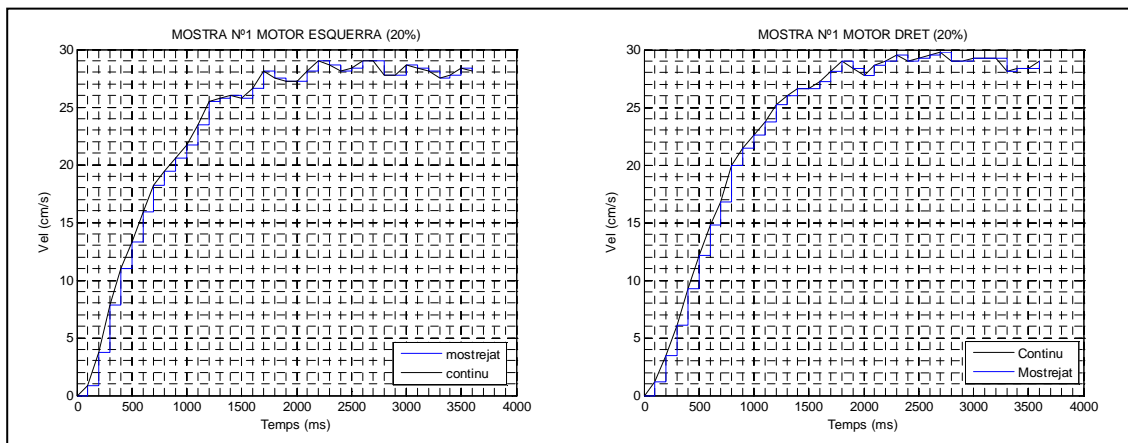


Figura 56. Representació gràfica mostra n°1 motor esquerra i dret amb D=20%

Mitjançant la comanda “ident” del matlab s’aconsegueixen les funcions transferències següents:

$$F_{1E(20\%)}(s) = \frac{16}{0,606s + 1} \tag{Eq. 41}$$

$$F_{1D(20\%)}(s) = \frac{16,53}{0,643s + 1} \tag{Eq. 42}$$

B.1.2. Mostra n°2

MOSTRA N°2		
TEMPS (ms)	VEL. MOTOR ESQ. (cm/s)	VEL. MOTOR DRET (cm/s)
0	0.00	0.00
100	0.86	0.57
200	3.47	3.18
300	4.92	5.21
400	8.39	7.52

Taula 20. Mostra n°2 amb D=20% de 0 a 400ms

MOSTRA Nº2		
TEMPS (ms)	VEL. MOTOR ESQ. (cm/s)	VEL. MOTOR DRET (cm/s)
500	10.13	9.84
600	12.15	12.73
700	14.76	15.34
800	17.65	17.37
900	20.26	19.39
1000	21.71	22.00
1100	22.87	23.44
1200	23.16	24.02
1300	24.31	25.47
1400	26.05	26.63
1500	26.92	27.50
1600	26.92	28.08
1700	26.63	27.79
1800	27.50	28.37
1900	28.66	28.66
2000	28.95	29.52
2100	28.66	28.95
2200	28.66	29.23
2300	29.52	29.23
2400	30.10	29.81
2500	29.52	29.81
2600	29.23	29.52
2700	29.52	29.52
2800	29.81	29.52
2900	29.52	30.10
3000	28.66	29.23
3100	28.95	29.52
3200	29.52	28.95
3300	28.95	29.52
3400	28.08	28.37
3500	27.50	28.37
3600	28.08	28.37
3700	28.66	28.95

Taula 21. Mostra nº2 amb D=20% de 500ms a 3700ms

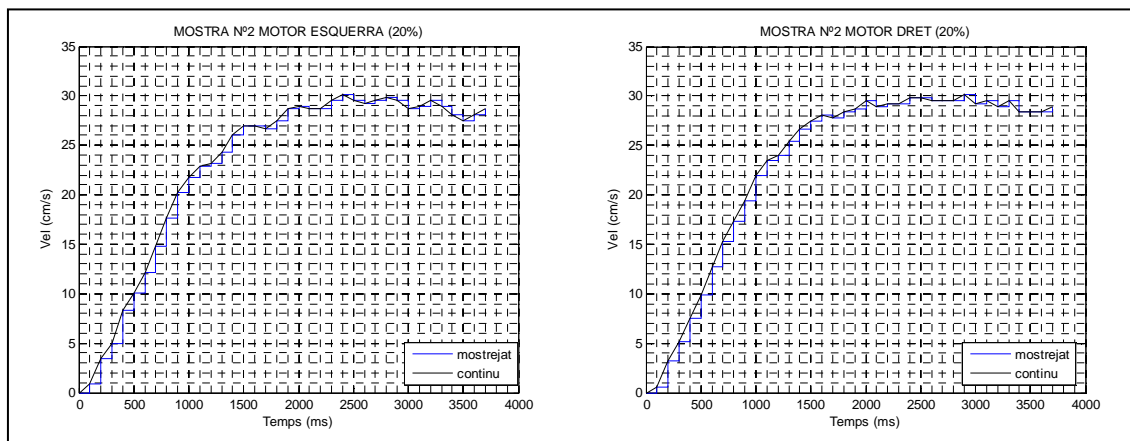


Figura 57. Representació gràfica mostra nº2 motor esquerra i dret amb D=20%

Mitjançant la comanda “ident” del matlab s'aconsegueixen les funcions transferències següents:

$$F_{2E(20\%)}(s) = \frac{16,74}{0,728s + 1} \tag{Eq. 43}$$

$$F_{2D(20\%)}(s) = \frac{16,82}{0,716s + 1} \tag{Eq. 44}$$

B.1.3. Mostra nº3

MOSTRA Nº3		
TEMPS (ms)	VEL. MOTOR ESQ. (cm/s)	VEL. MOTOR DRET (cm/s)
0	0.00	0.00
100	1.15	1.15
200	5.21	2.89
300	8.68	6.07
400	11.29	9.55
500	13.89	13.31
600	15.63	15.34
700	17.94	17.37
800	18.81	19.10
900	20.26	21.13
1000	22.29	23.16
1100	24.89	24.31
1200	25.18	25.76
1300	25.47	26.05
1400	25.76	26.63
1500	26.34	27.21
1600	27.79	28.66
1700	28.37	28.37
1800	27.79	28.08
1900	28.08	28.95
2000	28.95	29.23
2100	29.23	29.23
2200	28.95	28.37
2300	28.66	28.66
2400	29.23	29.52
2500	29.81	29.81
2600	29.23	29.52
2700	28.66	29.23
2800	28.95	29.23
2900	29.52	29.52
3000	29.52	29.81
3100	28.95	29.23

Taula 22. Mostra nº3 amb D=20% de 0 a 3100ms

MOSTRA N°3		
TEMPS (ms)	VEL. MOTOR ESQ. (cm/s)	VEL. MOTOR DRET (cm/s)
3200	28.37	29.23
3300	28.66	28.95
3400	28.95	29.23
3500	28.08	27.50
3600	27.21	27.21
3700	27.79	27.79
3800	28.08	27.50

Taula 23. Mostra n°3 amb D=20% de 3200ms a 3800ms

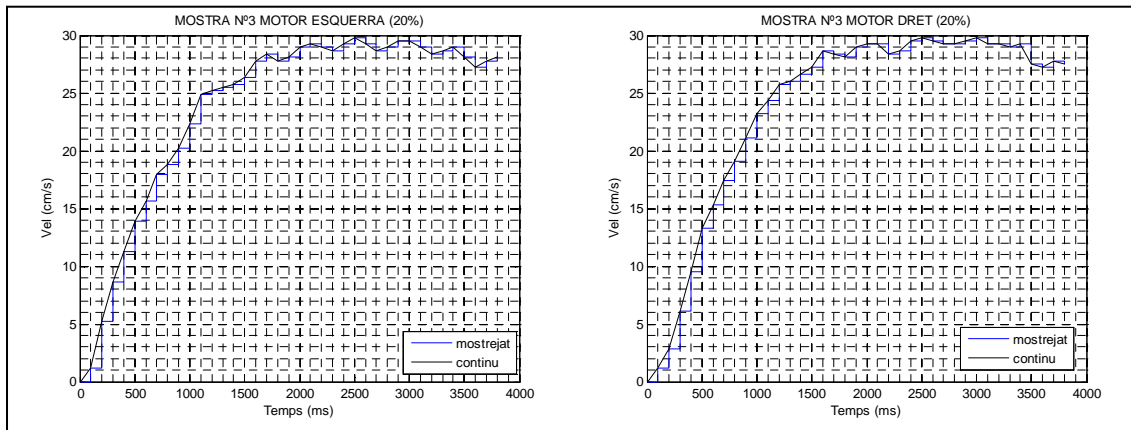


Figura 58. Representació gràfica mostra n°3 motor esquerra i dret amb D=20%

Mitjançant la comanda “ident” del matlab s’aconsegueixen les funcions transferències següents:

$$F_{3E(20\%)}(s) = \frac{16,4}{0,618s + 1} \tag{Eq. 45}$$

$$F_{3D(20\%)}(s) = \frac{16,62}{0,639s + 1} \tag{Eq. 46}$$

B.1.4. Mostra n°4

MOSTRA N°4		
TEMPS (ms)	VEL. MOTOR ESQ. (cm/s)	VEL. MOTOR DRET (cm/s)
0	0.00	0.00
100	2.02	1.73
200	5.21	3.76
300	8.39	6.65

Taula 24. Mostra n°4 amb D=20% de 0 a 300ms

MOSTRA N°4		
TEMPS (ms)	VEL. MOTOR ESQ. (cm/s)	VEL. MOTOR DRET (cm/s)
400	11.29	10.13
500	14.18	13.31
600	16.50	16.21
700	18.52	18.52
800	20.55	20.26
900	21.42	21.13
1000	22.87	23.16
1100	24.31	24.60
1200	25.76	25.76
1300	26.34	26.92
1400	26.05	26.63
1500	26.92	27.79
1600	28.08	28.66
1700	28.37	29.23
1800	28.66	29.23
1900	28.37	29.52
2000	28.66	29.81
2100	29.81	30.39
2200	29.52	30.10
2300	29.23	29.81
2400	29.23	29.81
2500	30.10	30.10
2600	30.10	30.39
2700	29.52	29.23
2800	28.95	29.23
2900	29.23	29.81
3000	29.81	30.10
3100	28.95	29.23
3200	28.08	28.95
3300	28.37	28.95
3400	28.95	29.23
3500	28.37	28.95
3600	27.79	28.37

Taula 25. Mostra n°4 amb D=20% de 400ms a 3600ms

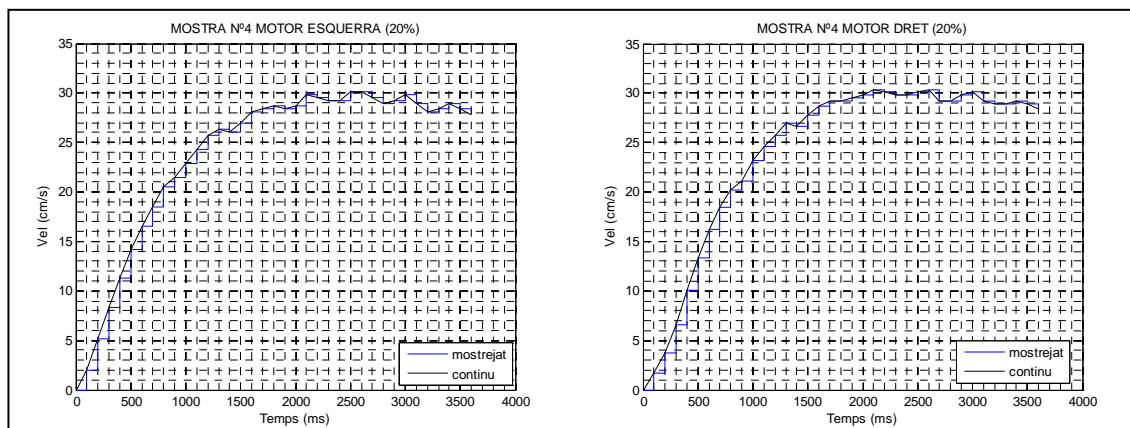


Figura 59. Representació gràfica mostra n°4 motor esquerra i dret amb D=20%

Mitjançant la comanda "ident" del matlab s'aconsegueixen les funcions transferències següents:

$$F_{4E(20\%)}(s) = \frac{16,57}{0,6s + 1} \quad (\text{Eq. 47})$$

$$F_{4D(20\%)}(s) = \frac{16,83}{0,609s + 1} \quad (\text{Eq. 48})$$

B.1.5. Mostra nº5

MOSTRA Nº5		
TEMPS (ms)	VEL. MOTOR ESQ. (cm/s)	VEL. MOTOR DRET (cm/s)
0	0.00	0.00
100	0.28	0.57
200	2.31	3.18
300	4.34	5.79
400	7.52	8.39
500	10.13	10.71
600	11.58	13.31
700	14.18	15.34
800	16.50	17.65
900	19.10	20.26
1000	21.71	22.00
1100	23.16	22.87
1200	24.02	24.02
1300	24.60	25.47
1400	25.76	26.05
1500	27.50	27.50
1600	27.50	27.50
1700	27.50	28.37
1800	27.79	28.66
1900	28.66	29.52
2000	29.81	29.52
2100	29.81	29.52
2200	29.23	30.10
2300	29.52	30.39
2400	30.39	30.10
2500	30.39	29.52
2600	29.52	29.81
2700	29.23	30.10
2800	30.10	30.97
2900	30.10	29.81
3000	29.81	29.81

Taula 26. Mostra nº5 amb D=20% de 0 a 3900ms

MOSTRA Nº5		
TEMPS (ms)	VEL. MOTOR ESQ. (cm/s)	VEL. MOTOR DRET (cm/s)
3100	29.23	29.81
3200	29.23	30.39
3300	29.52	29.52
3400	28.66	29.23
3500	28.08	29.23
3600	28.37	29.23
3700	28.66	29.23
3800	28.37	28.37

Taula 27. Mostra nº5 amb D=20% de 3100ms a 3800ms

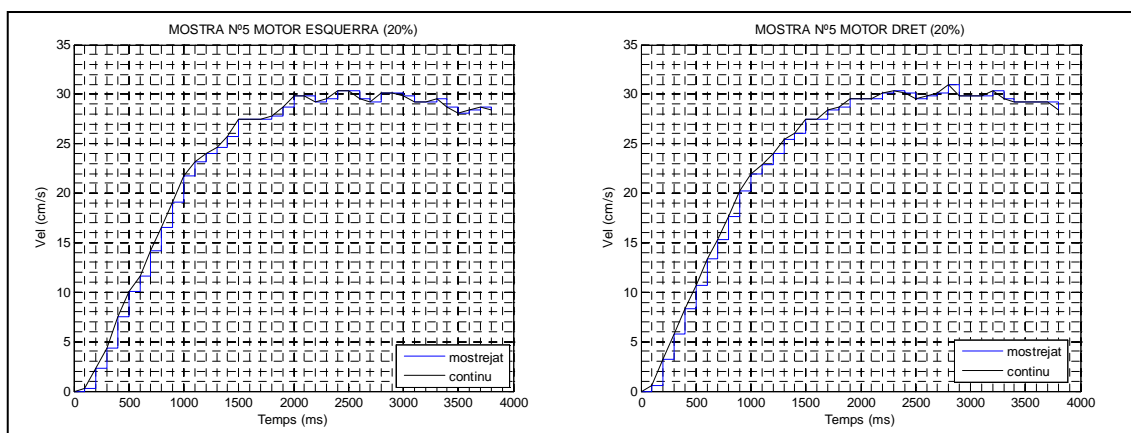


Figura 60. Representació gràfica mostra nº5 motor esquerra i dret amb D=20%

Mitjançant la comanda “ident” del matlab s’aconsegueixen les funcions transferències següents:

$$F_{5E(20\%)}(s) = \frac{16,86}{0,741s + 1} \tag{Eq. 49}$$

$$F_{5D(20\%)}(s) = \frac{17,17}{0,752s + 1} \tag{Eq. 50}$$

B.1.6. Mostra nº6

MOSTRA N°6		
TEMPS (ms)	VEL. MOTOR ESQ. (cm/s)	VEL. MOTOR DRET (cm/s)
0	0.00	0.00
100	0.57	0.86
200	3.47	2.60
300	7.52	5.21
400	10.42	7.81
500	11.58	9.55
600	13.60	12.44
700	14.47	15.34
800	16.79	17.65
900	19.10	19.68
1000	21.71	21.71
1100	23.44	23.44
1200	24.31	24.02
1300	24.89	25.18
1400	25.18	26.63
1500	26.92	27.50
1600	27.79	28.08
1700	27.79	28.37
1800	27.79	28.95
1900	28.37	29.23
2000	28.95	30.39
2100	29.23	29.52
2200	28.95	29.52
2300	28.37	30.10
2400	29.52	30.97
2500	30.10	30.10
2600	29.52	29.81
2700	28.66	30.10
2800	28.95	30.39
2900	29.52	30.10
3000	28.95	29.23
3100	28.08	29.52
3200	28.37	29.52
3300	28.66	29.52
3400	28.66	28.95
3500	28.08	29.23
3600	27.50	28.95
3700	27.79	29.23
3800	28.08	28.37

Taula 28. Mostra nº6 amb D=20%

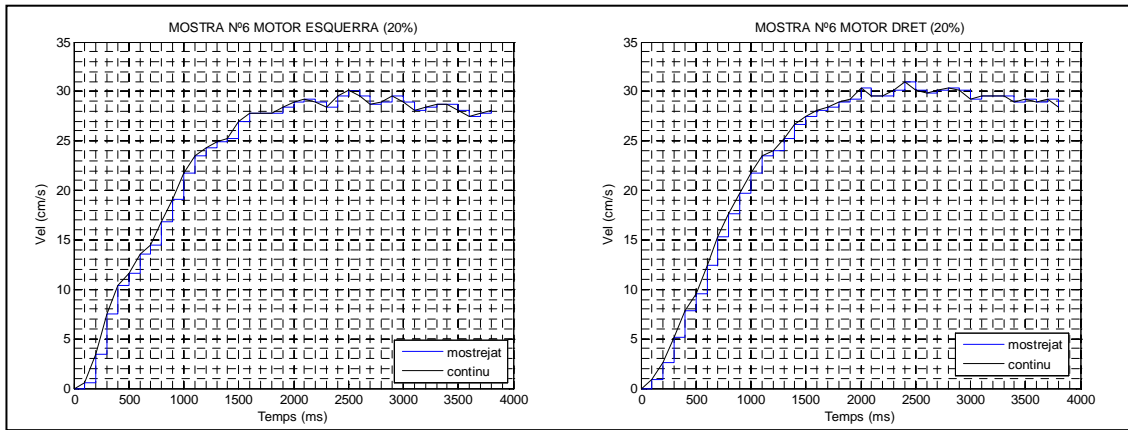


Figura 61. Representació gràfica mostra n°6 motor esquerra i dret amb D=20%

Mitjançant la comanda “ident” del matlab s’aconsegueixen les funcions transferències següents:

$$F_{6E(20\%)}(s) = \frac{16,4}{0,675s + 1} \tag{Eq. 51}$$

$$F_{6D(20\%)}(s) = \frac{17,11}{0,754s + 1} \tag{Eq. 52}$$

B.1.7. Mostra n°7

MOSTRA Nº7		
TEMPS (ms)	VEL. MOTOR ESQ. (cm/s)	VEL. MOTOR DRET (cm/s)
0	0.00	0.00
100	0.86	1.73
200	4.05	4.63
300	8.10	6.94
400	11.86	9.26
500	14.76	10.71
600	17.08	13.31
700	18.52	16.21
800	19.68	18.52
900	20.55	21.13
1000	21.71	22.87
1100	23.73	24.31
1200	25.18	24.89
1300	25.47	25.76
1400	25.47	26.92
1500	26.63	27.79

Taula 29. Mostra n°7 amb D=20% de 0 a 1500ms

MOSTRA N°7		
TEMPS (ms)	VEL. MOTOR ESQ. (cm/s)	VEL. MOTOR DRET (cm/s)
1600	27.79	28.08
1700	28.66	28.08
1800	28.37	28.95
1900	28.08	29.52
2000	28.95	30.39
2100	29.52	29.52
2200	29.23	29.81
2300	28.66	29.52
2400	29.23	30.39
2500	29.81	29.81
2600	29.52	29.52
2700	28.95	29.81
2800	28.95	30.39
2900	29.23	30.10
3000	29.52	29.23
3100	29.23	29.23
3200	28.37	29.52
3300	28.66	29.23
3400	29.23	28.37
3500	28.66	28.95
3600	27.50	28.66

Taula 30. Mostra n°7 amb D=20% de 1600ms a 3600ms

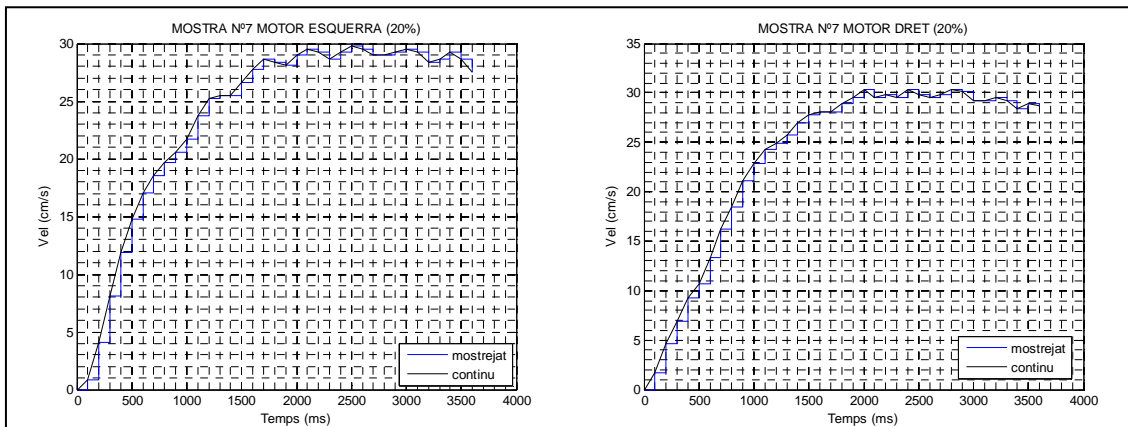


Figura 62. Representació gràfica mostra n°7 motor esquerra i dret amb D=20%

Mitjançant la comanda "ident" del matlab s'aconsegueixen les funcions transferències següents:

$$F_{7E(20\%)}(s) = \frac{16,42}{0,602s + 1} \quad (\text{Eq. 53})$$

$$F_{7D(20\%)}(s) = \frac{17}{0,661s + 1} \quad (\text{Eq. 54})$$

B.1.8. Mostra n°8

MOSTRA N°8		
TEMPS (ms)	VEL. MOTOR ESQ. (cm/s)	VEL. MOTOR DRET (cm/s)
0	0.00	0.00
100	0.86	0.57
200	4.63	3.18
300	7.81	6.07
400	9.84	8.97
500	11.86	12.15
600	13.02	15.05
700	15.05	17.37
800	18.52	18.81
900	20.84	20.55
1000	22.58	22.58
1100	22.87	24.02
1200	24.02	25.76
1300	25.47	26.92
1400	26.63	26.63
1500	27.21	27.21
1600	26.92	28.08
1700	27.21	29.52
1800	28.08	29.23
1900	29.52	29.23
2000	28.95	29.81
2100	28.66	30.39
2200	29.23	30.39
2300	29.81	30.39
2400	29.81	30.39
2500	29.23	30.97
2600	29.52	30.97
2700	29.81	30.10
2800	29.81	30.39
2900	29.52	30.39
3000	29.52	30.68

