

Treball final de grau

Estudi: Grau en Enginyeria mecànica

Títol: Maqueta d'una plataforma tipus delta

Document: Memòria i Annexos

Alumne: Adrià Sabater Dilmé

Tutor: Dr. Narcís Gascons Clarió

Departament: Enginyeria Mecànica i de la Construcció Industrial

Àrea: Enginyeria mecànica

Convocatòria (mes/any): Setembre 2019

INDEX DE CONTINGUTS

1. Introducció	3
1.1 Antecedents	3
1.1.1 Mecanisme de moviment paral·lel	3
1.1.2 Robots paral·lels delta	3
1.1.3 Aplicacions industrials	5
1.2 Objecte	6
1.3 Abast	6
1.4 Especificacions	7
2. Geometria de la plataforma	8
2.1 Bancada i espai de treball	9
2.2 Mecanisme	11
3. Construcció	14
3.1 Estructura	15
3.2 Superfície de treball	16
3.3 Mecanisme	18
3.3.1 Elements i fabricació del mecanisme	18
3.3.2 Muntatge del mecanisme	19
3.4 Muntatge final	21
4. Electrònica	22
4.1 Placa micro-controladora	22
4.2 Característiques dels servomotors	23
4.3 Control i alimentació dels servomotors	23
4.4 Elements addicionals	23
4.5 Esquema elèctric	25
5. Mesures de precisió	28
6. Resum del pressupost	31
7. Conclusions	32

8. Relació de documents	33
9. Bibliografia	33
Annex A: Càlculs	34
A.1 Càlculs cinemàtics	34
A.2 Càlcul de deformació	40
A.3 Càlcul parell. Elecció dels servomotors	44
Annex B: Programació de la màquina	48
Annex C: Documentació tècnica	51
C.1 Documentació tècnica de l'estructura	51
C.2 Documentació tècnica de l'electrònica	52

1 INTRODUCCIÓ

1.1 Antecedents

1.1.1 Mecanisme de moviment paral·lel

En els manipuladors es distingeix entre cadenes cinemàtiques en sèrie i en paral·lel. En les cadenes en sèrie l'element terminal, del qual es vol controlar el moviment, està unit per una sèrie única d'elements amb la bancada. Són els clàssics robots que imiten el braç humà.

En les cadenes en paral·lel, però, l'element terminal està connectat per més d'una cadena en sèrie amb la bancada. L'exemple més simple és el quadrilàter articulat, que ja va ser utilitzat per Watt en la seva màquina de vapor.

En comparació, les cadenes en sèrie són menys rígides però més fàcils de controlar, ja que l'existència de més d'una connexió amb la bancada fa que les cadenes en paral·lel puguin repartir entre elles la transmissió de forces a la bancada havent, però, de fer compatible el moviment respectiu de cada cadena.

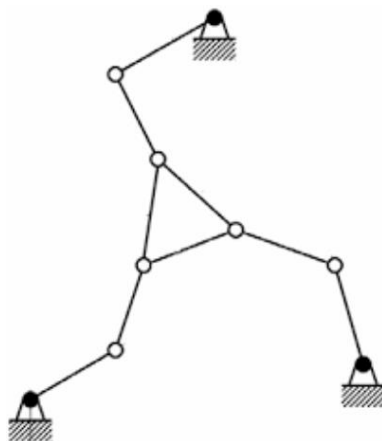


Figura 1. Representació esquemàtica de robot paral·lel.
(Imatge proporcionada per la *Universidad Miguel Hernández*)

1.1.2 Robots paral·lels *delta*

Una de les aplicacions més comunes dels mecanismes paral·lels a la indústria actualment, és en els robots tipus delta. Aquests mecanismes van ésser ideats pel professor Reymond Clavel a principis dels anys 80.



Figura 2. Robot paral·lel tipus delta de *Motoman Robotics division, Yaskawa America Inc.*

Els robots delta estan formats per dues plataformes: la superior i la inferior. A la plataforma superior s'hi troben tres motors units a unes manovelles. A la inferior hi trobem l'anomenat *end effector*, l'element terminal on es munten les eines per realitzar les operacions del robot, on depenent de l'aplicació que tingui el robot tindrà muntat un eina o una altra. Al següent apartat, d'aplicacions industrials, es detallen els elements que se solen trobar a l'*end effector*.

Donat que, com ja es comentarà, la plataforma inferior es manté sempre paral·lela amb la superior, es pot considerar que estan connectades per tres cadenes sèrie que es poden resoldre pràcticament com dispositius biela-manovella.

Els robots delta tenen tres braços a 120° entre ells i cadascun format per dos elements entre les plataformes, amb articulacions R-T-T. Les bieles consisteixen en dues barres paral·leles que formen un paral·lelogram. Això restringeix el gir entre la part superior i inferior, i provoca que les dues plataformes es mantinguin paral·leles, i conseqüentment, paral·leles també a la superfície de treball.

Per posicionar l'*end effector* i perquè realitzi els moviments desitjats, cal controlar els tres motors superiors, que fan moure les manovelles. Per tant, sempre són de tres graus de llibertat, i si es desitja, es pot implementar un motor addicional en sèrie a continuació de la plataforma inferior per tal de permetre, per exemple, una rotació de la part final sobre el seu eix.

El principal avantatge que presenten aquests tipus de mecanismes respecte, per exemple, els braços robòtics, és que els robots delta no tenen un motor a cada articulació, la càrrega que s'ha d'eleva es reparteix pels tres braços i els motors estan estàtics fixats a la bancada. Això provoca poder operar a una velocitat més elevada i eficient, degut a es redueix la inèrcia que es mou i augmenta la rigidesa.

1.1.3 Aplicacions industrials

Actualment, els robots paral·lels tipus delta són molt utilitzats en l'àmbit industrial. Serveixen per automatitzar processos de forma ràpida i eficient. Al permetre moure's a velocitats elevades fa que sigui ideal per tasques de *pick-n-place* (traduït com agafar i col·locar). Per exemple, són útils perquè agafin el producte situat a una banda per un sistema de ventosa i el col·loquin sobre una cinta transportadora amb la capsa on s'ha d'empaquetar.



Figura 3. Robot delta utilitzat en el sector de l'alimentació, del fabricant *Fanuc*

Amb un sistema de visió integrat a l'aparell, es pot automatitzar el seu funcionament, i no requerirà que els elements que ha d'agafar estiguin en un ordre determinat.

Una de les aplicacions que més s'està investigant aquests tipus de màquines és en l'àmbit mèdic, on es preveu que puguin assistir en intervencions quirúrgiques realitzant operacions que requereixin una altra precisió.

