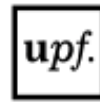




TecnoCampus
Escola Superior
Politécnica

Centre adscrit a:



Universitat
Pompeu Fabra
Barcelona

Grau en Enginyeria Electrónica i Automatització

**DISSENY I SIMULACIÓ D'UN CONTROLADOR PID PEL SEGUIMENT DE
TRAJECTÒRIES D'UN ROBOT DE 6 GRAUS DE LLIBERTAT**

Memòria

**ÀLEX PASCUAL MONROIG
PONENT: JOAN TRIADÓ AYMERICH**

ESTIU 2022



TecnoCampus
Mataró-Maresme

Resum

Aquest informe consisteix en el disseny i l'aplicació de controladors PID per tal que el robot TM14X segueixi la trajectòria planejada.

Per assolir aquest objectiu hem instal·lat un controlador PID per articulació i els hem sintonitzat manualment. Un cop aplicats els diferents controladors hem pogut aconseguir no només que la resposta s'estabilitzi en el punt desitjat, sinó que realitzi el moviment en el temps establert i amb un “*overshoot*” percentual que, en el pitjor dels casos és menor al 2 %.

Resumen

Este informe consiste en el diseño y la aplicación de controladores PID para que el robot TM14X siga la trayectoria planeada.

Para lograr este objetivo hemos instalado un controlador PID por articulación y los hemos sintonizado manualmente. Una vez aplicados los diferentes controladores hemos podido conseguir no con solo que la respuesta se estabilice en el punto deseado, sino que realice el movimiento en el tiempo establecido y con un “*overshoot*” porcentual que, en el peor de los casos es menor al 2%.

Abstract

This report consists of the design and application of PID controllers so that the TM14X robot follows the planned trajectory.

To achieve this goal we have installed a PID controller for each articulation and have tuned them manually. Once the different controllers have been applied, we have been able to achieve not only a response which has stabilized at the desired point, but that it is made in the desired time and with a percentage overshoot which, in the worst case, is less than 2 %.

Índex.

Índex.....	I
Índex de figures.....	III
Índex de taules.....	VII
1. Objectius	1
1.1. Propòsit	1
1.2. Finalitat	1
1.3. Objecte	1
1.4. Abast	1
1.5. Context en les línies de recerca i transferència de coneixement del Tecnocampus	2
2. Marc teòric	3
3. Metodologia del projecte	7
3.1. Etapa d'Anàlisi:	7
3.2. Etapa d'Avaluació d'alternatives:.....	7
3.3. Etapa de Disseny de la solució:	7
3.4. Etapa de Verificació de la solució:	7
4. Objectius tècnics	9
5. Especificacions tècniques	11
6. Plantejament inicial.....	13

II

6.1.1.	Generació de trajectòries	15
6.1.2.	Controlador PID	20
6.1.3.	Simulació.....	23
7.	Desenvolupament de la solució	27
7.1.	Generació de trajectòries	27
7.2.	Simulació braç robòtic.....	36
7.3.	Controlador PID	44
8.	Planificació.....	51
8.1.	Pla d'execució (Diagrama de Gantt)	51
8.1.1.	Planificació projecte.....	51
8.1.2.	Planificació avantprojecte	53
8.2.	Anàlisi i Gestió de Riscos.....	55
8.2.1.	Taula FMEA.....	56
8.2.2.	Gestió dels riscos.....	57
8.3.	Eines de Seguiment	59
8.4.	Replantejament memòria intermèdia.....	61
9.	Anàlisi Econòmica	63
10.	Anàlisi Mediambiental.....	65
11.	Conclusions.....	67
12.	Referències.....	69

Índex de figures.

Figura 2.1: Quatrinomi robot amb capacitat.....	3
Figura 2.2 Músculs robòtics	5
Figura 2.3 Previsió del ús de robots col·laboratius	6
Figura 5.1 Robot del tipus universal.....	11
Figura 6.1 Articulació cargol de 2 GDL.....	13
Figura 6.2 Resposta trajectòria polinòmica	18
Figura 6.3 Respostes trajectòria acceleració.....	19
Figura 6.4 Respostes trajectòria velocitat.....	20
Figura 6.5 Sintonització en esglaió.....	21
Figura 6.6 Sistema de control complert.....	23
Figura 6.7 Pas 1 i 2 dissenyats en el Simulink-Articulacions 1 i 2	24
Figura 6.8 Pas 3 dissenyat en el Simulink-Articulació 1.....	25
Figura 6.9 Pas 4 dissenyat en el Simulink-Articulació 1.....	25
Figura 6.10 Simulink sistema de control d'una articulació	26
Figura 6.11 Simulink sistema de control complert.....	26
Figura 7.1 Resultats de la trajectòria dissenyada.....	32
Figura 7.2 Finestra del robot interactiva.....	33
Figura 7.3 Nova posició i orientació	34
Figura 7.4 Resultats de la trajectòria alternativa	35

IV

Figura 7.5 Generació de trajectòria de la 1era articulació.....	36
Figura 7.6 Dinàmica directa del robot.....	37
Figura 7.7 Bloc de la dinàmica inversa	38
Figura 7.8 Bloc de la matriu de masses.....	38
Figura 7.9 Realimentació del sistema	40
Figura 7.10 Articulació 1 - θ destitjada = 55° Controlador proporcional unitari	40
Figura 7.11 Articulació 2 - θ destitjada = 50° Controlador proporcional unitari	41
Figura 7.12 Articulació 3 - θ destitjada = 20° Controlador proporcional unitari	41
Figura 7.13 Articulació 5 - θ destitjada = 70° Controlador proporcional unitari	42
Figura 7.14 Articulació 4 - θ destitjada = 30° Controlador proporcional unitari	42
Figura 7.15 Articulació 6 - θ destitjada = 60° Controlador proporcional unitari	43
Figura 7.16 Controlador PID previ a la sintonització	45
Figura 7.17 Articulació 1 amb PID - θ destitjada = 55°	47
Figura 7.18 Articulació 2 amb PID - θ destitjada = 50°	47
Figura 7.19 Articulació 3 amb PID - θ destitjada = 20°	48
Figura 7.20 Articulació 4 amb PID - θ destitjada = 30°	48
Figura 7.21 Articulació 5 amb PID - θ destitjada = 70°	49
Figura 7.22 Articulació 6 amb PID - θ destitjada = 60°	49
Figura 8.1 Diagrama de Gantt projecte	53
Figura 8.2 Diagrama de Gantt avantprojecte	55
Figura 8.3 Jira llistat de tasques	59

Figura 8.4 Jira Log Work 60

Figura 8.5 Diagrama de Gantt replantejament..... 62

Índex de taules.

Taula 5.1 Limitacions robot TM14X.....	11
Taula 6.1 Taula sintonització en esglaió.....	22
Taula 6.2 Taula sintonització guany crític.....	22
Taula 7.1 Constants controladors PID.....	46
Taula 7.2 Característiques simulació.....	46
Taula 8.1 Anàlisi de riscos FMEA	56
Taula 9.1 Preus llicències	63

1. Objectius

1.1. Propòsit

El propòsit d'aquest projecte consisteix en el disseny d'un controlador PID perquè el seguiment de les trajectòries creades siguin tan fidels com sigui possible.

1.2. Finalitat

La finalitat del projecte consisteix en l'obtenció d'un model capaç de simular la moció d'un robot seguint les trajectòries creades amb el menor error possible.

1.3. Objecte

L'objecte d'aquest informe serà la presentació dels resultats obtinguts en les simulacions del seguiment de trajectòries del robot col·laboratiu incorporant controladors PID individuals. El projecte tindrà com a objectiu final el disseny i la correcta sintonització del controlador de posició en qüestió.

Per realitzar aquest disseny es dividirà el projecte en dos informes. Aquest informe consistirà en la component electrònica del projecte, mentre que la component mecànica del projecte es desenvoluparà en l'informe complementari anomenat "*Estudi i simulació de la cinemàtica i dinàmica d'un robot col·laboratiu de 6 graus de llibertat*".

1.4. Abast

En aquest projecte es presentarà la simulació del robot creada amb Simulink i la diferència entre els resultats obtinguts aplicant el controlador envers no aplicant-lo.

El projecte està dividit en dues parts, la primera corresponent a la component mecànica del projecte i la segona corresponent a la component electrònica. Aquest informe inclou la part electrònica del projecte i, per tant, s'inclouran les parts de l'informe complementari que es creguin necessàries per presentar una explicació clara.

1.5. Context en les línies de recerca i transferència de coneixement del Tecnocampus

Aquest projecte ens servirà per aplicar varis dels coneixements adquirits durant els graus d'Enginyeria Mecànica i d'Enginyeria Electrònica Industrial i Automatització i ampliar amb els coneixements que considerem necessaris per a complir l'objectiu.

Els coneixements adquirits durant les assignatures de Robòtica, Modelització i Simulació, Control i Simulació de Processos Industrials i Control Digital de Sistemes seran especialment útils per al disseny i sintonització del controlador PID, l'obtenció de la cinemàtica inversa i la generació de trajectòries.

2. Marc teòric

En aquest projecte buscaré crear el sistema de control per un robot industrial, però, abans de començar a elaborar la part tècnica de la solució seria oportú tindre certes nocions de l'estat de l'art actual i futur de la robòtica. Això ens pot aportar idees a l'hora d'elaborar un millor sistema de control utilitzant tècniques actualitzades.

Parlar del futur de la robòtica és una tasca summament complicada a causa del ràpid i divers avanç d'aquesta branca d'estudi. Tot i això, sí que és possible observar certes tendències que agafaran potència durant els anys vinents:

Incorporació de robots amb IA

Fins fa relativament poc els robots eren definits com a sistemes autònoms programables capaços de realitzar determinades accions i tasques per les quals han estat dissenyats. Aquestes tasques eren portades a cap seguint el trinomi de funcionament percepció – decisió – acció segons el qual el robot era capaç de comprendre el seu entorn mitjançant sensors, decidir l'acció que s'ha de prendre segons la seva programació i executar-la. Això permet executar tasques senzilles en entorns inestables cosa que les màquines més senzilles no serien capaces [1] [2].

Però, a causa del desenvolupament accelerat de la intel·ligència artificial durant els últims anys es podria considerar que aquest trinomi està cada cop més obsolet. Això és a causa de la capacitat d'aprenentatge que proporciona la intel·ligència artificial el qual ens permet poder influenciar en l'etapa de decisió a partir de la informació

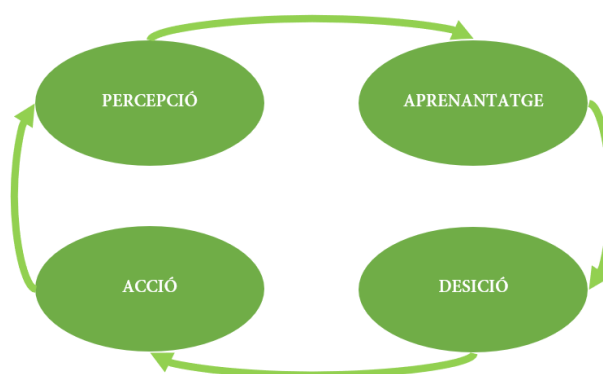


Figura 2.1: Quatrínomi robot amb capacitat

reunida en l'etapa de percepció al llarg de les diferents iteracions i per la informació proporcionada externament de manera totalment autònoma.

Aquest nou polinomi de funcionament permet la realització de tasques cada cop més complexes i en entorns cada cop més inestables. Un exemple de robots on aquest sistema de funcionament està àmpliament estès són els bots virtuals com, per exemple, els chatbots o els bots encarregats de reconeixement facial o d'imatges. En el cas de, per exemple, els chatbots s'utilitzen les dades que reuneixen durant totes les conversacions en línia que mantenen amb els diferents usuaris i les utilitzen per a crear millors i més coherents respostes [3].

Aquest sistema de funcionament també pot ser introduït en l'àmbit dels robots industrials. L'aplicació de la intel·ligència artificial en l'àmbit industrial podrà aportar els següents efectes:

- + Millora en el manteniment
- + Realització de tasques més complexes
- + Millora en el sistema productiu (+ **Ràpid, + Precís**)
- + Menys productes defectuosos
- Major necessitat de computació
- Disseny exponencialment més complicat

Però, tot i que aquesta tecnologia ja s'està aplicant en un seguit d'àmbits, l'estat de la tecnologia no està prou desenvolupat per a poder ser utilitzat a gran escala i sobretot, en àmbits que requereixen gran precisió com és la indústria o en l'autoconducció.

Robots col·laboratius

Dins del món industrial hem pogut observar cada cop més freqüentment l'aparició de robots col·laboratius. Aquests consisteixen en robot amb la capacitat de treballar en harmonia juntament amb els operaris. Això crea una cadena de producció ininterrompuda en què el robot aconsegueix les tasques repetitives que requereixen força i precisió i l'operari aporta destresa i Know-How per identificar i resoldre problemes.

Els robots col·laboratius han permès crear cadenes de producció cada cop més compactes, eficients i automatitzades, relegant la feina dels operaris a feines que requereixen més creativitat o a feines de supervisió. Això ha permès augmentar la velocitat de producció, augmentar l'eficiència, automatitzar grans parts de la producció i reduir els accidents laborals a l'empresa.

La ràpida propagació dels cobots ha creat un nou entorn de treball on els operaris treballen conjuntament amb els robots. Aquesta convivència, però, pot ser nociva pels treballadors en els casos de què la gestió de la càrrega del treball no es gestioni degudament. En el cas que es porti una gestió inadequada es pot donar el cas en què ens deixem portar per l'augment de la productivitat proporcionada pels cobots i es comenci a tractar els treballadors com si poguessin mantenir el mateix rendiment que els robots. Aquest cas no és hipotètic, ja que es pot observar un exemple d'ell en els escàndols recents que s'han pogut veure a Amazon. En aquests escàndols s'ha pogut veure com s'imposava als treballadors de magatzem i conductors d'Amazon ratis de treball que només podria assolir un robot. Això ha tingut com a conseqüència condicions insalubres i perilloses amb constants accidents amb els robots que circulen pels magatzems o sent obligats a no agafar temps de descans ni tan sols per evacuar [5] [7] [8].

Tendències futures

A causa de l'àmplia varietat de robots que existeixen les tendències de disseny de robots són igualment de nombroses. Un exemple molt curiós d'una d'aquestes tendències és el disseny de robots cada cop més suaus. Aquests robots suaus són robots que s'inspiren en éssers biològics, siguin animals, plantes o propis humans, per a dissenyar estructures deformables, suaus i a la vegada resistent i capaces de resistir grans càrregues. Utilitzant aquesta base d'inspiració s'estan dissenyant nous tipus d'estructures, articulacions i fins i tot sistemes motors que simulen el funcionament de músculs [4] [6].

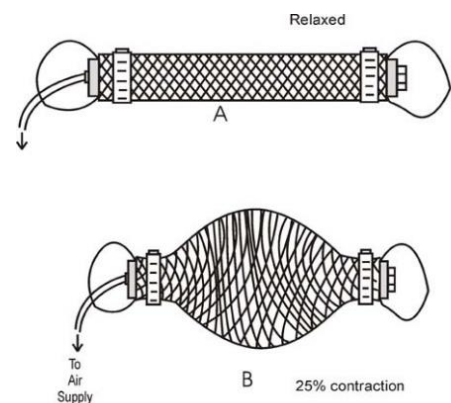


Figura 2.2 Músculs robòtics

Tot i que existeixen moltes tendències en l'etapa de disseny la tendència més interessant la trobem quan observem la robòtica des d'un punt de vista global. Analitzant diferents estadístiques podem observar que la venda i ús de robots està augmentant exponencialment especialment entre els robots col·laboratius. Segons l'informe de World Robotics 2021 els robots industrials utilitzats en les empreses ha augmentat en un 10 % i segons les previsions de l'evolució de l'ús de robots en els pròxims 5 anys l'augment serà de 37.5 % [9] [11].

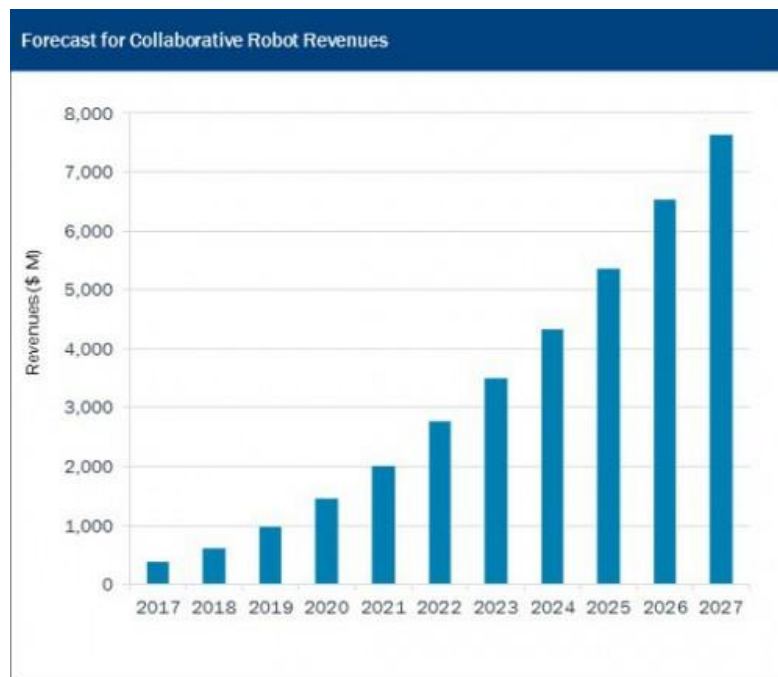


Figura 2.3 Previsió del ús de robots col·laboratius

Aquest augment implica que cada cop hi ha un major nombre de tasques que s'estan automatitzant el qual pot implicar un risc molt real de què cada cop més gent es trobi sense feina [5]. Això passarà especialment en el cas dels treballadors que compleixin tasques que no requereixin creativitat com, per exemple els operaris. Aquest problema ja està sent discutit en diversos àmbits polítics i des de diferents punts de vista. Per una banda, es poden observar opinions de polítics com Donald Trump el qual considerava que s'havia de limitar l'automatització en les fàbriques per tal de mantenir els treballs poc qualificats que en cas contrari es perdrien [12]. Per l'altra banda, considerem l'opinió de persones a favor de l'automatització i que la solució no resta en decidir si s'ha de limitar o no aquesta sinó trobar solucions a escala estatal per facilitar la vida en un possible món del futur on els treballs poc qualificats siguin obsolets. Un exemple molt recent el veiem durant una entrevista d'Elon Musk el qual sostenia que en un futur la gran majoria de les tasques repetitives serien completament automatitzades i que, per tant, molts treballs es perdrien. Degut això, Elon Musk proposava la implementació d'una Renda Bàsica Universal la qual provocaria un canvi en la nostra relació amb el treball, ja que aquest passaria a ser opcional [10].

3. Metodologia del projecte

La metodologia que s'ha seguit per desenvolupar aquest projecte ha consistit en les següents etapes:

3.1. Etapa d'Anàlisi:

Durant l'etapa d'anàlisi es realitzarà un estudi de l'objecte del projecte i com s'assolirà l'objectiu d'aquest. Durant aquesta etapa s'elaborarà un Roadmap en el qual representarem les tasques que s'hauran de dur a terme per tal d'aconseguir el nostre fi. Aquesta etapa correspondrà als apartats del marc teòric i els objectius tècnics.

3.2. Etapa d'Avaluació d'alternatives:

Durant l'etapa d'avaluació d'alternatives es recercarà la informació necessària per a poder executar les diferents tasques del Roadmap. En aquesta etapa no es buscarà una única solució ni s'intentarà trobar la millor solució possible. En lloc d'això, es buscarà totes les alternatives possibles per a solucionar les diferents tasques que s'han dissenyat en el Roadmap i s'estudiarà el procés que es seguirà per cada una de les possibilitats. Els resultats d'aquesta etapa es poden observar en els subapartats de Possibilitats de càlcul a la viabilitat tècnica.

3.3. Etapa de Disseny de la solució:

Durant l'etapa de disseny de la solució es consideraran totes les alternatives trobades en l'etapa d'avaluació d'alternatives i se seleccionaran les opcions més adequades per a la nostra situació. Aquesta etapa la podem observar en els subapartats de *Selecció i desenvolupament de la solució* en l'apartat de la viabilitat tècnica.

3.4. Etapa de Verificació de la solució:

Durant l'etapa de verificació de la solució es realitzaran les comprovacions corresponents per a verificar que la solució escollida és adient i presenta una resposta acceptable. Els resultats d'aquesta etapa es podran observar en part en els subapartats de *Selecció i desenvolupament de la solució* en l'apartat de la viabilitat tècnica i en les simulacions que es duran terme per comprovar el correcte funcionament del sistema.

4. Objectius tècnics

L'objectiu final d'aquest projecte és el disseny d'un sistema de control ràpid i el més estable possible per a un robot manipulador de 6 eixos. El projecte no contempla el disseny del robot manipulador de 6 eixos, en el seu lloc s'escollirà un robot industrial de 6 eixos i es trobarà les seves característiques mecàniques a partir d'un estudi de les seves articulacions i les característiques proporcionades per la fitxa tècnica del manipulador.

Els passos que s'hauran de complir per assolir l'objectiu final projecte són els següents els quals es dividiran en els dos informes del projecte:

Mecànica

- Trobar la cinemàtica del manipulador robòtic.
- Trobar la dinàmica del manipulador robòtic.

Electrònica

- Dissenyar un bloc de generació de trajectòries.
- Dissenyar un controlador PID amb un “% Overshoot” menor a 5 % i un temps d'estabilització el més proper al marcat en la trajectòria.