Taula 31. Mostra n°8 amb D=20% de 0 a 3000ms

MOSTRA N°8		
TEMPS (ms)	VEL. MOTOR ESQ. (cm/s)	VEL. MOTOR DRET (cm/s)
3100	29.52	29.52
3200	29.52	29.81
3300	28.66	29.52
3400	27.79	29.81
3500	27.79	29.23
3600	28.95	28.95
3700	28.66	28.95
3800	27.79	29.23

Taula 32. Mostra n°8 amb D=20% de 3100ms a 3800ms

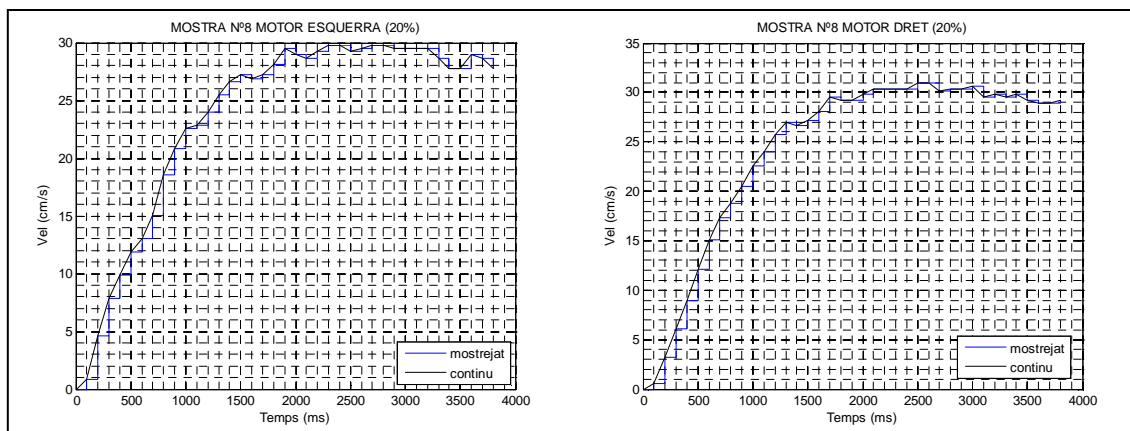


Figura 63. Representació gràfica mostra n°8 motor esquerra i dret amb D=20%

Mitjançant la comanda “ident” del matlab s’aconsegueixen les funcions transferències següents:

$$F_{8E(20\%)}(s) = \frac{16,73}{0,677s + 1} \tag{Eq. 55}$$

$$F_{8D(20\%)}(s) = \frac{17,12}{0,682s + 1} \tag{Eq. 56}$$

B.1.9. Mostra n^o9

MOSTRA N^o9		
TEMPS (ms)	VEL. MOTOR ESQ. (cm/s)	VEL. MOTOR DRET (cm/s)
0	0.00	0.00
100	1.15	1.15
200	3.18	4.05
300	5.50	7.23
400	8.39	9.55
500	11.00	13.02
600	13.60	15.63
700	15.34	17.08
800	17.94	18.81
900	20.26	21.13
1000	22.29	22.58
1100	23.73	24.02
1200	24.02	26.34
1300	25.18	26.05
1400	26.34	26.63
1500	27.79	27.79
1600	27.50	28.66
1700	27.21	29.23
1800	28.37	28.95
1900	29.23	29.81
2000	29.52	29.81
2100	29.81	30.10
2200	29.52	30.10
2300	29.81	30.39
2400	30.68	30.39
2500	30.10	30.97
2600	29.81	30.10
2700	30.10	30.39
2800	30.39	30.39
2900	30.10	30.68
3000	29.23	30.39
3100	29.23	29.81
3200	30.10	29.52
3300	30.10	29.52
3400	28.95	29.52
3500	28.95	28.95
3600	29.52	29.52
3700	29.52	28.95

Taula 33. Mostra n^o9 amb D=20%

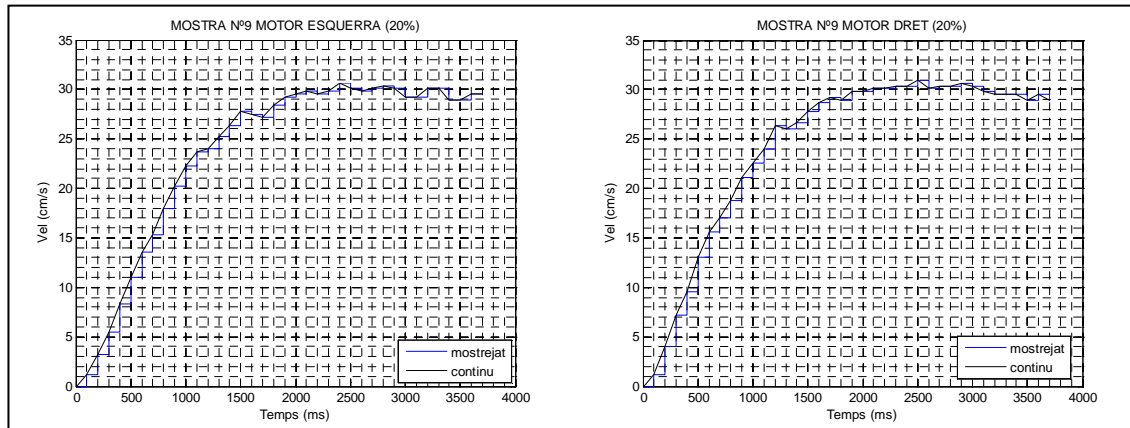


Figura 64. Representació gràfica mostra nº9 motor esquerra i dret amb D=20%

Mitjançant la comanda “ident” del matlab s’aconsegueixen les funcions transferències següents:

$$F_{9E(20\%)}(s) = \frac{17,16}{0,752s + 1} \tag{Eq. 57}$$

$$F_{9D(20\%)}(s) = \frac{17,18}{0,673s + 1} \tag{Eq. 58}$$

B.1.10.Mostra nº10

MOSTRA Nº10		
TEMPS (ms)	VEL. MOTOR ESQ. (cm/s)	VEL. MOTOR DRET (cm/s)
0	0.00	0.00
100	2.31	2.31
200	6.36	4.63
300	9.84	8.10
400	13.02	10.71
500	15.05	13.89
600	16.79	16.50
700	17.94	18.81
800	19.68	20.26
900	22.29	21.71
1000	24.31	23.16
1100	24.89	24.60
1200	25.47	26.05
1300	25.76	26.63
1400	27.21	26.92
1500	28.37	28.08

Taula 34. Mostra nº10 amb D=20% de 0 a 1500ms

MOSTRA N°10		
TEMPS (ms)	VEL. MOTOR ESQ. (cm/s)	VEL. MOTOR DRET (cm/s)
1600	28.37	28.95
1700	28.08	29.23
1800	28.66	29.23
1900	29.81	29.81
2000	29.81	29.81
2100	29.52	30.39
2200	29.52	29.81
2300	30.39	29.81
2400	30.39	29.81
2500	29.81	30.68
2600	29.52	29.81
2700	30.10	30.39
2800	30.39	30.39
2900	29.81	30.68
3000	29.23	29.81
3100	29.52	29.52
3200	29.81	29.81
3300	29.52	29.81
3400	28.37	29.52
3500	28.37	28.95
3600	28.66	28.95

Taula 35. Mostra n°10 amb D=20% de 1600ms a 3600ms

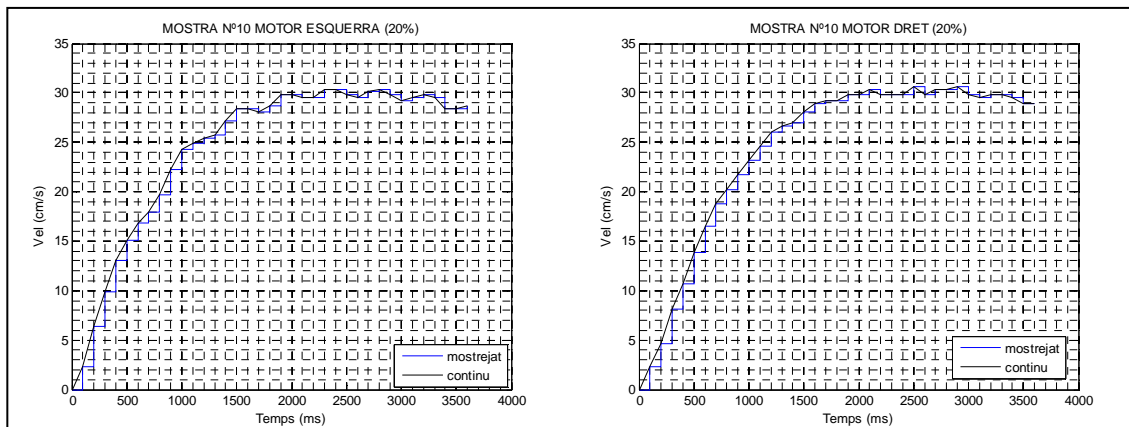


Figura 65. Representació gràfica mostra n°10 motor esquerra i dret amb D=20%

Mitjançant la comanda "ident" del matlab s'aconsegueixen les funcions transferències següents:

$$F_{10E(20\%)}(s) = \frac{16,81}{0,603s + 1} \quad (\text{Eq. 59})$$

$$F_{10D(20\%)}(s) = \frac{17,05}{0,623s + 1} \quad (\text{Eq. 60})$$

B.1.11. Funció transferència motor dret amb cycle de treball 20%

Es calcula la mitjana de totes les funcions transferències aconseguides del motor dret amb un cycle de treball del 20%.

$$K_{\text{mig}} = 16,94 \cong 17$$

$$\tau_{\text{mig}} = 0,675$$

$$F_{D(20\%)}(s) = \frac{17}{0,675s + 1} \quad (\text{Eq. 61})$$

B.1.12. Funció transferència motor esquerra amb cycle de treball 20%

Es calcula la mitjana de totes les funcions transferències aconseguides del motor esquerra amb un cycle de treball del 20%.

$$K_{\text{mig}} = 16,61$$

$$\tau_{\text{mig}} = 0,660$$

$$F_{E(20\%)}(s) = \frac{16,61}{0,66s + 1} \quad (\text{Eq. 62})$$

B.2. Mostres respostes motors amb cicle de treball 30%

A continuació es mostra els resultats de les 10 mostres aconseguides del motor esquerra i dret aplicant un PWM d'un cicle de treball del 30%.

B.2.1. Mostra nº1

MOSTRA Nº1		
TEMPS (ms)	VEL. MOTOR ESQ. (cm/s)	VEL. MOTOR DRET (cm/s)
0	0.00	0.00
100	1.73	2.31
200	9.55	8.10
300	17.08	15.63
400	23.44	21.71
500	28.08	26.34
600	30.68	31.26
700	33.00	33.87
800	35.60	36.18
900	37.63	37.92
1000	37.92	39.37
1100	39.37	40.24
1200	40.53	41.39
1300	40.81	41.97
1400	41.10	42.26
1500	42.26	42.55
1600	41.68	43.42
1700	41.97	43.13
1800	42.84	43.13
1900	42.26	43.42
2000	42.26	43.42
2100	42.84	43.13
2200	41.97	43.13
2300	41.68	42.55
2400	41.39	41.68

Taula 36. Mostra nº1 amb D=30%

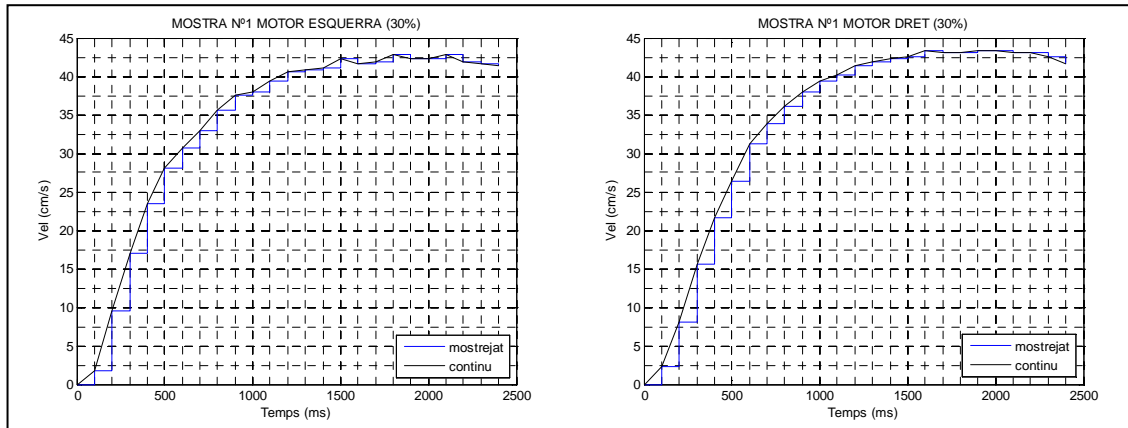


Figura 66. Representació gràfica mostra nº1 motor esquerra i dret amb D=30%

Mitjançant la comanda “ident” del matlab s’aconsegueixen les funcions transferències següents:

$$F_{1E(30\%)}(s) = \frac{15,8}{0,388s + 1} \tag{Eq. 63}$$

$$F_{1D(30\%)}(s) = \frac{16,27}{0,405s + 1} \tag{Eq. 64}$$

B.2.2. Mostra nº2

MOSTRA Nº2		
TEMPS (ms)	VEL. MOTOR ESQ. (cm/s)	VEL. MOTOR DRET (cm/s)
0	0.00	0.00
100	1.15	1.73
200	8.10	9.26
300	14.47	15.05
400	19.39	19.97
500	24.31	24.60
600	28.66	28.95
700	32.71	33.00
800	34.16	35.02
900	35.89	37.34
1000	38.79	38.79
1100	39.37	40.24
1200	39.37	40.53
1300	40.81	41.68
1400	41.68	42.84
1500	41.10	42.26
1600	42.26	43.13

Taula 37. Mostra nº2 amb D=30% de 0 a 1600ms

MOSTRA Nº2		
TEMPS (ms)	VEL. MOTOR ESQ. (cm/s)	VEL. MOTOR DRET (cm/s)
1700	42.55	43.71
1800	41.97	43.42
1900	42.84	43.42
2000	42.84	43.71
2100	42.26	43.13
2200	42.55	43.13
2300	42.55	43.13
2400	41.68	42.84
2500	42.26	42.55
2600	41.10	41.39

Taula 38. Mostra nº2 amb D=30% de 1700ms a 2600ms

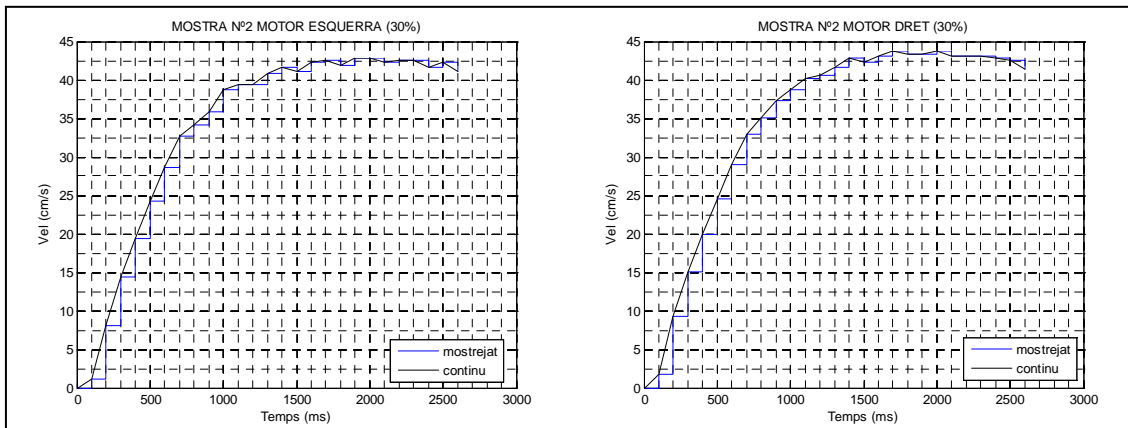


Figura 67. Representació gràfica mostra nº2 motor esquerra i dret amb D=30%

Mitjançant la comanda “ident” del matlab s’aconsegueixen les funcions transferències següents:

$$F_{2E(30\%)}(s) = \frac{16}{0,452s + 1} \tag{Eq. 65}$$

$$F_{2D(30\%)}(s) = \frac{16,3}{0,442s + 1} \tag{Eq. 66}$$

B.2.3. Mostra n^o3

MOSTRA N ^o 3		
TEMPS (ms)	VEL. MOTOR ESQ. (cm/s)	VEL. MOTOR DRET (cm/s)
0	0.00	0.00
100	0.86	1.44
200	6.65	6.07
300	12.44	12.44
400	15.34	15.05
500	21.13	20.84
600	26.92	26.63
700	30.68	30.10
800	32.42	33.00
900	34.45	35.31
1000	37.63	38.21
1100	38.21	38.79
1200	39.08	40.24
1300	40.81	41.68
1400	41.68	41.39
1500	41.10	42.26
1600	42.55	43.42
1700	42.55	42.84
1800	41.97	43.13
1900	42.84	44.00
2000	42.55	43.13
2100	41.97	43.42
2200	42.55	44.00
2300	42.26	42.55
2400	41.10	42.55
2500	41.97	43.42
2600	41.68	42.26
2700	39.37	41.10

Taula 39 Mostra n^o3 amb D=30%

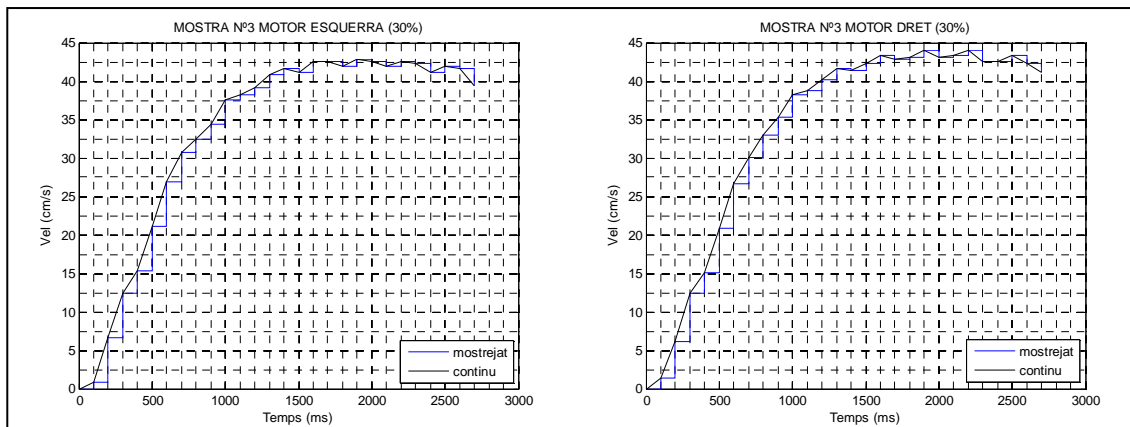


Figura 68. Representació gràfica mostra n^o3 motor esquerra i dret amb D=30%

Mitjançant la comanda “ident” del matlab s'aconsegueixen les funcions transferències següents:

$$F_{3E(30\%)}(s) = \frac{16,1}{0,496s + 1} \tag{Eq. 67}$$

$$F_{3D(30\%)}(s) = \frac{16,5}{0,519s + 1} \tag{Eq. 68}$$

B.2.4. Mostra nº4

MOSTRA Nº4		
TEMPS (ms)	VEL. MOTOR ESQ. (cm/s)	VEL. MOTOR DRET (cm/s)
0	0.00	0.00
100	1.44	2.02
200	6.94	8.39
300	14.76	14.76
400	21.42	20.55
500	26.34	25.18
600	29.52	29.52
700	32.13	33.00
800	35.02	35.89
900	37.05	37.34
1000	37.63	38.79
1100	39.08	40.53
1200	40.81	40.53
1300	40.53	41.68
1400	41.10	42.84
1500	42.26	42.55
1600	41.97	43.13
1700	41.97	43.71
1800	43.13	43.13
1900	42.55	43.71
2000	42.26	44.00
2100	43.13	43.13
2200	42.26	43.42
2300	41.97	44.00
2400	42.55	42.55
2500	41.68	43.13
2600	39.08	41.39

Taula 40 Mostra nº4 amb D=30%

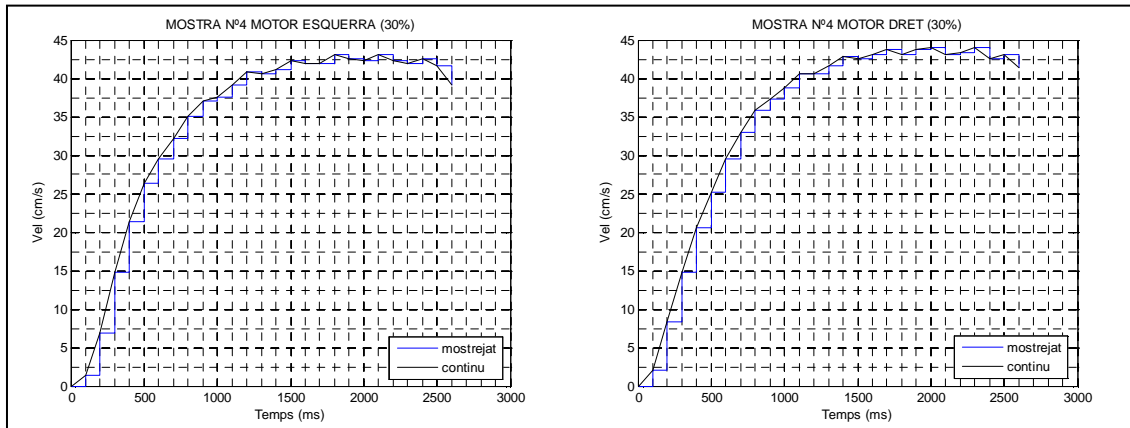


Figura 69. Representació gràfica mostra n^o4 motor esquerra i dret amb D=30%

Mitjançant la comanda “ident” del matlab s’aconsegueixen les funcions transferències següents:

$$F_{4E(30\%)}(s) = \frac{15,92}{0,425s + 1} \tag{Eq. 69}$$

$$F_{4D(30\%)}(s) = \frac{16,4}{0,441s + 1} \tag{Eq. 70}$$

B.2.5. Mostra n^o5

MOSTRA Nº5		
TEMPS (ms)	VEL. MOTOR ESQ. (cm/s)	VEL. MOTOR DRET (cm/s)
0	0.00	0.00
100	4.63	4.05
200	12.44	9.84
300	18.52	16.21
400	23.73	22.00
500	27.50	26.92
600	30.68	31.26
700	33.87	33.87
800	36.47	36.18
900	37.34	38.21
1000	38.50	39.66
1100	40.24	40.24
1200	40.53	41.10
1300	40.81	42.84
1400	42.55	42.26
1500	42.26	42.84