1.2 Objecte

L'objecte del projecte és dissenyar i construir una plataforma tipus Delta complint amb els requisits especificats pel departament d'Enginyeria Mecànica de la Universitat de Girona. La maqueta servirà com a material didàctic pels alumnes de l'assignatura Disseny de Mecanismes del grau en Enginyeria Mecànica.

1.3 Abast

El projecte consisteix a dissenyar i construir la maqueta d'un robot tipus Delta. S'adjuntaran els càlculs cinemàtics, així com també les condicions de muntatge i fabricació.

També es programarà una seqüència de moviments senzilla per tal de demostrar la validesa de la solució.

1.4 Especificacions

Tema	Obligació / Desig	Descripció
Mides	O	La superfície de treball de la màquina ha de ser 150x150 mm. Alçada de treball entre 150 i 300 mm.
Muntatge	O	Cap unió soldada. Fàcil muntatge
Electrònica	O	Control a través de placa Arduino
Funció	O	A la part final del mecanisme s'hi ha de poder adaptar diferents peces per poder-hi utilitzar diferents aparells (pinces, electroimants, ventoses, etc)
Materials	D	Utilitzar materials disponibles al taller. Comprar materials només en cas indispensable.
Pressupost	D	Pressupost màxim de materials: 400 euros.

2 GEOMETRIA DE LA PLATAFORMA

Els requisits del departament d'Enginyeria Mecànica especifica que el mecanisme ha d'operar en una superfície de 150 x 150 mm. Això condiona el disseny, i partint d'aquesta superfície s'ha dimensionat el mecanisme. Per tal d'obtenir un pressupost econòmic, s'ha optat per dissenyar la plataforma tan compacta com fos possible, sempre garantint la superfície indicada.

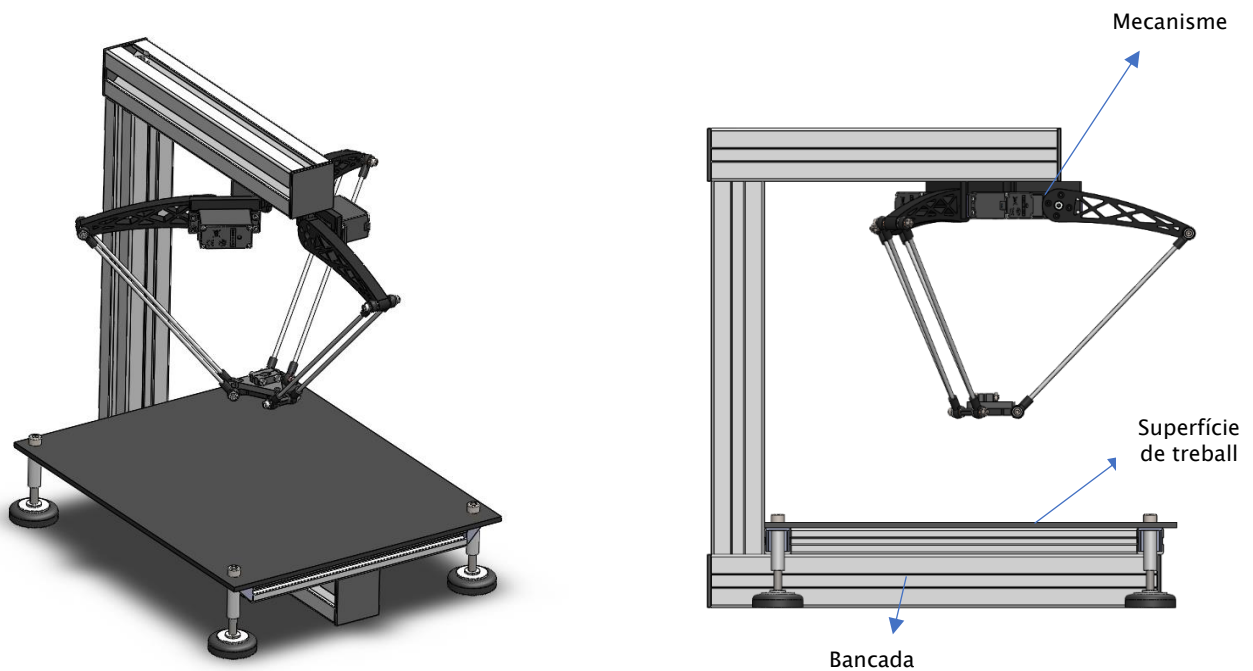


Figura 4 . Imatge renderitzada de la solució proposada

A la Figura 4 es mostra la solució proposada del mecanisme en 3D. La plataforma consta d'una bancada d'alumini amb tres perfils col·locats en U de 40 x 40 mm que lliga la superfície de treball amb el mecanisme, on més endavant es detallen els seus components.

A l'Annex de càlculs es mostren els càlculs realitzats per al dimensionament de la maqueta.

També s'explicarà detalladament el procés de fabricació a l'apartat *Construcció* i al document *3.Plec de Condicions*. Al document *2.Plànols* es poden consultar les dimensions de tots els elements de la màquina. La informació dels elements que componen la maqueta es pot trobar al document *4. Estat d'amidaments*.

2.1 Bancada i espai de treball

A l'apartat *1.Introducció* s'ha fet una petita explicació dels models de robots delta que es poden trobar al mercat. El funcionament és el mateix per tots els models, però el sistema de suport amb el terra és diferent en cadascuna d'elles. Segons la ubicació de la màquina i la funció que es necessita que realitzi, aquest suport canviarà.

En la maqueta dissenyada en aquest projecte s'ha decidit utilitzar una superfície de metacrilat amb una bancada a sota de perfils 20 x 20 mm, i el contacte amb el terra s'ha fet amb quatre potes amb revestiment de goma. Pel que fa a l'estructura de suport del mecanisme, s'ha utilitzat perfils de 40 x 40 mm, els quals aporten més rigidesa que els de 20 x 20. Per tal de permetre una millor ergonomia i facilitar el seu ús a l'usuari, s'ha decidit incloure només un peu que suporti el mecanisme. Això no seria possible si la màquina hagués d'elevat i moure càrregues majors. La present maqueta no s'espera que treballi amb càrregues elevades, i només amb un peu s'obtenen bons resultats de fletxa i precisió a la part final del mecanisme.