Addicionalment, es realitzaran una sèrie de simulacions per a verificar el correcte funcionament del sistema controlador executarem un seguit de simulacions. En aquestes simulacions es comprovarà el correcte disseny dels blocs de dinàmica i cinemàtica i el correcte funcionament del sistema de control global del manipulador robòtic.

5. Especificacions tècniques

El robot que s'utilitzarà serà un TM14X del fabricant OMRON. El TM14X és la variant sense càmera del robot col·laboratiu TM14 el qual li permet més rang de moviment en algunes de les articulacions. El robot col·laboratiu té una estructura de robot universal com es pot observar en la figura 5.1. El TM14X té un rang operatiu d'1,1 metres i permet aixecar fins a 14 kg de càrrega.



Figura 5.1 Robot del tipus universal

El rang d'operació i velocitats màximes de cada articulació varia segons l'articulació i podem veure les limitacions en la següent taula:

Articulació	Rang d'operació	Velocitat màxima
1	$\pm 360^\circ$	120°/s
2	$\pm 360^\circ$	120°/s
3	$\pm 163^\circ$	180°/s
4	$\pm 360^\circ$	150°/s
5	$\pm 360^\circ$	150°/s
6	$\pm 360^\circ$	180°/s

Taula 5.1 Limitacions robot TM14X

La resta de dades tècniques així com les seves dimensions es podran consultar en la fitxa tècnica de l'Annex.

6. Plantejament inicial

Termes importants

Robot col·laboratiu: Robot dissenyat amb la finalitat d'automatitzar processos per tal de millorar l'eficiència de la producció, millorar l'eficàcia dels procediments i substituir els operaris en les tasques o en les parts dels projectes que puguin ser perilloses o nocives per l'operari. Addicionalment, també disposa de la capacitat de treballar conjuntament amb un operari humà o complementar el treball que aquest realitza.

Manipulador: Robot dissenyat per, principalment, realitzar tasques de desplaçament i classificar.

Trames: Les trames consisteixen en un sistema de coordenades que utilitzarem per definir la posició i orientació de cada articulació.

Articulació: Les articulacions són els elements que uneixen els diferents enllaços. Generalment, seran d'1 o més graus de llibertat, però, també és possible tenir casos on l'articulació és fixa i, per tant, no té cap grau de llibertat.

Enllaç: Quan ens referim a enllaços ens referirem als cossos que componen els diferents elements sense cap grau de llibertat que uneixen les diferents articulacions del robot.

Graus de llibertat (GDL): Els graus de llibertat consisteixen en cada un de les coordenades independents de cada articulació que cal definir per tal de descriure la posició i orientació dels seus elements. En el cas d'un braç robòtic cada articulació generalment permetrà un tipus de moviment, rotació o desplaçament, tot i que alguns tipus d'articulació poden permetre ambdós com és el cas d'una articulació caragol com es veu a continuació.

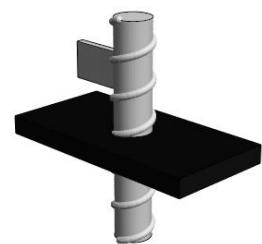


Figura 6.1 Articulació caragol de 2 GDL

Matriu de rotació bàsica: La matriu de rotació bàsica consisteix en l'obtenció d'una matriu per representar els canvis en l'orientació a causa del gir sobre un eix.

Matriu de transformació: La matriu de transformació consisteix en la multiplicació de diverses matrius de rotació bàsiques per tal d'obtenir una trama amb l'orientació desitjada.

Matriu de transformació homogènia: La matriu de transformació homogènia consisteix en una matriu que conté el vector de desplaçament i la matriu de transformació el qual ens permetrà definir el desplaçament i rotació que es vol aplicar a l'eina.

Variables tipus struct: Les variables struct són el tipus de variable que utilitzarà el solver que implementarem per trobar la cinemàtica inversa. Aquest tipus de variables consisteixen en una variable que genera una estructura la qual conté diferents llistes classificades segons temes. Addicionalment, es poden crear subtemes, però, en aquest cas no s'usaran.

En aquest apartat estudiarem el procés que haurem de seguir per dissenyar el sistema de control i presentarem una hipòtesis inicial per a executar el projecte. El sistema de control consistirà en 4 blocs principals:

- Bloc de cinemàtica (Directa o inversa)
- Bloc de la dinàmica
- Bloc de Generació de trajectòries
- Bloc del controlador

En aquest informe es tractaran els blocs que corresponen a la cinemàtica i a la dinàmica, ja que són els blocs més relacionats amb la mecànica. En el projecte complementari el qual tracta la part electrònica del sistema de control es tractaran els blocs de la generació de trajectòries, el bloc del controlador i la realització d'una simulació per comprovar el funcionament del controlador que hem creat.

6.1.1. Generació de trajectòries

El bloc de Generació de Trajectòries consisteix en creació de trajectòries per l'eina del robot manipulador. Per generar les trajectòries es necessitarà conèixer els següents paràmetres: la posició i l'orientació de l'eina del robot a l'inici i en el punt final desitjat, el temps desitjat en què es vol realitzar el moviment entre el punt inicial i el final i s'haurà de definir l'espai en el qual es vol treballar així com el tipus de trajectòria que es voldrà generar.

6.1.1.1. Possibilitats de càlcul

Primerament, haurem de definir l'espai de treball en què es voldrà treballar. La primera opció consistirà a actuar en l'espai articular el qual consisteix a definir la trajectòria a partir de l'increment en l'angle de l'articulació i planificant un moviment independent per cada articulació. La segona opció consisteix en l'espai cartesià gènera una trajectòria en línia recta entre la posició inicial i la final utilitzant coordenades cartesianes. Per reduir el nombre d'operacions que s'hauran de realitzar durant la realimentació en el sistema de control actuarem en l'espai articular per tal que el bloc de cinemàtica inversa es trobi fora del llaç tancat de realimentació. Per tant, les coordenades cartesianes a on volem que es dirigeixi l'eina passaran primer pel bloc de cinemàtica inversa, calculat en el projecte de la part mecànica, per obtenir una possible combinació d'angles que s'hauran d'assolir.

A continuació haurem de definir el tipus de moviment que volem que segueixi el robot manipulador.

- **Trajectòria cúbica:** La trajectòria cúbica ens permet obtenir moviments sense augments dràstics en l'acceleració amb un conjunt de polinomis que no requereixen càlculs complicats. Utilitzant aquest polinomi ens permetrà especificar la posició, velocitat i acceleració a l'inici i final de cada segment de ruta.

El polinomi que s'utilitzarà en aquest cas és el següent:

$$\theta(t) = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3 \quad (6.1)$$

Per trobar les variables que necessitem per calcular el polinomi establirem les següents restriccions:

$$a_0 = \theta_0 \quad (6.2)$$

$$a_1 = \dot{\theta}_0 = 0 \quad (6.3)$$

$$a_2 = \frac{3}{\Delta t^2}(\theta_f - \theta_0) \quad (6.4)$$

$$a_3 = -\frac{2}{\Delta t^3}(\theta_f - \theta_0) \quad (6.5)$$

- **Trajectòria amb acceleració màxima:** La trajectòria amb acceleració màxima generarà una trajectòria on l'acceleració sempre serà la màxima possible sigui amb un valor positiu o negatiu. D'aquesta manera la trajectòria es dividirà en una etapa d'acceleració i una de desacceleració.

Per a calcular aquest tipus de trajectòria s'haurà de resoldre el següent sistema d'equacions:

$$\theta(t) = \begin{cases} \frac{\ddot{\theta}}{2}(t - t_0)^2 + \theta_0, & t_0 < t \leq \frac{t_f}{2} \\ -\frac{\ddot{\theta}}{2}\left(t - \frac{t_f}{2}\right)^2 + \dot{\theta}\left(\frac{t_f}{2}\right) * \left(t - \frac{t_f}{2}\right) + \theta\left(\frac{t_f}{2}\right), & \frac{t_f}{2} < t < t_f \end{cases} \quad (6.6)$$

Per trobar la variable que necessitem per calcular el sistema d'equacions es resoldrà la següent equació:

$$\ddot{\theta} = 4 \frac{(\theta_f - \theta_0)}{(t_0 + t_f)^2} \quad (6.7)$$

El valor d'aquesta variable sempre haurà de ser menor en cada articulació que les especificacions màximes permeses pels motors de les articulacions.

- **Trajectòria amb velocitat constant:** Evidentment és impossible realitzar un moviment a velocitat constant si es comença amb una velocitat inicial igual a 0 degut a que això implicaria que tenim una acceleració infinita en el instant 0. Tot i que això no es possible, el que si podem es maximitzar el temps en que la velocitat és constant. Per fer-ho, primer haurem de definir un dels valors de $\ddot{\theta}$ o t_b . Normalment es definirà primer $\ddot{\theta}$ ja que les seves restriccions són més conegudes.

La primera restricció que s'haurà de complir és que l'acceleració no podrà superar l'acceleració permesa pels motors de l'articulació. La segona restricció és que $\ddot{\theta}$ haurà de complir la següent funció utilitzant la mateixa formula de l'acceleració que s'ha utilitzat en el cas anterior:

$$\ddot{\theta} > \frac{4(\theta_f - \theta_0)}{(t_0 + t_f)^2} \quad (6.8)$$

Un cop s'ha definit $\ddot{\theta}$ podrem calcular t_b utilitzant la següent equació:

$$t_b = \frac{\ddot{\theta}t - \sqrt{(\ddot{\theta}t)^2 - 4\ddot{\theta}(\theta_f - \theta_0)}}{2\ddot{\theta}} \quad (6.9)$$

Finalment podrem acabar de calcular la trajectòria a partir del següent sistema:

$$\theta(t) = \begin{cases} \frac{\ddot{\theta}}{2}(t - t_0)^2 + \theta_0, & t_0 < t \leq t_b \\ \theta_0 + \frac{\ddot{\theta}}{2}t_b^2 + \dot{\theta}(t - t_b) & t_b < t \leq t_f - t_b \\ -\frac{\ddot{\theta}}{2}(t - (t_f - t_b))^2 + \dot{\theta}(t_b) * (t - (t_f - t_b)) + \theta(t_f - t_b), & t_f - t_b < t < t_f \end{cases} \quad (6.10)$$

Les equacions presentades en aquest han estat modificades a partir de les següents fonts d'informació: [13] [14] [16].

6.1.1.2. Selecció i desenvolupament de la solució

Per seleccionar l'opció més adequada per al nostre estudi representarem la resposta dels diferents sistemes de càlcul de la trajectòria dels diferents segments del manipulador realitzant una simulació ràpida amb el Matlab. Per aquesta simulació utilitzarem un cas fictici on es vol moure un manipulador des d'un angle inicial de 15 graus fins a un angle de 90 graus en un període de 20 segons. En aquestes simulacions representarem la resposta que tindran tant la posició angular, la velocitat angular i l'acceleració angular.

En les figures que tenim a continuació es pot observar les respostes de l'angle, la velocitat angular i l'acceleració angular per una trajectòria polinòmica. Com es pot analitzar a partir de la resposta obtinguda és suau i no presenta canvis bruscs ni en la posició ni en la velocitat.

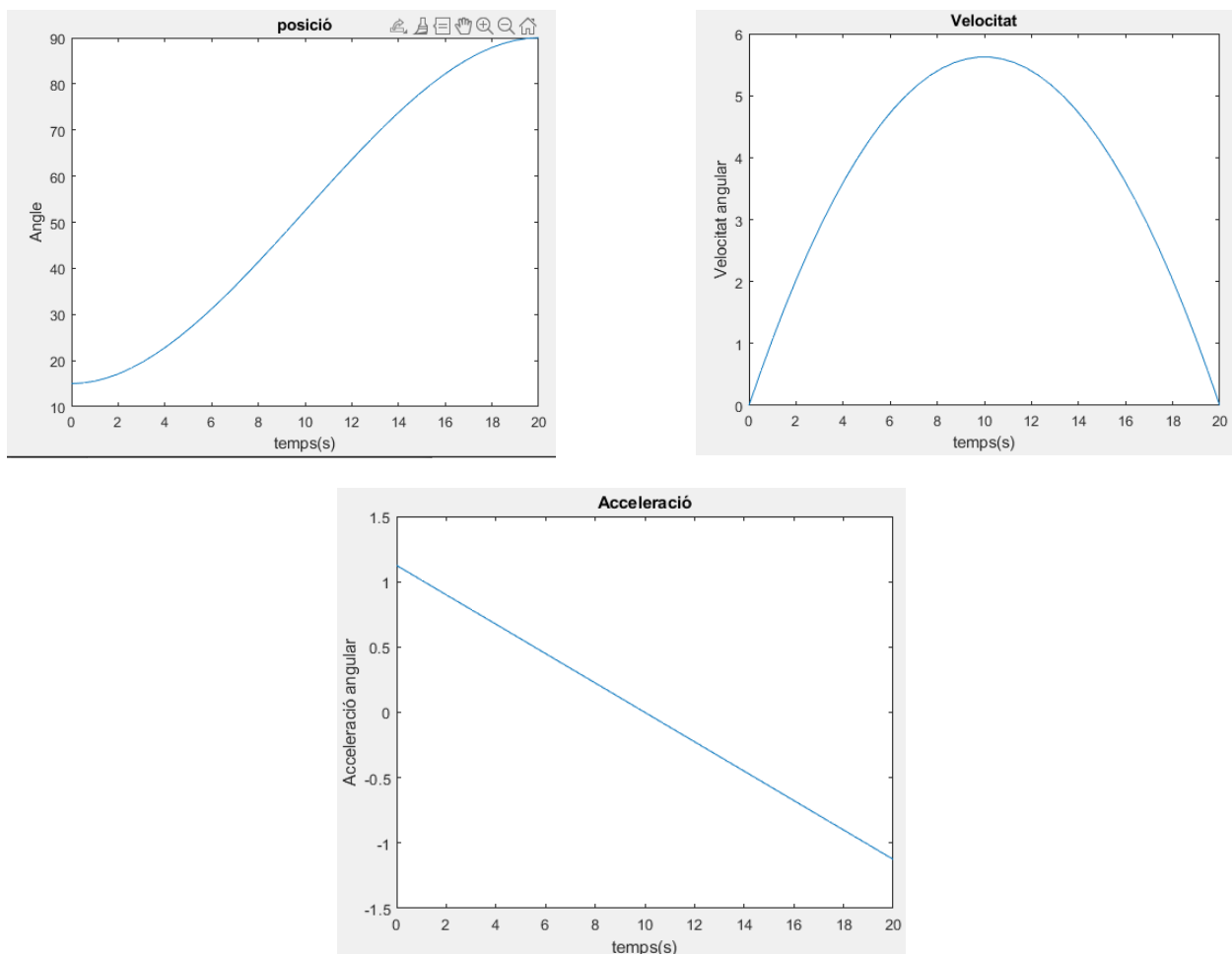


Figura 6.2 Resposta trajectòria polinòmica

En les figures que tenim a continuació es pot observar les respostes del angle, la velocitat angular i l'acceleració angular per una trajectòria amb acceleració màxima.

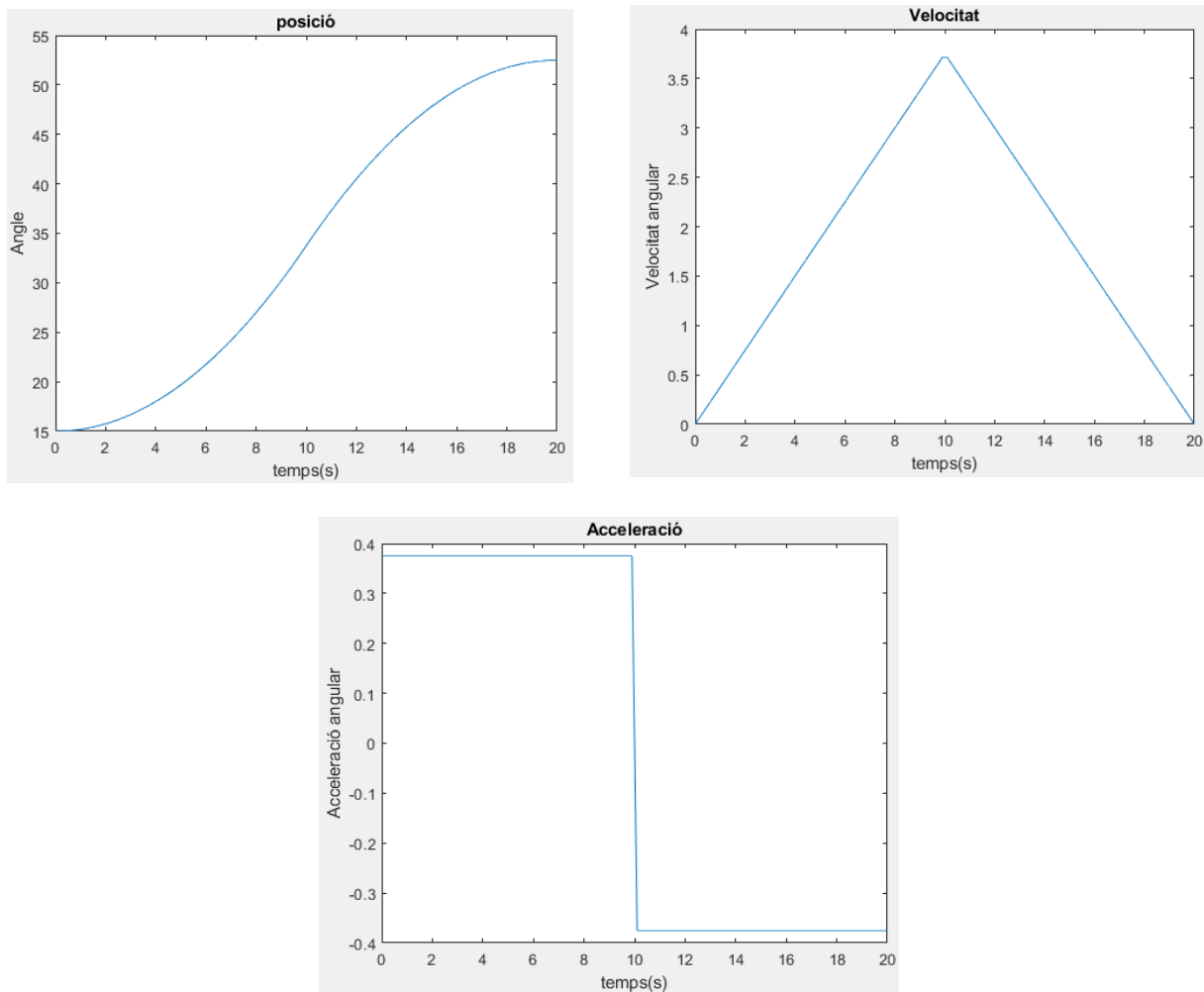


Figura 6.3 Respostes trajectòria acceleració

Com es pot observar l'evolució és molt més brusca que no en el cas de la trajectòria polinòmica

Per observar la resposta de la trajectòria a velocitat constant, tal i com s'ha mencionat en el apartat de càlcul haurem de definir una acceleració angular. Per simular el sistema hem utilitzat una acceleració angular igual a 2 rad/s^2 el qual ens ha donat la següent resposta.

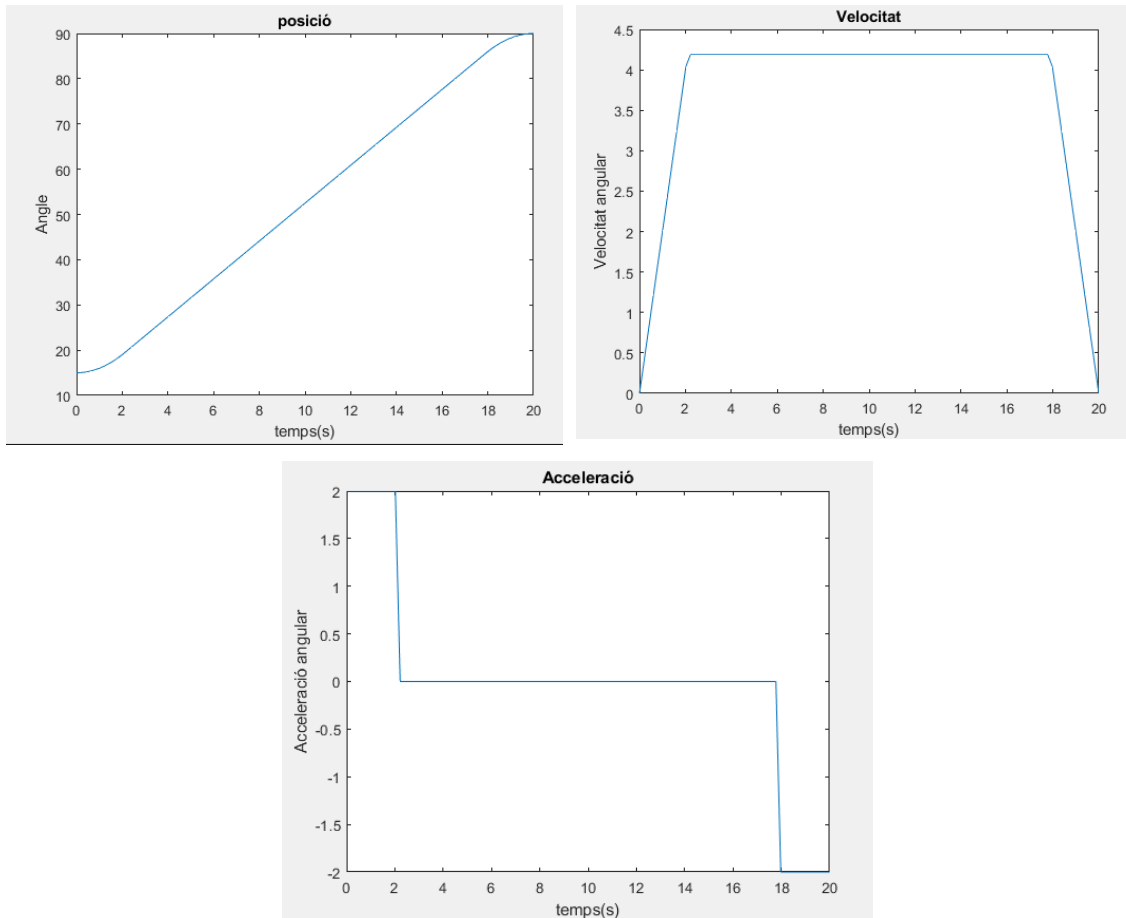


Figura 6.4 Respostes trajectòria velocitat

Com podem observar entre les trajectòries presentades la més estable serà la trajectòria polinòmica cúbica, ja que presenta una evolució constant i sense canvis bruscos deguts a acceleracions molt elevades. Degut aquest motiu escollirem aquesta per poder desenvolupar el bloc de Generació de Trajectòries tot i que es considerarà aplicar punts de via intermedis per tal d'elaborar una trajectòria més complexa que permeti evitar obstacles fixos.