Taula 41. Mostra n^o5 amb D=30% de 0 a 1500ms

MOSTRA N°5		
TEMPS (ms)	VEL. MOTOR ESQ. (cm/s)	VEL. MOTOR DRET (cm/s)
1600	42.55	43.42
1700	43.42	43.13
1800	42.84	43.71
1900	42.84	44.29
2000	43.71	43.42
2100	42.55	43.42
2200	42.26	43.71
2300	42.84	43.13
2400	40.24	41.10

Taula 42. Mostra n°5 amb D=30% de 1600ms a 2400ms

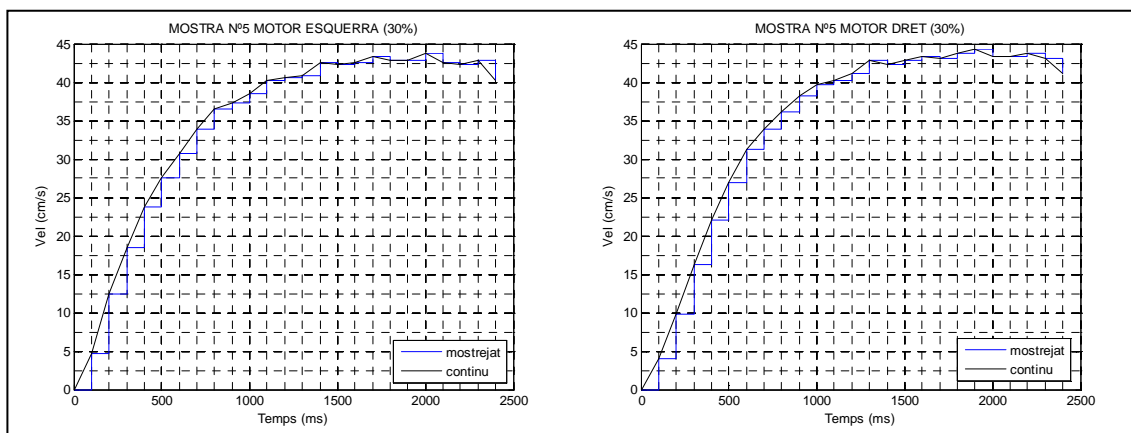


Figura 70. Representació gràfica mostra n°5 motor esquerra i dret amb D=30%

Mitjançant la comanda “ident” del matlab s’aconsegueixen les funcions transferències següents:

$$F_{5E(30\%)}(s) = \frac{16,06}{0,407s + 1} \tag{Eq. 71}$$

$$F_{5D(30\%)}(s) = \frac{16,37}{0,417s + 1} \tag{Eq. 72}$$

B.2.6. Mostra n°6

MOSTRA N°6		
TEMPS (ms)	VEL. MOTOR ESQ. (cm/s)	VEL. MOTOR DRET (cm/s)
0	0.00	0.00
100	1.44	1.73
200	7.23	6.94
300	14.47	13.02
400	20.55	18.52
500	25.47	24.02
600	29.52	28.66
700	31.84	32.13
800	34.16	34.45
900	37.05	36.76
1000	38.21	38.21
1100	38.79	40.24
1200	40.53	40.53
1300	41.10	41.68
1400	41.10	42.55
1500	41.68	42.26
1600	42.26	42.84
1700	41.97	43.42
1800	42.84	42.84
1900	42.84	43.13
2000	41.97	43.71
2100	42.55	42.84
2200	42.55	42.84
2300	41.68	43.13
2400	42.26	42.84
2500	40.81	41.10

Taula 43. Mostra n°6 amb D=30%

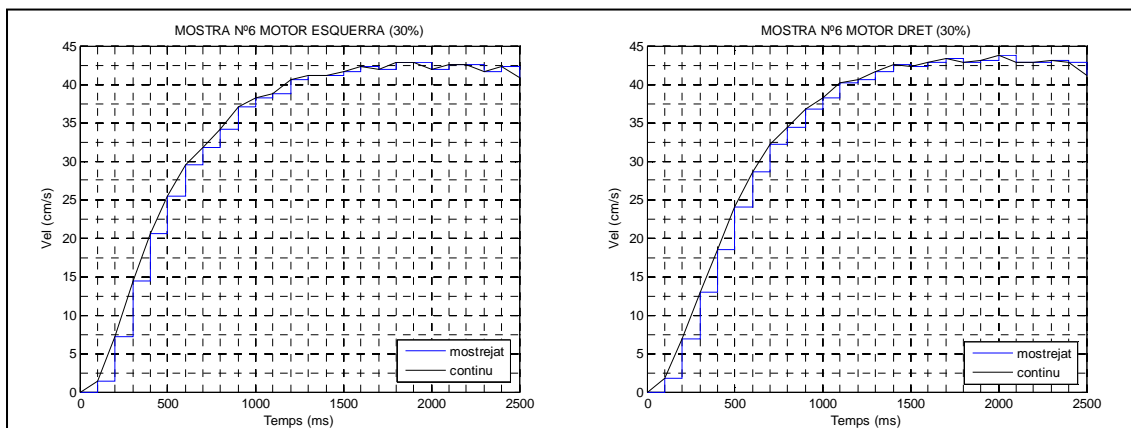


Figura 71. Representació gràfica mostra n°6 motor esquerra i dret amb D=30%

Mitjançant la comanda “ident” del matlab s’aconsegueixen les funcions transferències següents:

$$F_{6E(30\%)}(s) = \frac{15,98}{0,439s + 1} \tag{Eq. 73}$$

$$F_{6D(30\%)}(s) = \frac{16,37}{0,464s + 1} \tag{Eq. 74}$$

B.2.7. Mostra nº7

MOSTRA Nº7		
TEMPS (ms)	VEL. MOTOR ESQ. (cm/s)	VEL. MOTOR DRET (cm/s)
0	0.00	0.00
100	5.21	4.92
200	11.86	12.15
300	17.37	17.65
400	22.58	22.87
500	27.79	28.08
600	31.55	31.26
700	33.29	34.45
800	35.31	36.18
900	37.63	38.21
1000	38.79	39.95
1100	39.08	39.95
1200	40.53	41.39
1300	41.10	42.55
1400	41.10	42.26
1500	41.97	42.55
1600	42.55	43.42
1700	41.97	42.84
1800	42.55	43.13
1900	42.84	43.71
2000	41.68	43.42
2100	42.55	43.42
2200	42.55	43.71
2300	41.68	43.13
2400	41.39	42.26

Taula 44. Mostra nº7 amb D=30%

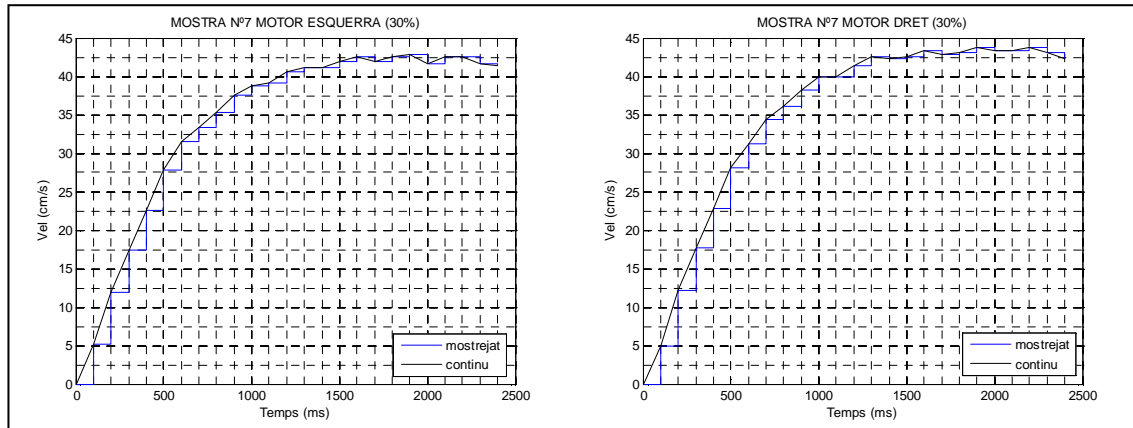


Figura 72. Representació gràfica mostra n°7 motor esquerra i dret amb D=30%

Mitjançant la comanda “ident” del matlab s’aconsegueixen les funcions transferències següents:

$$F_{7E(30\%)}(s) = \frac{15,85}{0,402s + 1} \tag{Eq. 75}$$

$$F_{7D(30\%)}(s) = \frac{16,29}{0,411s + 1} \tag{Eq. 76}$$

B.2.8. Mostra n°8

MOSTRA Nº8		
TEMPS (ms)	VEL. MOTOR ESQ. (cm/s)	VEL. MOTOR DRET (cm/s)
0	0.00	0.00
100	1.44	1.15
200	6.94	8.39
300	14.18	14.47
400	19.39	19.39
500	24.02	24.60
600	28.66	28.95
700	32.71	33.00
800	34.16	34.74
900	35.60	36.76
1000	37.63	38.50
1100	38.79	39.95
1200	39.08	40.81
1300	40.24	41.68
1400	41.39	42.55
1500	41.39	42.26

Taula 45. Mostra n°8 amb D=30% de 0 a 1500ms

MOSTRA N°8		
TEMPS (ms)	VEL. MOTOR ESQ. (cm/s)	VEL. MOTOR DRET (cm/s)
1600	41.68	42.84
1700	42.55	44.00
1800	41.97	42.84
1900	42.26	43.42
2000	42.55	44.00
2100	41.97	42.84
2200	41.97	43.13
2300	42.55	43.42
2400	41.97	42.55

Taula 46. Mostra n°8 amb D=30% de 1600ms a 2400ms

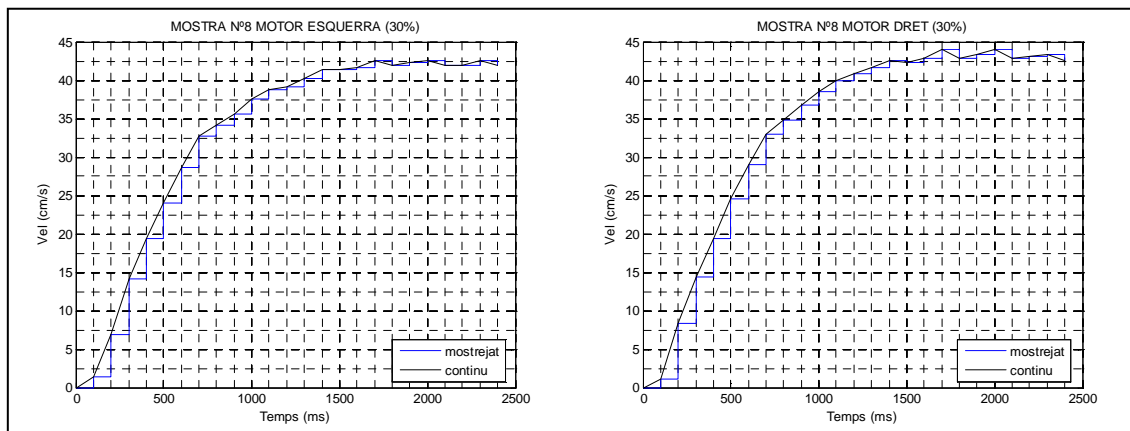


Figura 73. Representació gràfica mostra n°8 motor esquerra i dret amb D=30%

Mitjançant la comanda “ident” del matlab s’aconsegueixen les funcions transferències següents:

$$F_{8E(30\%)}(s) = \frac{15,97}{0,452s + 1} \tag{Eq. 77}$$

$$F_{8D(30\%)}(s) = \frac{16,43}{0,458s + 1} \tag{Eq. 78}$$

B.2.9. Mostra n^o9

MOSTRA N ^o 9		
TEMPS (ms)	VEL. MOTOR ESQ. (cm/s)	VEL. MOTOR DRET (cm/s)
0	0.00	0.00
100	0.57	0.86
200	6.94	6.65
300	13.02	11.58
400	18.52	16.79
500	23.73	21.42
600	26.92	26.92
700	30.39	30.68
800	33.87	34.45
900	35.60	35.89
1000	36.76	37.92
1100	38.79	39.95
1200	39.95	40.24
1300	39.66	41.10
1400	41.10	42.55
1500	42.26	42.26
1600	41.68	42.55
1700	42.55	43.42
1800	43.42	43.13
1900	42.26	43.13
2000	42.84	43.71
2100	43.13	43.13
2200	42.26	43.42
2300	42.55	44.00
2400	42.84	42.84
2500	40.24	41.39

Taula 47. Mostra n^o9 amb D=30%

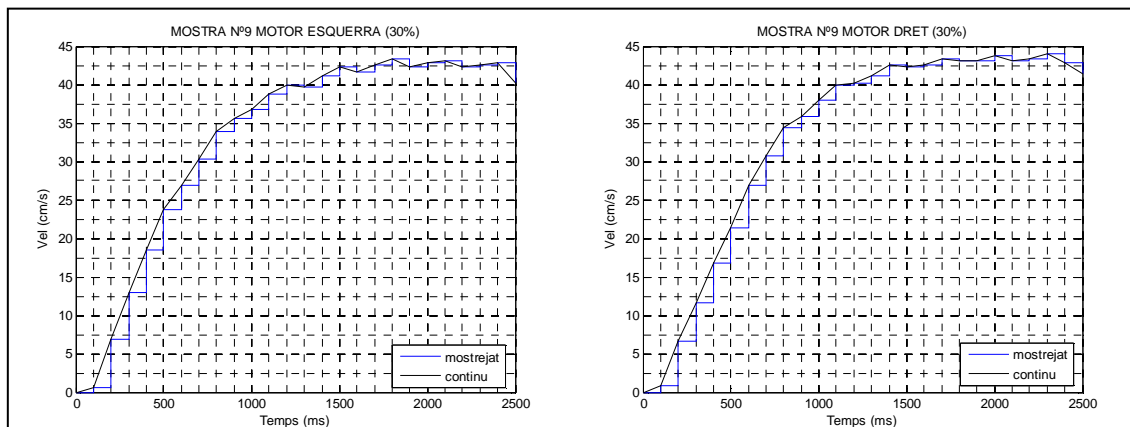


Figura 74. Representació gràfica mostra n^o9 motor esquerra i dret amb D=30%

Mitjançant la comanda “ident” del matlab s'aconsegueixen les funcions transferències següents:

$$F_{9E(30\%)}(s) = \frac{16,3}{0,507s + 1} \quad (\text{Eq. 79})$$

$$F_{9D(30\%)}(s) = \frac{16,57}{0,509s + 1} \quad (\text{Eq. 80})$$

B.2.10. Mostra nº10

MOSTRA Nº10		
TEMPS (ms)	VEL. MOTOR ESQ. (cm/s)	VEL. MOTOR DRET (cm/s)
0	0.00	0.00
100	0.28	0.28
200	5.79	6.36
300	13.89	13.60
400	20.26	19.39
500	25.47	23.44
600	28.66	28.37
700	31.26	31.84
800	34.45	35.02
900	36.76	36.47
1000	37.34	38.21
1100	39.08	39.95
1200	40.53	40.53
1300	40.81	41.39
1400	41.10	42.26
1500	42.26	42.26
1600	42.26	42.55
1700	41.97	43.13
1800	43.13	43.13
1900	42.55	43.42
2000	42.26	43.71
2100	43.13	43.13
2200	42.55	43.42
2300	41.68	43.71
2400	42.26	43.13
2500	41.97	42.84
2600	40.81	42.26

Taula 48. Mostra nº10 amb D=30%

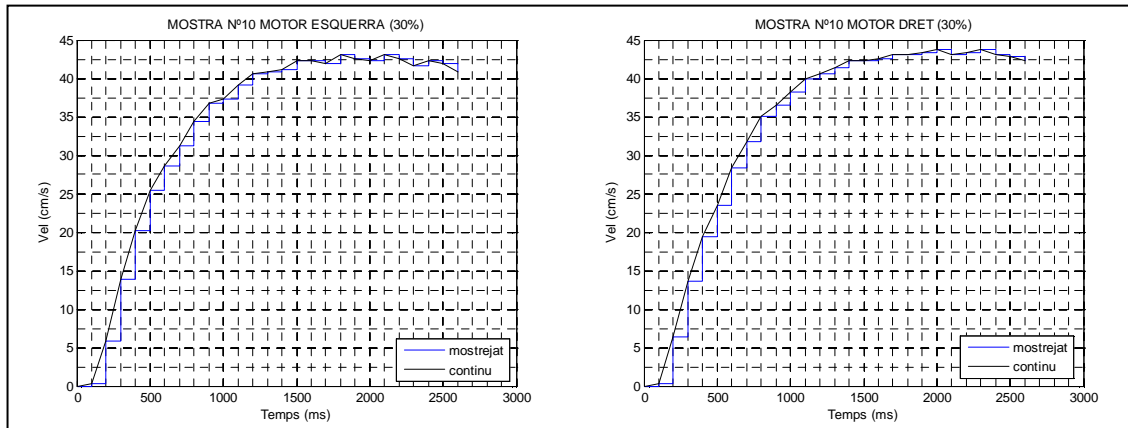


Figura 75. Representació gràfica mostra n°10 motor esquerra i dret amb D=30%

Mitjançant la comanda “ident” del matlab s’aconsegueixen les funcions transferències següents:

$$F_{10E(30\%)}(s) = \frac{16,05}{0,45s + 1} \tag{Eq. 81}$$

$$F_{10D(30\%)}(s) = \frac{16,37}{0,467s + 1} \tag{Eq. 82}$$

B.2.11.Funció transferència motor dret amb cycle de treball 30%

Es calcula la mitjana de totes les funcions transferències aconseguides del motor dret amb un cycle de treball del 30%.

$$K_{mig} = 16,39 \cong 16,4$$

$$\tau_{mig} = 0,453$$

$$F_{D(30\%)}(s) = \frac{16,4}{0,453s + 1} \tag{Eq. 83}$$

B.2.12. Funció transferència motor esquerra amb cicle de treball 30%

Es calcula la mitjana de totes les funcions transferències aconseguides del motor esquerra amb un cicle de treball del 30%.

$$K_{mig} = 16$$

$$\tau_{mig} = 0,442$$

$$F_{E(30\%)}(s) = \frac{16}{0,442s + 1} \tag{Eq. 84}$$

B.3. Mostres respostes motors amb cicle de treball 40%

A continuació es mostra els resultats de les 10 mostres aconseguides del motor esquerra i dret aplicant un PWM d'un cicle de treball del 40%.

B.3.1. Mostra nº1

MOSTRA Nº1		
TEMPS (ms)	VEL. MOTOR ESQ. (cm/s)	VEL. MOTOR DRET (cm/s)
0	0.00	0.00
100	0.86	0.86
200	8.97	8.97
300	20.26	19.10
400	28.66	26.92
500	35.02	33.87
600	38.21	38.79
700	40.81	41.39
800	44.29	43.42
900	44.58	45.45
1000	45.45	46.03
1100	46.60	47.18
1200	46.60	47.18
1300	47.18	47.76
1400	47.76	48.63
1500	47.47	48.63
1600	48.63	49.21
1700	48.34	49.50
1800	48.92	49.50
1900	49.50	50.08
2000	48.34	49.79

Taula 49. Mostra nº1 amb D=40% de 0 a 2000ms

MOSTRA Nº1		
TEMPS (ms)	VEL. MOTOR ESQ. (cm/s)	VEL. MOTOR DRET (cm/s)
2100	49.50	50.37
2200	49.50	50.66
2300	48.92	50.37
2400	50.08	50.37
2500	49.21	49.79
2600	49.50	50.66

Taula 50. Mostra nº1 amb D=40% de 2100ms a 2600ms

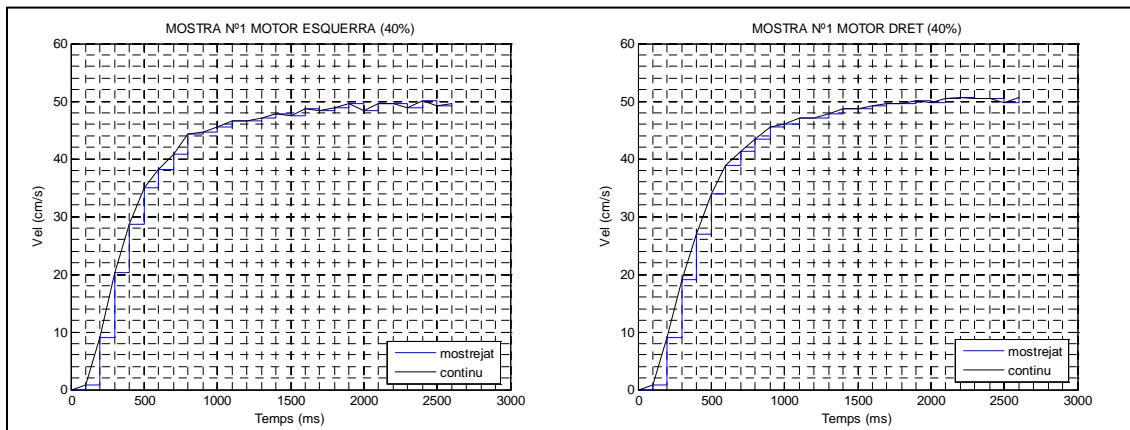


Figura 76. Representació gràfica mostra nº1 motor esquerra i dret amb D=40%

Mitjançant la comanda “ident” del matlab s’aconsegueixen les funcions transferències següents:

$$F_{1E(40\%)}(s) = \frac{13,66}{0,342s + 1} \tag{Eq. 85}$$

$$F_{1D(40\%)}(s) = \frac{13,95}{0,358s + 1} \tag{Eq. 86}$$

B.3.2. Mostra nº2

MOSTRA Nº2		
TEMPS (ms)	VEL. MOTOR ESQ. (cm/s)	VEL. MOTOR DRET (cm/s)
0	0.00	0.00
100	3.76	3.76
200	15.05	14.18
300	24.31	23.44
400	30.68	30.68
500	35.89	36.47
600	40.53	40.81
700	42.55	42.84
800	44.00	44.87
900	46.03	46.32
1000	45.74	46.60
1100	46.60	47.47
1200	47.76	48.05
1300	46.89	48.05
1400	48.05	48.92
1500	48.05	48.63
1600	48.05	49.21
1700	49.21	50.08
1800	48.63	49.50
1900	49.21	50.08
2000	49.50	49.79
2100	49.50	50.37
2200	50.08	50.66
2300	49.50	50.08
2400	49.50	50.66
2500	50.37	50.66
2600	49.79	50.66
2700	50.66	51.24
2800	50.37	50.66
2900	50.08	51.24
3000	49.79	50.37