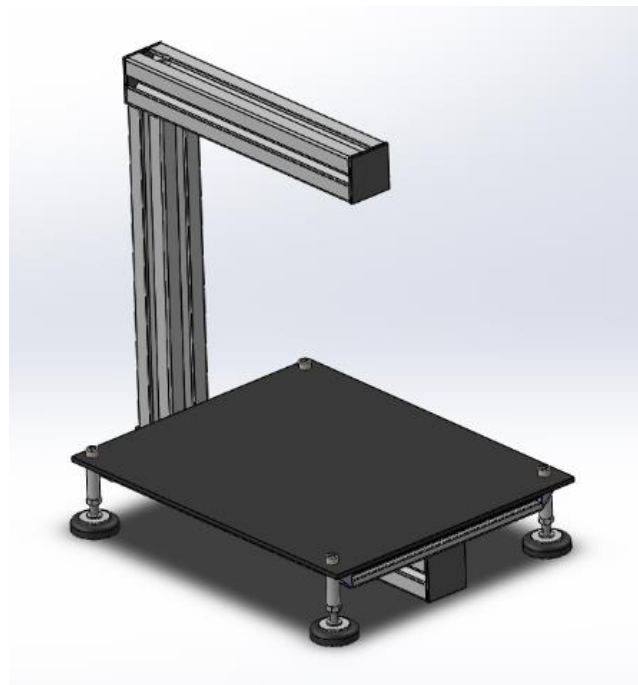


Figura 5 . Bancada i espai de treball

La bancada consisteix en tres perfils d'alumini de 40 x 40 mm de secció col·locats en U.

Això ens permet tenir un sistema reforçat que procura minimitzar les vibracions durant el moviment i aportar una rigidesa que no es podria aconseguir amb perfils d'una secció menor.

Unit a la bancada, hi trobem la superfície de treball, que consisteix en una planxa de metacrilat que serà la superfície sobre la qual operarà la màquina. Aquesta planxa té una estructura a sota que li fa de suport i de mètode d'unió amb els perfils en U. Els perfils són també d'alumini amb una secció de 20 x 20 mm. La funció estructural d'aquests perfils és mínima. La màquina està dissenyada perquè tot el pes recaigui sobre els perfils de 40 x 40 mm. Els perfils s'uneixen entre ells utilitzant unes peces en forma de L de compra, permetent un angle recte precís i una unió ferma.

Per tal d'evitar el bolcament de la màquina, cal que aquesta superfície estigui subjectada i garanteixi una superfície horitzontal on treballar. Per això, inclou quatre peus a cada extrem, tal i com es mostra a la Figura 5. Aquests peus són de compra, i incorporen una base de material plàstic pel contacte amb el terra i una rosca a la part superior per poder-les fixar. Per permetre un ajust òptim en alçada, s'ha col·locat un separador roscat amb una femella a la part de sota per poder-se collar a l'alçada desitjada. La unió amb la planxa de metacrilat es realitzarà amb cargols normalitzats.

2.2 Mecanisme

El mecanisme delta està format per un sistema biela-manovella, on les manovelles són peces d'impressió 3D i les bieles son dues vares llises de 3 mm de diàmetre. Per permetre el moviment, és necessari la presència de ròtules a cada extrem de les vares per tal que el mecanisme pugui operar correctament.



Figura 6 . Mecanisme delta

El moviment de les manovelles és provocat per tres servomotors del fabricant Futaba, les especificacions del quals es poden trobar a l'*Annex C: Documentació tècnica*. Els servomotors van units entre ells per una peça d'impressió 3D dissenyada de tal manera que els braços quedin a 120° entre ells (Figura 7). Aquesta peça va collada al perfil superior de la bancada per dos forats de la cara superior. Per no haver de foradar el perfil, s'ha dissenyat una peça mostrada a la Figura 8, que s'introdueix dins la ranura de l'alumini, i amb les dues femelles presoneres es pot collar amb facilitat. Això permet poder moure el mecanisme a la distància desitjada des de l'extrem del perfil.

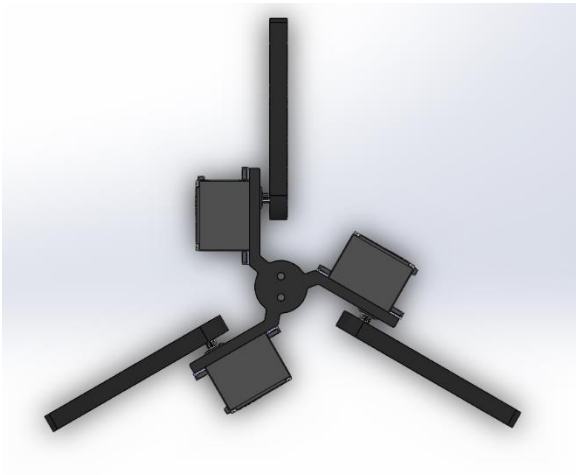


Figura 7 . Vista superior dels servomotors i el seu suport

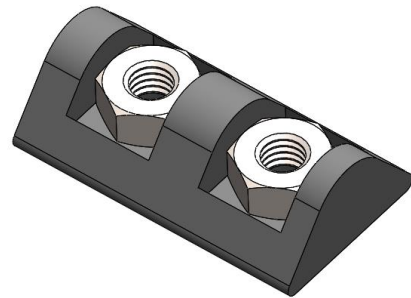


Figura 8 . Peça d'unió mecanisme-perfil

A la part inferior o *end effector* s'hi troba un element que permet l'acoblament de diferents peces perquè subjecti terminals diferents, com poden ser pinces, ventoses, imants o retoladors. Per la present maqueta s'ha dissenyat una peça amb la finalitat de subjectar un bolígraf convencional i poder traçar línies entre punts.



Figura 9 .*End effector*

La peça que permet l'adaptació d'un llapis o bolígraf està representada a la Figura 10. Consisteix en una mordassa formada per dues peces, una de les quals s'uneix amb l'altra per una guia i comprimeix l'objecte que s'hi vulgui posar.