Els scripts de Matlab utilitzats per a obtenir les respostes es podran consultar en el Annex.

6.1.2. Controlador PID

La implementació de controladors PID en el nostre sistema ens permetrà regular l'angle de cada articulació augmentant el parell del motor a partir de la diferència entre la posició actual i la posició desitjada en aquest moment del temps. A causa del fet que tenim 6 articulacions que actuaran amb

un moviment independent les unes de les altres utilitzarem 6 controladors PID independents tot i que els seus paràmetres seran considerablement similars.

Els controladors PID estan definits per tres constants per cada una de les tres parts del controlador, la proporcional, la integral i la derivativa. Per definir aquests tres paràmetres hem considerat dues maneres per sintonitzar els 3 valors de manera empírica.

La primera opció és una sintonització per la resposta en un esglaó. Per poder determinar els 3 paràmetres que busquem haurem de substituir el controlador per un senyal esglaonat de la següent manera:

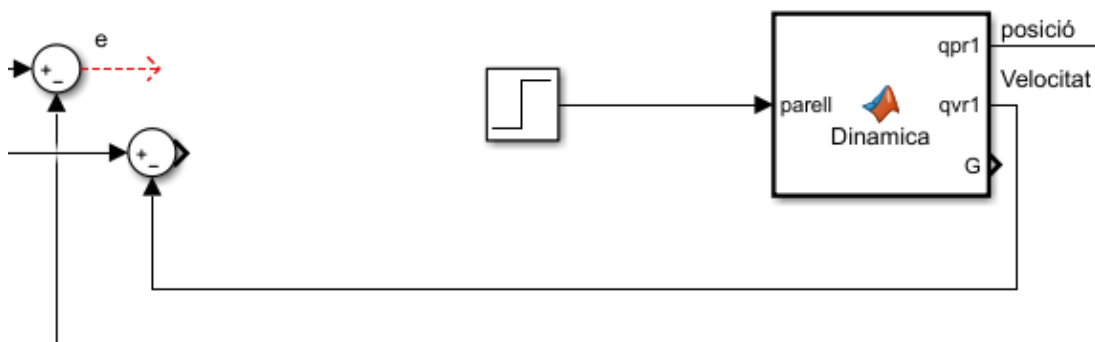


Figura 6.5 Sintonització en esglaó

A continuació s'executarà la simulació i s'obtingran els valors $t1$, $t2$, ΔX i ΔY els quals corresponen al temps mort, al temps de pujada, la variació en el par que representa l'esglaó i la variació entre l'angle inicial i el final respectivament. El temps mort correspon al temps que el sistema tarda en respondre, és a dir, serà el temps entre que s'activa el senyal d'esglaó fins al punt de tall entre el valor inicial, que en aquest cas serà l'angle inicial de l'articulació, amb la recta que aconseguim d'allargar el pendent del senyal de sortida. El temps de pujada per la seva part consistirà en el temps entre el moment immediatament després de $t1$ i el moment en què la mateixa recta mencionada anteriorment talla amb el valor final de l'angle de l'articulació. Per calcular les diferències de l'esglaó i de la sortida simplement s'haurà de restar el valor inicial menys el final.

A continuació obtindrem la constant K_o per a poder aplicar el mètode de Ziegler-Nichols i trobar els tres paràmetres del controlador:

$$K_o = (\Delta X * t2) / (\Delta Y * t1) \quad (6.11)$$

Finalment seleccionarem el tipus de control que volem utilitzar i trobarem els valors de K_p , K_i , K_v a partir del valor de K_o calculat:

Control	K_p	K_i	K_v
P	K_o		
PI	$0.9 * K_o$	$0.27 * K_o / t_1$	
PD	$1.6 * K_o$		$0.60 * K_o * t_1$
PID	$1.2 * K_o$	$0.60 * K_o / t_1$	$0.60 * K_o * t_1$

Taula 6.1 Taula sintonització en esglaó

Alternativament, podem sintonitzar els tres paràmetres del PID mitjançant el mètode del guany crític en llaç tancat. Aquesta metodologia consisteix a igualar les constants derivatives i integrals a 0 i anar augmentant progressivament el valor de K_p per tal de trobar el límit a partir del qual les oscil·lacions del sistema augmenten al llarg del temps en lloc de disminuir. Un cop trobem aquest punt crític haurem obtingut el valor de K_c i t_c (període del senyal de la sortida quan s'ha trobat K_c) el qual podrem utilitzar per trobar els valors dels tres paràmetres utilitzant la segona taula del mètode de Ziegler-Nichols:

Control	K_p	K_i	K_v
P	$0.5 * K_c$		
PI	$0.45 * K_c$	$0.54 * K_c / t_c$	
PD	$0.8 * K_c$		$0.075 * K_c * t_c$
PID	$0.58 * K_c$	$1.18 * K_c / t_c$	$0.075 * K_c * t_c$

Taula 6.2 Taula sintonització guany crític

Un cop s'ha obtingut les constants de la part proporcional, derivativa i integral ja podrem aplicar el controlador PID al nostre sistema de control.

La metodologia de càlcul s'ha consultat en la següent font d'informació [15].

6.1.3. Simulació

Un cop hem desenvolupat tots els diferents blocs que necessitem es realitzarà una simulació del sistema complet el qual serà la representació visual dels resultats obtinguts en les dues parts del projecte.

El sistema de control funcionarà de la següent manera [16]:

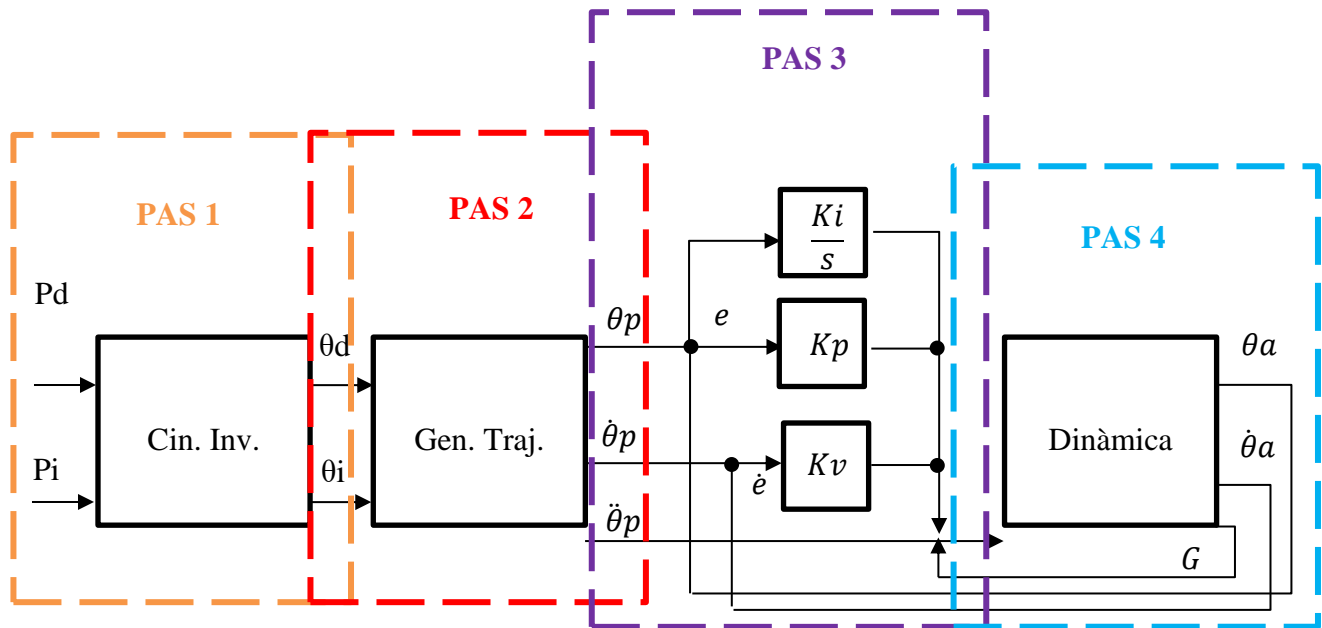


Figura 6.6 Sistema de control complet

PAS 1: Coordenades destí i conversió

Inicialment, es donarà les coordenades i l'orientació a la qual es vol moure l'eina del manipulador així com la seva posició i orientació inicial. Aquestes coordenades seran coordenades cartesianes, per tant, s'haurà de passar a les coordenades articular per tal de poder treballar amb elles. Per convertir les coordenades cartesianes a coordenades articulars haurem d'utilitzar el bloc de cinemàtica inversa dissenyat prèviament a partir dels resultats obtinguts en els estudis. Per tant, aquest pas tindrà com entrades les coordenades en l'espai cartesià i retornarà les coordenades en l'espai articular per cada un de les articulacions.

PAS 2: Generació de trajectòries

En el segon pas s'utilitzaran les coordenades articulars obtingudes en el primer pas per a generar una trajectòria segons la metodologia de planificació escollida. Addicionalment, s'haurà d'introduir el temps en què es desitja completar la trajectòria. El resultat d'aquest pas serà l'obtenció de la posició, la velocitat i l'acceleració angular per a cada una de les articulacions. Per tant, les entrades en aquest pas seran les coordenades articulars inicials i finals de la trajectòria en cada articulació i el temps d'execució el qual anirà directament programat en el bloc i retornarà la posició, velocitat i acceleració angulars per cada una de les articulacions.

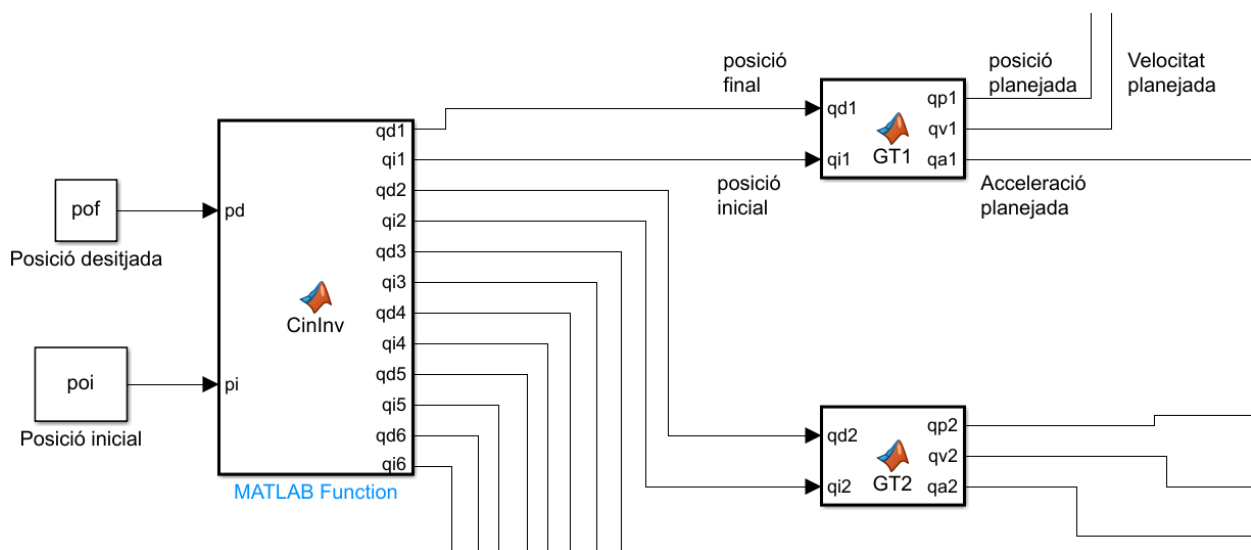


Figura 6.7 Pas 1 i 2 dissenyats en el Simulink-Articulacions 1 i 2

PAS 3: Controlador PID amb compensació gravitacional

El tercer pas consistirà en el controlador del PID. El PID consistirà en 5 parts la suma de les quals serà igual al parell. Primerament, es calcularà l'error de la posició i l'error de la velocitat. Per fer-ho restarem la posició o velocitat planificada menys la posició i velocitat actual.

A continuació multiplicarem l'error de la posició per la constant proporcional per obtenir la component proporcional. També integrarem l'error de la posició i ho multiplicarem per la constant integradora per aconseguir la component integral del PID. Per calcular la component derivativa, multiplicarem l'error de la velocitat per la constant derivativa.

Finalment per obtenir el parell dels motors sumarem les components proporcional, derivativa i integral obtinguda amb l'acceleració planificada i la compensació gravitacional. La compensació gravitacional ens servirà per aconseguir una resposta més estable si s'apliqués en un cas real. En

el nostre cas, com que utilitzem el bloc de dinàmica com a representació del moviment del robot no s'observarà un canvi molt gran. Tot i això, hem decidit aplicar aquesta compensació gravitacional per a assolir un controlador més realista.

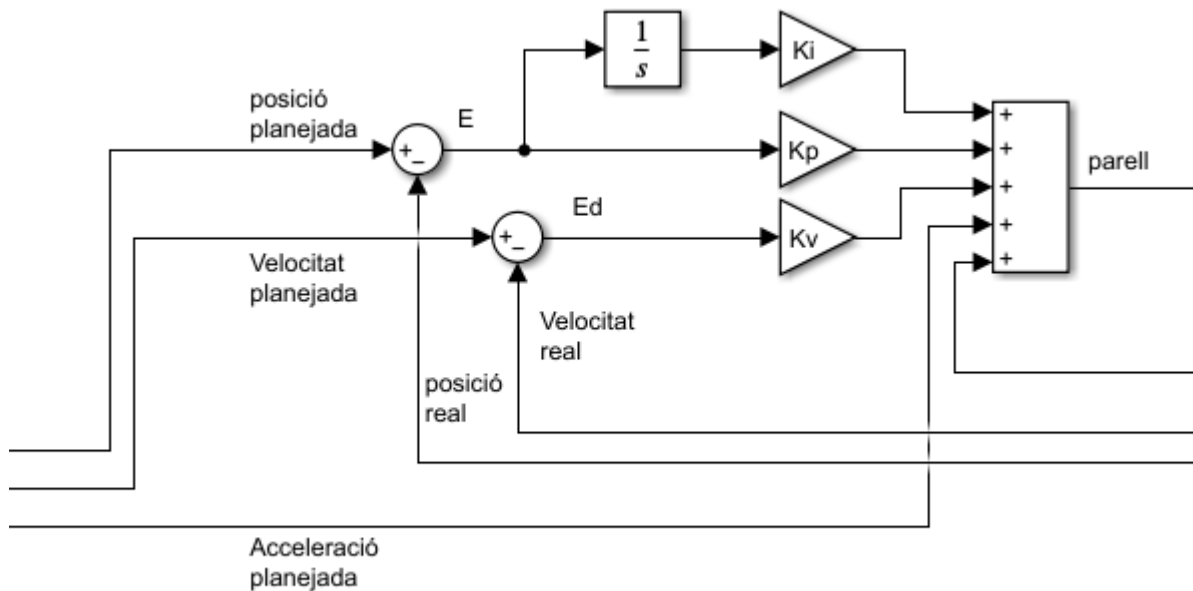


Figura 6.8 Pas 3 dissenyat en el Simulink-Articulació 1

PAS 4: Dinàmica del manipulador i realimentació

Finalment, tindrem el bloc de la dinàmica el qual serà la representació del moviment del manipulador robòtic. El bloc de la dinàmica tindrà com a entrada el parell obtingut pel control PID i tindrà les sortides de la posició i velocitat angulars reals i la component gravitacional. Addicionalment, aquestes tres sortides seran les que utilitzarem com a realimentació per a calcular els errors i el parell.

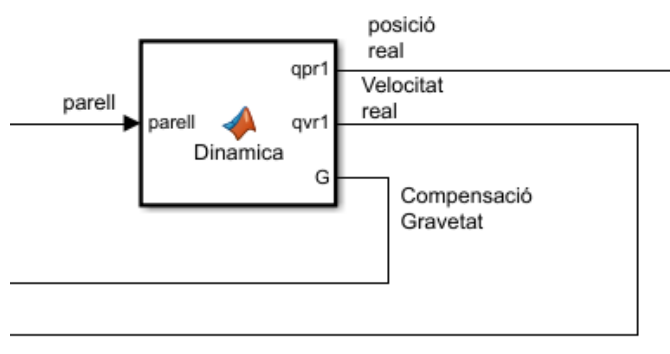


Figura 6.9 Pas 4 dissenyat en el Simulink-Articulació 1

Un cop establert els anteriors passos es simularà utilitzant el Simulink del Matlab. El sistema que hem dissenyat inicialment com a representació de com serà el sistema de control del robot és el següent:

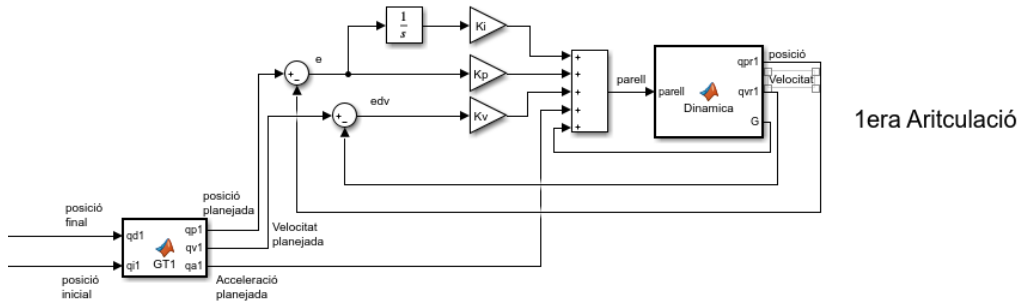


Figura 6.10 Simulink sistema de control d'una articulació

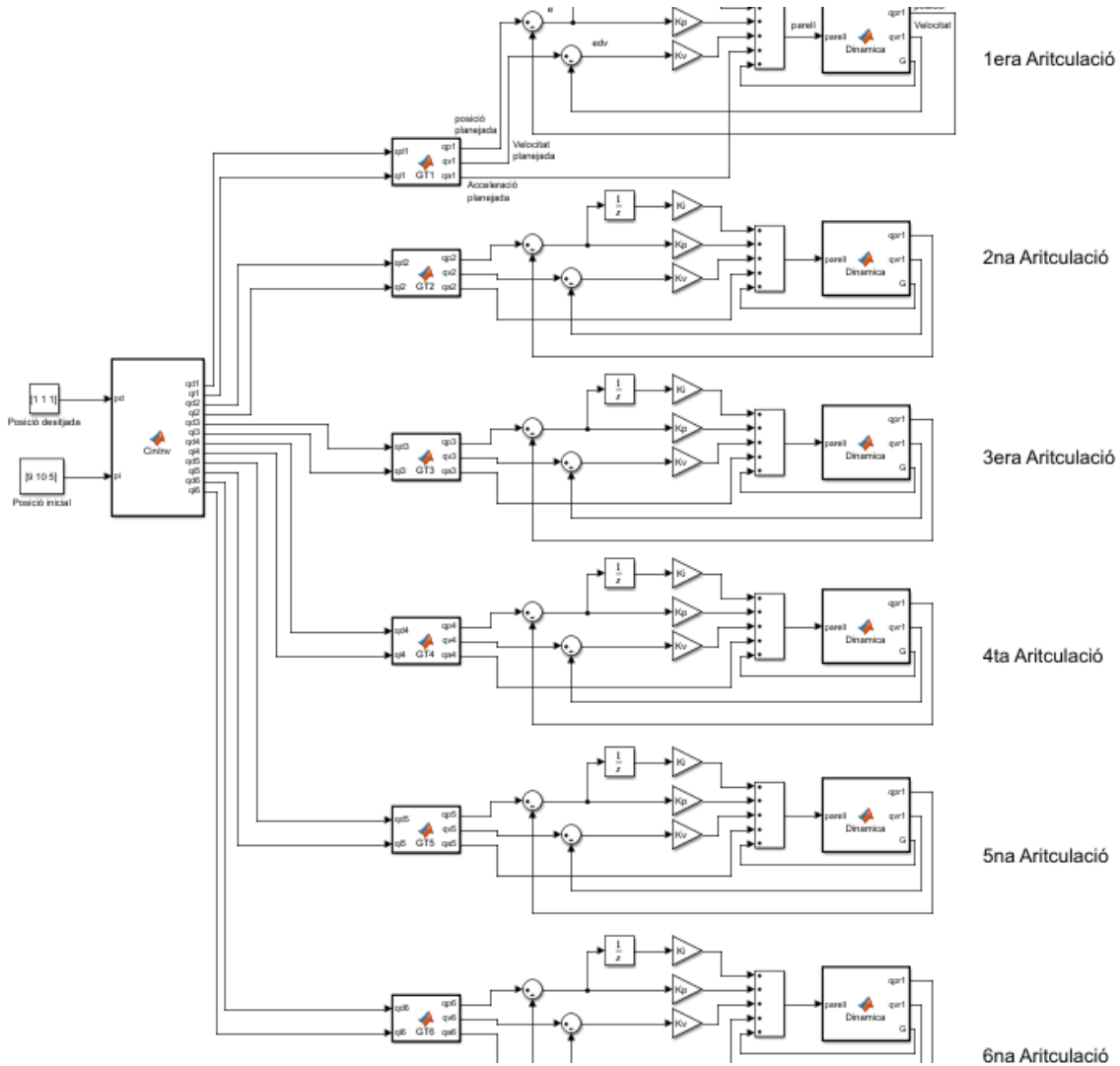


Figura 6.11 Simulink sistema de control complet

7. Desenvolupament de la solució

En aquest apartat presentarem els procediments i els resultats obtinguts durant l'execució de la component electrònica. També s'explicaran els canvis entre el procediment inicial dissenyat durant l'etapa de l'avantprojecte i l'utilitzat durant l'execució.