Taula 51. Mostra nº2 amb D=40%

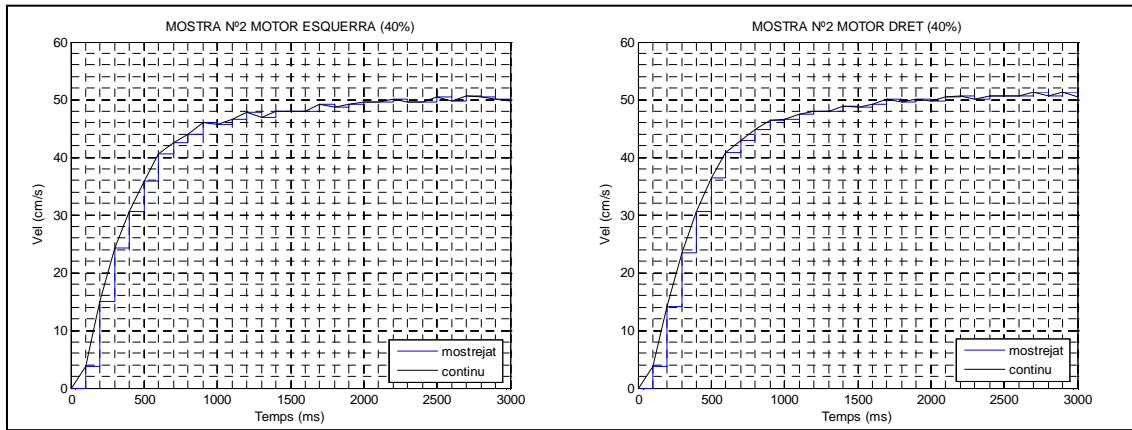


Figura 77. Representació gràfica mostra n^o2 motor esquerra i dret amb D=40%

Mitjançant la comanda “ident” del matlab s’aconsegueixen les funcions transferències següents:

$$F_{2E(40\%)}(s) = \frac{13,76}{0,318s + 1} \tag{Eq. 87}$$

$$F_{2D(40\%)}(s) = \frac{13,97}{0,325s + 1} \tag{Eq. 88}$$

B.3.3. Mostra n^o3

MOSTRA N ^o 3		
TEMPS (ms)	VEL. MOTOR ESQ. (cm/s)	VEL. MOTOR DRET (cm/s)
0	0.00	0.00
100	1.73	2.02
200	11.58	11.58
300	20.84	21.71
400	28.37	29.81
500	34.74	35.60
600	39.66	39.66
700	41.68	42.26
800	44.00	44.87
900	45.74	45.74
1000	45.45	46.60
1100	46.60	48.05
1200	47.47	47.47
1300	46.89	48.05
1400	49.21	48.92
1500	48.34	48.63

Taula 52. Mostra n^o3 amb D=40% de 0 a 1500ms

MOSTRA N°3		
TEMPS (ms)	VEL. MOTOR ESQ. (cm/s)	VEL. MOTOR DRET (cm/s)
1600	48.05	49.50
1700	48.92	49.21
1800	48.34	49.50
1900	49.79	50.37
2000	49.21	49.50
2100	48.34	50.08
2200	49.50	50.08
2300	48.92	50.08
2400	49.50	50.66
2500	49.79	49.79
2600	49.79	49.79
2700	50.08	50.37
2800	49.79	50.37

Taula 53. Mostra n°3 amb D=40% de 1600ms a 2800ms

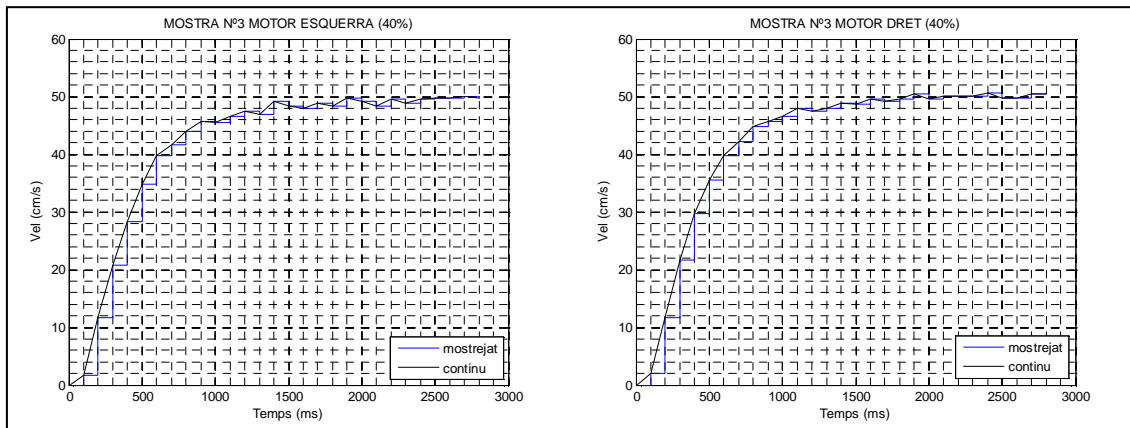


Figura 78. Representació gràfica mostra n°3 motor esquerra i dret amb D=40%

Mitjançant la comanda “ident” del matlab s’aconsegueixen les funcions transferències següents:

$$F_{3E(40\%)}(s) = \frac{13,74}{0,336s + 1} \tag{Eq. 89}$$

$$F_{3D(40\%)}(s) = \frac{13,89}{0,326s + 1} \tag{Eq. 90}$$

B.3.4. Mostra nº4

MOSTRA N°4		
TEMPS (ms)	VEL. MOTOR ESQ. (cm/s)	VEL. MOTOR DRET (cm/s)
0	0.00	0.00
100	2.89	2.31
200	13.89	13.89
300	23.73	24.31
400	31.84	31.26
500	36.47	36.76
600	39.37	40.53
700	42.55	43.42
800	45.16	45.16
900	44.87	46.32
1000	46.60	46.89
1100	46.60	47.18
1200	46.89	48.05
1300	48.05	48.05
1400	48.05	48.63
1500	48.34	49.50
1600	48.92	49.21
1700	48.63	49.79
1800	49.50	49.79
1900	48.92	49.79
2000	49.50	50.95
2100	50.08	50.08
2200	48.92	50.37
2300	49.79	50.37
2400	50.08	50.66
2500	49.50	50.95
2600	50.37	50.37
2700	49.50	50.66
2800	50.08	50.95
2900	50.66	50.95
3000	49.21	50.66

Taula 54. Mostra nº4 amb D=40%

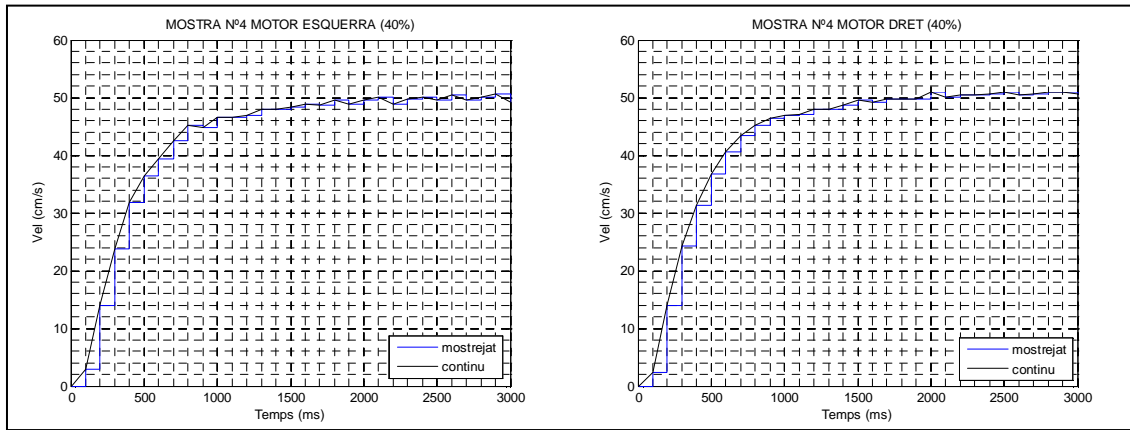


Figura 79. Representació gràfica mostra n°4 motor esquerra i dret amb D=40%

Mitjançant la comanda “ident” del matlab s’aconsegueixen les funcions transferències següents:

$$F_{4E(40\%)}(s) = \frac{13,74}{0,312s + 1} \tag{Eq. 91}$$

$$F_{4D(40\%)}(s) = \frac{13,98}{0,314s + 1} \tag{Eq. 92}$$

B.3.5. Mostra n°5

MOSTRA N°5		
TEMPS (ms)	VEL. MOTOR ESQ. (cm/s)	VEL. MOTOR DRET (cm/s)
0	0.00	0.00
100	2.60	3.18
200	13.02	12.73
300	23.16	22.29
400	30.97	29.81
500	35.60	35.60
600	38.79	40.53
700	42.55	42.55
800	44.00	44.00
900	44.87	46.32
1000	46.60	46.32
1100	46.60	47.47
1200	46.89	48.05
1300	47.76	48.34
1400	47.47	48.63
1500	49.21	48.63

Taula 55. Mostra n°5 amb D=40% de 0 a 1500ms

MOSTRA N°5		
TEMPS (ms)	VEL. MOTOR ESQ. (cm/s)	VEL. MOTOR DRET (cm/s)
1600	48.92	49.21
1700	48.34	49.79
1800	49.79	49.79
1900	49.21	50.08
2000	49.79	50.37
2100	50.08	50.08
2200	49.50	50.95
2300	50.37	50.08
2400	49.50	50.37
2500	49.79	50.37
2600	50.66	50.66
2700	50.08	51.24
2800	50.95	50.66
2900	50.66	50.95
3000	50.95	51.24
3100	49.50	49.79

Taula 56. Mostra n°5 amb D=40% de 1600ms a 3100ms

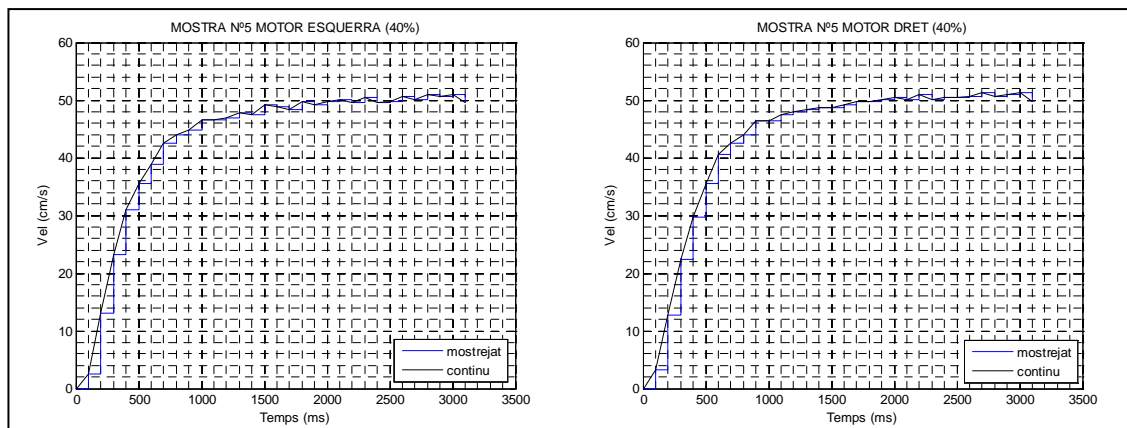


Figura 80. Representació gràfica mostra n°5 motor esquerra i dret amb D=40%

Mitjançant la comanda “ident” del matlab s’aconsegueixen les funcions transferències següents:

$$F_{5E(40\%)}(s) = \frac{13,85}{0,332s + 1} \tag{Eq. 93}$$

$$F_{5D(40\%)}(s) = \frac{13,99}{0,34s + 1} \tag{Eq. 94}$$

B.3.6. Mostra nº6

MOSTRA N°6		
TEMPS (ms)	VEL. MOTOR ESQ. (cm/s)	VEL. MOTOR DRET (cm/s)
0	0.00	0.00
100	5.79	5.21
200	16.79	15.34
300	25.18	24.89
400	31.55	32.42
500	37.34	37.05
600	40.81	41.10
700	42.26	44.00
800	44.29	44.58
900	45.74	45.74
1000	45.45	46.89
1100	46.89	46.89
1200	46.89	47.76
1300	47.18	48.05
1400	48.34	48.34
1500	47.76	48.92
1600	48.63	48.92
1700	48.92	49.21
1800	48.63	50.08
1900	49.79	49.79
2000	49.50	50.37
2100	49.21	50.08
2200	50.08	50.37
2300	48.92	50.66
2400	50.08	50.37
2500	49.79	50.66
2600	49.50	50.37
2700	50.66	50.95
2800	49.79	51.53
2900	50.66	51.24
3000	50.08	50.95

Taula 57. Mostra nº6 amb D=40%

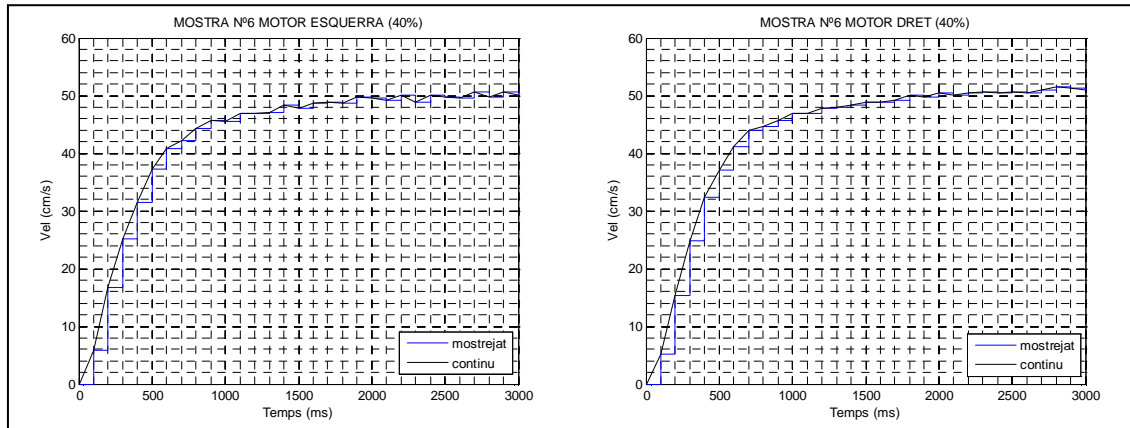


Figura 81. Representació gràfica mostra n°6 motor esquerra i dret amb D=40%

Mitjançant la comanda “ident” del matlab s’aconsegueixen les funcions transferències següents:

$$F_{6E(40\%)}(s) = \frac{13,72}{0,311s + 1} \tag{Eq. 95}$$

$$F_{6D(40\%)}(s) = \frac{13,93}{0,311s + 1} \tag{Eq. 96}$$

B.3.7. Mostra n°7

MOSTRA N°7		
TEMPS (ms)	VEL. MOTOR ESQ. (cm/s)	VEL. MOTOR DRET (cm/s)
0	0.00	0.00
100	3.18	3.47
200	14.18	14.47
300	23.44	22.87
400	30.97	30.68
500	36.76	35.89
600	39.66	40.81
700	41.97	42.84
800	44.29	44.58
900	44.87	46.03
1000	46.03	46.60
1100	46.89	47.18
1200	46.32	47.76
1300	47.47	48.34
1400	48.05	49.21
1500	47.47	48.63

Taula 58. Mostra n°7 amb D=40% de 0 a 1500ms

MOSTRA N°7		
TEMPS (ms)	VEL. MOTOR ESQ. (cm/s)	VEL. MOTOR DRET (cm/s)
1600	48.92	48.92
1700	48.34	49.50
1800	48.63	49.50
1900	49.21	49.79
2000	48.34	49.50
2100	49.21	50.08
2200	49.50	50.66
2300	49.21	49.79
2400	50.37	50.37
2500	49.50	50.08
2600	49.79	50.08
2700	50.08	50.95
2800	49.50	50.66
2900	51.24	50.95
3000	50.37	50.95
3100	49.21	50.08

Taula 59. Mostra n°7 amb D=40% de 1600ms a 3100ms

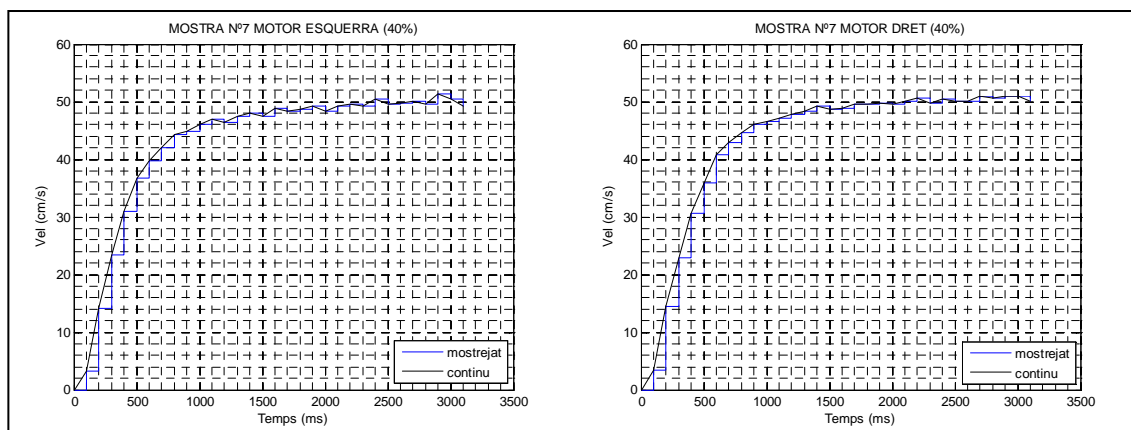


Figura 82. Representació gràfica mostra n°7 motor esquerra i dret amb D=40%

Mitjançant la comanda “ident” del matlab s’aconsegueixen les funcions transferències següents:

$$F_{7E(40\%)}(s) = \frac{13,69}{0,321s + 1} \tag{Eq. 97}$$

$$F_{7D(40\%)}(s) = \frac{13,93}{0,328s + 1} \tag{Eq. 98}$$

B.3.8. Mostra nº8

MOSTRA N°8		
TEMPS (ms)	VEL. MOTOR ESQ. (cm/s)	VEL. MOTOR DRET (cm/s)
0	0.00	0.00
100	1.44	0.86
200	11.29	10.13
300	22.29	20.84
400	29.52	29.52
500	34.45	34.74
600	39.08	39.37
700	42.26	42.55
800	43.42	44.00
900	44.87	45.45
1000	46.32	46.89
1100	46.03	46.89
1200	47.18	47.76
1300	47.18	48.34
1400	47.18	48.05
1500	48.34	48.63
1600	48.34	48.92
1700	48.05	49.50
1800	49.21	50.08
1900	48.34	49.50
2000	48.92	50.08
2100	48.92	50.08
2200	48.92	50.08
2300	50.08	50.66
2400	49.21	50.08
2500	49.50	50.37
2600	50.37	50.66
2700	49.50	50.66
2800	50.95	51.24
2900	50.08	50.95
3000	50.66	51.53
3100	50.66	51.53

Taula 60. Mostra nº8 amb D=40%

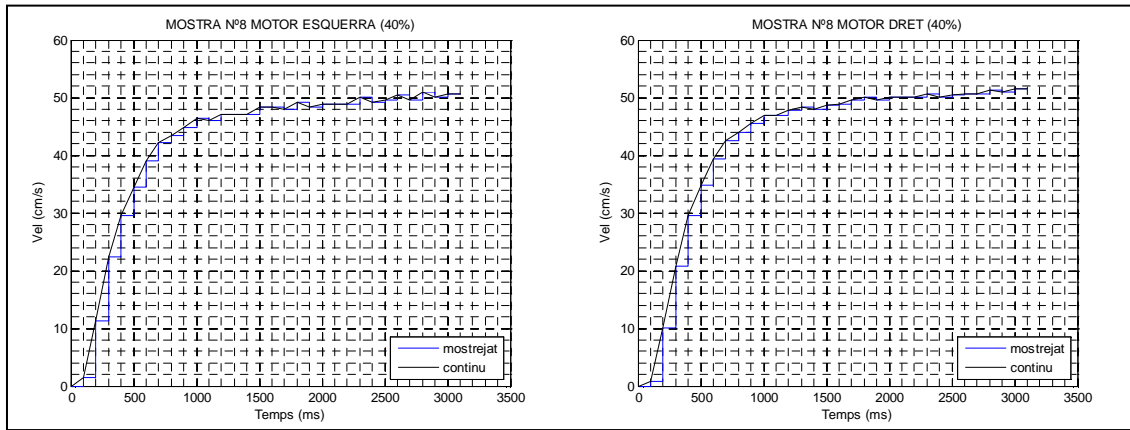


Figura 83. Representació gràfica mostra n°8 motor esquerra i dret amb D=40%

Mitjançant la comanda “ident” del matlab s’aconsegueixen les funcions transferències següents:

$$F_{8E(40\%)}(s) = \frac{13,69}{0,33s + 1} \tag{Eq. 99}$$

$$F_{8D(40\%)}(s) = \frac{13,98}{0,343s + 1} \tag{Eq. 100}$$

B.3.9. Mostra n°9

MOSTRA N°9		
TEMPS (ms)	VEL. MOTOR ESQ. (cm/s)	VEL. MOTOR DRET (cm/s)
0	0.00	0.00
100	3.47	3.76
200	14.18	15.05
300	23.73	24.02
400	31.55	31.55
500	36.76	37.34
600	39.66	40.53
700	41.97	42.84
800	44.58	44.87
900	45.16	45.74
1000	46.32	46.60
1100	47.18	47.18
1200	46.60	47.47
1300	47.76	48.34
1400	48.05	48.05
1500	47.76	48.92

Taula 61. Mostra n°9 amb D=40% de 0 a 1500ms

MOSTRA N°9		
TEMPS (ms)	VEL. MOTOR ESQ. (cm/s)	VEL. MOTOR DRET (cm/s)
1600	49.21	50.08
1700	48.34	48.92
1800	48.92	49.79
1900	49.50	50.08
2000	48.92	50.37
2100	50.08	51.24
2200	49.79	50.37
2300	49.50	50.37
2400	50.37	50.37
2500	49.79	50.66
2600	50.95	51.24
2700	50.37	50.37
2800	50.08	51.24
2900	49.79	50.37

Taula 62. Mostra n°9 amb D=40% de 1600ms a 2900ms

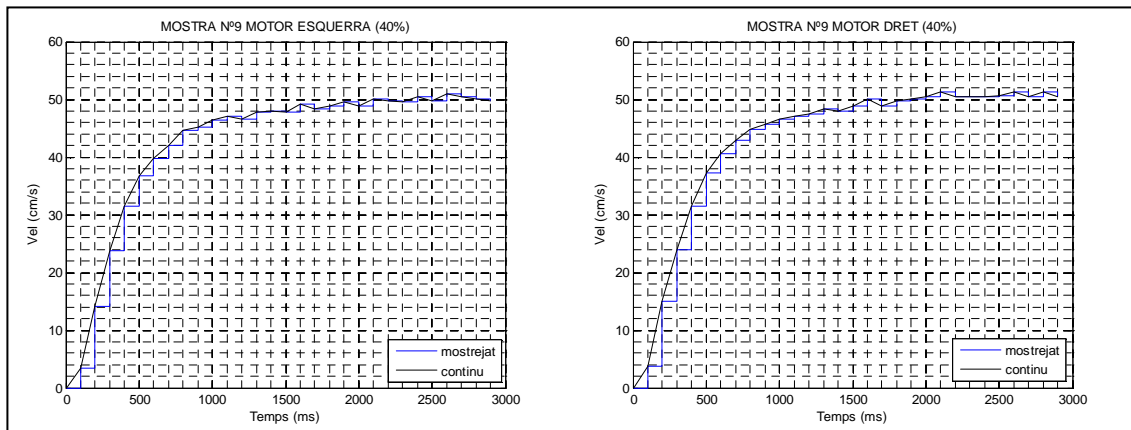


Figura 84. Representació gràfica mostra n°9 motor esquerra i dret amb D=40%

Mitjançant la comanda “ident” del matlab s’aconsegueixen les funcions transferències següents:

$$F_{9E(40\%)}(s) = \frac{13,76}{0,316s + 1} \tag{Eq. 101}$$

$$F_{9D(40\%)}(s) = \frac{13,96}{0,319s + 1} \tag{Eq. 102}$$

B.3.10.Mostra nº10

MOSTRA Nº10		
TEMPS (ms)	VEL. MOTOR ESQ. (cm/s)	VEL. MOTOR DRET (cm/s)
0	0.00	0.00
100	2.31	2.60
200	11.58	12.15
300	21.13	21.71
400	28.37	29.52
500	35.02	35.89
600	39.66	39.66
700	41.39	42.55
800	44.00	44.87
900	45.74	45.74
1000	45.45	46.89
1100	46.89	47.76
1200	47.47	47.76
1300	47.18	48.63
1400	48.63	48.63
1500	48.05	48.63
1600	48.34	49.50
1700	49.50	48.92
1800	48.34	49.21
1900	49.50	50.08
2000	49.50	49.79
2100	49.21	50.66
2200	50.08	50.08
2300	48.92	50.08
2400	49.50	50.66
2500	49.79	49.79
2600	49.21	50.66
2700	50.66	50.66
2800	50.08	50.95
2900	50.66	51.53
3000	50.66	50.66