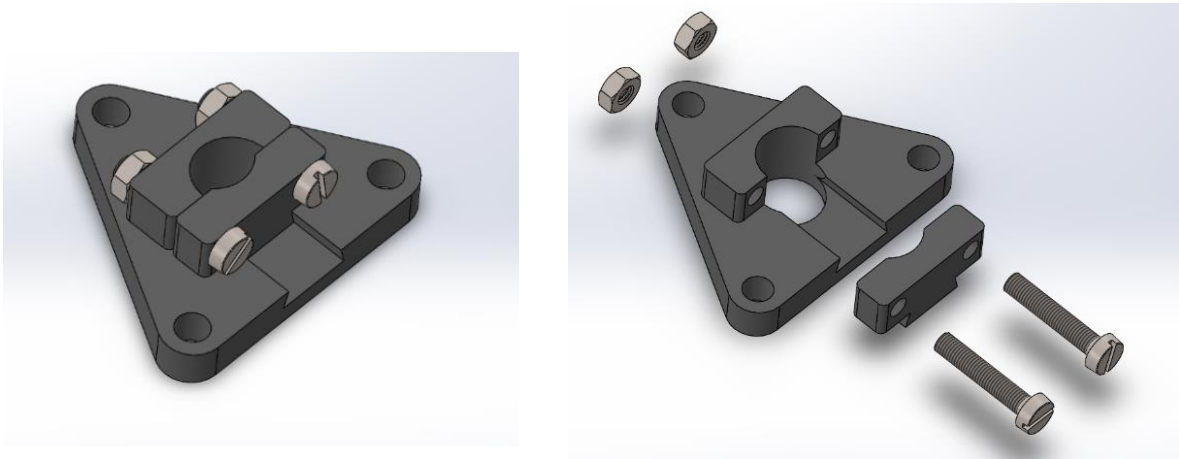


Figura 10. Peça de subjecció per a bolígraf

3 CONSTRUCCIÓ

En aquest apartat es detalla el procediment de construcció de la plataforma. S'hi mostraran els passos seguits durant tot el procés de fabricació i muntatge, amb imatges que aniran il·lustrant el procediment. S'ha dividit aquest apartat segons els muntatges dels diferents subconjunts que formen la plataforma, i un subapartat final on es mostra el muntatge de tots els subconjunts.

En la màquina trobem peces de fabricació pròpia i de compra, i algunes peces s'han mecanitzat segons indica el plànol corresponent dins el document *Plànols*. Aquest apartat estarà complementat per imatges reals del procés de muntatge.

3.1 Estructura

L'estructura o bancada de la màquina està constituïda per perfils d'alumini del fabricant ITEM. En cadascun d'ells ha calgut algun tipus de mecanització, i tot seguit es detalla el procés de mecanitzat i unió.

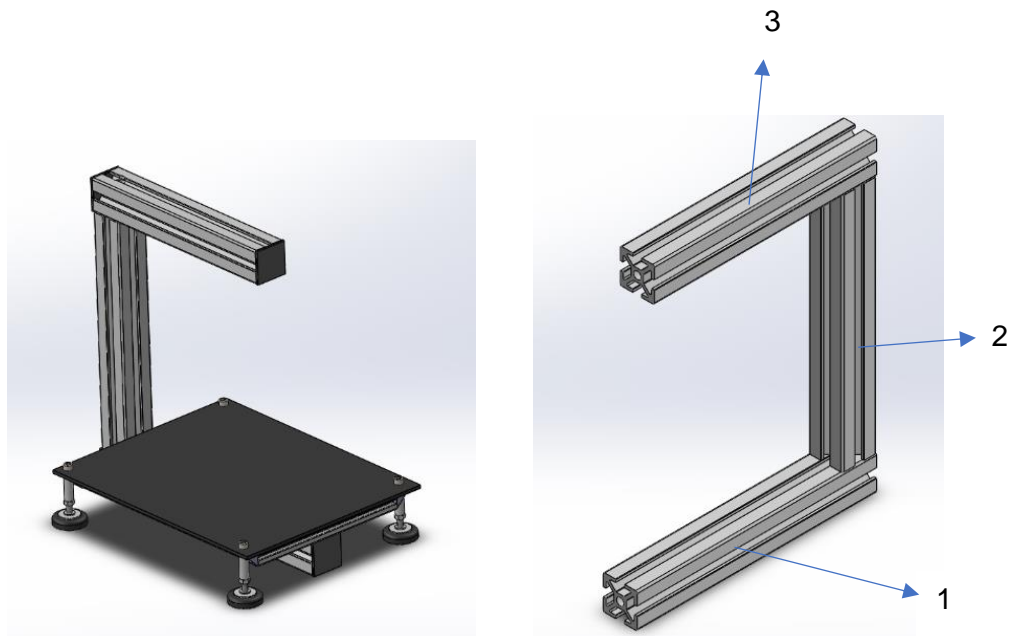


Figura 11. Imatge renderitzada de l'estructura en U

Els perfils utilitzats són d'alumini de 40 x 40 mm. Per facilitar l'explicació, s'han numerat les parts segons mostra la Figura 11. Les llargades són les següents:

- 1 → 335 mm
- 2 → 280 mm
- 3 → 260 mm

El primer pas ha estat crear la rosca interior dels forats passants que tenen els perfils a la part central. Com que els forats originalment són de 6 mm de diàmetre, s'ha passat el mascle de roscar de M8. Aquest procediment s'ha realitzat per cadascun dels perfils. En el cas del perfil número 2 s'ha creat la rosca a cada extrem, mentre que en el perfil número 1 i 3 només en una banda. Això permetrà unir-los amb un cargol M8.

Per poder passar els cargols, s'ha foradat els perfils 1 i 3 amb la broca de 8'25 mm segons com indica el plànol número 6 dins el document *Plànols*. A continuació, per tal de fer encabir-hi la femella, s'ha fet un forat amb la broca de 13 mm a la part superior del perfil, com es mostra en la Figura 12.



Figura 12. Imatge de les mecanitzacions dels perfils 1 i 3

Adicionalment, en el perfil 1 s'han mecanitzat dos forats passants de M4 per tal d'unir-ho amb l'estructura que suporta el metacrilat.

L'últim pas ha estat unir els 3 perfils formant una forma de U. Per fer-ho, s'ha collat el perfil 1 amb el 2 i el 2 amb el 3 mitjançant un cargol i femella M8. S'ha afegit també un escaire entre el perfil 2 i 3, per reforçar la unió i impedir el gir.

3.2 Superfície de treball

La superfície de treball de la màquina consisteix en una planxa de metacrilat de color negre de 4 mm de gruix. L'únic mecanitzat que s'ha realitzat en el metacrilat han estat els quatre forats de 6 mm de diàmetre de les cantonades per poder-lo unir al perfil.

Sota el metacrilat hi trobem una estructura d'alumini de perfils de 20x20 mm, que actuen de suport del metacrilat i mètode d'unió amb els perfils de 40x40 mm que formen l'estructura del mecanisme. Les mecanitzacions que s'han realitzat en aquests perfils han estat únicament dos forats de 4 mm passants en la cara superior de dos d'ells per tal de poder-los unir amb la U que forma l'estructura.

Per unir els perfils entre ells, només ha calgut utilitzar les peces escairadores per unir-los entre ells en angle recte. Aquestes peces són de compra, i es mostra les seves característiques en el document *Estat d'amidaments*.