Tal com s'ha mencionat anteriorment el sistema de simulació del controlador contindrà quatre blocs principals. Els blocs de la cinemàtica inversa i la generació de trajectòries seran els primers blocs que s'hauran de dissenyar i realitzaran la funció de traducció de les coordenades de la posició i orientació desitjades de l'eina i dissenyar la trajectòria que els diferents enllaços hauran de seguir. A continuació es dissenyarà el bloc de la dinàmica el qual farà la funció de simular la relació entre les forces que s'apliquen en el robot, tant internes com externes, i la posició i velocitat reals de les diferents articulacions. Un cop tenim la trajectòria dissenyada i un bloc perquè simularà el robot físic i proporcionarà la posició i velocitat reals podrem començar a dissenyar els controladors que s'usaran de manera independent en cada una de les articulacions.

7.1. Generació de trajectòries

El bloc corresponent a la generació de trajectòria té la funció de planejar trajectòries independents per cada una de les articulacions de manera que podrem saber la posició, velocitat i acceleració en cada moment.

Per a poder dissenyar el generador de trajectòries hem de tenir decidit prèviament tres coses. El primer que hem de conèixer és la posició inicial des d'on cada una de les articulacions iniciarà el moviment. El segon que haurem de conèixer és la configuració d'angles necessària perquè l'eina adopti la posició i orientació desitjada. Finalment, l'últim element que haurem de definir abans de començar el disseny del generador de trajectòries és definir el tipus de trajectòria que seguiran les articulacions.

Els dos primers paràmetres es definiran utilitzant el bloc de la cinemàtica inversa el qual es presentarà en l'informe corresponent a la component mecànica del projecte. Usant el generador de trajectòries dissenyat s'obtidran tant la configuració inicial dels angles per assolir la posició inicial com la configuració d'angles objectius per assolir la posició desitjada.

Pel que fa a la trajectòria escollida ja es va estudiar durant l'avantprojecte i se continuarà utilitzant la trajectòria polinòmica cúbica estudiada durant el previ informe. Aquest tipus de trajectòria ens permetrà dissenyar un moviment fluid i ràpid.

Un cop definits aquests paràmetres començarem a programar un codi amb el Matlab Online que ens permeti obtenir les trajectòries de les articulacions [23] [24]. Primerament, presentarem una solució que ens permeti aconseguir una trajectòria fent servir les configuracions d'angles aconseguides amb el bloc de la cinemàtica dissenyat originalment. També es presentarà una alternativa per obtenir les trajectòries fent ús de les finestres interactives explicades en la memòria corresponent a la component mecànica.

Tal com s'ha comentat, els generadors de trajectòries generaran trajectòries individuals per cada una de les articulacions. Per això crearem un bucle for el qual es repetirà segons el nombre d'articulacions que tingui el braç robòtic.

```
for x=1:6
```

La variable x del for servirà per seleccionar l'articulació amb la qual estem treballant en cada loop. Per cridar la posició inicial, però, primer haurem de crear una variable de per guardar la configuració inicial del robot. La configuració d'angles destí està guardada en la variable *configSol* la qual es va crear en el bloc de la cinemàtica inversa el qual s'explica en l'informe de la component mecànica del projecte. Per cridar cada una de les posicions que desitgem cridarem la variable en qüestió de la següent manera:

```
homeconfig = homeConfiguration(robot);
```

```
homeconfig(x).JointPosition;
```

```
configSol(x).JointPosition
```

Per definir el moviment uniforme de la trajectòria caldrà definir almenys quatre restriccions que haurà de complir. Les primeres dues restriccions seran clarament que, durant l'instant inicial del moviment la posició de l'articulació serà la posició guardada en *homeConfiguration* i per l'altra banda, durant l'instant final del moviment la posició serà la mateixa que la que tenim guardada en la variable *configSol*. Per tant, tenim que:

$$\theta(t_0) = \theta_0 \quad (7.1)$$

$$\theta(t_f) = \theta_0 \quad (7.2)$$

Les dues altres restriccions correspondran a les restriccions de la velocitat en l'instant inicial i final. En l'instant inicial del moviment el robot estarà en repòs i, per tant, la velocitat serà igual a 0. En l'instant final, però, dependrà de si es voldrà realitzar un segon moviment posteriorment a l'acabament del primer moviment. Si no es desitja portar a cap un segon moviment llavors la velocitat a l'instant final també serà igual a 0. En el cas que es vulgui dur a terme un moviment posterior el valor de la velocitat en l'instant final la podem escollir donant-li un valor entre 0 i la velocitat màxima permesa pel motor. En aquest primer estudi considerarem la velocitat en l'instant final igual a 0.

$$(7.3)$$

$$\theta(t_0) = 0 \quad (7.4)$$

$$\dot{\theta}(t_f) = 0$$

Aquestes quatre restriccions es podran respectar utilitzant un polinomi de tercer grau o polinòmic cúbic el qual té quatre coeficients. Aquest tipus de polinomis es veurà de la següent forma:

$$\theta(t) = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3 \quad (7.5)$$

$$\dot{\theta}(t) = a_1 + 2a_2t + 3a_3t^2 \quad (7.6)$$

$$\ddot{\theta}(t) = 2a_2 + 6a_3t \quad (7.7)$$

Aplicant les restriccions mencionades i utilitzant el polinomi cúbic així com les seves derivades podem obtenir les següents quatre equacions:

$$a_0 = \theta_0 \quad (7.8)$$

$$a_1 = 0 \quad (7.9)$$

$$\theta_f = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3 \quad (7.10)$$

$$0 = a_1 + 2a_2t + 3a_3t^2 \quad (7.11)$$

Amb aquestes quatre equacions ja hem obtingut dos dels quatre coeficients. Resolent les equacions podem calcular els dos últims coeficients. Per resoldre les equacions primer aïllarem el a_3 en la quarta equació.

$$a_3 = \frac{-2a_2t}{3t^2} \quad (7.12)$$

A continuació substituïrem el que hem obtingut en la tercera equació i resoldrem l'equació resultant:

$$\theta_f = \theta_0 + 0t + a_2t^2 + \frac{-2a_2t}{3t^2}t^3 \rightarrow a_2 = \frac{3(\theta_f - \theta_0)}{t^2} \quad (7.13)$$

Per obtenir el últim coeficient resoldrem seguint el mateix coeficient però aïllarem a_2 enlloc de a_3 .

$$a_2 = \frac{-3a_3t^2}{2t} \quad (7.14)$$

$$\theta_f = \theta_0 + 0t + \frac{-3a_3t^2}{2t}t^2 + a_3t^3 \rightarrow a_3 = \frac{-2(\theta_f - \theta_0)}{t^3} \quad (7.15)$$

Amb això ja haurem obtingut els quatre coeficients necessaris per calcular la trajectòria i procedirem a programar-ho.

```
a0=homeconfig(x).JointPosition;
a1=0;
a2=3/(t^2)*(configSol(x).JointPosition-a0);
a3=-(2/(t^3)*(configSol(x).JointPosition-a0));
```

El valor de t serà donat pel temps que volem que tardi a realitzar un moviment. En tot cas, el valor de t haurà de permetre que el moviment es faci a unes velocitats menors a les màximes permeses per l'articulació. Per aquesta primera prova el temps el fixarem en 5 segons tot i que per l'entrega final s'ajustarà per tal que el moviment sigui el més ràpid possible sense superar la velocitat màxima permesa.

Per calcular les funcions de la posició, velocitat i acceleració de la trajectòria utilitzarem el següent bucle for:

```
i=1;
for t = linspace(0,5,20)
    teta(i)=a0+a1*t+a2*t^2+a3*t^3;
    tetad(i)=a1+2*a2*t+3*a3*t^2;
    tetadd(i)=2*a2+6*a3*t;
    i=i+1;
end
```

La variable t en aquest bucle generarà una llista que tindrà valors que aniran des de 0 fins a 5. El nombre de valors que tindrà la llista dependrà del tercer valor que introduïm en la funció *linspace*. Si volem augmentar la precisió de la nostra trajectòria simplement haurem d'augmentar aquest valor per tenir més mostres al llarg del temps. La variable i s'utilitzarà per modificar la posició de les llistes *teta*, *tetad* i *tetadd* on es guardarà els resultats de les equacions.

Utilitzant aquest codi ja haurem calculat la posició, la velocitat i l'acceleració en una sèrie de punts en el temps de manera que puguem definir la trajectòria que seguirà. A continuació només faltaria gràfica els resultats obtinguts de la següent manera:

```
figure
plot(t,teta)
title('posició')
xlabel('temps(s)')
ylabel('Angle')
figure
plot(t,tetad)
title('Velocitat')
xlabel('temps(s)')
ylabel('Velocitat angular')
figure
plot(t,tetadd)
title('Acceleració')
```

```
xLabel('temps(s)')
```

```
yLabel('Acceleració angular')
```

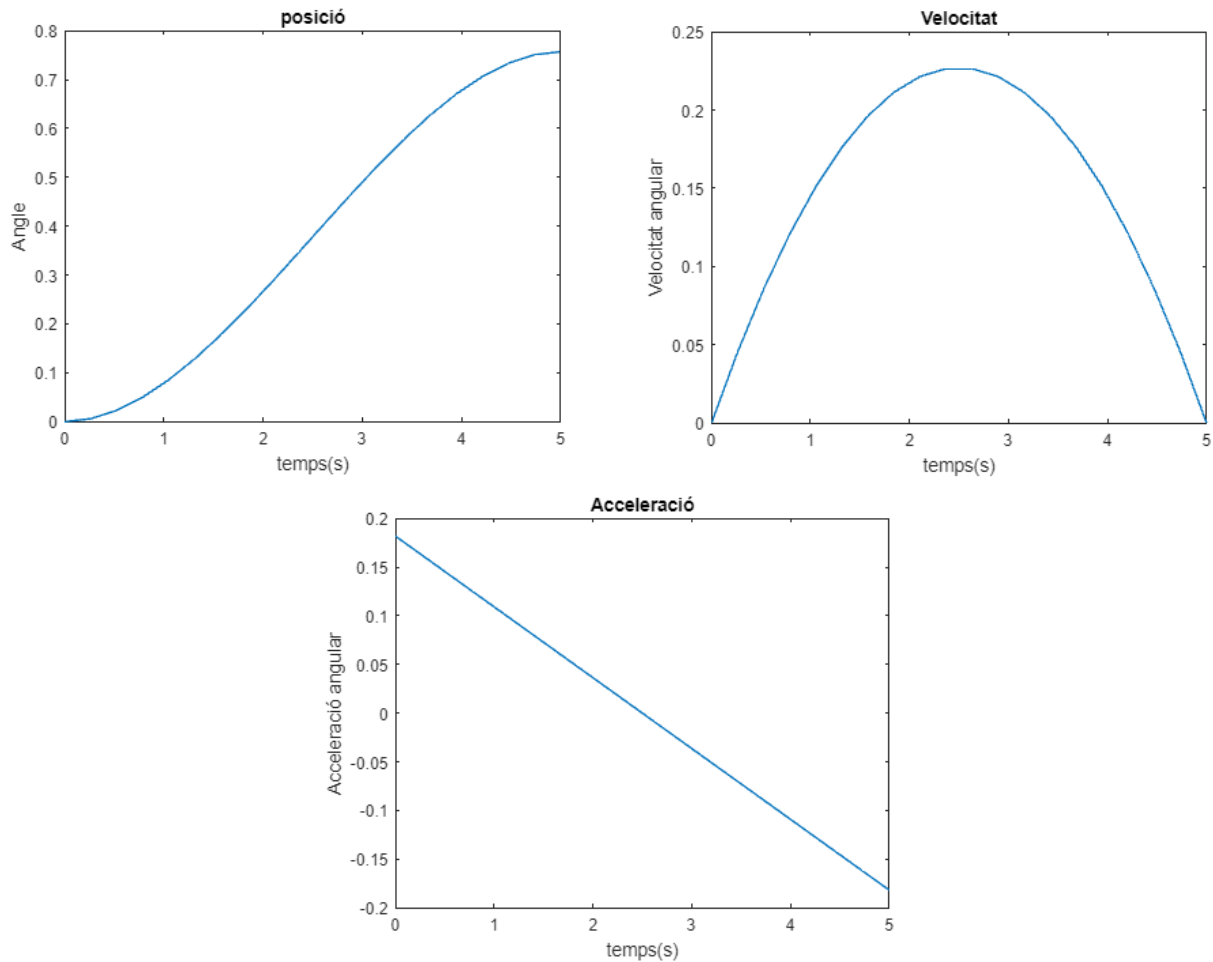


Figura 7.1 Resultats de la trajectòria dissenyada

En les figures 7.1 presentem els resultats obtinguts de la primera articulació per la trajectòria dissenyada. Com es pot observar en la gràfica de la velocitat aquesta és inferior als 0,25 rad/s, però la velocitat màxima permessa per l'articulació 1 és d'aproximadament 2,1 rad/s. Per tant, per l'entrega final es podrà reduir la duració de la trajectòria per tal de realitzar el moviment considerablement més ràpid.

Per consultar el codi de la funció de la Generació de trajectòries polinòmiques es pot consultar el codi en l'Annex IV.

Alternativament, a aquesta solució hem estudiat la possibilitat d'obtenir la configuració dels angles i la generació de trajectòries utilitzant una interfase interactiva. Aquesta forma d'obtenir la configuració dels angles ens permetrà moure el robot manualment utilitzant una simulació i marcar la posició exacta que volem que adopti el robot. Aquesta manera d'introduir la posició simularà el procediment d'un operari movent l'eina del robot col·laboratiu fins a una posició per programar-la de manera ràpida i senzilla. Addicionalment, ens permetrà marcar múltiples posicions i generar de manera ràpida i senzilla una trajectòria que passis per cada punt marcat. Per usar aquest mètode per aconseguir la configuració dels angles utilitzarem el *RigidBodyTree* que hem creat anteriorment i utilitzarem la següent funció per a habilitar una figura que ens permetrà interactuar manualment amb l'esquelet del robot.

```
gui = interactiveRigidBodyTree(robot,MarkerScaleFactor=0.4);
```

Executant la funció anterior se'ns obrirà la següent finestra.

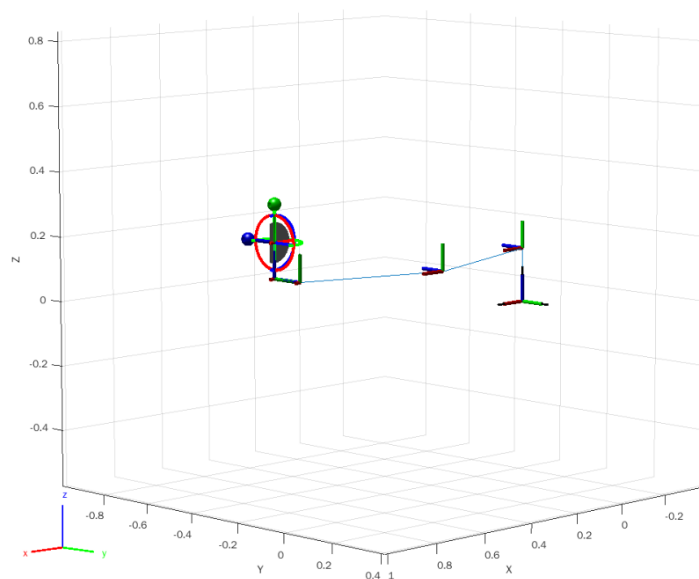


Figura 7.2 Finestra del robot interactiva

Per defecte, l'articulació interactiva que es podrà moure serà l'articulació més propera a l'extrem. Com es pot observar en la figura 7.2 en l'última articulació del braç robòtic disposem d'uns marcadors que anteriorment no apareixien. Aquests marcadors serveixen per modificar la posició i l'orientació de la trama interactiva.

Com es podem veure tenim tres cercles amb una esfera en un dels seus extrems. Aquests cercles serveixen per modificar l'orientació de la trama interactiva. Cada un dels tres cercles ens permetrà girar la trama envers un dels eixos movent l'esfera que al costat del cercle.

Per modificar la posició de la trama, utilitzarem la àrea negra que trobem a l'interior dels cercles i l'arrossegarem per tal de moure la trama en l'espai XYZ.

Un cop haguem col·locat la trama final en la posició i orientació que desitgem executarem la següent funció per guardar la configuració actual dels angles de les articulacions.

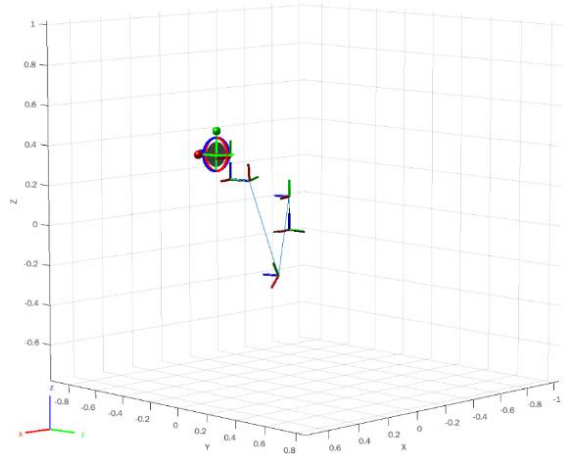


Figura 7.3 Nova posició i orientació

```
gui.addConfiguration
```

Executant aquesta funció ens permetrà guardar la configuració dels angles actuals la qual podrem visualitzar executant el següent el qual ens permetrà visualitzar totes les configuracions guardades.

```
gui.StoredConfigurations
```

Per demostrar el funcionament d'aquest procediment per generar trajectòries hem guardat tres configuracions diferents seguint els passos mencionats anteriorment. Un cop els hem marcat llavors haurem de crear dos vectors. El primer serà un vector el qual tindrà el mateix número de valors que les configuracions que haguem guardat. Aquest vector correspondrà als moments en el temps en el qual volem que el robot arribi en cada posició. És a dir, tindrem un vector amb tres valors i cada un d'aquests valors correspondrà al moment en el temps en el qual el robot assolirà els angles marcats per la configuració. El primer valor serà igual a 0 i s'assignarà a la configuració inicial de la qual parteix el robot.

El segon vector correspondrà al vector del temps. Aquest vector es crearà amb la funció *linspace* i funcionarà de la mateixa manera que el cas anterior. En aquest cas, el primer i últim valor que tindran aquest vector han de ser els mateixos que el primer i últim valor del primer vector explicat.

```
tpts=[0 2,5 5];
```

```
t=linspace(0,5,20);
```


A continuació escollirem el tipus de trajectòria que volem que segueixi el nostre robot. En aquest cas escollirem una trajectòria polinòmica cúbica com s'ha mencionat anteriorment tot i que disposem de diversos tipus de trajectòries com les trajectòries de cinquè ordre o les trajectòries B-spline cúbiques. Per generar les trajectòries necessitarem introduir tres paràmetres. Els paràmetres que s'hauran d'introduir seran les configuracions guardades, els punts en el temps de cada posició i el vector del temps en aquest ordre.

```
[q, qd, qdd, pp] = cubicpolytraj(irBT.StoredConfigurations, tpts, t);
```

A continuació, per visualitzar la trajectòria dissenyada crearem gràfiques per l'evolució de la primera articulació i visualitzarem els resultats.