Taula 63. Mostra nº10 amb D=40%

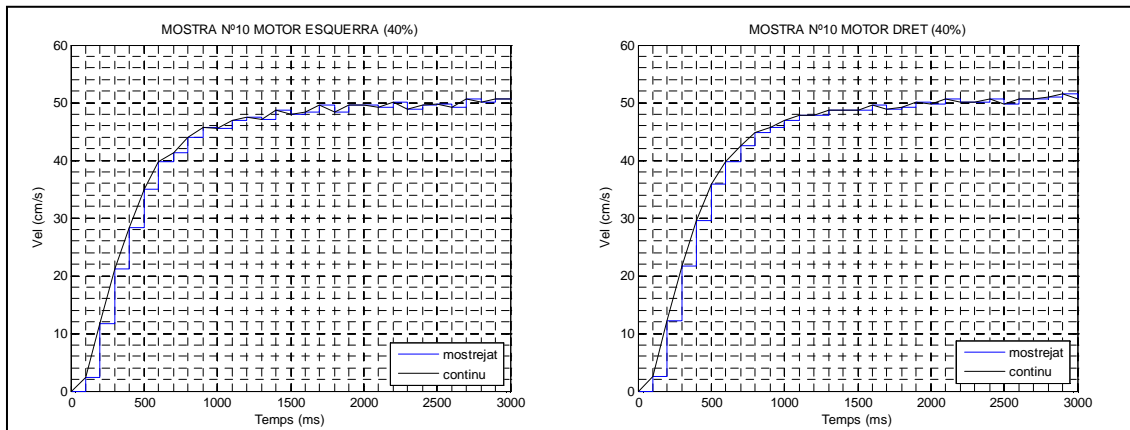


Figura 85. Representació gràfica mostra n°10 motor esquerra i dret amb D=40%

Mitjançant la comanda “ident” del matlab s’aconsegueixen les funcions transferències següents:

$$F_{10E(40\%)}(s) = \frac{13,8}{0,341s + 1} \tag{Eq. 103}$$

$$F_{10D(40\%)}(s) = \frac{13,96}{0,333s + 1} \tag{Eq. 104}$$

B.3.11.Funció transferència motor dret amb cycle de treball 40%

Es calcula la mitjana de totes les funcions transferències aconseguides del motor dret amb un cycle de treball del 40%.

$$K_{mig} = 13,95$$

$$\tau_{mig} = 0,329$$

$$F_{D(40\%)}(s) = \frac{13,95}{0,329s + 1} \tag{Eq. 105}$$

B.3.12. Funció transferència motor esquerra amb cicle de treball 40%

Es calcula la mitjana de totes les funcions transferències aconseguides del motor esquerra amb un cicle de treball del 40%.

$$K_{mig} = 13,74$$

$$\tau_{mig} = 0,325$$

$$F_{E(40\%)}(s) = \frac{13,74}{0,325s + 1} \tag{Eq. 106}$$

B.4. Mostres respostes motors amb cicle de treball 50%

A continuació es mostra els resultats de les 10 mostres aconseguides del motor esquerra i dret aplicant un PWM d'un cicle de treball del 50%.

B.4.1. Mostra nº1

MOSTRA Nº1		
TEMPS (ms)	VEL. MOTOR ESQ. (cm/s)	VEL. MOTOR DRET (cm/s)
0	0.00	0.00
100	2.89	2.89
200	17.08	15.92
300	28.37	28.37
400	37.34	37.63
500	43.13	42.84
600	46.03	46.89
700	48.92	49.50
800	50.08	50.66
900	50.37	52.11
1000	51.82	51.82
1100	51.53	52.68
1200	52.97	53.26
1300	52.68	52.97
1400	52.68	54.42
1500	53.55	53.84
1600	53.26	54.13
1700	53.55	54.13
1800	53.26	54.42
1900	53.84	55.00
2000	53.84	54.42

Taula 64. Mostra nº1 amb D=50% de 0 a 2000ms

MOSTRA N°1		
TEMPS (ms)	VEL. MOTOR ESQ. (cm/s)	VEL. MOTOR DRET (cm/s)
2100	53.55	55.29
2200	54.71	54.71
2300	53.84	55.29
2400	54.42	54.71
2500	54.13	54.71
2600	53.55	54.42

Taula 65. Mostra n°1 amb D=50% de 2100ms a 2600ms

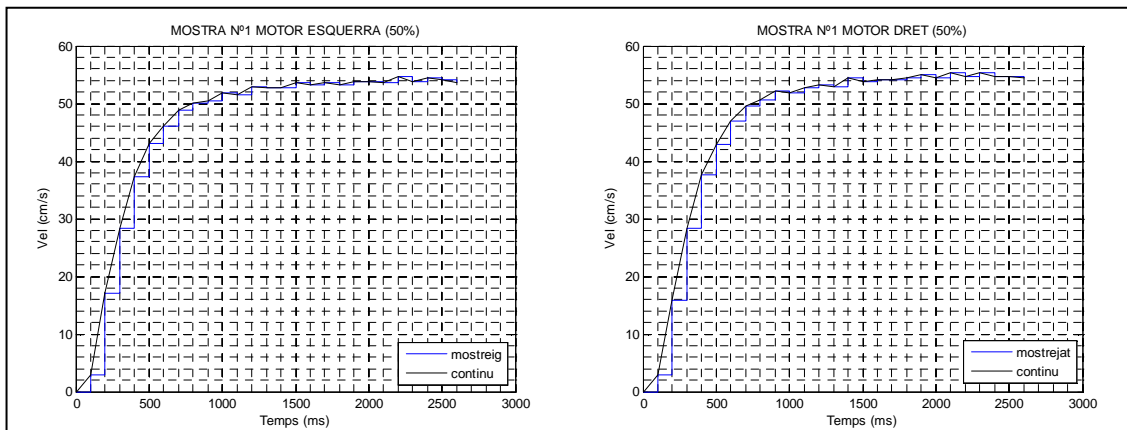


Figura 86. Representació gràfica mostra n°1 motor esquerra i dret amb D=50%

Mitjançant la comanda “ident” del matlab s’aconsegueixen les funcions transferències següents:

$$F_{1E(50\%)}(s) = \frac{11,93}{0,261s + 1} \tag{Eq. 107}$$

$$F_{1D(50\%)}(s) = \frac{12,13}{0,263s + 1} \tag{Eq. 108}$$

B.4.2. Mostra nº2

MOSTRA Nº2		
TEMPS (ms)	VEL. MOTOR ESQ. (cm/s)	VEL. MOTOR DRET (cm/s)
0	0.00	0.00
100	0.57	0.86
200	12.73	12.44
300	26.05	26.05
400	35.31	35.60
500	41.68	41.68
600	45.74	46.03
700	47.76	48.92
800	50.37	50.37
900	50.66	51.53
1000	51.24	52.39
1100	52.39	52.68
1200	52.11	54.13
1300	53.26	53.55
1400	52.68	54.42
1500	52.97	53.84
1600	53.55	54.13
1700	53.26	54.42
1800	54.42	55.00
1900	53.55	55.29
2000	54.71	55.29
2100	54.13	55.29
2200	53.84	55.00
2300	54.42	55.00
2400	53.84	55.00
2500	55.00	55.29
2600	54.42	55.87

Taula 66. Mostra nº2 amb D=50%

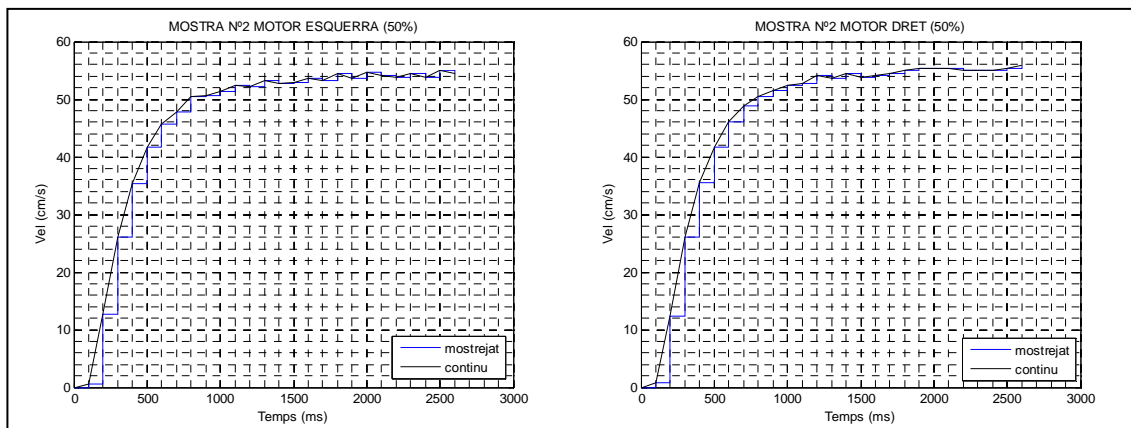


Figura 87. Representació gràfica mostra nº2 motor esquerra i dret amb D=50%

Mitjançant la comanda “ident” del matlab s’aconsegueixen les funcions transferències següents:

$$F_{2E(50\%)}(s) = \frac{12,01}{0,281s + 1} \quad (\text{Eq. 109})$$

$$F_{2D(50\%)}(s) = \frac{12,23}{0,286s + 1} \quad (\text{Eq. 110})$$

B.4.3. Mostra nº3

MOSTRA Nº3		
TEMPS (ms)	VEL. MOTOR ESQ. (cm/s)	VEL. MOTOR DRET (cm/s)
0	0.00	0.00
100	3.18	2.31
200	17.08	15.34
300	28.95	28.37
400	36.47	37.34
500	43.13	42.84
600	46.60	46.89
700	48.05	49.21
800	50.95	50.95
900	50.66	52.11
1000	51.82	52.39
1100	52.39	52.68
1200	52.11	53.26
1300	53.26	53.55
1400	52.97	54.71
1500	53.55	54.13
1600	53.55	54.71
1700	52.97	54.13
1800	54.13	54.42
1900	53.26	54.42
2000	54.42	55.00
2100	53.84	55.29
2200	53.84	54.71
2300	54.42	55.58
2400	53.55	54.71
2500	54.71	55.29
2600	54.13	55.29
2700	53.55	54.13

Taula 67. Mostra nº3 amb D=50%

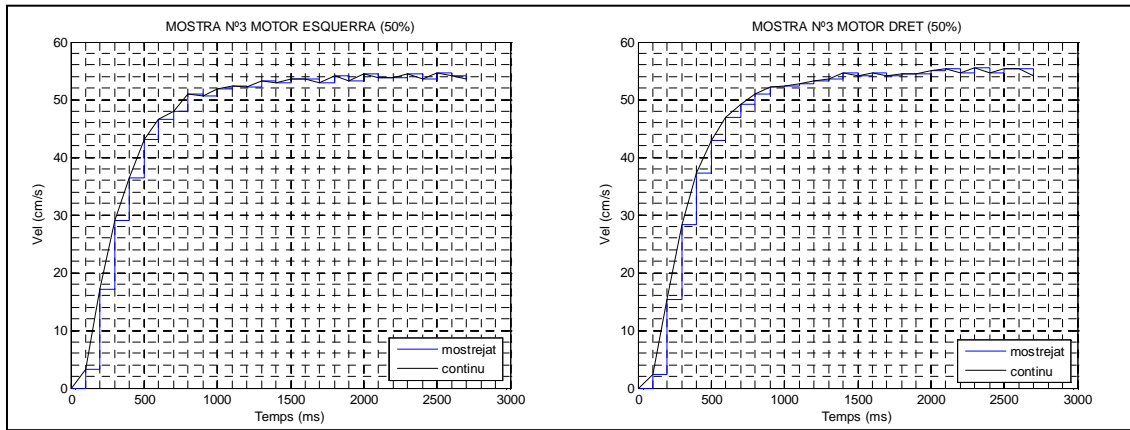


Figura 88. Representació gràfica mostra n°3 motor esquerra i dret amb D=50%

Mitjançant la comanda “ident” del matlab s’aconsegueixen les funcions transferències següents:

$$F_{3E(50\%)}(s) = \frac{11,96}{0,262s + 1} \tag{Eq. 111}$$

$$F_{3D(50\%)}(s) = \frac{12,17}{0,267s + 1} \tag{Eq. 112}$$

B.4.4. Mostra n°4

MOSTRA Nº4		
TEMPS (ms)	VEL. MOTOR ESQ. (cm/s)	VEL. MOTOR DRET (cm/s)
0	0.00	0.00
100	4.63	5.21
200	18.81	18.81
300	29.81	29.81
400	38.50	38.50
500	44.29	44.29
600	46.32	47.18
700	49.21	49.79
800	50.66	51.24
900	50.66	51.53
1000	52.39	52.68
1100	51.53	52.68
1200	52.68	53.26
1300	52.68	53.55
1400	52.39	53.84
1500	53.84	54.42

Taula 68. Mostra n°4 amb D=50% de 0 a 1500ms

MOSTRA N°4		
TEMPS (ms)	VEL. MOTOR ESQ. (cm/s)	VEL. MOTOR DRET (cm/s)
1600	52.97	53.84
1700	53.84	54.13
1800	53.55	54.42
1900	54.13	55.00
2000	54.42	55.29
2100	53.55	54.71
2200	55.00	55.29
2300	53.84	54.71
2400	55.00	55.29
2500	54.42	55.00
2600	54.71	55.58
2700	55.29	55.87
2800	53.26	54.42

Taula 69. Mostra n°4 amb D=50% de 1600ms a 2800ms

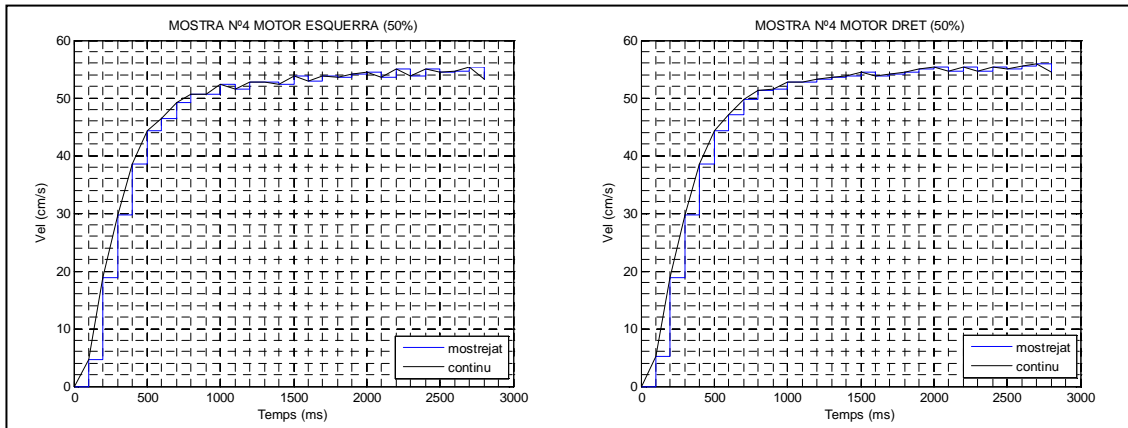


Figura 89. Representació gràfica mostra n°4 motor esq. amb D=50%

Mitjançant la comanda “ident” del matlab s’aconsegueixen les funcions transferències següents:

$$F_{4E(50\%)}(s) = \frac{11,97}{0,251s + 1} \tag{Eq. 113}$$

$$F_{4D(50\%)}(s) = \frac{12,16}{0,257s + 1} \tag{Eq. 114}$$

B.4.5. Mostra n^o5

MOSTRA N ^o 5		
TEMPS (ms)	VEL. MOTOR ESQ. (cm/s)	VEL. MOTOR DRET (cm/s)
0	0.00	0.00
100	5.79	5.79
200	20.55	19.97
300	31.55	31.26
400	38.50	39.08
500	44.00	44.00
600	47.47	47.47
700	48.34	49.21
800	50.95	51.53
900	50.95	51.53
1000	51.53	52.39
1100	52.39	52.97
1200	52.11	53.26
1300	53.55	53.84
1400	52.68	53.55
1500	53.55	54.13
1600	53.55	54.42
1700	53.26	54.42
1800	54.42	55.00
1900	53.55	54.71
2000	54.42	55.29
2100	53.84	54.42
2200	54.42	55.29
2300	54.71	54.71
2400	53.84	55.29
2500	55.00	55.87
2600	54.13	55.58
2700	55.58	56.16
2800	55.00	55.58
2900	55.58	56.45

Taula 70. Mostra n^o5 amb D=50%

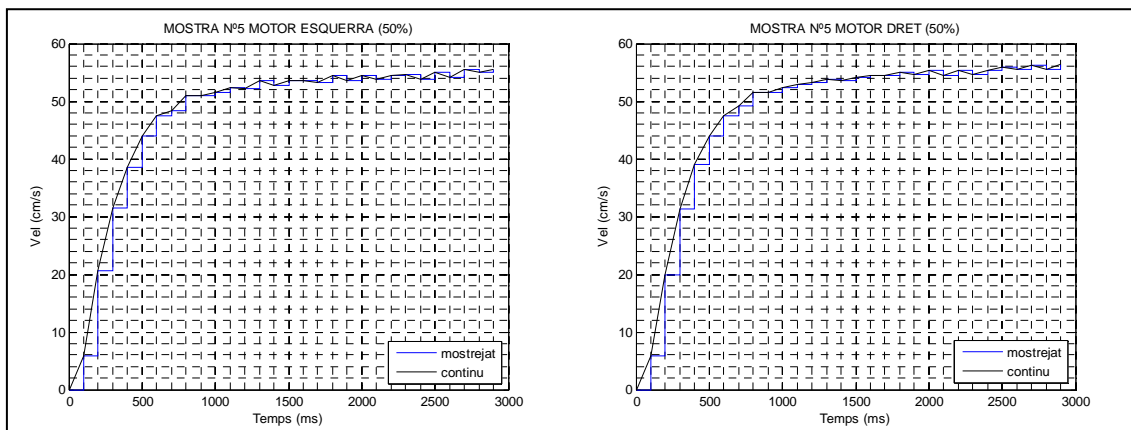


Figura 90. Representació gràfica mostra n^o5 motor esquerra i dret amb D=50%

Mitjançant la comanda “ident” del matlab s'aconsegueixen les funcions transferències següents:

$$F_{5E(50\%)}(s) = \frac{12,01}{0,247s + 1} \quad (\text{Eq. 115})$$

$$F_{5D(50\%)}(s) = \frac{12,2}{0,255s + 1} \quad (\text{Eq. 116})$$

B.4.6. Mostra nº6

MOSTRA N°6		
TEMPS (ms)	VEL. MOTOR ESQ. (cm/s)	VEL. MOTOR DRET (cm/s)
0	0.00	0.00
100	8.10	7.52
200	22.87	21.42
300	34.16	33.00
400	39.95	39.95
500	44.29	44.58
600	48.34	48.63
700	49.21	49.50
800	50.37	50.95
900	51.53	51.53
1000	50.95	52.39
1100	52.68	53.55
1200	52.11	52.68
1300	52.68	53.55
1400	52.97	53.26
1500	52.68	53.84
1600	53.84	54.42
1700	54.42	54.13
1800	54.13	55.00
1900	53.84	54.13
2000	53.55	54.71
2100	54.42	54.71
2200	53.55	55.00
2300	55.00	55.58
2400	53.84	54.71
2500	53.84	54.42

Taula 71. Mostra nº6 amb D=50%

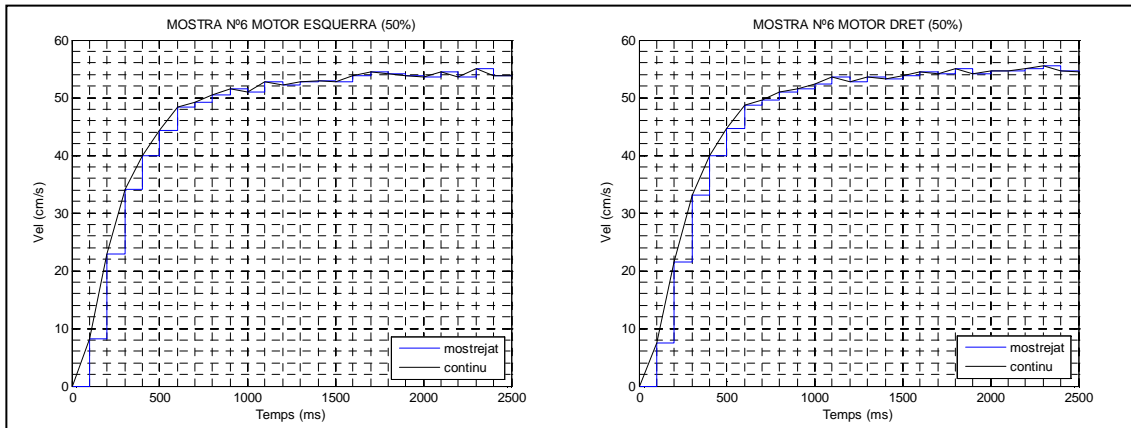


Figura 91. Representació gràfica mostra n°6 motor esquerra i dret amb D=50%

Mitjançant la comanda “ident” del matlab s’aconsegueixen les funcions transferències següents:

$$F_{6E(50\%)}(s) = \frac{11,89}{0,229s + 1} \tag{Eq. 117}$$

$$F_{6D(50\%)}(s) = \frac{12,04}{0,233s + 1} \tag{Eq. 118}$$

B.4.7. Mostra n°7

MOSTRA N°7		
TEMPS (ms)	VEL. MOTOR ESQ. (cm/s)	VEL. MOTOR DRET (cm/s)
0	0.00	0.00
100	8.10	7.23
200	21.71	20.55
300	31.84	32.13
400	39.95	40.24
500	44.87	44.58
600	46.89	47.47
700	49.50	50.37
800	50.66	50.95
900	50.95	52.11
1000	52.68	52.68
1100	51.82	52.68
1200	52.97	53.84
1300	52.68	53.26
1400	52.68	54.13
1500	53.55	53.84

Taula 72. Mostra n°7 amb D=50% de 0 a 1500ms

MOSTRA N°7		
TEMPS (ms)	VEL. MOTOR ESQ. (cm/s)	VEL. MOTOR DRET (cm/s)
1600	52.97	54.42
1700	54.13	55.00
1800	53.55	54.71
1900	54.13	55.29
2000	54.42	54.42
2100	53.55	55.00
2200	54.42	54.71
2300	53.55	54.71
2400	54.71	55.58