Aquesta estructura inclou quatre potes a cada extrem, la única funció de les quals és garantir que la màquina no bolqui; la càrrega estructural del perfil i les potes serà pràcticament nul·la.

Per unir el metacrilat amb l'estructura s'han roscat quatre peces a les cantonades en angle recte. Per poder-ho roscar als perfils de 20 x 20 mm, s'ha hagut de crear una rosca de M4 amb el mascle de roscar a cada extrem del perfil. Aquestes peces permeten poder collar el metacrilat amb els perfils i les potes alhora. Aquest muntatge, també, facilita la graduació de l'alçada de les potes i anivellar-les collant les femelles a la posició desitjada. Les potes inclouen un separador roscat que permet aquest anivellament. Són peces de compra, i es poden consultar als documents *Estat d'amidaments* i *Pressupost*.



Figura 13. Imatge d'una pota, el separador roscat i ambdues parts muntades

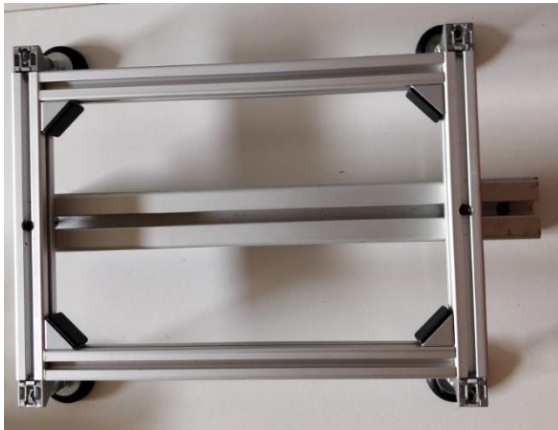


Figura 14. Procés d'unió del metacrilat

Com s'ha comentat anteriorment, aquest muntatge permet que els perfils de 20 x 20 mm pràcticament no rebin càrrega, i la única funció és garantir l'estabilitat de la màquina. Els perfils que interessa que siguin resistents per tal de minimitzar la fletxa mentre la màquina està operant, és l'estructura en U on hi ha el mecanisme delta a la part superior. És per aquest motiu que s'ha decidit que aquests perfils siguin de 40 x 40 mm. Els càlculs de fletxa de *l'Annex A: Càlculs* corroboren aquesta afirmació.

3.3 Mecanisme

3.3.1 Elements i fabricació del mecanisme

El mecanisme és l'element dinàmic de la màquina i el més rellevant del projecte. Està format principalment per tres servomotors i tres biela-manovella. A la part superior trobem la peça d'unió de tot el mecanisme amb l'estructura en forma de U anteriorment comentada. A la part inferior trobem l'*end effector* de la màquina. Ambdues peces estan fabricades mitjançant fabricació additiva (impressió 3D).



Figura 15. Imatge renderitzada del mecanisme

Les bieles consisteixen en vares llises de 3 mm de diàmetre d'acer inoxidable, mentre que les manivelles consisteixen en peces d'impressió 3D, els plànols de les quals es poden consultar en el document *Plànols*.

Aquesta part de la màquina inclou moltes peces de compra, i es detallen en el document *Estat d'amidaments*. Aquestes peces són: ròtules de M3, cargols i femelles de M3 i M2, volanderes de 3 mm.

Les úniques peces on ha calgut algun treball manual han estat les vares llises, on s'ha fet rosca a cada banda. Per fer-ho, s'ha utilitzat una filera de M3 i una mica d'oli lubricant.



Figura 16. Vares de 3mm de diàmetre roscades als extrems

3.3.2 Muntatge del mecanisme

El procés de muntatge comença roscant les ròtules a cada extrem de les vares. Es col·loquen contrafemelles per tal de poder orientar les dues ròtules cap al mateix sentit i permetre una unió forta. Per orientar les ròtules, cal utilitzar una cinta mètrica per assegurar la llargada establerta entre els eixos, i mirar que les dues ròtules estiguin orientades al mateix sentit. Després, només és qüestió de collar fermament la contrafemella .



Figura 17. Vares amb ròtules i contrafemelles.

El següent pas consisteix a col·locar els motors en la peça de la part superior d'impressió 3D.

Es collaran amb cargols i femelles de M3. Tot seguit, s'uneixen els braços superiors amb l'engranatge de sortida dels motors.

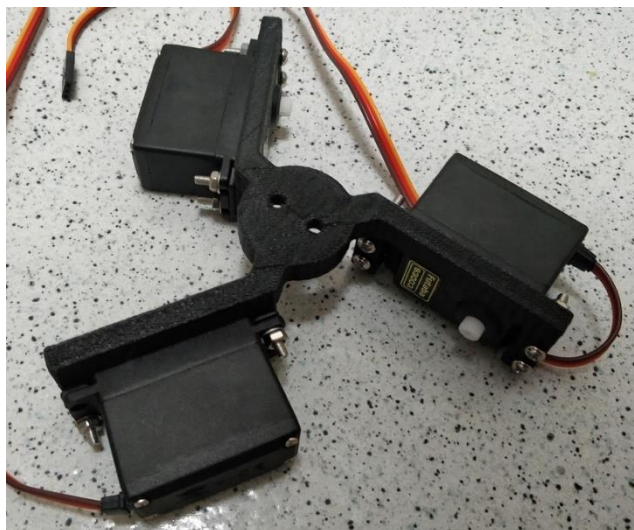


Figura 18. Muntatge dels motors amb el suport i el perfil

Un cop col·locades les manovelles, s'introdueix un cargol de M3 i 30 mm de llarg pel forat de la part final, i es col·loca una ròtula a cada banda. Per tal d'evitar que es desmunti, es colla amb una femella a l'altre extrem. És important posar volanderes entremig de cada element, per garantir el bon funcionament, tal com s'observa a la Figura 19.



Figura 19. Unió braç superior i inferior

L'últim pas consisteix a repetir el procediment per la part inferior, s'introdueixen els cargols, les ròtules, les volanderes i les femelles. D'aquesta manera, queden connectats els motors amb *l'end effector*.

3.4 Muntatge final

L'últim pas del muntatge consisteix a unir les tres parts anteriorment comentades. L'estructura en forma de U s'uneix amb la superfície de treball mitjançant dos cargols de M4 i una femella per sota el perfil. El mecanisme s'uneix amb el perfil de 40 x 40 mm mitjançant la peça d'impressió 3D on van collats els tres motors. Aquesta peça inclou dos forats passants de 4 mm de diàmetre. Per fer la unió amb el perfil, s'ha dissenyat una petita peça d'impressió 3D, els plànols de la qual es poden consultar al document *Plànols*. Aquesta peça va col·locada al raïl del perfil. Inclou un petit espai per empresonar una femella de M4 i així poder-se collar amb els cargols de M4, tal com mostra la Figura 20.