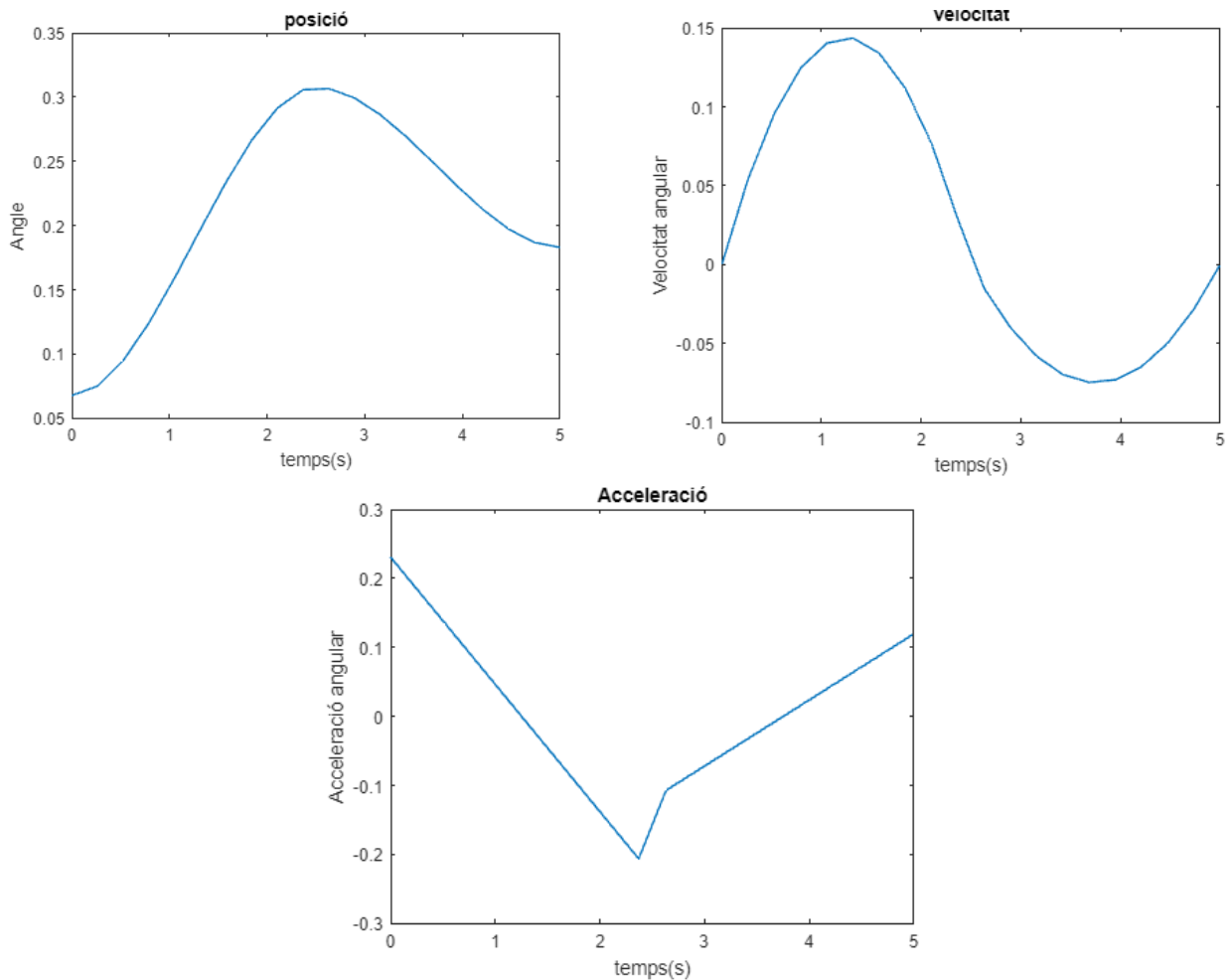


Figura 7.4 Resultats de la trajectòria alternativa

Com es pot observar en les gràfiques de la figura 7.4 la trajectòria entre de punt a punt és molt similar a l'obtinguda en la primera trajectòria dissenyada. En la gràfica de l'acceleració es pot

analitzar un canvi en l'acceleració que no es visualitzava en la trajectòria original. Aquesta diferència es podria reduir o fins i tot eliminar augmentant el nombre de mostres del vector temps.

7.2. Simulació braç robòtic

Per a completar l'objectiu final de dissenyar un control PID per al robot col·laboratiu TM14X primer haurem de dissenyar un model que ens permeti simular el comportament del manipulador en qüestió. Per simular el comportament del robot haurem de dissenyar un model de Simulink utilitzant les trajectòries dissenyades en l'apartat anterior i un sistema que ens permeti emular la dinàmica directa del robot.

La simulació Simulink tindrà tres parts principals. La primera part consistirà en l'aplicació del generador de trajectòries dissenyat prèviament per a calcular les trajectòries individuals de cada motor.

Aquesta primera part del model de simulació aplicat a una sola articulació el podem veure representat a continuació:

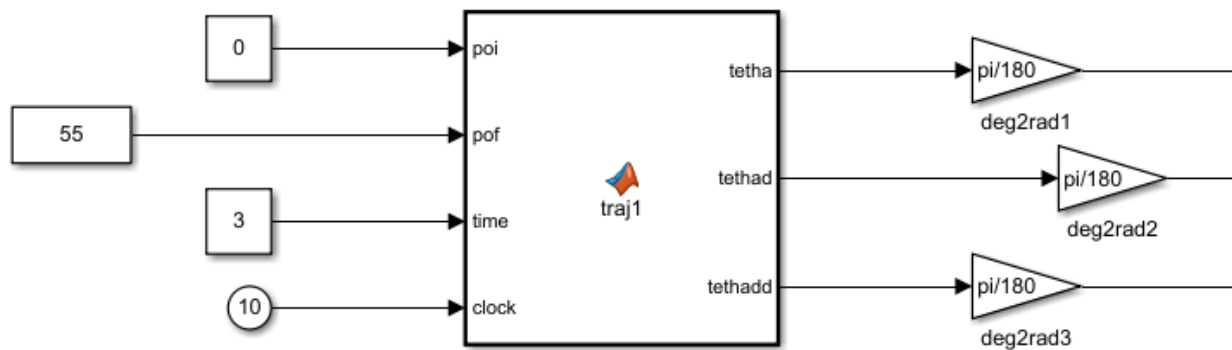


Figura 7.5 Generació de trajectòria de la 1era articulació

El bloc de la Matlab Function que veiem en la figura 7.5 utilitzarà les equacions 7.5, 7.6, 7.7, 7.8, 7.9, 7.13, 7.14 les quals ja hem programat anteriorment i les modificarem per tal que s'adaptin al format d'una Matlab Function.

Per a poder calcular la funció de la generació de trajectòries necessitarà que li indiquem la posició angular des d'on s'iniciarà el moviment (*poi*), la posició angular fins on es vol moure l'articulació (*pof*), el temps que durarà el moviment (*time*) i el temps de la simulació (*clock*). Modificant els inputs *poi*, *pof* i *time* podrem dissenyar una trajectòria que parteixi des de qualsevol posició, es desplaci fins a qualsevol posició i realitzi el moviment en el temps que desitgem. Tot i això, sí que hauré de tindre en consideració que les variables que introduïm no provoquin situacions que no siguin possibles a causa de les limitacions físiques que té el mateix robot.

La funció ens retornarà tres variables les quals seran: *tetha* la qual definirà la trajectòria de la posició angular que haurà de seguir la trajectòria, *tethad* la qual definirà la velocitat angular que haurà de tenir l'articulació en cada moment i *tethadd* la qual definirà l'acceleració que haurà de tenir l'articulació en cada moment. Aquestes tres variables de sortides estaran en graus, però per les parts posteriors del model necessitarem que aquestes variables estiguin en radians i, per tant, afegirem un bloc de *Gain* amb un valor de $\pi/180$ a la sortida de cada variable.

El codi de la funció el podrem observar en el Annex IV.

La segona part principal que tindrà el nostre model de simulació correspondrà a la implementació de la dinàmica directa, de manera que podrem obtenir l'acceleració angular coneixent les posicions i velocitats angulars i el parell del motor.

La part del model de simulació corresponent a l'obtenció de la dinàmica directa serà el següent:

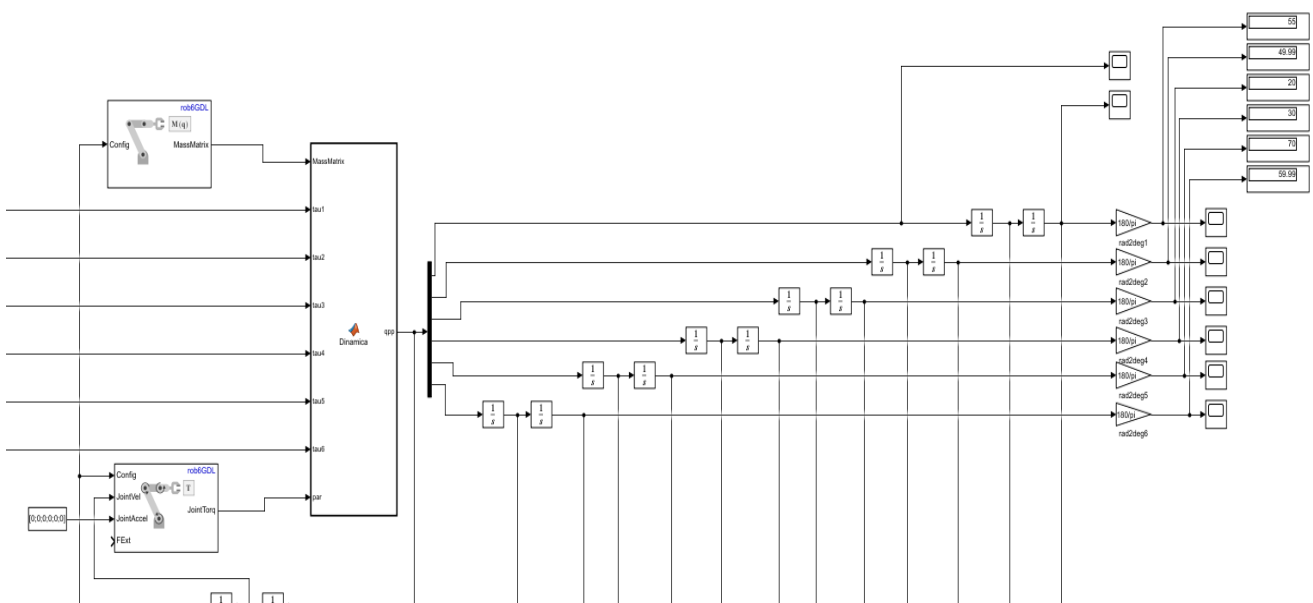


Figura 7.6 Dinàmica directa del robot

El procés per calcular la dinàmica directa segueix el mateix procediment que hem explicat en l'informe complementari a aquest el qual tracta el estudi mecànic del robot, creant un model d'estudi de la cinemàtica inversa i la dinàmica del robot. De forma resumida, en aquest informe explicàvem que abans de realitzar el càlcul de la dinàmica directa prèviament havíem de dissenyar una funció que calculés la dinàmica inversa utilitzant el mètode recursiu de Newton-Euler. Un cop dissenyada la funció, vam usar el primer mètode de Walker-Orin per calcular la dinàmica directa. Per calcular la dinàmica directa fent servir el primer mètode de Walker-Orin de manera que la simulació sigui el més ràpida i eficient hem utilitzat blocs del Simulink de la llibreria *Robotic Systems Toolbox* per calcular la matriu de masses i el mètode recursiu de Newton-Euler.

El bloc *Inverse Dynamics* el qual el podem observar en la figura 7.7, ens permet calcular la dinàmica inversa segons el mètode recursiu de Newton-Euler d'una manera optimitzada. Com podem observar, el bloc requereix tres inputs obligatoris i un opcional. Els inputs obligatoris per aquest bloc són les configuracions de les posicions angulars, les velocitats angulars i les acceleracions angulars. Opcionalment, també podem introduir una força externa la qual simularà l'efecte que té la manipulació d'objectes i l'efecte que el pes d'aquests objectes tindran sobre el manipulador. L'output del bloc en qüestió serà el parell de cada una de les articulacions del robot. Addicionalment, s'haurà d'assignar el model *RigidBodyTree* el qual guardarem en una variable utilitzant el codi que podem observar en l'Annex III.

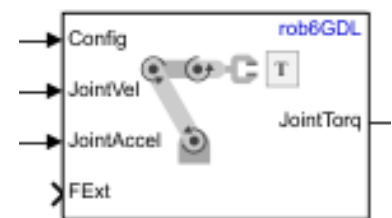


Figura 7.7 Bloc de la dinàmica inversa

En la simulació de la figura 7.6 podem observar que en l'input corresponent a l'acceleració angular introduïm un vector de 6×1 amb tots els seus elements iguals a 0. Això ho fem, ja que, tal com es menciona en l'informe de l'estudi de la dinàmica, d'aquesta manera podem eliminar l'efecte que té la matriu d'inèrcia sobre el càlcul i obtenir el vector $B(\theta, \dot{\theta})$ el qual està compost per tots els paràmetres de la força centrífuga, la gravetat i els paràmetres de Coriolis.

El segon bloc que utilitzarem de la llibreria *Robotic Systems Toolbox* que utilitzarem consistirà en el bloc de *Joint Space Mass Matrix* (figura 7.8) que ens permetrà calcular la matriu de masses segons la configuració de posicions angulars que tinguem en el moment. Addicionalment, s'haurà d'assignar el model

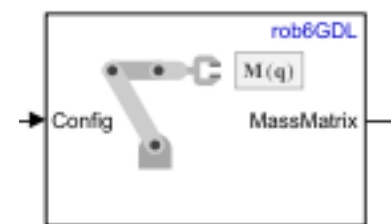


Figura 7.8 Bloc de la matriu de masses

RigidBodyTree el qual guardarem en una variable utilitzant el codi que podem observar en l'Annex III tal i com hem fet amb el bloc de la dinàmica inversa.

Utilitzant aquests dos blocs i les realimentacions que ens permetran calcular el parell podrem crear una funció que ens permeti calcular la dinàmica directa utilitzant el 1er mètode de Walker-Orin [30]. El codi d'aquesta Matlab Function la podrem observar en el següent codi:

```
function qpp = Dinamica(MassMatrix, tau1, tau2, tau3, tau4, tau5, tau6, par)

tau=[0 0 0 0 0 0];
tau(1)=tau1;
tau(2)=tau2;
tau(3)=tau3;
tau(4)=tau4;
tau(5)=tau5;
tau(6)=tau6;

qpp = inv(MassMatrix)*(tau.'-par);
end
```

Utilitzant aquesta funció obtindrem les diferents articulacions angulars reals de les quals podrem extreure les posicions i velocitats angulars reals utilitzant els blocs del Simulink d'integració.

L'últim bloc de la simulació del robot sense controlador PID és la realimentació dels paràmetres reals per a calcular el parell de l'articulació. En aquest bloc de realimentació, podrem observar que mentre que sí que és veritat que no disposem d'un controlador PID el que sí que tenim és un controlador de posició amb una constant igual a 1.

Per a calcular el parell de les diferents articulacions en un sistema realimentat sense els controlador PID eliminarem els paràmetres corresponents a les parts derivativa i integradora del càlcul del par de manera que l'equació resultat serà igual a l'equació 7.16.

$$\tau = E * k_p + \ddot{\theta} - \dot{\theta} * v \quad (7.16)$$

Sent:

E: Error de la posició restant la posició planificada menys la posició real

k_p: Constant proporcional igual a 1 (en aquest cas)

v : Constant de viscositat dinàmica del aire ($1,8 * 10^{-5} \frac{N * s}{m^2}$)

Seguint l'equació 7.16 hem dissenyat el següent sistema de realimentació per a simular el sistema robòtic. Com podem observar els parells els obtenim sumant l'error de la posició multiplicat per 1 més l'acceleració angular i hem deixat desconnectat el error de velocitat ja que, en aquest cas no tenim cap ús per ell. Posteriorment a la suma hem restat el resultat menys la velocitat real, obtinguda de la integració de l'acceleració angular que ens ha donat la dinàmica inversa,



multiplicada per la constant viscosa dinàmica del aire a temperatura ambient (20 °C).

A continuació, podem observar les respostes que hem obtingut de executar la simulació:



Figura 7.10 Articulació 1 - θ destitjada = 55° Controlador proporcional unitari



Figura 7.11 Articulació 2 - θ destitjada = 50° Controlador proporcional unitari

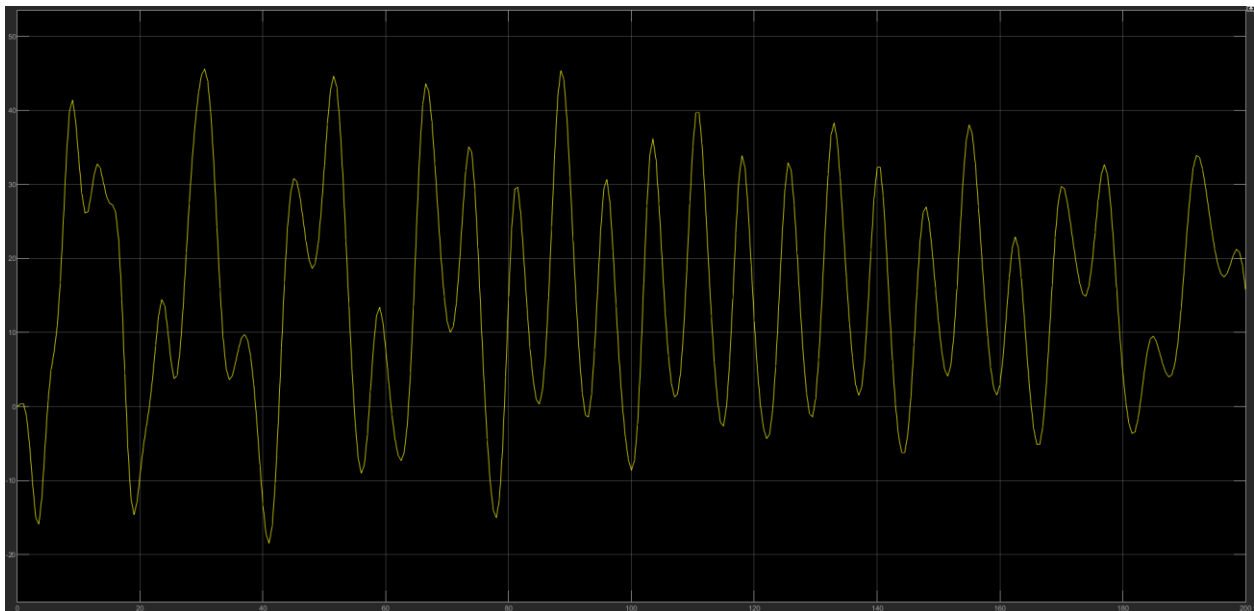


Figura 7.12 Articulació 3 - θ destitjada = 20° Controlador proporcional unitari

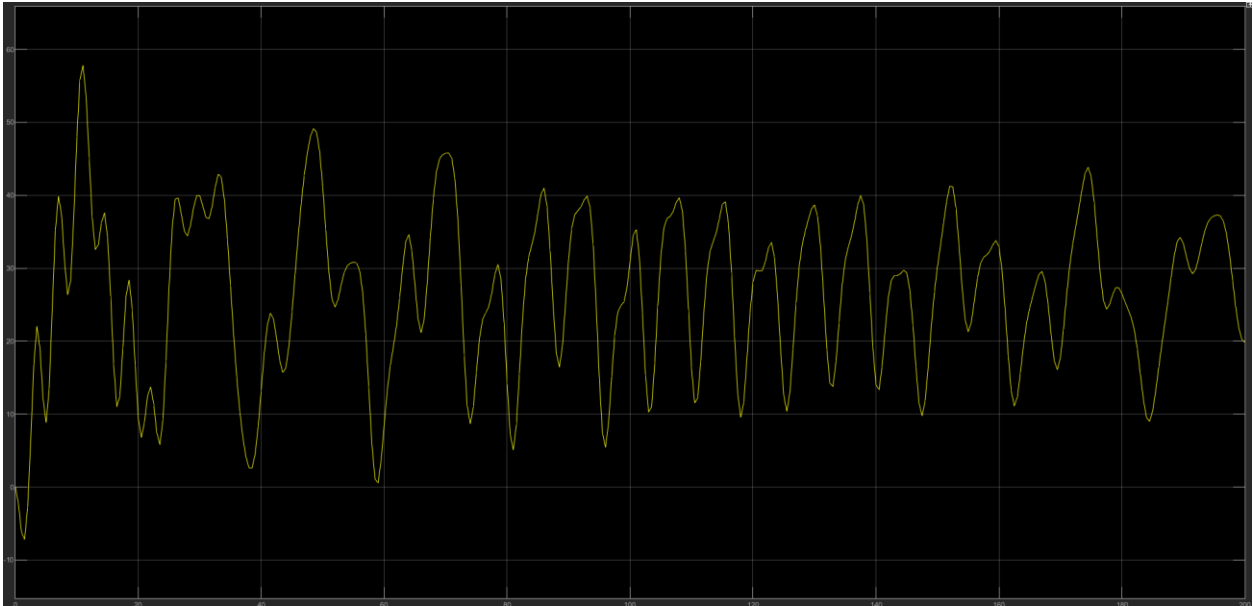


Figura 7.14 Articulació 4 - θ destitjada = 30° Controlador proporcional unitari

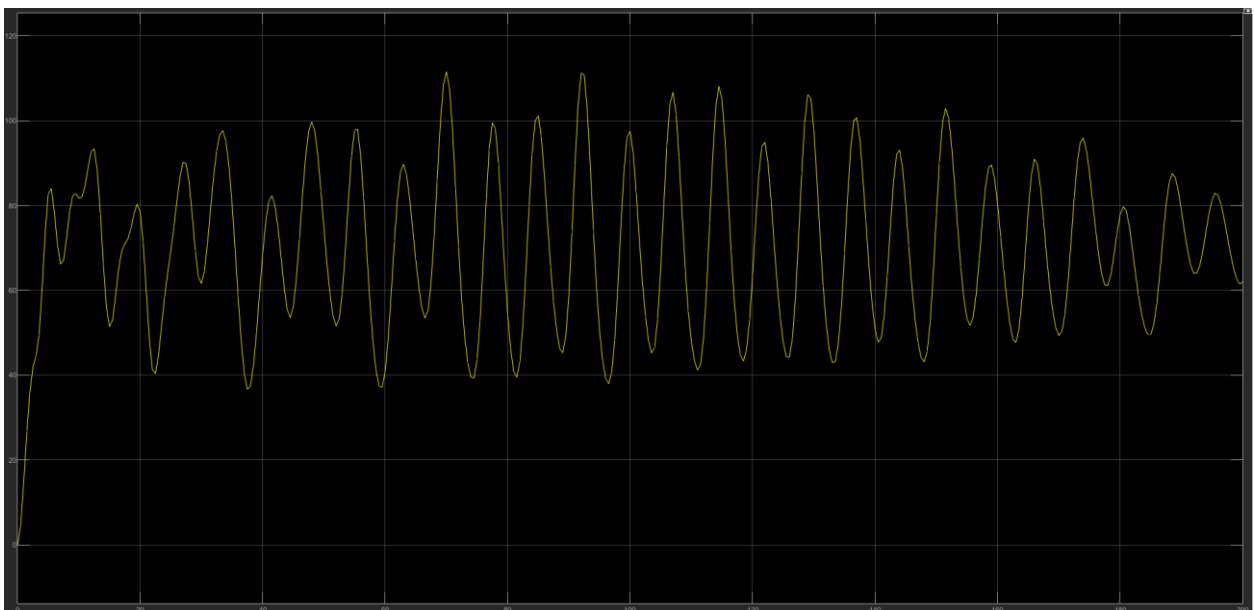


Figura 7.13 Articulació 5 - θ destitjada = 70° Controlador proporcional unitari

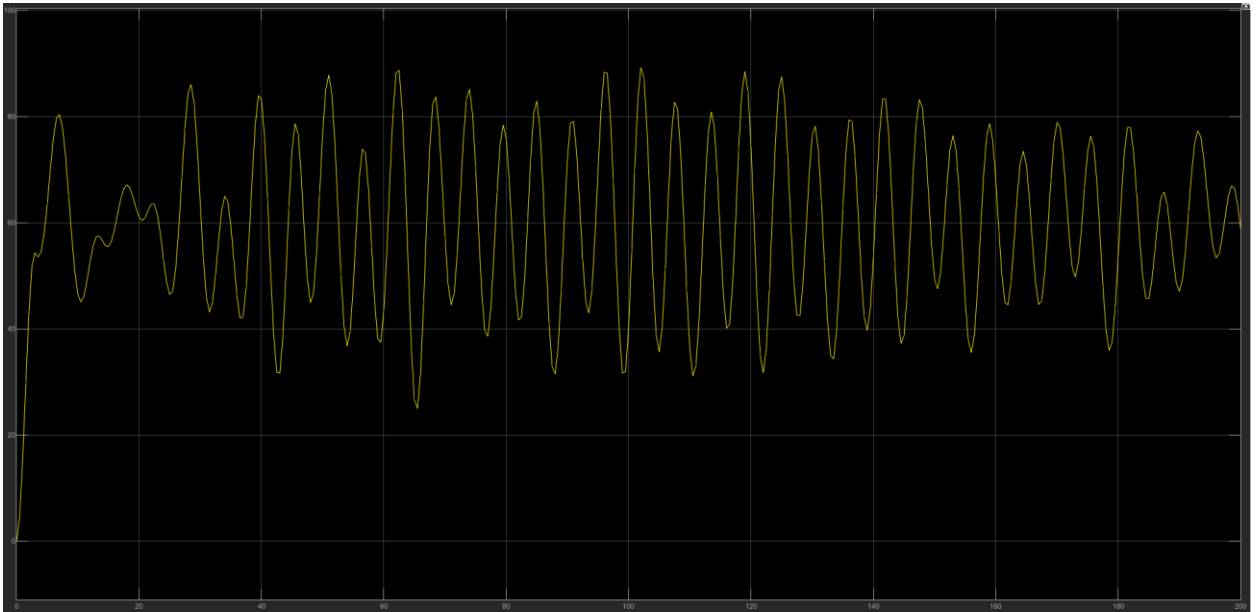


Figura 7.15 Articulació 6 - θ desitjada = 60° Controlador proporcional unitari

Com podem observar en les figures 7.10-15 que les respostes no s'estabilitzen en la posició desitjada tot i haver allargat la simulació durant 200 segons. Això és degut als efectes que tenen les forces internes i externes que afecten al manipulador no permeten que aquest s'estabilitzi solament amb un controlador de posició amb una constant unitari. Per contrarestar aquests efectes, necessitem l'aplicació i sintonització del controlador PID el qual és el objectiu final d'aquest projecte.

Com podem visualitzar en les gràfiques 7.10-7.15, a partir de l'articulació 3 la resposta de la posició angular es torna molt més inestable que en les articulacions prèvies. Això és degut a dos motius. La primera causa d'aquesta irregularitat és, clarament que el moviment de les articulacions prèvies afecta les articulacions posteriors i degut a això és raonable assumir que les articulacions posteriors seran menys estables que no les primeres. Però, només aquest motiu no ens resoldria el motiu pel qual l'estabilitat de l'articulació 3 és notablement més inestable que l'articulació 2. El motiu d'aquesta inestabilitat és degut al fet que l'eix de gir del motor en l'articulació 2 és perpendicular al vector gravetat de manera que el moment generat per la gravetat en l'articulació 3 serà molt més gran que en els casos previs en els quals la causa de la inestabilitat era donada més aviat per l'efecte de la velocitat i la inèrcia dels diferents enllaços.

7.3. Controlador PID

Per aconseguir que la resposta de les articulacions s'estabilitzi en la posició angular desitjada aplicarem controladors PID individuals en cada una de les articulacions del manipulador. Això implicarà que haguem de modificar l'equació 7.16 la qual només tenia en compte la component proporcional. En aquest cas, haurem d'aplicar la següent equació la qual ens permetrà calcular el parell quan apliquem el controlador PID [19].

$$\tau = E * k_p + \dot{E} * k_v + \int E dt * k_i + \ddot{\theta} - \dot{\theta} * v \quad (7.17)$$

Sent:

E: Error de la posició restant la posició planificada menys la posició real

Ė: Error de la velocitat restant la velocitat planificada menys la velocitat real

k_p: Constant proporcional

k_v: Constant derivativa

k_i: Constant integradora

v: Constant de viscositat dinàmica del aire ($1,8 * 10^{-5} \frac{N * s}{m^2}$)

A partir de l'equació 7.17 hem modificat la part de la simulació corresponent a la realimentació de la figura 7.9 i l'hem modificat per incloure els controladors PID. Per fer-ho hem afegit un bloc *Gain* que multiplicarà *k_v* per l'error de la posició, també hem connectat l'error de la posició i hem afegit un *Gain* que farà la funció de multiplicar la *k_v* per l'error de velocitat i finalment hem connectat un *Integrer* al error de posició i posteriorment hem afegit un *Gain* que multiplicarà la *k_i* per l'error de posició integrat. De manera temporal, establirem totes les constants igual a 1 i només connectarem al bloc sumador el string provinent de la part proporcional.

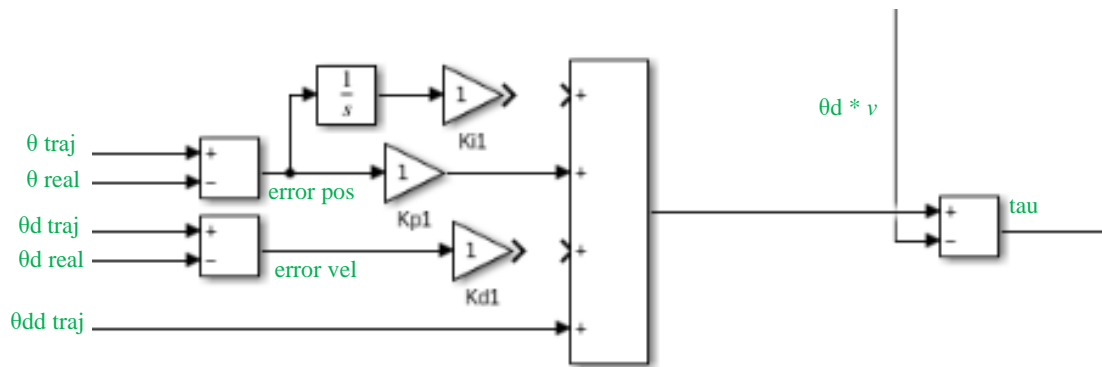


Figura 7.16 Controlador PID previ a la sintonització

Les constants k_p , k_v , i k_i les haurem de trobar sintonitzant els diferents controladors per tal d'obtenir una resposta adequada. Com que estem treballant amb un controlador PID per a cada articulació no podrem utilitzar els mètodes de sintonització per esglaió o relé, ja que pot causar problemes en la simulació a causa dels integradors del sistema. En lloc d'usar aquest mètode, haurem de realitzar una sintonització manual dels diferents controladors el qual serà un procediment més lent, però podrem modificar els valors fins a aconseguir una resposta amb una precisió que trobem acceptable.

Per sintonitzar manualment els controladors hem començat per el controlador de la última articulació ja que el parell en aquesta és el que varia en menys mesura respecte les forces que la resta d'articulacions apliquen en aquesta.

Llavors, hem deixat totes les articulacions només amb un controlador proporcional amb una constant unitària, tal com hem comentat anteriorment, excepte l'última articulació en la qual connectarem les components proporcional, derivativa i integradora del controlador PID al sumador. Un cop tenim fetes aquestes connexions hem anat augmentant la constant proporcional fins a tenir una gràfica que s'estabilitzi en la posició desitjada i seguidament hem modificat les constants integradores i derivatives per millorar l'estabilitat i la velocitat de la resposta.

Un cop hem obtingut una resposta satisfactòria procedirem a connectar el controlador PID en la següent articulació començant per la cua i realitzarem el mateix procediment que en l'anterior. Un cop haguem assolit una resposta satisfactòria per l'articulació amb la qual estem treballant tornarem a revisar si la resposta en les articulacions que hem sintonitzat prèviament s'ha vist modificada negativament i en el cas que sigui necessari tornarem a sintonitzar l'articulació prèvia

en qüestió. Aquest procediment el repetirem fins que haguem sintonitzat tots els diferents controladors del manipulador.

A continuació podrem observar la taula amb els diferents valors de les constants dels controladors PID.

	K_p	K_v	K_i
Controlador 1	5000	40	10
Controlador 2	5000	40	10
Controlador 3	100000	40	10
Controlador 4	20000	80	20
Controlador 5	500	40	10
Controlador 6	60	40	10

Taula 7.1 Constants controladors PID

Aplicant una trajectòria amb una duració de 3 segons i que parteixi des de la posició base del robot (és a dir que tots els angles seràn igual a 0) hem obtingut les següents posicions finals després d'haver executat una simulació amb una duració de 10 segons:

	Posició desitjada (°)	Posició real (°)	Error relatiu (%)
Articulació 1	55	55	0
Articulació 1	50	50	0
Articulació 1	19.92	20	0.400
Articulació 1	29.94	30	0.200
Articulació 1	70.08	70	0.114
Articulació 1	59.99	60	0.016

Taula 7.2 Característiques simulació

Implementant aquests paràmetres en els controladors PID hem obtingut les següents respostes.