Taula 73. Mostra n°7 amb D=50% de 1600ms a 2400ms

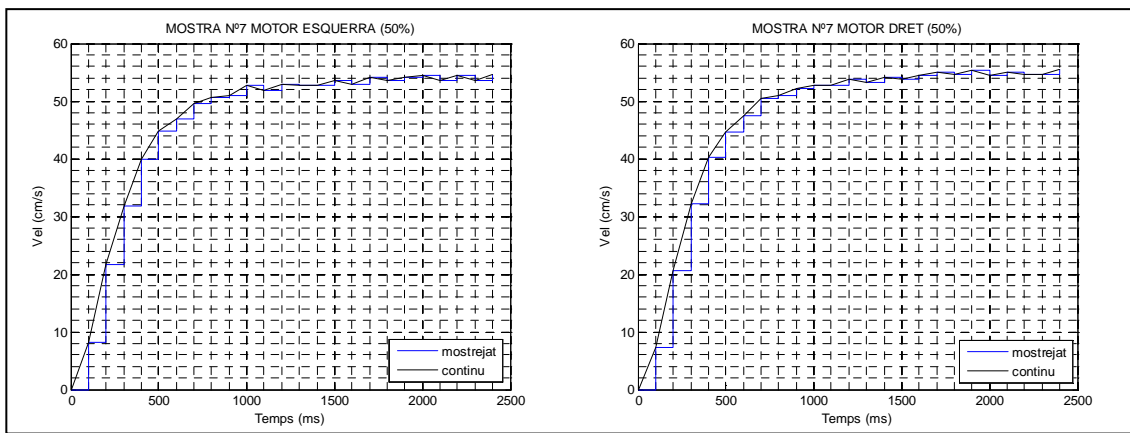


Figura 92. Representació gràfica mostra n°7 motor esquerra i dret amb D=50%

Mitjançant la comanda “ident” del matlab s’aconsegueixen les funcions transferències següents:

$$F_{7E(50\%)}(s) = \frac{11,91}{0,234s + 1} \tag{Eq. 119}$$

$$F_{7D(50\%)}(s) = \frac{12,09}{0,239s + 1} \tag{Eq. 120}$$

B.4.8. Mostra n^o8

MOSTRA N ^o 8		
TEMPS (ms)	VEL. MOTOR ESQ. (cm/s)	VEL. MOTOR DRET (cm/s)
0	0.00	0.00
100	0.57	0.57
200	12.15	12.44
300	25.18	25.47
400	35.31	35.60
500	41.68	41.68
600	44.87	46.03
700	48.34	48.63
800	49.50	50.08
900	50.66	51.82
1000	51.82	51.53
1100	51.53	52.68
1200	52.68	53.26
1300	52.68	53.26
1400	52.68	54.42
1500	53.55	53.55
1600	52.68	54.42
1700	53.84	54.13
1800	53.26	54.42
1900	53.84	54.71
2000	54.13	54.71
2100	53.84	55.29
2200	54.71	54.71
2300	53.55	55.29
2400	54.71	54.71
2500	53.55	53.84

Taula 74. Mostra n^o8 amb D=50%

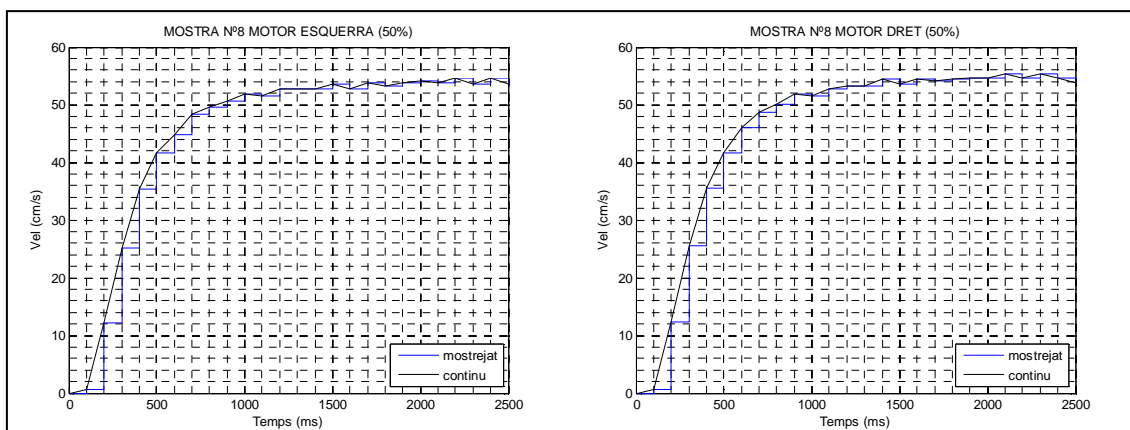


Figura 93. Representació gràfica mostra n^o8 motor esquerra i dret amb D=50%

Mitjançant la comanda “ident” del matlab s'aconsegueixen les funcions transferències següents:

$$F_{8E(50\%)}(s) = \frac{11,96}{0,279s + 1} \quad (\text{Eq. 121})$$

$$F_{8D(50\%)}(s) = \frac{12,14}{0,281s + 1} \quad (\text{Eq. 122})$$

B.4.9. Mostra nº9

MOSTRA N°9		
TEMPS (ms)	VEL. MOTOR ESQ. (cm/s)	VEL. MOTOR DRET (cm/s)
0	0.00	0.00
100	4.34	5.21
200	18.81	18.23
300	31.55	29.81
400	39.08	38.21
500	42.84	44.58
600	47.18	47.47
700	48.92	49.79
800	49.50	51.24
900	51.53	51.82
1000	51.24	52.97
1100	52.11	52.68
1200	52.39	52.97
1300	52.39	53.26
1400	53.55	53.55
1500	52.68	54.42
1600	53.84	54.13
1700	53.55	55.00
1800	53.55	54.42
1900	54.13	54.42
2000	53.55	54.42
2100	54.71	55.00
2200	53.84	55.00
2300	54.71	55.00
2400	54.42	55.29
2500	54.42	55.00
2600	55.00	55.29

Taula 75. Mostra nº9 amb D=50%

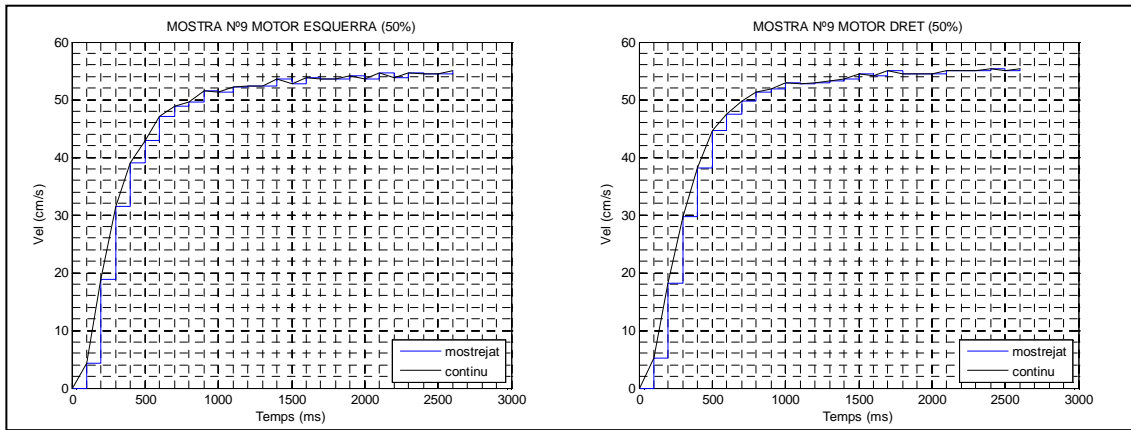


Figura 94. Representació gràfica mostra n^o9 motor esquerra i dret amb D=50%

Mitjançant la comanda “ident” del matlab s’aconsegueixen les funcions transferències següents:

$$F_{9E(50\%)}(s) = \frac{11,94}{0,246s + 1} \tag{Eq. 123}$$

$$F_{9D(50\%)}(s) = \frac{12,14}{0,257s + 1} \tag{Eq. 124}$$

B.4.10.Mostra n^o10

MOSTRA N ^o 10		
TEMPS (ms)	VEL. MOTOR ESQ. (cm/s)	VEL. MOTOR DRET (cm/s)
0	0.00	0.00
100	3.76	3.47
200	18.81	17.08
300	30.97	29.52
400	39.08	38.21
500	43.13	44.00
600	47.18	47.47
700	49.50	50.08
800	49.79	50.66
900	51.82	52.11
1000	51.53	52.68
1100	52.68	52.68
1200	52.68	53.55
1300	52.39	52.97
1400	53.84	53.84
1500	52.97	54.13

Taula 76. Mostra n^o10 amb D=50% de 0 a 1500ms

MOSTRA N°10		
TEMPS (ms)	VEL. MOTOR ESQ. (cm/s)	VEL. MOTOR DRET (cm/s)
1600	54.13	54.71
1700	53.55	55.29
1800	54.42	55.00
1900	54.42	55.29
2000	53.84	54.71
2100	54.42	55.29
2200	53.84	55.00
2300	54.71	55.00
2400	54.42	55.58

Taula 77. Mostra n°10 amb D=50% de 1600ms a 2400ms

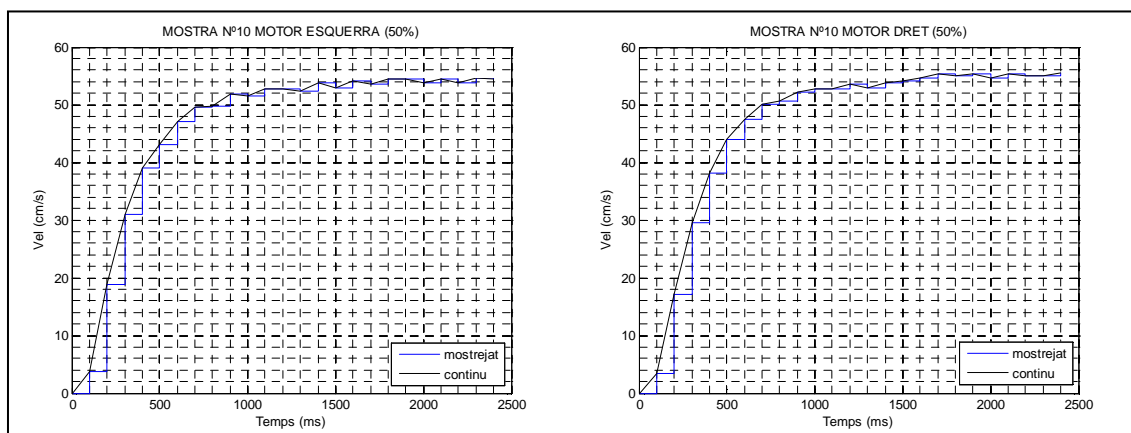


Figura 95. Representació gràfica mostra n°10 motor esquerra i dret amb D=50%

Mitjançant la comanda “ident” del matlab s’aconsegueixen les funcions transferències següents:

$$F_{10E(50\%)}(s) = \frac{11,98}{0,244s + 1} \tag{Eq. 125}$$

$$F_{10D(50\%)}(s) = \frac{12,18}{0,259s + 1} \tag{Eq. 126}$$

B.4.11. Funció transferència motor dret amb cycle de treball 50%

Es calcula la mitjana de totes les funcions transferències aconseguides del motor dret amb un cycle de treball del 50%.

$$K_{\text{mig}} = 12,14$$

$$\tau_{\text{mig}} = 0,259$$

$$F_{D(50\%)}(s) = \frac{12,14}{0,259s + 1} \quad (\text{Eq. 127})$$

B.4.12. Funció transferència motor esquerra amb cycle de treball 50%

Es calcula la mitjana de totes les funcions transferències aconseguides del motor esquerra amb un cycle de treball del 50%.

$$K_{\text{mig}} = 11,95$$

$$\tau_{\text{mig}} = 0,253$$

$$F_{E(50\%)}(s) = \frac{11,95}{0,253s + 1} \quad (\text{Eq. 128})$$

B.5. Mostres respostes motors amb cycle de treball 60%

A continuació es mostra els resultats de les 10 mostres aconseguides del motor esquerra i dret aplicant un PWM d'un cycle de treball del 60%.

B.5.1. Mostra n^o1

MOSTRA N ^o 1		
TEMPS (ms)	VEL. MOTOR ESQ. (cm/s)	VEL. MOTOR DRET (cm/s)
0	0.00	0.00
100	4.34	3.18
200	21.13	19.39
300	34.74	34.74
400	42.55	43.13
500	48.92	48.92
600	51.82	52.68
700	52.97	53.84
800	55.00	55.29
900	54.42	55.29
1000	56.16	56.45
1100	55.58	55.87
1200	56.16	56.74
1300	56.16	57.03
1400	55.87	57.03
1500	57.03	57.32
1600	56.45	57.32
1700	57.32	57.90
1800	56.45	57.32
1900	57.32	57.90
2000	56.45	57.61

Taula 78. Mostra n^o1 amb D=60%

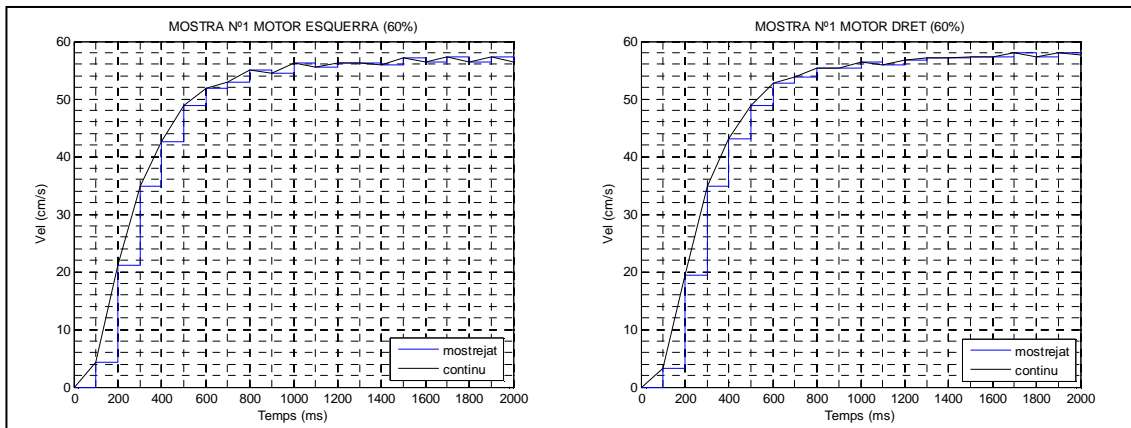


Figura 96. Representació gràfica mostra n^o1 motor esquerra i dret amb D=60%

Mitjançant la comanda “ident” del matlab s’aconsegueixen les funcions transferències següents:

$$F_{1E(60\%)}(s) = \frac{10,49}{0,214s + 1} \quad (\text{Eq. 129})$$

$$F_{1D(60\%)}(s) = \frac{10,63}{0,215s + 1} \quad (\text{Eq. 130})$$

B.5.2. Mostra nº2

MOSTRA Nº2		
TEMPS (ms)	VEL. MOTOR ESQ. (cm/s)	VEL. MOTOR DRET (cm/s)
0	0.00	0.00
100	2.02	1.73
200	18.23	17.94
300	33.00	32.71
400	41.68	42.26
500	48.05	48.34
600	51.53	51.82
700	52.97	53.84
800	55.00	55.58
900	54.42	55.58
1000	56.16	56.45
1100	55.87	56.16
1200	56.16	56.74
1300	56.74	57.03
1400	56.45	57.61
1500	57.03	57.90
1600	56.16	57.90
1700	57.90	58.47
1800	57.03	57.90
1900	57.90	58.47
2000	57.03	57.90
2100	57.61	58.76
2200	56.16	56.74

Taula 79. Mostra nº2 amb D=60%

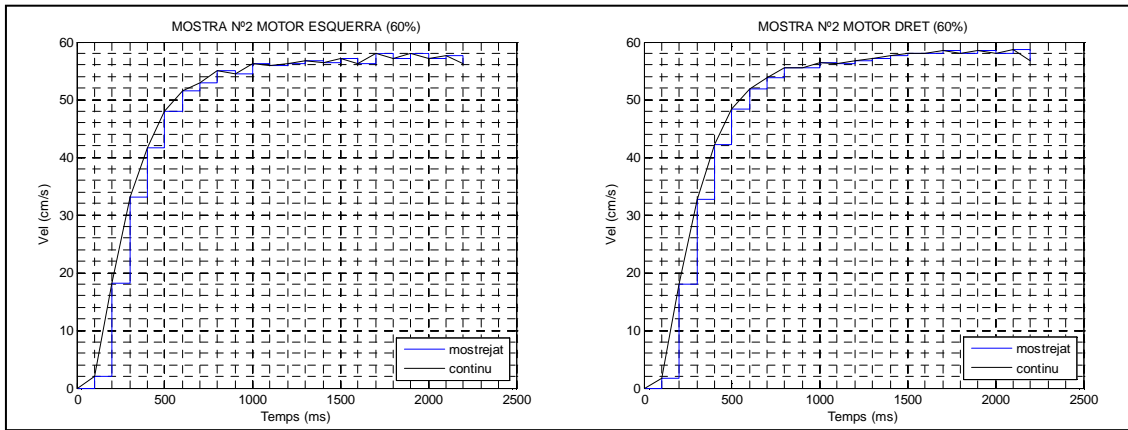


Figura 97. Representació gràfica mostra n^o2 motor esquerra i dret amb D=60%

Mitjançant la comanda “ident” del matlab s’aconsegueixen les funcions transferències següents:

$$F_{2E(60\%)}(s) = \frac{10,56}{0,227s + 1} \tag{Eq. 131}$$

$$F_{2D(60\%)}(s) = \frac{10,72}{0,232s + 1} \tag{Eq. 132}$$

B.5.3. Mostra n^o3

MOSTRA N ^o 3		
TEMPS (ms)	VEL. MOTOR ESQ. (cm/s)	VEL. MOTOR DRET (cm/s)
0	0.00	0.00
100	5.50	6.65
200	22.29	23.16
300	36.18	35.60
400	44.00	44.00
500	48.34	49.50
600	52.39	52.11
700	52.97	54.42
800	54.71	55.29
900	55.00	55.87
1000	55.58	56.74
1100	56.16	56.45
1200	55.58	57.32
1300	57.03	56.74
1400	55.87	57.61
1500	57.32	57.32

Taula 80. Mostra n^o3 amb D=60% de 0 a 1500ms

MOSTRA N°3		
TEMPS (ms)	VEL. MOTOR ESQ. (cm/s)	VEL. MOTOR DRET (cm/s)
1600	56.45	57.61
1700	57.32	57.90
1800	57.03	57.90
1900	57.03	58.47
2000	57.32	57.90
2100	57.61	58.47

Taula 81. Mostra n°3 amb D=60% de 1600ms a 2100ms

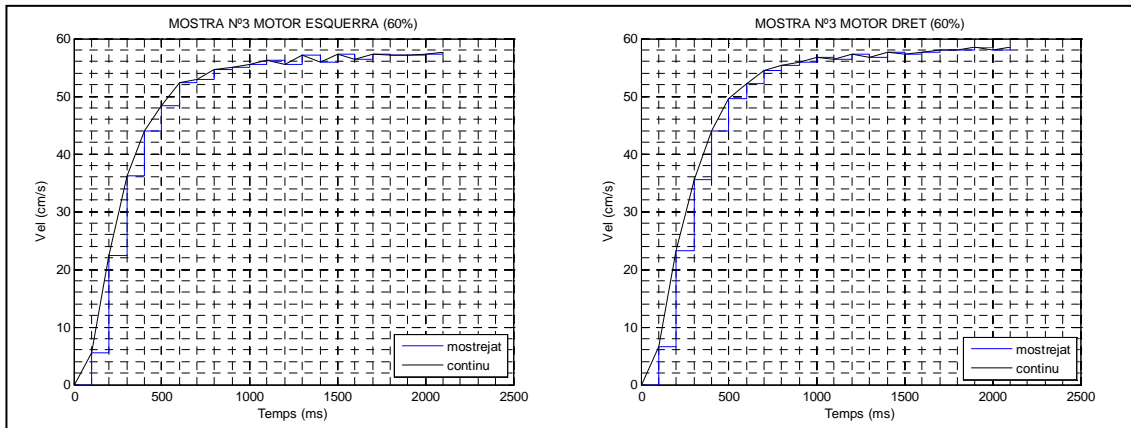


Figura 98. Representació gràfica mostra n°3 motor esquerra i dret amb D=60%

Mitjançant la comanda “ident” del matlab s’aconsegueixen les funcions transferències següents:

$$F_{3E(60\%)}(s) = \frac{10,51}{0,208s + 1} \tag{Eq. 133}$$

$$F_{3D(60\%)}(s) = \frac{10,68}{0,213s + 1} \tag{Eq. 134}$$

B.5.4. Mostra n^o4

MOSTRA N ^o 4		
TEMPS (ms)	VEL. MOTOR ESQ. (cm/s)	VEL. MOTOR DRET (cm/s)
0	0.00	0.00
100	1.73	1.73
200	17.08	17.37
300	32.13	32.13
400	42.26	42.26
500	47.47	48.63
600	50.95	51.82
700	53.26	53.84
800	53.55	55.58
900	55.29	55.58
1000	55.00	56.74
1100	55.87	56.16
1200	55.87	56.74
1300	56.45	57.03
1400	56.16	57.03
1500	55.87	57.32
1600	57.03	57.61
1700	56.45	58.18
1800	57.32	57.90
1900	56.74	58.18
2000	57.32	57.90
2100	57.61	58.18
2200	57.32	57.90
2300	56.74	57.32

Taula 82. Mostra n^o4 amb D=60%

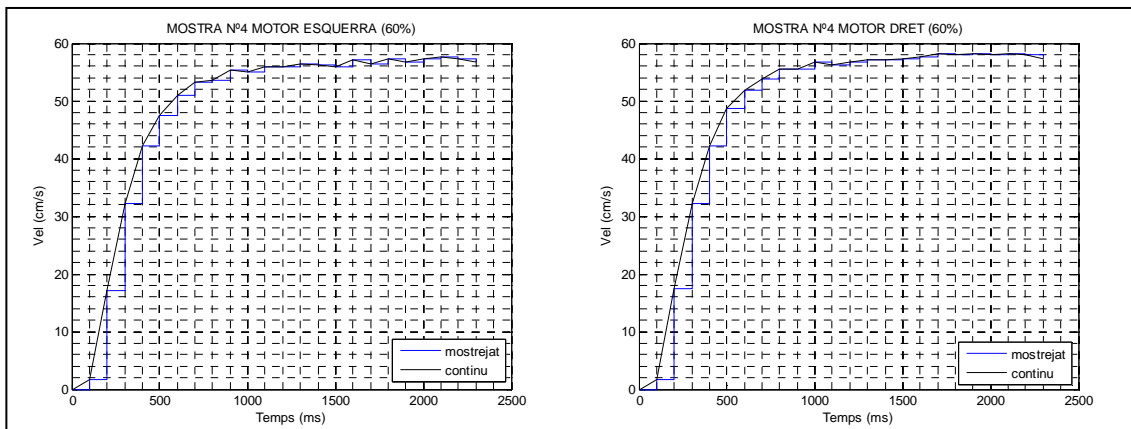


Figura 99. Representació gràfica mostra n^o4 motor esquerra i dret amb D=60%

Mitjançant la comanda “ident” del matlab s’aconsegueixen les funcions transferències següents:

$$F_{4E(60\%)}(s) = \frac{10,53}{0,229s + 1} \quad (\text{Eq. 135})$$

$$F_{4D(60\%)}(s) = \frac{10,69}{0,226s + 1} \quad (\text{Eq. 136})$$

B.5.5. Mostra nº5

MOSTRA Nº5		
TEMPS (ms)	VEL. MOTOR ESQ. (cm/s)	VEL. MOTOR DRET (cm/s)
0	0.00	0.00
100	1.73	1.73
200	17.37	15.92
300	33.29	31.26
400	41.68	41.97
500	47.18	47.76
600	52.11	51.82
700	52.68	53.84
800	55.00	55.29
900	55.29	56.16
1000	55.58	56.16
1100	56.45	57.03
1200	55.87	56.74
1300	56.74	57.32
1400	56.16	57.03
1500	57.03	57.61
1600	56.45	57.61
1700	57.32	57.90
1800	57.32	58.18
1900	56.74	57.90
2000	57.32	58.47
2100	56.74	57.90
2200	58.18	58.76
2300	56.74	58.18
2400	58.18	58.76