Figura 20. Unió del mecanisme amb el perfil

És convenient realitzar el muntatge tenint en compte les consideracions exposades al document *Plec de Condicions*, on s'indica com efectuar la fabricació i muntatge del mecanisme per tal d'evitar l'aparició de jocs a la màquina, i garantir un funcionament òptim.

4 ELECTRÒNICA

L'electrònica és una part fonamental de la plataforma que permet programar el moviment dels motors per tal d'executar les operacions necessàries. En la maqueta que s'ha construït s'ha programat una sèrie de moviments senzills simplement per demostrar la validesa de la solució. S'ha fet servir una placa controladora de codi lliure que permet que qualsevol persona pugui programar la màquina per executar moviments més complexos si es desitja.

Els moviments que executarà la maqueta serà el dibuix de quadrilàters en determinades posicions utilitzant un bolígraf fixat a l'*end effector*.

4.1 Placa microcontroladora

La placa que s'ha utilitzat per controlar els moviments del mecanisme és una Arduino Uno. Aquesta placa té el gran avantatge de ser de codi lliure i la seva programació és senzilla, amb molta documentació a la xarxa, que permet un aprenentatge ràpid i fàcil.

La finalitat de la placa és permetre la comunicació dels motors amb una computadora, on es compila i s'executa el codi d'operacions.

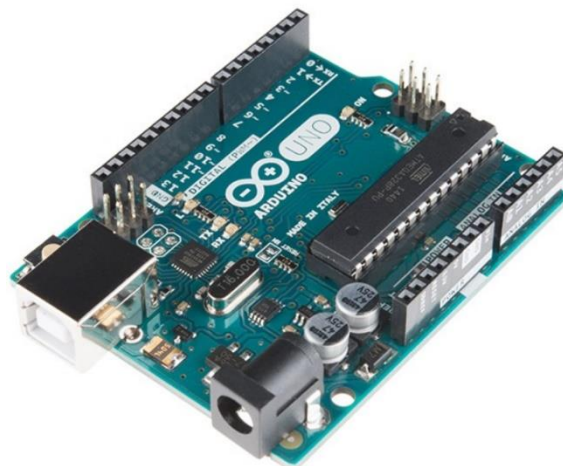


Figura 21. Placa controladora Arduino Uno

4.2 Característiques dels servomotors

Els motors utilitzats en el mecanisme són una classe de motors elèctrics anomenats servomotors. Aquests tenen unes característiques que els fan òptim per l'ús en l'àmbit de la robòtica. Algunes d'aquestes característiques en comparació amb altres tipus de motors elèctrics que podem trobar al mercat són:

- Poden aconseguir grans velocitats de gir
- Mantenen el parell màxim a gran velocitat
- Grans rampes d'acceleració i frenada
- Gran simplicitat en l'ajustament de paràmetres

Tots els servomotors, a diferència d'altres motors com per exemple els *pas a pas*, són de llaç tancat. Això implica la existència d'un encòder i controlador que li atorguen unes prestacions optimitzades per totes les velocitats i precisió.

Al mercat hi podem trobar servomotors de molts fabricants amb característiques diferents. El factor més important en que difereixen els motors entre ells és el la precisió de funcionament.

Per l'aplicació del projecte en qüestió s'han utilitzat uns servomotors del fabricant Futaba, una marca molt comuna dins la robòtica. El model és el S3003. Aquests servomotors disposen de bona precisió i permeten vèncer un parell considerable. Per aquest motiu, aquests motors són òptims pel moviment de les manovelles de la maqueta, ja que cal assegurar una bona precisió de l'*end effector*.



Figura 22. Servomotor Futaba S3003

Les especificacions tècniques del servomotor es poden consultar en format taula a la pàgina web del fabricant. D'aquesta taula podem extreure la informació necessària pel bon dimensionament dels aparells electrònics. Tots els documents referits a documentacions tècniques de qualsevol dels aparells utilitzat en el muntatge de la màquina, es poden consultar a l'*Annex C: Documentació tècnica*.

4.3 Control i alimentació dels servomotors

La placa controladora Arduino permet controlar els motors de maneres diferents i fent ús de diferents aparells. Molts dels mètodes de control requereixen aparells electrònics d'alt cost. Els servomotors que s'han escollit per la maqueta no requereixen font d'alimentació externa, i la seva programació és relativament senzilla.

L'alimentació del mecanisme s'ha fet a partir de les característiques del motor proporcionades pel fabricant. Els servomotors Futaba S3003 es poden alimentar a 4,8 V o bé a 6 V. Per facilitar l'electrònica s'alimentarà a 4,8 V, el mateix voltatge al que opera la placa.

4.4 Elements addicionals

Per millorar l'ergonomia del aparell i facilitar el seu ús al públic, s'han afegit alguns elements electrònics extra al circuit. Aquests elements són dos pulsador i un led.



Figura 23. Led i pulsador

La funció d'aquests dos elements serà permetre a l'usuari iniciar la seqüència de moviments (polsador) i rebre un feedback de que la seva acció s'està executant (led). El led romandrà encès durant l'execució del programa, i s'apagarà quan hagi finalitzat.

Per el correcte funcionament d'aquests aparells farà falta utilitzar dues resistències, una per cada element. Les resistències permeten rebaixar el voltatge que ofereix la placa Arduino, per tal de no sobrecarregar els aparells i fer-los malbé. Les resistències escollides han estat de 100k Ω pel polsador i 1k Ω pel led, que són els valors que indica el fabricant per aquests elements.

4.5 Esquema elèctric

En aquests apartat es mostra l'esquema de connexió de tot el cablejat. El codi de programació utilitzat pels moviments descrits es poden trobar a l'Annex B: Programació.

Per consultar tots els detalls dels elements electrònics utilitzats, consultar Annex C: Documentació tècnica. També es trobaran en el document Estat d'Amidaments i Pressupost.