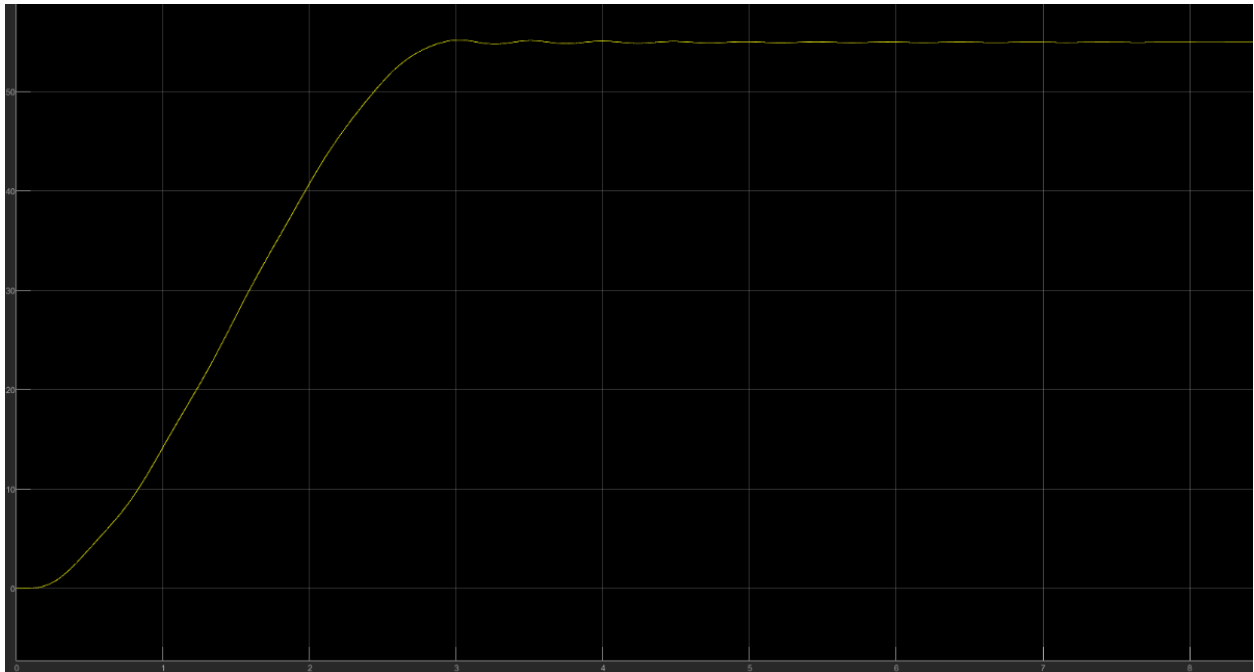


Figura 7.17 Articulació 1 amb PID - θ destitjada = 55°

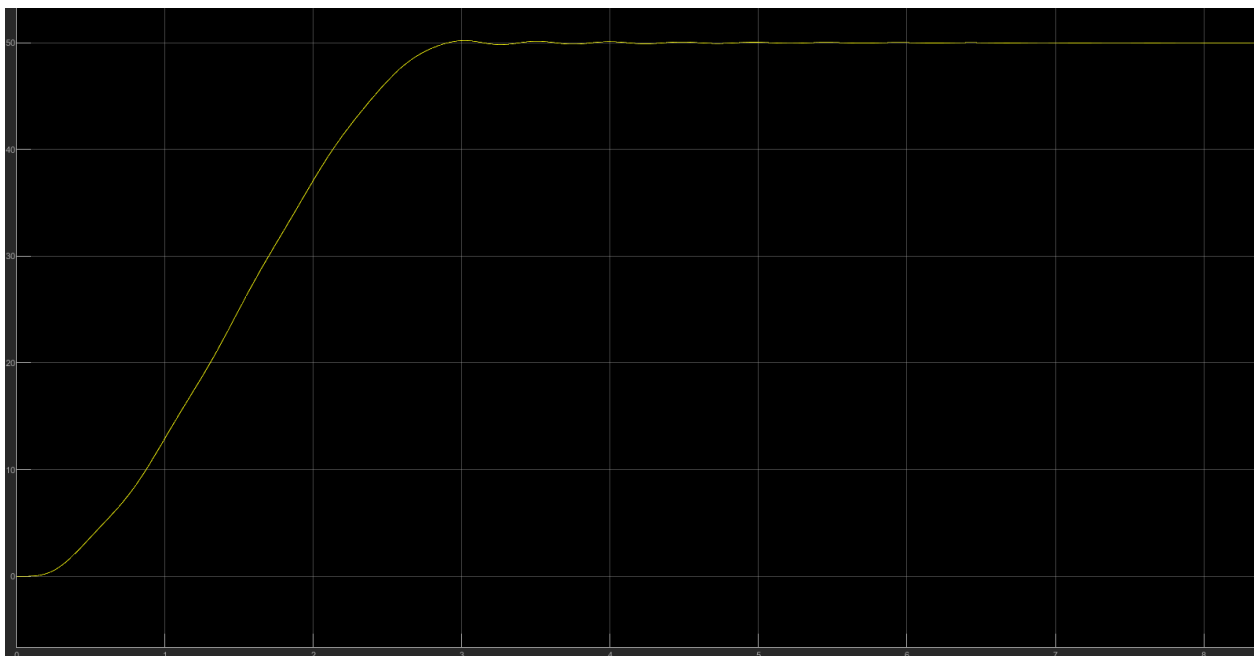


Figura 7.18 Articulació 2 amb PID - θ destitjada = 50°

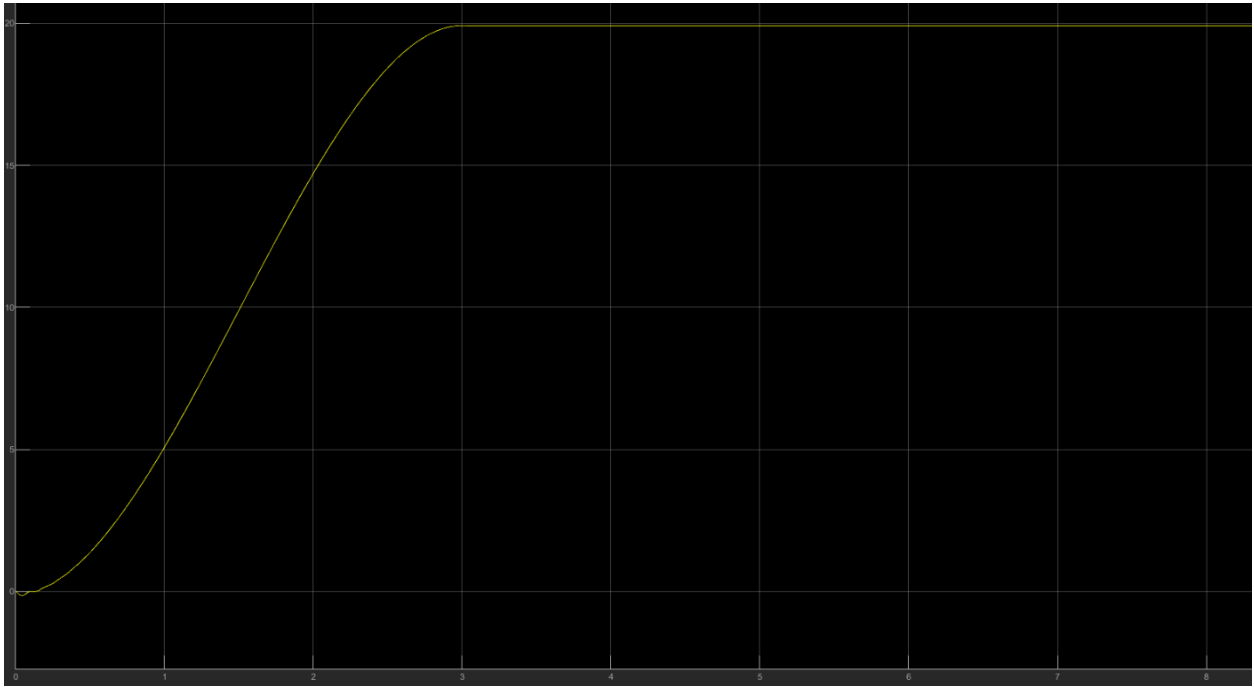


Figura 7.19 Articulació 3 amb PID - θ destitjada = 20°

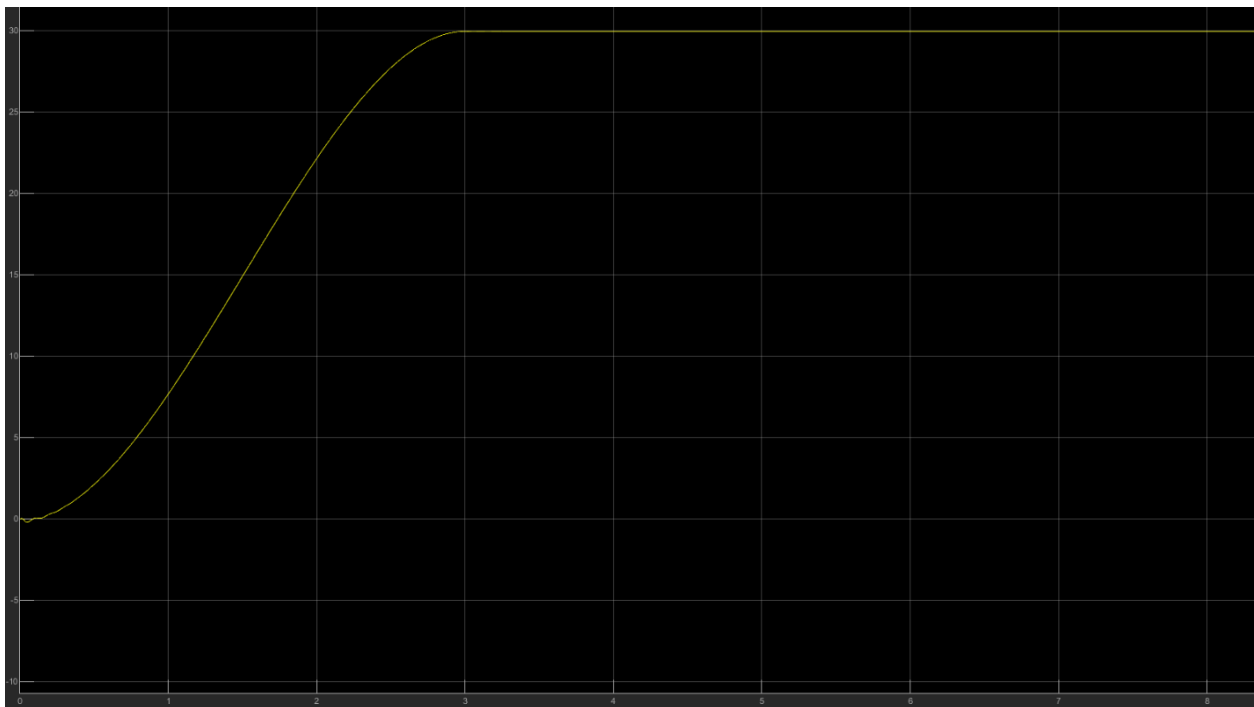


Figura 7.20 Articulació 4 amb PID - θ destitjada = 30°

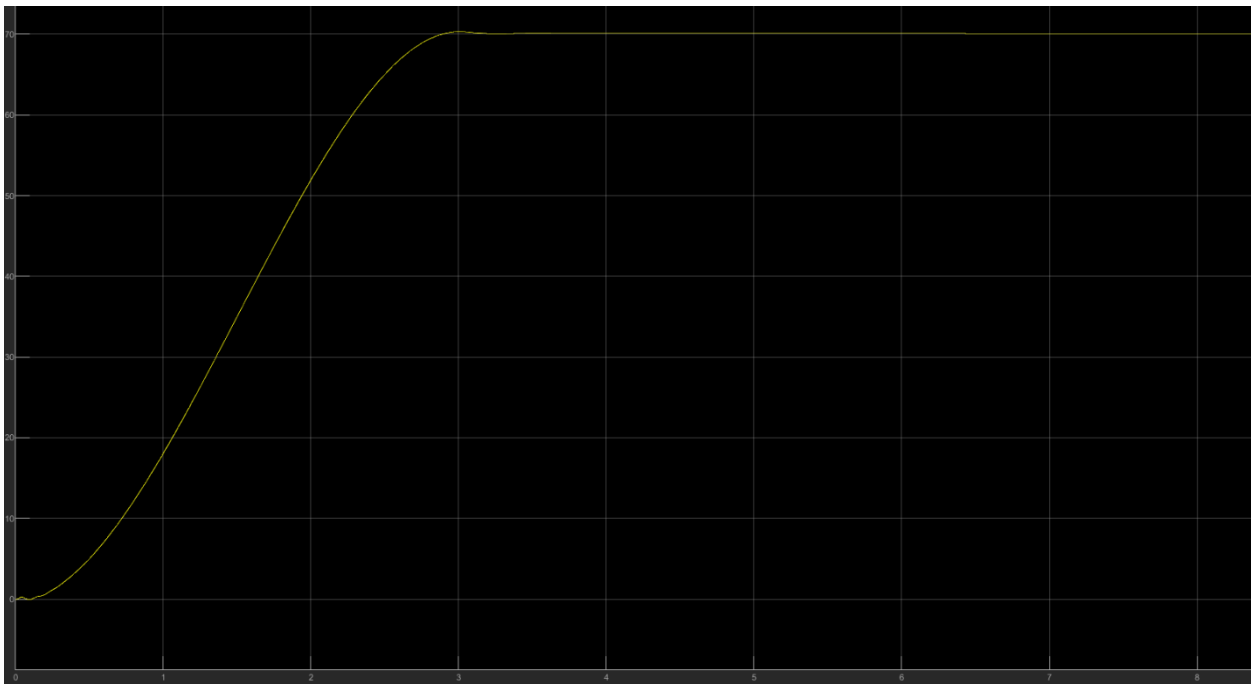


Figura 7.21 Articulació 5 amb PID - θ destitjada = 70°

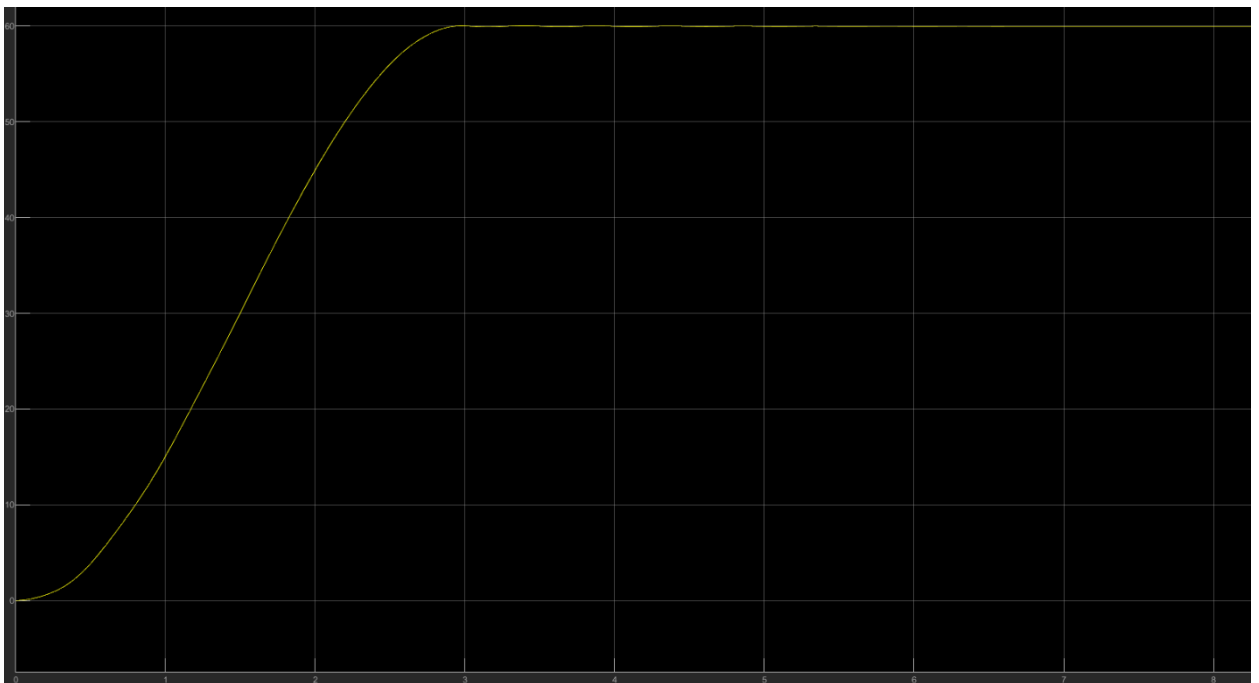


Figura 7.22 Articulació 6 amb PID - θ destitjada = 60°

Com podem observar en les figures 7.16-7.21, la resposta és molt propera a la resposta desitjada. La resposta obtinguda es realitza en el temps programat (3 segons) i amb un “overshoot” percentual inferior al 2 %. En el cas més desfavorable, el qual és l’articulació 3, l’error relatiu és menor al 0.4 % de manera que tenim una resposta amb una precisió molt alta.

8. Planificació

En el següent apartat parlarem de la planificació que se seguirà per gestionar el projecte. Aquesta planificació inclourà una planificació des de la presentació de l'avantprojecte fins a l'entrega final d'ambdós projectes, així com l'anàlisi i gestió de riscos i l'aplicació d'eines de seguiment en el projecte.

8.1. Pla d'execució (Diagrama de Gantt)

8.1.1. Planificació projecte

En el següent apartat presentarem el Diagrama de Gantt de l'execució del projecte realitzat utilitzant el Microsoft Project i s'explicaran les diferents tasques que el conformen.

Les tasques a realitzar durant l'etapa d'execució són:

Replantejament avantprojecte

El replantejament de l'avantprojecte consisteix en la implementació dels canvis necessaris que s'hagin de realitzar en el projecte després de la retroacció per part dels responsables de projecte. Aquests canvis preveiem que no s'allarguin més de 3 dies, però es pot donar el cas que s'hagin de fer canvis majors el qual es tindrà en compte durant l'anàlisi i gestió de riscos.

Estudis

Aquesta tasca consistirà en la realització dels diferents càlculs de manera seqüencial. Els càlculs es realitzaran seguint la metodologia indicada en l'apartat de viabilitat tècnica i formarà la part principal de l'entrega de la memòria intermèdia. En el cas que alguna tasca dels estudis s'hagi allargat més del previst i no es pugui entregar en un estat acceptable es farà la corresponent menció en la memòria intermèdia i es presentarà juntament amb la memòria final del projecte.

Simulacions

Les simulacions consisteixen en l'elaboració de un model de simulació per a poder representar els resultats obtinguts en els estudis. Degut això es realitzaran posteriorment als estudis i es preveu que es presentaran durant l'entrega final.

Redacció de la memòria

La redacció de la memòria l'hem separat en dues parts. La primera consistirà en la redacció del gruix de l'informe i es començarà de manera paral·lela als estudis i les simulacions. Ja que s'hi dedicarà 5 hores diàries al projecte, s'empraran tres hores per avançar en els estudis i la resta del temps sobrant per redactar el que s'ha fet prèviament. Això ens permetrà poder portar un informe actualitzat dia a dia el qual ens atorgarà certa flexibilitat si sorgeix qualsevol imprevist que allargui pugui perjudicar el projecte.

La segona part del projecte consistirà en el tancament de l'informe el qual consistirà en l'adequació de l'informe a un format uniforme i que s'adeqüi als criteris demanats. També es farà un repàs ortogràfic, s'actualitzaran els índexs d'apartats, imatges i taules i s'afegiran els reforços visuals que es creguin necessaris per reforçar l'explicació del projecte.

Millores/ Recuperació d'hores

Finalment, afegim una última tasca abans de cada entrega la qual consistirà en un període de dues setmanes en les quals s'executaran les tasques que s'hagin endarrerit a causa de imprevistos o s'utilitzaran per implementar possibles millores constructives que s'hagin considerat posteriorment a l'entrega de l'avantprojecte.

En total el projecte tindrà una duració de **125 dies**.

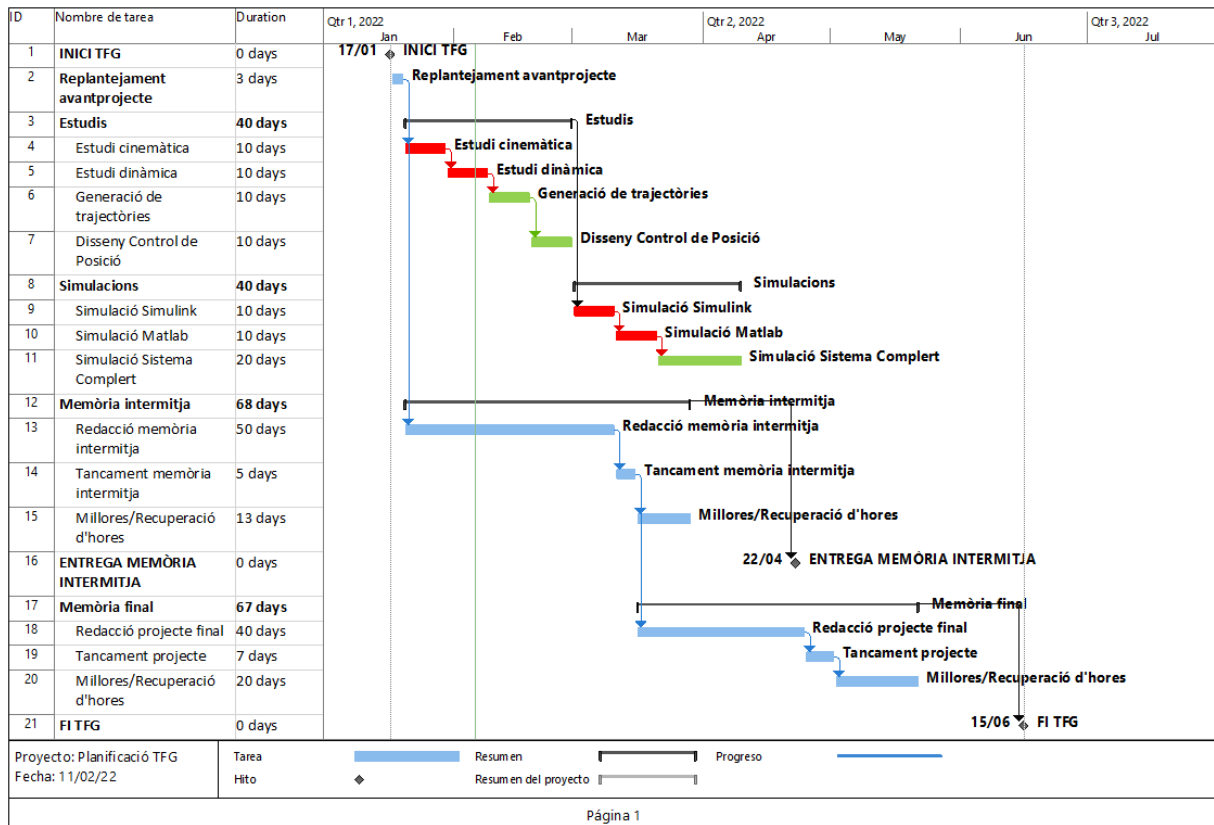


Figura 8.1 Diagrama de Gantt projecte

En aquest Diagrama de Gantt podem observar tasques de tres tipus. Les tasques de color blau corresponen a tasques que es realitzen tant pel projecte de mecànica com al projecte d'electrònica, les tasques de color vermell corresponen a les tasques que es realitzen només en el projecte de mecànica i les tasques de color verd corresponen a les tasques que es desenvolupen en el projecte electrònic.

8.1.2. Planificació avantprojecte

A continuació presentarem el Diagrama de Gantt de l'execució de l'avantprojecte realitzat utilitzant el Microsoft Project i s'explicaran les diferents tasques que el conformen.

Les tasques de la redacció de l'avantprojecte són molt similars a les que s'han explicat en la planificació de l'avantprojecte i s'ha estructurat de la mateixa manera. Pel que fa a la resta de tasques les explicarem a continuació:

Reunió plantejament TFG

Reunió amb el tutor encarregat del TFG per aclarir dubtes i posar en marxa el projecte. En aquesta reunió es van aclarir els objectius que tindria el projecte i com encarar-los de cara a l'avantprojecte i al projecte.

Anàlisi problema

En aquesta tasca s'ha analitzat el problema que es tractarà durant el projecte i s'han identificat les parts clau d'aquest per organitzar i posteriorment executar d'una manera clara i ordenada.

Cerca d'informació

Aquesta tasca ha consistit en la recerca d'antecedents i l'estudi del marc teòric del projecte en qüestió. En aquesta cerca de la informació també s'ha estudiat els procediments o procediments que s'hauran de seguir per a poder assolir l'objectiu final del projecte.

Planificació projecte

En aquesta etapa es realitzarà una planificació de l'execució del projecte utilitzant el Microsoft Project. Durant la planificació es tindran en consideració les dues entregues corresponents a la memòria intermèdia i la memòria final.

En total l'avantprojecte tindrà una duració de **112 dies**.

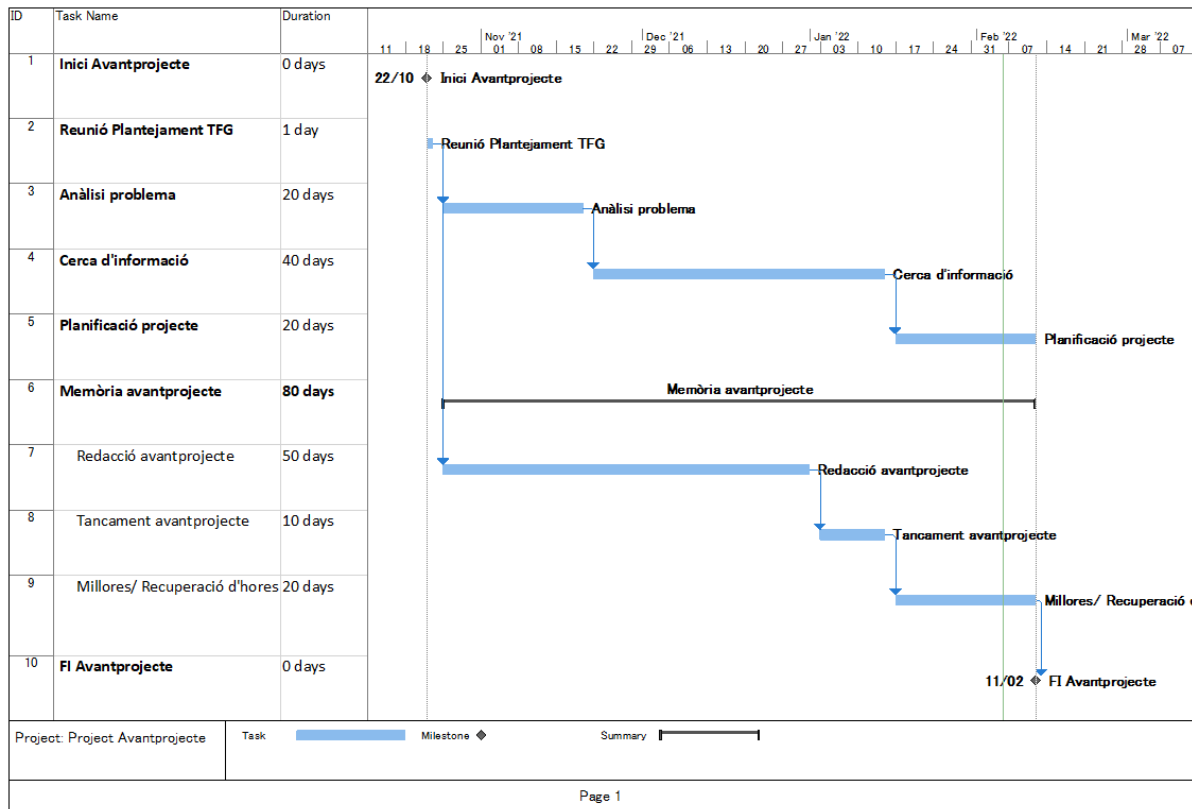


Figura 8.2 Diagrama de Gantt avantprojecte

8.2. Anàlisi i Gestió de Riscos

Per analitzar els riscos utilitzarem la metodologia FMEA (Failure Mode and Effective Analysis) amb la qual comencem identificant els possibles riscos i els efectes que poden tenir. A continuació classificarem els diferents riscos segons una puntuació donada pels següents criteris:

- **Freqüència:** Els diferents riscos es classificaran segons la freqüència puntuant d'1 fins a 10 sent 1 un risc molt poc probable i sent 10 un risc molt probable.
- **Gravetat:** Els diferents riscos es classificaran segons la gravetat de les conseqüències puntuant d'1 fins a 10 sent 1 un risc amb unes conseqüències menyspreables i sent 10 un risc que pugui comprometre la finalització del projecte.
- **Detecció:** Els diferents riscos es classificaran segons la seva fàcil detecció puntuant d'1 a 10 sent 1 un risc el qual molt probablement es detectarà i sent 10 un risc el qual es molt probable que ocorri sense que ens assabentem.

Un cop tinguem la classificació realitzada i amb les puntuacions escollides se sumaran els diferents punts atorgats i es farà una última classificació per determinar la criticitat del risc.

8.2.1. Taula FMEA

A continuació presentem la taula obtinguda amb la metodologia FMEA [20] on podem observar la classificació realitzada dels diferents riscos considerats.

Risc	Freqüència	Gravetat	Detecció	Criticitat
Incidències meteorològiques	2	6	1	9
Incidències mèdiques	7	5	4	16
Aparells informàtics malmesos	4	8	7	19
Planificació poc realista	4	8	5	18
Falta de claredat	5	7	8	20
Rendiment menor de l'esperat	5	6	4	15

Taula 8.1 Anàlisi de riscos FMEA

La columna corresponent a la *Criticitat* es el resultat de la suma dels paràmetres de la *Freqüència*, *Gravetat* i la *Detecció* i anirà des de un valor mínim de 3 fins a un valor màxim de 30. La criticitat la classificarem de la següent manera:

- Valors entre 3 i 10: Els riscos amb una puntuació entre 3 i 10 els considerarem riscos amb baixa importància. Per a aquests riscos es portarà un control trimestral i establir unes mesures preventives i d'actuació bàsiques.
- Valors entre 11 i 20: Els riscos amb una puntuació entre 11 i 20 els considerarem amb una importància moderada. Per aquests riscos es portarà un control mensual i establir mesures preventives i d'actuació.
- Valors entre 21 i 30: Els riscos amb una puntuació superior als 20 punts seran riscos crítics els quals s'haurà de portar un control setmanal i establir mesures de prevenció i actuació amb una àmplia dedicació de recursos per contrarestar els riscos.