Taula 83. Mostra nº5 amb D=60%

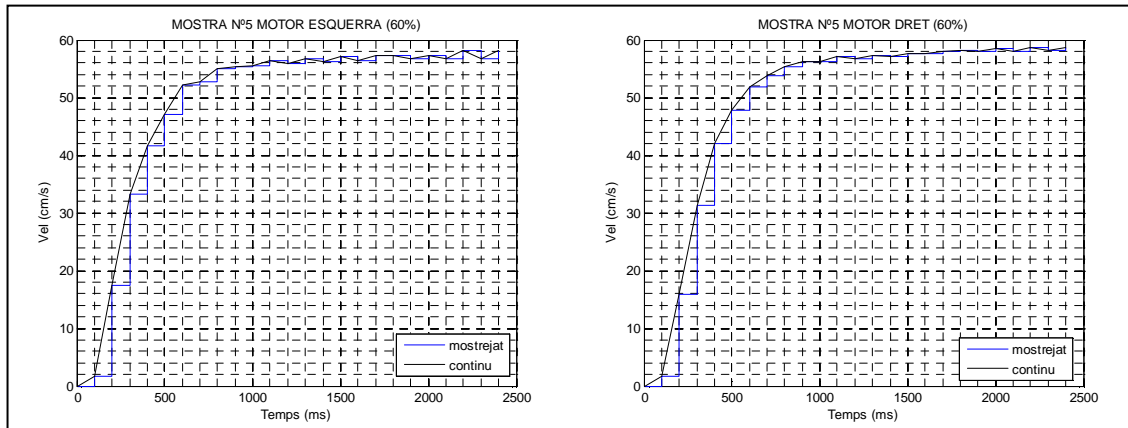


Figura 100. Representació gràfica mostra nº5 motor esquerra i dret amb D=60%

Mitjançant la comanda “ident” del matlab s’aconsegueixen les funcions transferències següents:

$$F_{5E(60\%)}(s) = \frac{10,55}{0,228s + 1} \tag{Eq. 137}$$

$$F_{5D(60\%)}(s) = \frac{10,74}{0,234s + 1} \tag{Eq. 138}$$

B.5.6. Mostra nº6

MOSTRA Nº6		
TEMPS (ms)	VEL. MOTOR ESQ. (cm/s)	VEL. MOTOR DRET (cm/s)
0	0.00	0.00
100	6.65	6.94
200	23.73	23.44
300	35.89	36.47
400	43.71	44.58
500	50.08	50.08
600	51.53	52.39
700	53.55	54.42
800	55.00	55.29
900	55.00	55.87
1000	56.16	56.74
1100	55.58	56.45
1200	57.03	57.61
1300	56.45	57.03
1400	56.74	57.61
1500	57.03	57.61
1600	57.03	57.90

Taula 84. Mostra nº6 amb D=60% de 0 a 1600ms

MOSTRA N°6		
TEMPS (ms)	VEL. MOTOR ESQ. (cm/s)	VEL. MOTOR DRET (cm/s)
1700	57.32	57.90
1800	56.74	57.90
1900	57.61	58.47
2000	57.03	57.90
2100	57.90	58.47
2200	56.45	57.03

Taula 85. Mostra n°6 amb D=60% de 1700ms a 2200ms

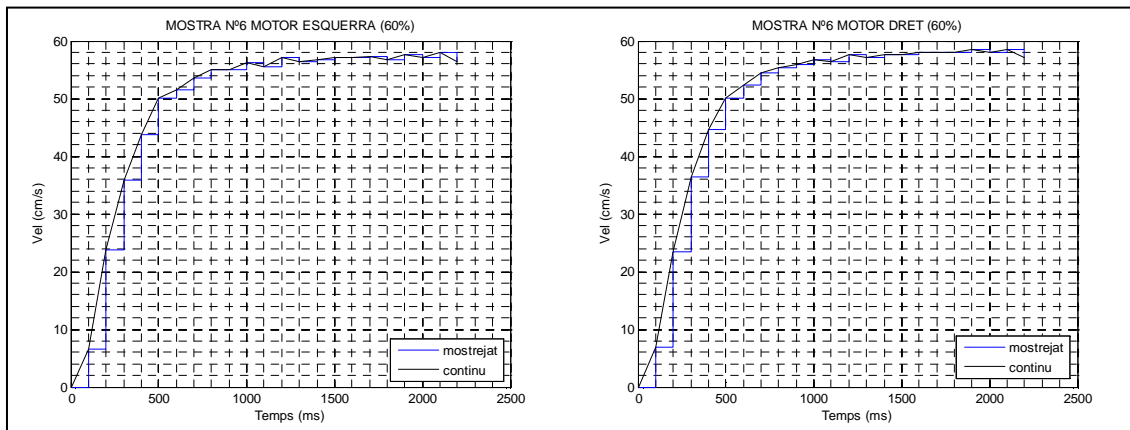


Figura 101. Representació gràfica mostra n°6 motor esquerra i dret amb D=60%

Mitjançant la comanda “ident” del matlab s’aconsegueixen les funcions transferències següents:

$$F_{6E(60\%)}(s) = \frac{10,54}{0,206s + 1} \tag{Eq. 139}$$

$$F_{6D(60\%)}(s) = \frac{10,68}{0,207s + 1} \tag{Eq. 140}$$

B.5.7. Mostra n^o7

MOSTRA N ^o 7		
TEMPS (ms)	VEL. MOTOR ESQ. (cm/s)	VEL. MOTOR DRET (cm/s)
0	0.00	0.00
100	6.94	6.65
200	24.02	22.87
300	36.18	35.60
400	44.00	44.29
500	49.79	50.08
600	51.53	52.39
700	54.13	54.71
800	54.71	54.71
900	55.00	55.58
1000	55.87	56.16
1100	55.58	56.45
1200	56.74	57.32
1300	55.87	57.03
1400	56.74	57.32
1500	56.16	56.74
1600	56.74	57.90
1700	57.03	57.32
1800	56.74	57.90
1900	57.32	57.61
2000	57.03	57.90
2100	57.90	57.90
2200	56.74	57.90
2300	58.18	58.76

Taula 86. Mostra n^o7 amb D=60%

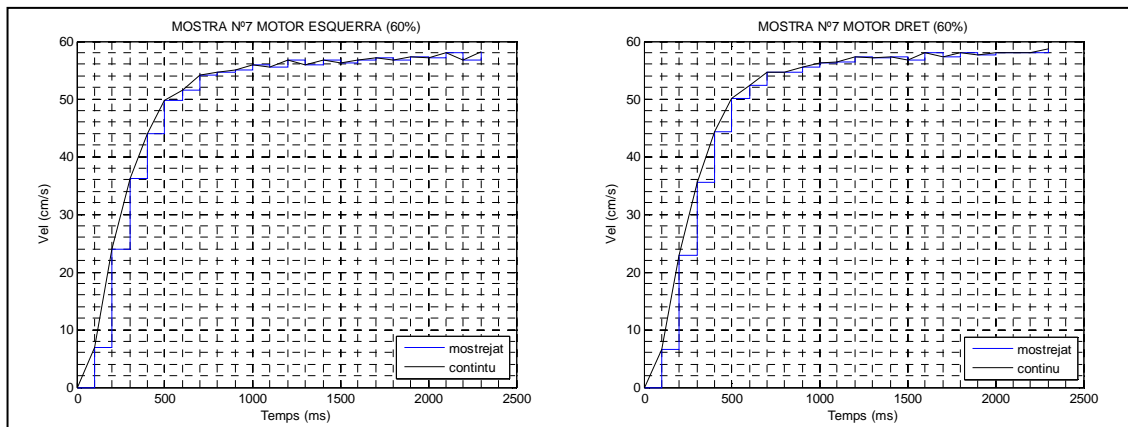


Figura 102. Representació gràfica mostra n^o7 motor esquerra i dret amb D=60%

Mitjançant la comanda "ident" del matlab s'aconsegueixen les funcions transferències següents:

$$F_{7E(60\%)}(s) = \frac{10,52}{0,203s + 1} \quad (\text{Eq. 141})$$

$$F_{7D(60\%)}(s) = \frac{10,66}{0,210s + 1} \quad (\text{Eq. 142})$$

B.5.8. Mostra n°8

MOSTRA N°8		
TEMPS (ms)	VEL. MOTOR ESQ. (cm/s)	VEL. MOTOR DRET (cm/s)
0	0.00	0.00
100	3.47	4.34
200	19.39	19.39
300	35.02	33.87
400	43.13	43.13
500	48.05	48.92
600	52.39	52.11
700	52.97	53.84
800	54.71	55.29
900	55.00	55.87
1000	55.58	56.74
1100	56.16	56.74
1200	55.87	57.32
1300	57.03	57.03
1400	55.87	57.32
1500	56.74	57.32
1600	56.45	57.61
1700	57.03	57.90
1800	57.03	57.90
1900	56.74	58.76
2000	57.61	58.18
2100	57.03	58.76
2200	55.87	56.45

Taula 87. Mostra n°8 amb D=60%

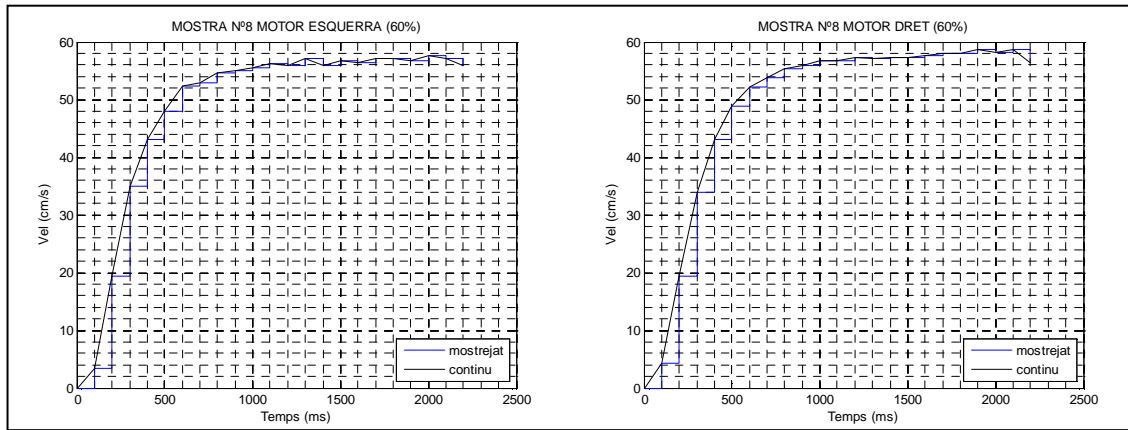


Figura 103. Representació gràfica mostra n°8 motor esquerra i dret amb D=60%

Mitjançant la comanda “ident” del matlab s’aconsegueixen les funcions transferències següents:

$$F_{8E(60\%)}(s) = \frac{10,5}{0,212s + 1} \tag{Eq. 143}$$

$$F_{8D(60\%)}(s) = \frac{10,7}{0,223s + 1} \tag{Eq. 144}$$

B.5.9. Mostra n°9

MOSTRA N°9		
TEMPS (ms)	VEL. MOTOR ESQ. (cm/s)	VEL. MOTOR DRET (cm/s)
0	0.00	0.00
100	4.05	5.21
200	20.26	20.55
300	34.74	34.74
400	44.29	43.42
500	48.34	49.79
600	52.11	52.11
700	53.84	53.84
800	54.13	55.00
900	55.87	56.16
1000	55.29	57.03
1100	56.74	56.74
1200	56.45	57.32
1300	56.74	57.03
1400	56.45	57.61
1500	56.74	57.32
1600	57.32	57.32

Taula 88. Mostra n°9 amb D=60% de 0 a 1600ms

MOSTRA N°9		
TEMPS (ms)	VEL. MOTOR ESQ. (cm/s)	VEL. MOTOR DRET (cm/s)
1700	56.45	57.61
1800	57.32	57.90
1900	57.32	58.18
2000	57.90	57.90
2100	56.74	58.47
2200	57.90	58.18

Taula 89. Mostra n°9 amb D=60% de 1700ms a 2200ms

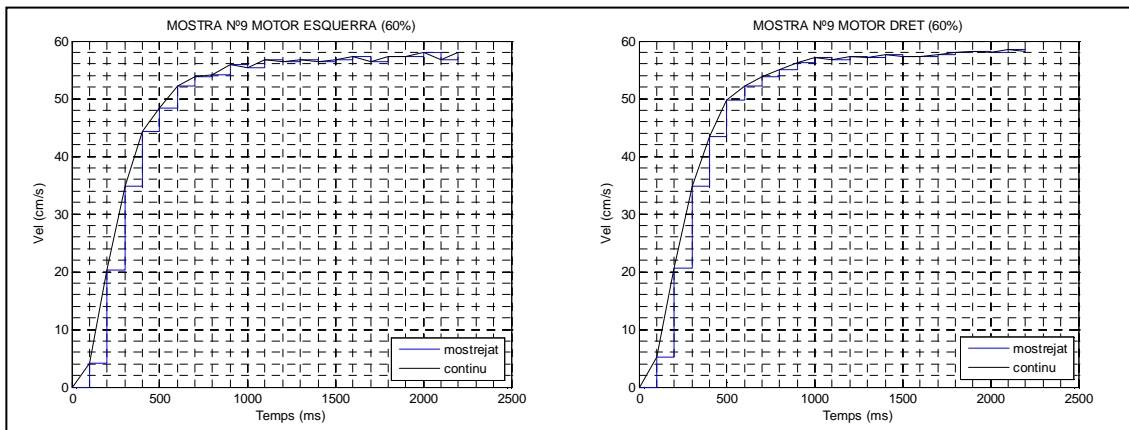


Figura 104. Representació gràfica mostra n°9 motor esquerra i dret amb D=60%

Mitjançant la comanda “ident” del matlab s’aconsegueixen les funcions transferències següents:

$$F_{9E(60\%)}(s) = \frac{10,56}{0,212s + 1} \tag{Eq. 145}$$

$$F_{9D(60\%)}(s) = \frac{10,7}{0,221s + 1} \tag{Eq. 146}$$

B.5.10.Mostra nº10

MOSTRA Nº10		
TEMPS (ms)	VEL. MOTOR ESQ. (cm/s)	VEL. MOTOR DRET (cm/s)
0	0.00	0.00
100	12.44	11.29
200	26.92	26.05
300	38.79	37.63
400	44.87	45.74
500	49.79	50.08
600	52.39	52.97
700	53.26	53.84
800	55.00	55.29
900	54.42	55.87
1000	55.87	56.45
1100	55.58	57.03
1200	55.87	57.03
1300	56.45	57.61
1400	55.87	57.03
1500	57.03	57.90
1600	56.16	57.32
1700	57.32	57.61
1800	57.03	57.61
1900	57.32	57.61
2000	56.74	57.61
2100	57.03	57.90
2200	57.32	58.47

Taula 90. Mostra nº10 amb D=60%

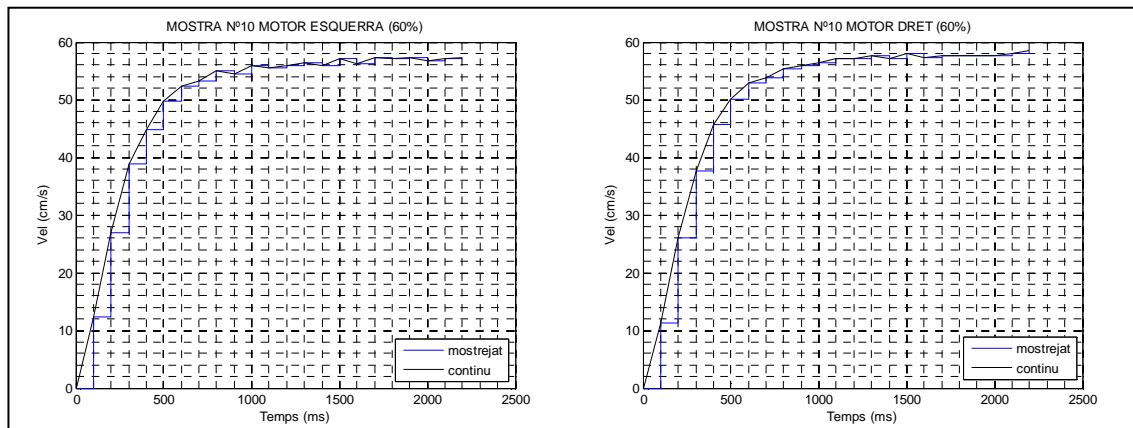


Figura 105. Representació gràfica mostra nº10 motor esquerra i dret amb D=60%

Mitjançant la comanda "ident" del matlab s'aconsegueixen les funcions transferències següents:

$$F_{10E(60\%)}(s) = \frac{10,45}{0,188s + 1} \quad (\text{Eq. 147})$$

$$F_{10D(60\%)}(s) = \frac{10,64}{0,199s + 1} \quad (\text{Eq. 148})$$

B.5.11. Funció transferència motor dret amb cycle de treball 60%

Es calcula la mitjana de totes les funcions transferències aconseguides del motor dret amb un cycle de treball del 60%.

$$K_{\text{mig}} = 10,68$$

$$\tau_{\text{mig}} = 0,218$$

$$F_{D(60\%)}(s) = \frac{10,68}{0,218s + 1} \quad (\text{Eq. 149})$$

B.5.12. Funció transferència motor esquerra amb cycle de treball 60%

Es calcula la mitjana de totes les funcions transferències aconseguides del motor esquerra amb un cycle de treball del 60%.

$$K_{\text{mig}} = 10,52$$

$$\tau_{\text{mig}} = 0,212$$

$$F_{E(60\%)}(s) = \frac{10,52}{0,212s + 1} \quad (\text{Eq. 150})$$

C. CÀLCULS DISSENY CONTROLADORS PI CONTINUS

En aquest apartat es procedeix a dissenyar i calcular els controladors PI per cada model de cada motor. Es segueix per tots els controladors les especificacions de sobrepic màxim igual o inferior al 25% i un temps d'establiment del criteri del 2% a un temps igual o inferior a 1 segon, de manera que s'obté els valors de ζ i W_n a partir de les equacions 151 i 152 que es mostren a continuació.

$$\zeta = \frac{-\ln MP}{\sqrt{\pi^2 + (\ln MP)^2}} \quad (\text{Eq. 151})$$

$$W_n = \frac{4}{t_{s(2\%)} \times \zeta} \quad (\text{Eq. 152})$$

A partir de les especificacions desitjades en l'apartat anterior, es resol les equacions 151 i 152, obtenint un factor esmoreïment de 0,404 i W_n de 10 rad/s.

C.1. Disseny controlador PI continu motor esquerra model 1

Les funcions transferències del controlador PI i la planta del motor esquerra model 1 queden reflectides en les equacions següents:

$$C_{E1}(s) = \frac{K_p s + K_i}{s} \quad (\text{Eq. 153})$$

$$F_{E1}(s) = \frac{16}{0,442s + 1} \quad (\text{Eq. 154})$$

El sistema de control en llaç tancat queda definida de la manera següent:

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{C_{E1}(s) \times F_{E1}(s)}{1 + C_{E1}(s) \times F_{E1}(s)} \quad (\text{Eq. 155})$$

Agafem l'equació característica del denominador de l'equació 155:

$$1 + C_{E1}(s) \times F_{E1}(s) = 0 \quad (\text{Eq. 156})$$

Desenvolupem l'equació 156 substituint amb els valors de l'equació 153 i 154, de manera que s'obté l'equació 157:

$$s^2 + (2,26 + 36,2K_p)s + 36,2K_i \quad (\text{Eq. 157})$$

Igualem l'equació 157 amb l'equació característica d'un sistema definit per ζ i W_n :

$$s^2 + (2,26 + 36,2K_p)s + 36,2K_i = s^2 + 2\zeta W_n s + W_n^2 \quad (\text{Eq. 158})$$

De manera que substituint els valors del factor esmorteïment i W_n en l'equació 158, s'obté els valors de K_p i K_i , que queden reflectides en el controlador de l'equació 159.

$$C_{E1}(s) = \frac{0,16s + 2,76}{s} \quad (\text{Eq. 159})$$

C.2. Disseny controlador PI continu motor esquerra model 2

Les funcions transferències del controlador PI i la planta del motor esquerra model 2 queden reflectides en les equacions següents:

$$C_{E2}(s) = \frac{K_p s + K_i}{s} \quad (\text{Eq. 160})$$

$$F_{E2}(s) = \frac{11,95}{0,253s + 1} \quad (\text{Eq. 161})$$

El sistema de control en llaç tancat queda definida de la manera següent:

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{C_{E2}(s) \times F_{E2}(s)}{1 + C_{E2}(s) \times F_{E2}(s)} \quad (\text{Eq. 162})$$

Agafem l'equació característica del denominador de l'equació 162:

$$1 + C_{E2}(s) \times F_{E2}(s) = 0 \quad (\text{Eq. 163})$$

Desenvolupem l'equació 163 substituint amb els valors de l'equació 160 i 161:

$$s^2 + (3,95 + 47,23K_p)s + 47,23K_i \quad (\text{Eq. 164})$$

Igualem l'equació 164 amb l'equació característica d'un sistema definit per ζ i W_n :

$$s^2 + (3,95 + 47,23K_p)s + 47,23K_i = s^2 + 2\zeta W_n s + W_n^2 \quad (\text{Eq. 165})$$

De manera que substituint els valors del factor esmorteïment i W_n en l'equació 165, s'obté els valors de K_p i K_i , que queden reflectides en el controlador de l'equació 166.

$$C_{E2}(s) = \frac{0,08s + 2,12}{s} \quad (\text{Eq. 166})$$

C.3. Disseny controlador PI continu motor dret model 1

Les funcions transferències del controlador PI i la planta del motor dret model 1 queden reflectides en les equacions següents:

$$C_{D1}(s) = \frac{K_p s + K_i}{s} \quad (\text{Eq. 167})$$

$$F_{D1}(s) = \frac{16,4}{0,453s + 1} \quad (\text{Eq. 168})$$

El sistema de control enllaç tancat queda definida de la manera següent:

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{C_{D1}(s) \times F_{D1}(s)}{1 + C_{D1}(s) \times F_{D1}(s)} \quad (\text{Eq. 169})$$

Agafem l'equació característica del denominador de l'equació 169:

$$1 + C_{D1}(s) \times F_{D1}(s) = 0 \quad (\text{Eq. 170})$$

Desenvolupem l'equació 170 substituint amb els valors de l'equació 167 i 168:

$$s^2 + (2,2 + 36,2K_p)s + 36,2K_i \quad (\text{Eq. 171})$$

Igualem l'equació 171 amb l'equació característica d'un sistema definit per ζ i W_n :

$$s^2 + (2,2 + 36,2K_p)s + 36,2K_i = s^2 + 2\zeta W_n s + W_n^2 \quad (\text{Eq. 172})$$

De manera que substituint els valors del factor esmorteïment i W_n en l'equació 172, s'obté els valors de K_p i K_i , que queden reflectides en el controlador de l'equació 173.

$$C_{D1}(s) = \frac{0,16s + 2,76}{s} \quad (\text{Eq. 173})$$

C.4. Disseny controlador PI continu motor dret model 2

Les funcions transferències del controlador PI i la planta del motor dret model 2 queden reflectides en les equacions següents:

$$C_{D2}(s) = \frac{K_p s + K_i}{s} \quad (\text{Eq. 174})$$

$$F_{D2}(s) = \frac{12,14}{0,259s + 1} \quad (\text{Eq. 175})$$

El sistema de control en llaç tancat queda definida de la manera següent:

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{C_{D2}(s) \times F_{D2}(s)}{1 + C_{D2}(s) \times F_{D2}(s)} \quad (\text{Eq. 176})$$

Agafem l'equació característica del denominador de l'equació 176:

$$1 + C_{D2}(s) \times F_{D2}(s) = 0 \quad (\text{Eq. 177})$$

Desenvolupem l'equació 177 substituint amb els valors de l'equació 174 i 175:

$$s^2 + (3,86 + 46,87K_p)s + 46,87K_i \quad (\text{Eq. 178})$$

Igualem l'equació 168 amb l'equació característica d'un sistema definit per ζ i W_n :

$$s^2 + (3,86 + 46,87K_p)s + 46,87K_i = s^2 + 2\zeta W_n s + W_n^2 \quad (\text{Eq. 179})$$

De manera que substituint els valors del factor esmorteïment i W_n en l'equació 179, s'obté els valors de K_p i K_i , que queden reflectides en el controlador de l'equació 180.

$$C_{D2}(s) = \frac{0,1s + 2,13}{s} \quad (\text{Eq. 180})$$

D. CÀLCULS DISSENY CONTROLADORS PI DISCRETS

En aquest apartat es procedeix a dissenyar i calcular els controladors PI discrets. Es segueix amb les mateixes especificacions esmentats en el capítol anterior.