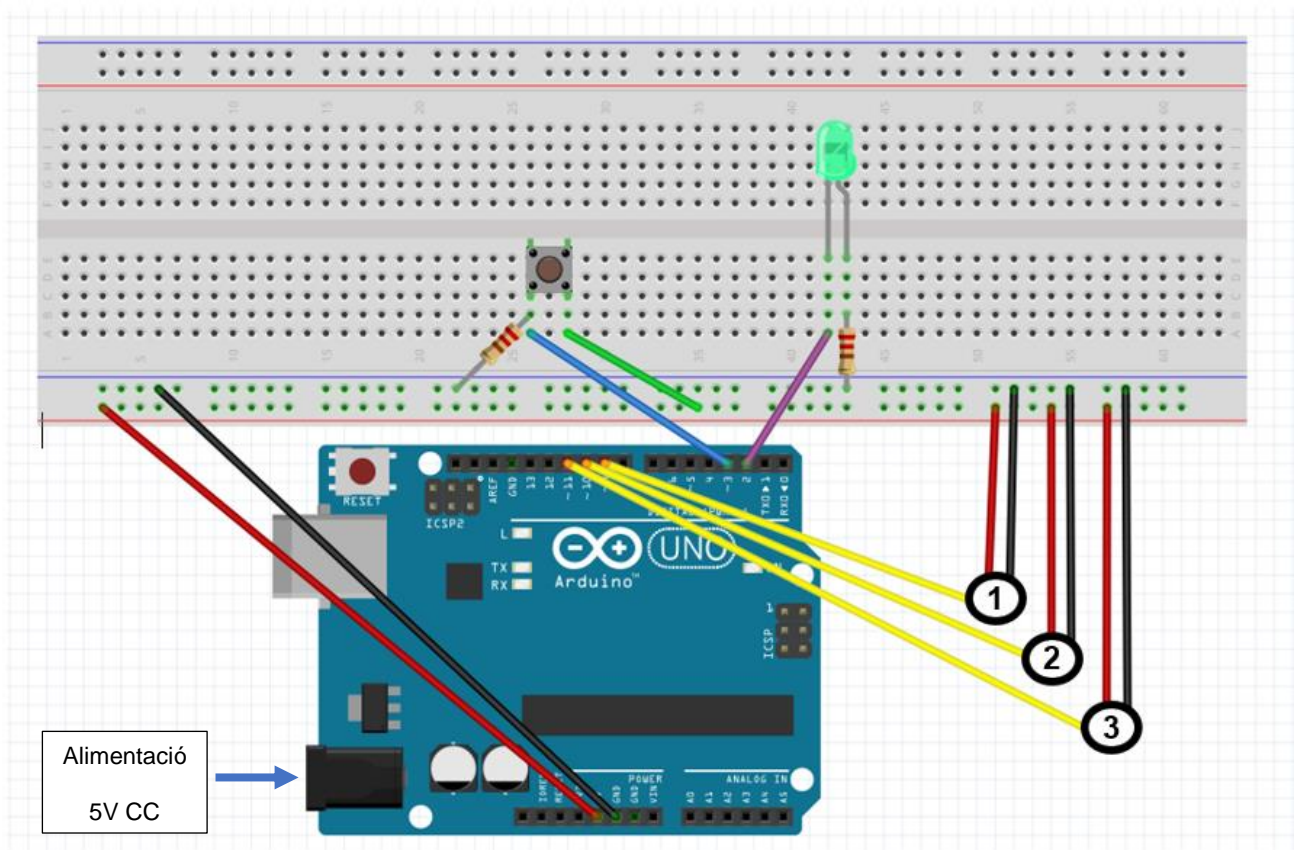


Figura 24. Esquema elèctric realitzat amb el software Fritzing

A l'esquema podem veure la forma de connexió del cablejat. L'alimentació necessària del circuit és 5V, que ens ho proporcionarà una font externa. Aquesta font ens permet no dependre de connexió a l'ordinador, i la informació del programa estarà guardada a la placa Arduino.

El programa s'iniciarà al prémer el polsador. Aquest polsador és de quatre potes, i necessita una resistència pel seu correcte funcionament. Cal connectar-lo a una de les sortides digitals de la placa (en aquest cas al pin 3) i l'altra pota al negatiu de la placa.

Pel que fa al led, també necessitarà una resistència pel seu funcionament. Les connexions que cal fer són: la pota llarga ha d'anar connectada al pin desitjat de la placa (en aquest cas al pin 2), i la pota curta ha d'anar al negatiu de la placa, amb una resistència entremig.

Els tres servomotors aniran connectats de la mateixa forma i en diferents pins. Dels tres cables que surten del motor, cal distingir bé els tres colors i connectar cadascú al lloc correcte. Connectar-los incorrectament suposaria malmetre'l. Pel cas d'aquests servomotors, el codi de colors que utilitza és el mateix per la resta de servomotors de les mateixes característiques: el marró és el negatiu o terra, el vermell és el positiu i el taronja és el de la senyal, que va connectat a la placa Arduino al pin que desitgem (en aquest cas el pin 9, 10 i 11).

L'esquematització del circuit s'ha realitzat utilitzant el programa *Fritzing*, de descàrrega gratuïta. Aquest programa permet la simulació de cablejat i funcionament d'aparells electrònics.

5 MESURES DE PRECISIÓ

Els mecanismes paral·lels, com a s'ha comentat anteriorment, són molt utilitzats en tot tipus de indústria, i les seves aplicacions són múltiples. Per això és indispensable garantir l'anul·lació completa de joc que pugui aparèixer en qualsevol punt de la màquina, per tal de millorar la precisió i la fiabilitat de la màquina.

La finalitat d'aquest apartat és la comprovació del joc en varis punts de la màquina i procurar que no excedeixen els límits establerts en les especificacions.

Tot seguit es detalla el procediment de l'experiment, així com també els estris utilitzats. Els resultats es troben en forma de taula al final de l'apartat, i també hi ha un resum de la prova a l'apartat *Conclusions*.

Els aparells utilitzats en aquesta prova són un rellotge comparador i un dinamòmetre, mostrats a la figura 25.