8.2.2. Gestió dels riscos

Els riscos ha considerar en aquest projecte són molt limitats ja que el projecte en qüestió es purament teòric. Tenint això en consideració els riscos que s'han tingut en consideració han sigut els següents:

- **Incidències meteorològiques:** El risc d'incidències meteorològiques el tenim en consideració, no per quan hi hagi mal temporal o pluges, sinó per quan es produeixin borrasques com el Glòria o altres incidents meteorològics que puguin parar el moviment interurbà o inclús produir parades en el subministrament elèctric. Aquests incidents, tot i que són poc freqüents i fàcilment detectables consultant els informatius meteorològics, poden tenir greus conseqüències en el projecte en el cas que es produeixin. En els casos en què es produeixin talls de subministrament elèctrics s'avançarà el projecte amb mitjans analògics i es passarà a format digital quan el temporal hagi amainat.
- **Incidències mèdiques:** A causa de l'actual situació de la pandèmia hem considerat necessari incloure les incidències mèdiques com a un risc clau del projecte. Degut a l'estat actual de la pandèmia de la COVID-19 relativament probable contraure la malaltia el qual pot endarrerir l'execució del projecte. Un cop un s'ha contagiat no es poden prendre moltes mesures addicionals en un projecte individual, però sí que es poden prendre mesures preventives per tal de reduir les probabilitats d'infecció com l'ús de EPIs i mantenir el distanciament social sempre que sigui oportú i possible.
- **Aparells informàtics malmesos:** Existeix la possibilitat que els aparells electrònics que s'estiguin utilitzant per elaborar el projecte, com per exemple el ordinador, s'avariïn. Això pot suposar una parada en el projecte durant un parell de dies en el millor dels casos o una pèrdua de tot el projecte en format digital en el pitjor dels casos. Per això, serà convenient guardar els avenços en el projecte amb un Backup al núvol per a no perdre el treball realitzat fins aquell moment i poder continuar desenvolupant-lo des de un ordinador alternatiu de manera temporal. Addicionalment, quan el risc es produeixi una altra conseqüència en que es produirà en el projecte és el augment del cost del projecte. Degut a tot això, serà imperatiu portar un bon manteniment dels aparells que s'utilitzin per reduir la probabilitat d'averies.
- **Planificació poc realista:** Es pot donar el cas que la planificació realitzada durant l'avantprojecte hagi estat massa optimista i, per tant, no es pugui executar el projecte tal com estava previst. Aquest problema pot tenir greus conseqüències, ja que una mala planificació pot provocar un gran nombre d'endarreriments que impedeixin la correcta finalització del projecte. Per evitar aquest cas, a part d'intentar fer la planificació més realista possible durant l'avantprojecte, s'aplicaran les eines de seguiment que s'explicaran en el següent apartat les quals ens permetran portar un control sobre la planificació inicial i modificar-la sempre que ens sigui necessari.
- **Falta de claredat:** Un altre problema que sorgeix del plantejament de l'avantprojecte és la falta de claredat en la metodologia o procediments que s'hauran de seguir. Això pot ser

donat a una mala o insuficient recerca d'informació o que durant l'execució del projecte s'hagi pivotat en una direcció que no s'havia previst durant l'avantprojecte. Sense importar l'origen de la falta d'informació, el risc en qüestió provocarà que s'hagi de dedicar vaires hores a la cerca d'informació el qual pot endarrerir la planificació realitzada.

- **Rendiment menor al esperat:** Aquest risc va molt lligat al risc de la planificació poc realista mencionat anteriorment. Es pot donar el cas que s'hagi subestimat la complexitat de les tasques que s'hagin de realitzar o que s'hagi sobreestimat les capacitats d'un mateix el qual pot provocar que el ritme de treball sigui menor al previst el qual pot provocar endarreriments. Degut això s'hauran d'aplicar les eines de seguiment per portar un control de si la feina diària feta és la prevista o si és menor al previst realitzant un ràpid informe del treball realitzat en el qual mencionarem la feina realitzada, el temps emprat i les dificultats que s'han trobat durant aquest.

8.3. Eines de Seguiment

Per realitzar el seguiment del projecte s'ha considerat la utilització dels programes de Notion o Jira. Al final s'ha optat per utilitzar Jira perquè permet un millor seguiment i control del projecte i els diferents problemes que vagin sorgint durant el projecte [21] [22].

A l'hora de crear el projecte en el programa hem seleccionat el *template* d'un projecte de negocis, ja que era la base que més s'adequa a les nostres necessitats. Un cop hem creat el projecte hem introduït les tasques representades en el Diagrama de Gantt i hem definit les mateixes dates d'inici i final que hem definit.

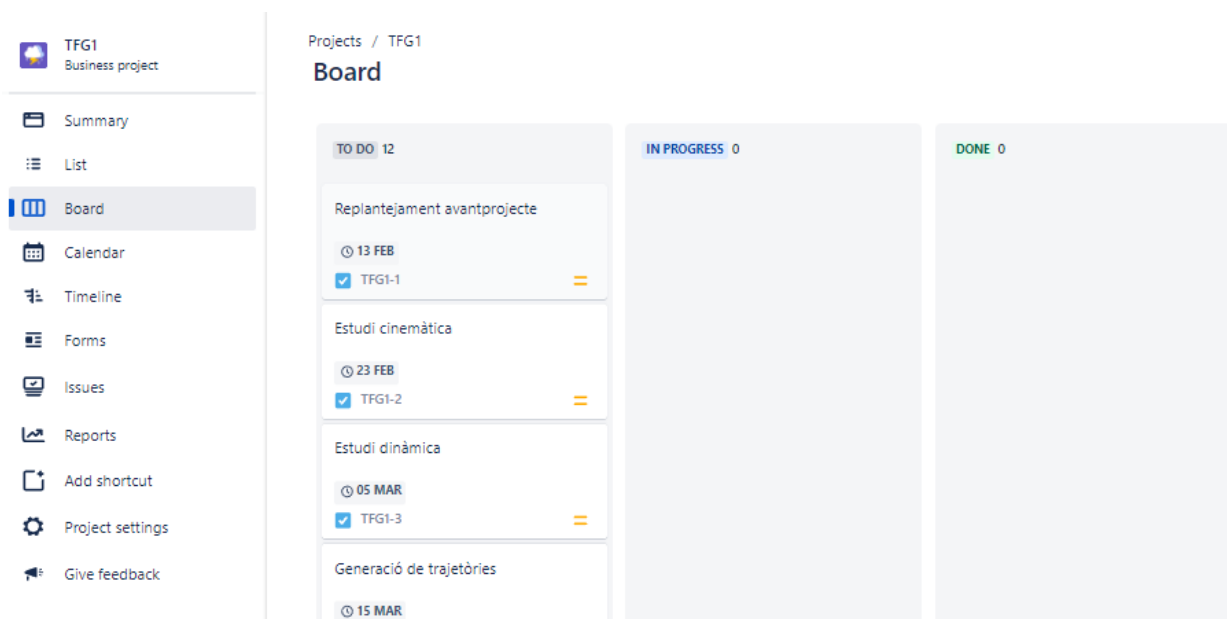


Figura 8.3 Jira llistat de tasques

En la imatge anterior podem observar les diferents funcionalitats que tenim disponibles. Les pestanyes que utilitzarem amb més freqüència seran el calendari, el *timeline* i la pestanya de problemes.

El *timeline* consisteix en una representació simplificada i dinàmica del Diagrama de Gantt creat el qual ens permetrà tenir una idea clara de l'estat del projecte. Addicionalment, es poden crear subtasques el qual ens permetrà tenir un control més precís de l'estat i saber més fàcilment si s'han produït retard en la planificació.

La pestanya del calendari ens permetrà poder visualitzar les dates límits de les diferents tasques del projecte així com crear dates d'entrega pròpies que no s'hagin plantejat en la planificació ideal.

Finalment, la pestanya de problemes (*issues*) ens permetrà crear incidències durant el projecte i gestionar-les al llarg del temps. Aquesta pestanya serà l'eina principal que utilitzarem per a portar el seguiment i resoldre els diferents problemes que es vagin detectant durant el seguiment del projecte.

Per a portar el seguiment del projecte, al final de cada dia treballat anirem a la pestanya de problemes en el programa Jira i seleccionarem les tasques que s'hagin avançat en aquell dia. A continuació clicarem els tres punts a la dreta de la tasca i seleccionarem l'opció de *Log Work* i se'ns obrirà la següent finestra.

Log Work: TFG1-12

Time Spent ^{*}

 (eg. 3w 4d 12h) [?]

An estimate of how much time you have spent working.

Date Started ^{*}

 [?]

Remaining Estimate

Adjust automatically
the estimate will be reduced by the amount of work done, but never below 0.

Leave estimate unset

Set to (eg. 3w 4d 12h)

Reduce by (eg. 3w 4d 12h)

Work Description

Style ^v | B | I | U | A ^v | ~~A~~ ^v | ^v | | | ^v | + ^v |

[?] Viewable by All Users

Figura 8.4 Jira Log Work

En aquesta anirem introduint les hores que s'han dedicat a la tasca i una descripció de la feina que s'ha realitzat durant el dia així com els diferents problemes que hagin sorgit. En el cas que durant el dia l'avanç hagi sigut menor a l'esperat, s'haurà de seleccionar l'opció de *Reduce by* i indicar la reducció real estimada en la duració del projecte.

En el cas que hagi sorgit un problema important es crearà una subtasca en la tasca afectada, se li assignarà la duració estimada i s'allargarà la tasca afectada en aquesta duració.

8.4. Replantejament memòria intermèdia

L'execució del projecte fins a la memòria intermèdia no ha sigut completament sense imprevistos. Per aquest motiu s'ha considerat adient realitzar una segona planificació del projecte per a poder portar una planificació actualitzada i així poder evitar possibles problemes deguts aquests retard.

Dins dels estudis les tasques corresponents a l'estudi de la cinemàtica inversa i la generació de trajectòries s'ha pogut executar segons la planificació plantejada durant l'avantprojecte. Però, pel que fa a l'estudi de la dinàmica, l'execució d'aquest s'ha endarrerit més del que s'havia plantejat inicialment el qual ha provocat que no es pugui presentar els resultats de l'estudi de la dinàmica del robot durant la memòria intermèdia. Aquest endarreriment provocarà que totes les tasques que depenguin de l'estudi de la dinàmica s'endarrereixi. Entre aquestes trobem el disseny de la posició el qual no es pot iniciar fins que no s'hagi dissenyat la resta de blocs així com les simulacions del sistema les quals tenien com a precedent els estudis. La simulació de la cinemàtica és l'única excepció, ja que s'ha realitzat la simulació de la cinemàtica com a part de l'estudi d'aquesta.

A continuació, presentarem el nou Diagrama de Gantt amb la informació de l'estat d'execució del projecte actualitzada:

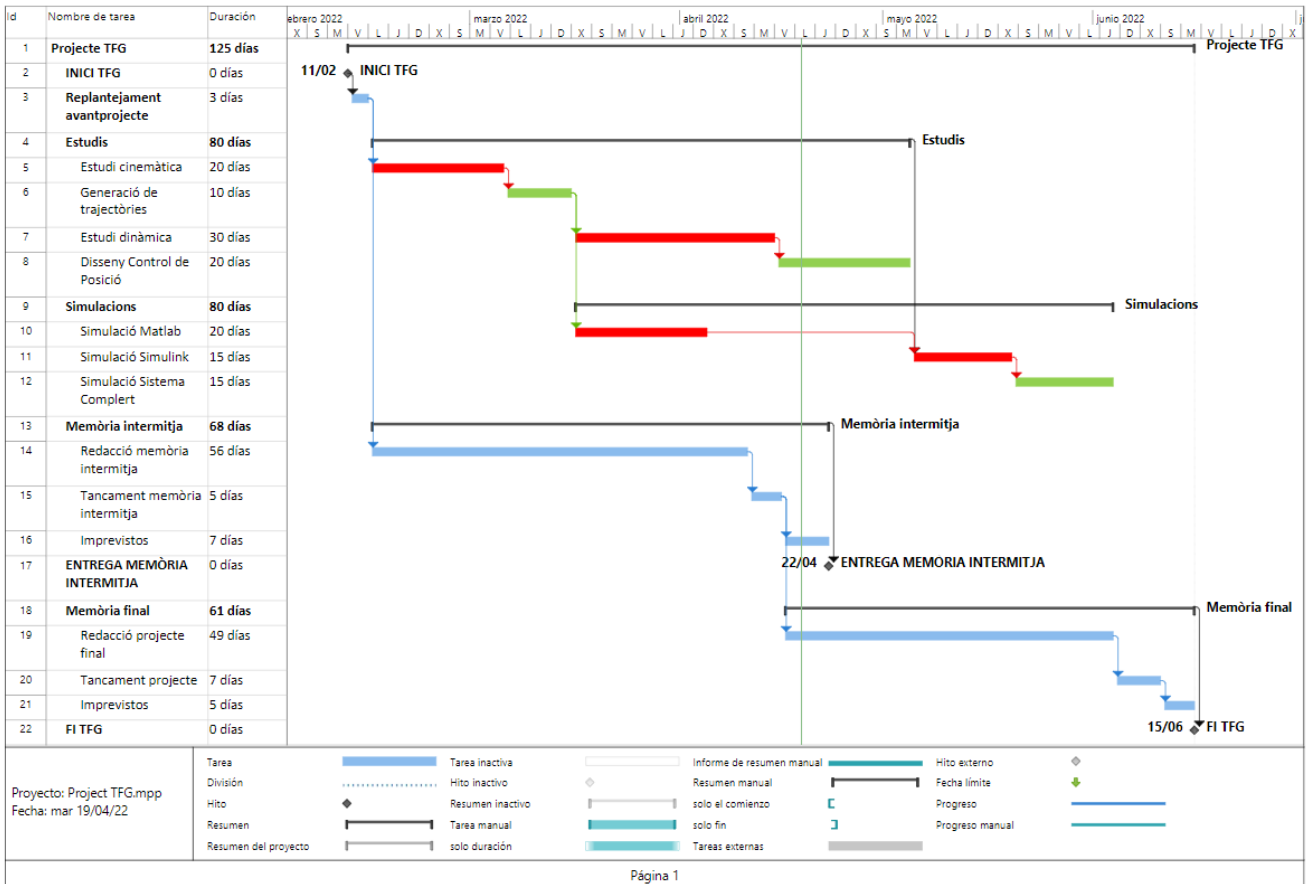


Figura 8.5 Diagrama de Gantt replantejament

Com es pot observar, l'estudi de la cinemàtica inversa i la dinàmica ha durat més del previst per culpa de certs imprevistos puntuals. Això ha provocat que no es pugui presentar l'estudi de la dinàmica en la memòria intermèdia tal com estava previst en la planificació de l'avantprojecte. Per culpa de això s'ha post posat l'inici del disseny del control de posició així com de les simulacions. Tot i això es podrà minimitzar l'efecte d'aquest retard reduint el temps dedicat a la tasca dels imprevistos per a poder complir les entregues establertes pel projecte.

9. Anàlisi Econòmica

En aquest apartat realitzarem un estudi dels costos aplicables en el nostre projecte. Ja que aquest projecte que estem desenvolupant és un estudi teòric i, per tant, no es durà a terme un estudi en profunditat dels costos i la rendibilitat que donarà el projecte. En el seu lloc es presentarà un resum del cost de les hores personals dedicades així com el cost de les llicències dels programes emprats.

El cost de les hores l'hem calculat a partir de les hores dedicades a l'estudi i el desenvolupament dels avantprojectes en qüestió. Estimem que les hores que s'han dedicat estan a prop de les 400 h des de l'inici del projecte. El cost hora que aplicarem l'hem obtingut de les dades aportades per l'ECCAT en el qual podem observar que el sou mitjà d'un enginyer treballant a Catalunya està al voltant dels 40.000 € l'any [21]. D'aquí podem deduir que el cost hora rondarà al voltant dels 20 €/h el qual ens donaria un cost de les hores dedicades de 8.000 €.

A continuació podem veure una taula on es poden observar els diferents softwares que s'utilitzaran i els preus de la compra de les llicències anuals. A causa del fet que el projecte no dura el mateix que la llicència anual també hem considerat quin serà el cost proporcional de les llicències anuals durant els 237 dies del projecte [22] [23].

Software	Preu/any	Preu proporcional
Matlab (licència perpetua)	800 €	519,45 €
Microsoft Word	69 €	44,80 €
Microsoft Project	39,90 €	25,91 €

Taula 9.1 Preus llicències

A causa de la possibilitat que es produeixin incidents que augmentin el cost s'ha considerat un cost addicional corresponent a imprevistos igual a un 10% del valor del projecte, és a dir, 859,02 €.

Per tant, el cost final del projecte teòric serà de **9.449,18 €** el qual com es pot observar és un preu molt petit, ja que el projecte només inclou l'estudi teòric del sistema de control d'un braç robòtic i, en conseqüència, no es tindrà en compte els costos pertinents a la fabricació ni a la compra de materials. Per visualitzar el desglossament dels costos veure l'Annex I.

A continuació exposem el desglossament dels costos de l'execució i planificació del projecte:

Resum Costos del Projecte

Cost hores	Unitats	Cost unitari	Cost total
Hores emprades	400 h	20,00 €	8.000,00 €
Cost llicències			
Matlab	237 dies	2,19 €	519,45 €
Microsoft Word	237 dies	0,19 €	44,80 €
Microsoft Project	237 dies	0,11 €	25,91 €
			8.590,16 €
10% Imprevistos ¹			859,02 €
		TOTAL	9.449,18 €

¹ Entre els imprevistos es consideren els costos de papereria, estris d'escriptura i el augment en costos considerat en el risc de *Aparells informàtics malmesos* tractat en el apartat d'Anàlisi de riscos.

10. Anàlisi Mediambiental

Per a realitzar l'estudi de la viabilitat mediambiental ens trobem amb un problema similar al que ens trobem amb la viabilitat econòmica. Ja que el projecte consisteix en un estudi purament teòric l'impacte mediambiental és pràcticament nul. Tot i això, s'han pres mesures com fer les reunions amb el supervisor del projecte (tutor del TFG) via Zoom i en el cas que ens haguéssim de desplaçar utilitzar el transport públic sempre que sigui possible. D'aquesta manera es minimitza encara més l'impacte que pugui tindre el desenvolupament del projecte.

Les taules de l'estudi mediambiental que s'han dut a terme per realitzar l'estudi mediambiental les podem consultar a l'Annex I.

11. Conclusions

Un cop executat el projecte complert hem pogut comprovar que s'ha pogut completar els objectius planejats a l'inici d'aquest per ambdues parts del projecte conjunt. Pel que fa a la component electrònica del projecte, la qual és la que tractem en aquest informe, s'ha pogut dissenyar satisfactòriament tant les trajectòries individuals per cada articulació com els controladors PID que s'aplicaren al parell generat pels motors de les articulacions. Sintonitzant aquests controladors hem pogut arribar a reduir l'error relatiu de la resposta del sistema a només un 0.4 % el qual és un resultat molt satisfactori.

Tot i això, encara existeixen certs punts els quals podrien ser objecte de futurs estudis de cara a un futur, ja que no s'ha tingut temps a desenvolupar i incloure'ls en el projecte. El primer punt que s'ha considerat que es podria aprofundir en un futur és en l'ampliació del ventall de possibilitats de trajectòries i, especialment en el disseny de trajectòries que ens permetin fer moviments com que l'eina segueixi una línia.

La segona millora la qual s'ha ideat per a estudis futurs és la implementació d'un controlador de força paral·lel al de posició que ens permeti agafar i transportar elements fràgils. Aquesta millora, però també implicaria ampliar l'abast de la proposta mecànica, ja que està fortament lligada a ella.

12. Referències

[1] Marc teòric

- [1] <https://blogs.20minutos.es/ciencia-para-llevar-csic/2016/04/22/en-que-se-diferencia-un-robot-de-otros-tipos-de-maquinas/>
- [2] <https://www.areatecnologia.com/electronica/tipos-de-robots.html>
- [3] <https://revistabyte.es/actualidad-it/el-futuro-del-mercado-de-la-robotica-inteligencia-y-movilidad/>
- [4] <https://www.bbvaopenmind.com/articulos/la-robotica-los-materiales-inteligentes-y-su-impacto-futuro-para-la-humanidad/>
- [5] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921889016306285>
- [6] Article “*Soft Robotic*”: *Una nueva generación de robots* per José Medina H. i Paulina Vélez N.
- [7] <https://blog.infaimon.com/automatizacion-y-robotica-industrial/>
- [8] <https://www.tecnicaindustrial.es/la-robotica-industrial-en-el-ambito-de-la-aut/>
- [9] <https://www.interempresas.net/Robotica/Articulos/370816-Las-ventas-de-robots-suben-de-nuevo-segun-el-ultimo-informe-de-la-IFR.html>
- [10] <https://www.businessinsider.com/elon-musk-universal-basic-income-physical-work-choice-2021-8>
- [11] <https://www.interactanalysis.com/collaborative-robot-market-to-grow-by-60-in-2018/>
- [12] <https://wjla.com/news/nation-world/trump-vs-the-robots-inside-the-white-house-plan-to-save-us-jobs-from-automation>

Cinemàtica

- [13] Video per César Chávez -Ingeniería-: Cinemática inversa por método geométrico. Ejemplo sencillo y comprobación en Matlab.
- [14] Presentació per Jon Legarreta i Raquel Martinez: *Modelado Geométrico y Cinemático del Robot*

Dinàmica

- [15] Video per ET 4860 Robotic: *Robot Manipulato Dynamics*

- [16] Video per Javier Garcia: 2 – *Mecánica Teórica [Euler-Lagrange 1]*
- [17] Video per Northwestern Robotics: *Modern Robotics, Chapter 8.1: Lagrangian Formulation of Dynamics (Part 1 of 2)*
- [18] Video per Ali Raza: *Dynamics of Robotic Manipulators – Part 1*

Llibres

- [19] Tercera Edició de *Robotica* per John J. Craig
- [20] Primera Edició de *Introducción a la Robótica* per Subir Kumar Saha

Viabilitat econòmica

- [21] <https://www.engineerscivils.cat/ca/node/4878>
- [22] <https://es.mathworks.com/pricing-licensing.html>
- [23] <https://www.microsoft.com/es-es/microsoft-365/p/microsoft-365-personal/cfq7ttc0k5bf?activetab=pivot%3aoverviewtab>

Planificació

- [24] <https://blog.infraspeak.com/es/analisis-fmea-amfe/>
- [25] <https://apalm.atlassian.net/jira/core/projects/TFG1/board>
- [26] <https://www.notion.so/>

Informació Matlab Online

- [27] <https://matlab.mathworks.com/>
- [28] <https://es.mathworks.com/help/robotics/ref/rigidbodytree.html>
- [29] <https://es.mathworks.com/help/robotics/ref/inversekinematics-system-object.html>

Dinàmica directa

- [30] Article “*Efficient Dynamic Computer Simulation of Robotic Mechanisms*”
per M. W. Walker i D. E. Orin