D.1. Disseny controlador PI discret motor esquerra model 1

Les funcions transferències del controlador PI i la planta del motor esquerra model 1 queden reflectides en les equacions següents:

$$C_{E1}(z) = \frac{K_1 z + K_2}{z - 1} \quad (\text{Eq. 181})$$

$$F_{E1}(z) = \frac{3,24}{z - 0,797} \quad (\text{Eq. 182})$$

El sistema de control en laç tancat queda definida de la manera següent:

$$\frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{C_{E1}(z) \times F_{E1}(z)}{1 + C_{E1}(z) \times F_{E1}(z)} \quad (\text{Eq. 183})$$

Agafem l'equació característica del denominador de l'equació 183:

$$1 + C_{E1}(z) \times F_{E1}(z) = 0 \quad (\text{Eq. 184})$$

Desenvolupem l'equació 184 substituint amb els valors de l'equació 181 i 182:

$$z^2 + (-0,797 - 1 + 3,24K_1)z + 0,797 + 3,24K_2 \quad (\text{Eq. 185})$$

Convertim els pols que passen pel pla "s" del sistema en continu al pla "z" amb T=0.1s:

$$p_{1z,2z} = 0,407 \pm 0,53i \quad (\text{Eq. 186})$$

Igualem termes de l'equació 185 amb els pols aconseguits en l'equació 186, de manera que obtenim els valors de K_1 i K_2 que queden reflectides en el controlador de l'equació 187.

$$C_{E1}(z) = \frac{0,303z - 0,08}{z - 1} \quad (\text{Eq. 187})$$

D.2. Disseny controlador PI discret motor esquerra model 2

Les funcions transferències del controlador PI i la planta del motor esquerra model 2 queden reflectides en les equacions següents:

$$C_{E2}(z) = \frac{K_1z + K_2}{z - 1} \quad (\text{Eq. 188})$$

$$F_{E2}(z) = \frac{3,9}{z - 0,673} \quad (\text{Eq. 189})$$

El sistema de control en llaç tancat queda definida de la manera següent:

$$\frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{C_{E2}(z) \times F_{E2}(z)}{1 + C_{E2}(z) \times F_{E2}(z)} \quad (\text{Eq. 190})$$

Agafem l'equació característica del denominador de l'equació 190:

$$1 + C_{E2}(z) \times F_{E2}(z) = 0 \quad (\text{Eq. 191})$$

Desenvolupem l'equació 191 substituint amb els valors de l'equació 188 i 189:

$$z^2 + (-0,673 - 1 + 3,9K_1)z + 0,673 + 3,9K_2 \quad (\text{Eq. 192})$$

Convertim els pols que passen pel pla "s" del sistema en continu al pla "z" amb $T=0.1s$:

$$p_{1z,2z} = 0,407 \pm 0,53i \quad (\text{Eq. 193})$$

Igualem termes de l'equació 185 amb els pols aconseguits en l'equació 193, de manera que obtenim els valors de K_1 i K_2 que queden reflectides en el controlador de l'equació 194.

$$C_{E2}(z) = \frac{0,22z - 0,058}{z - 1} \quad (\text{Eq. 194})$$

D.3. Disseny controlador PI discret motor dret model 1

Les funcions transferències del controlador PI i la planta del motor dret model 1 queden reflectides en les equacions següents:

$$C_{D1}(z) = \frac{K_1 z + K_2}{z - 1} \quad (\text{Eq. 195})$$

$$F_{D1}(z) = \frac{3,25}{z - 0,802} \quad (\text{Eq. 196})$$

El sistema de control en llaç tancat queda definida de la manera següent:

$$\frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{C_{D1}(z) \times F_{D1}(z)}{1 + C_{D1}(z) \times F_{D1}(z)} \quad (\text{Eq. 197})$$

Agafem l'equació característica del denominador de l'equació 197:

$$1 + C_{D1}(z) \times F_{D1}(z) = 0 \quad (\text{Eq. 198})$$

Desenvolupem l'equació 198 substituint amb els valors de l'equació 195 i 196:

$$z^2 + (-0,802 - 1 + 3,25K_1)z + 0,802 + 3,25K_2 \quad (\text{Eq. 199})$$

Convertim els pols que passen pel pla "s" del sistema en continu al pla "z" amb $T=0.1s$:

$$p_{1z,2z} = 0,407 \pm 0,53i \quad (\text{Eq. 200})$$

Igualem termes de l'equació 199 amb els pols aconseguits en l'equació 200, de manera que obtenim els valors de K_1 i K_2 que queden reflectides en el controlador de l'equació 201.

$$C_{D1}(z) = \frac{0,304z - 0,11}{z - 1} \quad (\text{Eq. 201})$$

D.4. Disseny controlador PI discret motor dret model 2

Les funcions transferències del controlador PI i la planta del motor dret model 2 queden reflectides en les equacions següents:

$$C_{D2}(z) = \frac{K_1z + K_2}{z - 1} \quad (\text{Eq. 202})$$

$$F_{D2}(z) = \frac{3,88}{z - 0,679} \quad (\text{Eq. 203})$$

El sistema de control en llaç tancat queda definida de la manera següent:

$$\frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{C_{D2}(z) \times F_{D2}(z)}{1 + C_{D2}(z) \times F_{D2}(z)} \quad (\text{Eq. 204})$$

Agafem l'equació característica del denominador de l'equació 204:

$$1 + C_{D2}(z) \times F_{D2}(z) = 0 \quad (\text{Eq. 205})$$

Desenvolupem l'equació 205 substituint amb els valors de l'equació 202 i 203:

$$z^2 + (-0,679 - 1 + 3,88K_1)z + 0,679 + 3,88K_2 \quad (\text{Eq. 206})$$

Convertim els pols que passen pel pla "s" del sistema en continu al pla "z" amb $T=0.1s$:

$$p_{1z,2z} = 0,407 \pm 0,53i \quad (\text{Eq. 207})$$

Igualem termes de l'equació 206 amb els pols aconseguits en l'equació 207, de manera que obtenim els valors de K_1 i K_2 que queden reflectides en el controlador de l'equació 208.

$$C_{D2}(z) = \frac{0,22z - 0,06}{z - 1} \quad (\text{Eq. 208})$$

E. PROGRAMACIÓ

En aquest apartat de l'annex, fa referència a la programació en llenguatge C del compilador CCS.

E.1. Codi programa

```

/* Control_trajectoria.c */

#include <18F452.h> //Llibreria PIC18F452
#define adc=10 //Configuració A/D 10 bits
#define HS,NOWDT,NOPROTECT,NOLVP,CCP2B3 //Configuracions internes
#define delay(clock=1000000) //Configuració rellotge
#define rs232(baud=9600,xmit=PIN_C6,rcv=PIN_C7) //Comunicació sèrie
#define porta=0xf80 //Assignem adreça Port A
#define portb=0xf81 //Assignem adreça Port B
#define portc=0xf82 //Assignem adreça Port C
#define portd=0xf83 //Assignem adreça Port D
#define porte=0xf84 //Assignem adreça Port E
#define lector_bateria PIN_A0 //Definim PIN_A0
#define encoder_me PIN_A4 //Definim PIN_A4
#define boto_prova PIN_A5 //Definim PIN_A5
#define led_verd_bat PIN_E0 //Definim PIN_E0
#define led_groc_bat PIN_E1 //Definim PIN_E1
#define led_vermell_bat PIN_E2 //Definim PIN_E2
#define encoder_md PIN_C0 //Definim PIN_C0
#define pwm1 PIN_C2 //Definim PIN_C2
#define in1 PIN_D0 //Definim PIN_D0
#define in2 PIN_D1 //Definim PIN_D1
#define in3 PIN_D2 //Definim PIN_D2
#define in4 PIN_D3 //Definim PIN_D3
#define led_verd_proves PIN_D4 //Definim PIN_D4
#define led_groc_proves PIN_D5 //Definim PIN_D5
#define led_vermell_proves PIN_D6 //Definim PIN_D6
#define led_groc_mig PIN_D7 //Definim PIN_D7
#define S6 PIN_B1 //Definim PIN_B1
#define S5 PIN_B2 //Definim PIN_B2
#define pwm2 PIN_B3 //Definim PIN_B3
#define S4 PIN_B4 //Definim PIN_B4
#define S3 PIN_B5 //Definim PIN_B5
#define S2 PIN_B6 //Definim PIN_B6
#define S1 PIN_B7 //Definim PIN_B7

```

```

int temps_encoder, temps_adc; //Declarem variables int
int resposta, visual; //Declarem variables int
int ref_dret, ref_esq; //Declarem variables int
int ref_dret_s, ref_esq_s; //Declarem variables int
int constant; //Declarem variables int
int vel_esq, vel_dret, vel_lineal; //Declarem variables int
int x, y, z, t; //Declarem variables int
int16 nivell_bateria; //Declarem variables int16
long contesq, contdret; //Declarem variables long
long motor_dret, motor_esq; //Declarem variables long
float vel_dret_segons, vel_esq_segons; //Declarem variables float
float voltatge_real; //Declarem variable float
float ka_dret, ka_esq; //Declarem variables float
float kb_dret, kb_esq; //Declarem variables float
float err_dret_act, err_esq_act; //Declarem variables float
float err_dret_ant, err_esq_ant; //Declarem variables float
float u_dret_act, u_esq_act; //Declarem variables float
float u_dret_ant, u_esq_ant; //Declarem variables float

#INT_TIMER3 //Interrupció cada 25ms
void timer3(void)
{
    temps_encoder++; //Incrementa temps per lectures dels encoders
    temps_adc++; //Incrementa temps per lectura del A/D

    /* Lectura de l'estat dels sensors*/
    if((input(S6))&&(input(S5))&&(!input(S4))&&(!input(S3))&&(input(S2))&&(input(S1)))
    {
        ref_dret_s=ref_dret;
        ref_esq_s=ref_esq;
    }
    if((input(S6))&&(!input(S5))&&(input(S4))&&(input(S3))&&(input(S2))&&(input(S1)))
    {
        d=1;
        ref_dret_s=ref_dret+x;
        ref_esq_s=ref_esq-x;
    }
    if((input(S6))&&(input(S5))&&(input(S4))&&(input(S3))&&(!input(S2))&&(input(S1)))
    {
        d=2;
        ref_dret_s=ref_dret-x;
        ref_esq_s=ref_esq+x;
    }
}

```

```

if ((!input(S6))&&(!input(S5))&&(input(S4))&&(input(S3))&&(input(S2))&&(input(S1)))

    {
        d=1;
        ref_dret_s=ref_dret+y;
        ref_esq_s=ref_esq-y;
    }

if ((input(S6))&&(input(S5))&&(input(S4))&&(input(S3))&&(!input(S2))&&(!input(S1)))

    {
        d=2;
        ref_dret_s=ref_dret-y;
        ref_esq_s=ref_esq+y;
    }

if ((!input(S6))&&(input(S5))&&(input(S4))&&(input(S3))&&(input(S2))&&(input(S1)))

    {
        d=1;
        ref_dret_s=ref_dret+z;
        ref_esq_s=ref_esq-z;
    }

if ((input(S6))&&(input(S5))&&(input(S4))&&(input(S3))&&(input(S2))&&(!input(S1)))

    {
        d=2;
        ref_dret_s=ref_dret-z;
        ref_esq_s=ref_esq+z;
    }

if ((input(S6))&&(input(S5))&&(input(S4))&&(input(S3))&&(input(S2))&&(input(S1)))

    {
        if(d==1)
        {
            ref_dret_s=ref_dret+t;
            ref_esq_s=ref_esq-t;
        }
        if(d==2)
        {
            ref_dret_s=ref_dret-t;
            ref_esq_s=ref_esq+t;
        }
    }

if ((!input(S6))&&(!input(S5))&&(!input(S4))&&(!input(S3))&&(!input(S2))&&(!input(S1)))

    {
        ref_dret_s=0;
        ref_esq_s=0;
    }

```

```

    }
if(temps_encoder==4) // mostreig cada 100ms
{
    temps_encoder=0; //Reiniciem temps lectures encoders
    contesq=get_timer1(); //Lectura comptador encoder motor esq.
    contdret=get_timer0(); //Lectura comptador encoder motor dret
    vel_esq_segons=contesq*0.2895; //Conversió polsos a cm/s motor esq.
    vel_dret_segons=contdret*0.2895; //Conversió polsos a cm/s motor dret
    vel_esq=vel_esq_segons;
    vel_dret=vel_dret_segons;
    vel_lineal=(vel_esq+vel_dret)*0.5; //Operació velocitat lineal
    if(visual==1)
    {
        printf("%d\r\n",vel_lineal); //Visualització vel. lineal
    }

    /*Algoritme PI*/
    err_esq_act=ref_esq_s-vel_esq_segons; //Calcula l'error esq.
    err_dret_act=ref_dret_s-vel_dret_segons; //Calcula l'error dret.
    u_esq_act=u_esq_ant+ka_esq*err_esq_act+kb_esq*err_esq_ant; //Opera
    u_dret_act=u_dret_ant+ka_dret*err_dret_act+kb_dret*err_dret_ant; //Opera
    if(u_esq_act>9) //Limitem 0V-9V motor esq.
    {
        u_esq_act=9;
    }
    if(u_esq_act<0)
    {
        u_esq_act=0;
    }
    if(u_dret_act>9) //Limitem 0V-9V motor dret.
    {
        u_dret_act=9;
    }
    if(u_dret_act<0)
    {
        u_dret_act=0;
    }
    motor_esq=u_esq_act*constant; //Convertim volts a PWM esq.
    motor_dret=u_dret_act*constant; //Convertim volts a PWM dret
    set_pwm1_duty(motor_esq); //Aplicuem PWM esq. calculat
    set_pwm2_duty(motor_dret); //Aplicuem PWM dret calculat
    err_esq_ant=err_esq_act; //Actualitzem error esq.
    err_dret_ant=err_dret_act; //Actualitzem error dret.
    u_esq_ant=u_esq_act; //Actualitzem volts calculat
    u_dret_ant=u_dret_act; //Actualitzem volts calculat
    set_timer0(0); //Reiniciem comptador dret
    set_timer1(0); //Reiniciem comptador esq.
}

```

```

    }
if(temps_adc==80) //Mostreig cada 2 segons
{
    temps_adc=0; //Reiniciem temps lectura A/D
    SET_ADC_CHANNEL(0); //Lectura al pin AN0
    nivell_bateria=read_adc(); //Memoritzem valor lectura A/D
    voltatge_real=nivell_bateria*0.01463; //Conversió posició a volts
    if(visual==0)
    {
        printf("Nivell bateria (V)= %3.1f\r\n",voltatge_real); //Nivell bateria
    }
    if(voltatge_real>=12.5) //Si nivell bateria>=12.5 Volts, led verd
    {
        output_high(led_verd_bat);
    }
    else output_low(led_verd_bat);
    if(voltatge_real<=12.49) //Si nivell bateria<=12.49 Volts, led vermell
    {
        output_high(led_vermell_bat);
    }
    else output_low(led_vermell_bat);
    }
set_timer3(0xC2FA); //Reiniciem TIMER3
}
void llegir(void) //Funció per llegir tecla polsada
{
    if(resposta=='b') //Tecla b per visualitzar vel.lineal o bateria
    {
        visual++;
        if(visual%2==0)
        {
            visual=0;
        }
        if(visual%2!=0)
        {
            visual=1;
        }
    }
    if(resposta=='0') //Tecla 0 amb velocitat de referència 0cm/s
    {
        ref_dret=0;
        ref_esq=0;
        ka_dret=0.23; //Valor de la K1 dret
        ka_esq=0.23; //Valor de la K1 esq.
        kb_dret=-0.15; //Valor de la K2 dret
        kb_esq=-0.15; //Valor de la K2 esq.
    }
}

```



```
x=0;
y=0;
z=0;
t=0;
}
if(resposta=='1') //Tecla 1 amb velocitat de referència 30cm/s
{
    ref_dret=30;
    ref_esq=30;
    ka_dret=0.23;
    ka_esq=0.23;
    kb_dret=-0.15;
    kb_esq=-0.15;
    x=3;
    y=5;
    z=7;
    t=11;
}
if(resposta=='2') //Tecla 2 amb velocitat de referència 35cm/s
{
    ref_dret=35;
    ref_esq=35;
    ka_dret=0.23;
    ka_esq=0.23;
    kb_dret=-0.15;
    kb_esq=-0.15;
    x=3;
    y=5;
    z=7;
    t=12;
}
if(resposta=='3') //Tecla 3 amb velocitat de referència 40cm/s
{
    ref_dret=40;
    ref_esq=40;
    ka_dret=0.23;
    ka_esq=0.23;
    kb_dret=-0.15;
    kb_esq=-0.15;
    x=3;
    y=6;
    z=8;
    t=14;
}
if(resposta=='4') //Tecla 4 amb velocitat de referència 45cm/s
```

```
{
  ref_dret=45;
  ref_esq=45;
  ka_dret=0.23;
  ka_esq=0.23;
  kb_dret=-0.15;
  kb_esq=-0.15;
  x=3;
  y=6;
  z=8;
  t=17;
}
if(resposta=='5') //Tecla 5 amb velocitat de referència 50cm/s
{
  ref_dret=50;
  ref_esq=50;
  ka_dret=0.22;
  ka_esq=0.22;
  kb_dret=-0.12;
  kb_esq=-0.12;
  x=3;
  y=6;
  z=10;
  t=19;
}
if(resposta=='6') //Tecla 6 amb velocitat de referència 55cm/s
{
  ref_dret=55;
  ref_esq=55;
  ka_dret=0.22;
  ka_esq=0.22;
  kb_dret=-0.12;
  kb_esq=-0.12;
  x=4;
  y=7;
  z=11;
  t=19;
}
if(resposta=='7') //Tecla 7 amb velocitat de referència 60cm/s
{
  ref_dret=60;
  ref_esq=60;
  ka_dret=0.22;
  ka_esq=0.22;
  kb_dret=-0.12;
  kb_esq=-0.12;
```

```

        x=4;
        y=7;
        z=12;
        t=20;
    }
    output_high(in1);           //Configuració sentit motor
    output_low(in2);           //Configuració sentit motor
    output_high(in4);          //Configuració sentit motor
    output_low(in3);           //Configuració sentit motor
}
void main()
{
    disable_interrupts(GLOBAL);
    set_tris_a(0x71);          //Configurem sortides i entrades del PORTA
    set_tris_b(0xF6);          //Configurem sortides i entrades del PORTB
    set_tris_c(0x81);          //Configurem sortides i entrades del PORTC
    set_tris_d(0x00);          //Configurem sortides i entrades del PORTD
    set_tris_e(0x00);          //Configurem sortides i entrades del PORTE
    portd=0;                   //Sortides del PORTD a nivell baix
    porte=0;                   //Sortides del PORTE a nivell baix
    contdret=0;
    contesq=0;
    temps_encoder=0;
    temps_adc=0;
    resposta=0;
    visual=1;
    vel_esq_segons=0;
    vel_dret_segons=0;
    ref_dret=0;
    ref_esq=0;
    u_esq_act=0;
    u_dret_act=0;
    u_esq_ant=0;
    u_dret_ant=0;
    ka_dret=0;
    ka_esq=0;
    kb_dret=0;
    kb_esq=0;
    err_dret_act=0;
    err_esq_act=0;
    err_dret_ant=0;
    err_esq_ant=0;
    constant=69;
    setup_adc_ports(AN0);      //PIN_A0 entrada analògica(Vref=Vdd i -Vref=Vss)
    setup_adc(ADC_CLOCK_INTERNAL); //configurem rellotge de conversió A/D
    setup_timer_0(RTCC_EXT_H_TO_L|RTCC_DIV_1); //Timer0 com a comptador

```

```
setup_timer_1(T1_EXTERNAL|T1_DIV_BY_1);           //Timer1 com a comptador
setup_timer_3(T3_INTERNAL|T3_DIV_BY_4);         //Timer3 com a temporitzador
setup_timer_2(T2_DIV_BY_4,155,1);              //Timer2 per realitzar PWM
setup_ccp1(CCP_PWM);                            //CCP1 en mode PWM
setup_ccp2(CCP_PWM);                            //CCP2 en mode PWM
output_low(in1);                                //Configuració sentit motor
output_low(in2);                                //Configuració sentit motor
output_low(in3);                                //Configuració sentit motor
output_low(in4);                                //Configuració sentit motor
motor_dret=0;                                   //Duty cicle motor dret 0%
motor_esq=0;                                    //Duty cicle motor esq. 0%
set_timer0(0);                                  //Reiniciar contador polsos
set_timer1(0);                                  //Reiniciar contador polsos
enable_interrupts(GLOBAL);                     //Habilitar interrupcions
enable_interrupts(INT_TIMER3);                 //Habilitar interrupció T3
set_timer3(0xC2FA);                             //Inici Timer3 de 25ms
while(1)
{
resposta=getch();                               //Guarda tecla premuda
llegir();                                       //Funció que llegeix tecla
}
}
```