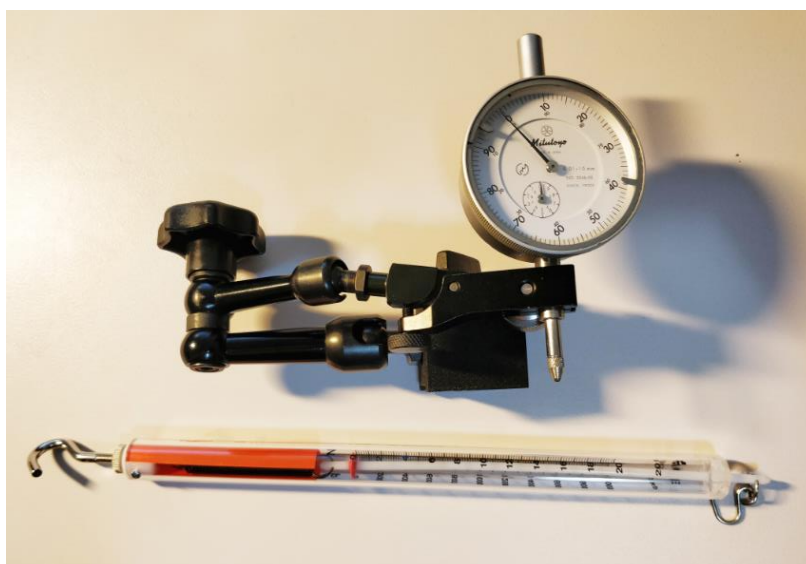


Figura 25. Rellotge comparador amb suport i dinamòmetre

L'experiment ha consistir en, una vegada muntat tota la màquina, col·locar la punta del rellotge comparador a la part final o *end effector*. Llavors, aplicant una força en sentit contrari a la orientació del rellotge, sabrem quin joc hi ha. Per fer-ho, és indispensable que els motors estiguin connectats a la font d'alimentació per tal de mantinguin la posició.

La força aplicada és interessant poder-la mesurar. És per això que la força s'aplica per mitjà d'un dinamòmetre. A la figura 26 es mostra el muntatge dels aparells.

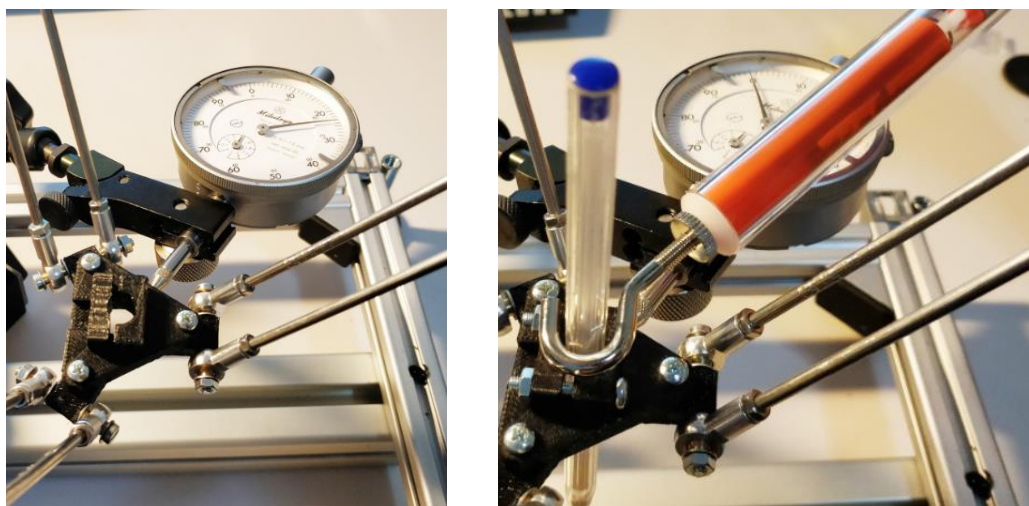


Figura 26. Demostració del muntatge dels aparells

Els resultats del joc es mostres de manera tabulada a la Figura 27. A la columna de l'esquerra hi ha el valor de força aplicada, i a la columna de la dreta el desplaçament que ha provocat a l'*end effector*.

Força (N)	Desplaçament (mm)
0.5	0,05
1	0,18
2	0,34
3	0,42

Figura 27. Taula de resultats de joc

Les causes del joc en la maqueta són vàries. Primerament, els braços són fabricats amb impressió 3D. Això implica que el material utilitzat és un plàstic, i durant el procés de muntatge hi poden haver hagut deformacions, ja sigui al moment de collar els cargols amb fermesa o el propi joc degut a la deformació a l'aplicar la força.

Per altra banda, els servomotors sempre tenen un cert joc. Els utilitzats en aquesta maqueta mostren un cert joc al moure els braços, i això també afecta a la precisió del terminal. A més, la sortida és un petit engranatge que pot provocar l'aparició de folgances entre el propi motor i la peça acoblada.

Aquest ha estat un experiment senzill que ens ha permès conèixer quina imprecisió tindrem a la part final de la màquina. Aquesta maqueta, al ser de caràcter didàctic i d'exposició, no es demana una precisió molt elevada. En aplicacions industrials, però, l'exigència és molt més elevada.

6 RESUM DEL PRESSUPOST

El preu total amb IVA inclòs de la maqueta del robot tipus delta dissenyada en aquest projecte el dia 4 de setembre de 2019 és de:

Tres-cents seixanta-quatre euros amb seixanta-nou cèntims **364,69 €**

7 CONCLUSIONS

En aquest apartat es pretén fer una reflexió de les conclusions assolides després de la realització del projecte i comprovar que s'hagin assolit els requeriments que el peticionari ha especificat a l'apartat introductori.

Primerament, i com a factor més important de la maqueta, cal que el funcionament sigui òptim. Com ja s'ha comentat a l'apartat d'objecte i abast del projecte i com figura a les especificacions, la programació de moviments no havia de ser complicada. Tant sols era necessari que la maqueta fos capaç de moure's tal i com el codi li exigia. Els moviments que s'ha decidit que fes consisteixen a dibuixar quadrilàters sobre una superfície. Per demostrar-ho, s'ha dissenyat una petita peça que permeti adaptar un bolígraf a la part final (*end effector*), tal i com es detalla a l'apartat *Geometria de la plataforma* i a l'apartat de *Plànols*. La superfície sobre la qual s'ha dibuixat és un full de paper convencional.

Després de realitzar varies proves, el funcionament és correcte. L'aparell és capaç de descriure quadrilàters sobre un full de paper. Consultant l'apartat *Especificacions*, es pot comprovar que s'ha complert satisfactòriament amb la majoria. Això dona un balanç del projecte positiu.

8 RELACIÓ DE DOCUMENTS

Els documents que formen el projecte són els següents:

Document 1. Memòria i Annexos

Document 2. Plànols

Document 3. Plec de condicions

Document 4. Estat d'amidaments

Document 5. Pressupost

9 BIBLIOGRAFIA

Zhen, Huang (2012). *Theory of Parallel Mechanisms (Mechanisms and Machine Science)*. Springer Science & Business Media

Trossen Robotics. Fòrums: <http://forums.trossenrobotics.com/content.php> 'Delta robot kinematics' (Data de consulta: 12/06/2019)

Hackaday: <https://hackaday.com/2019/07/30/pick-and-place-robot-built-with-fischertechnik/> 'Pick And Place Robot Built With Fischertechnik'. Pat Whetman (2019) (Data consulta: 06/05/2019)

Sinerges tecmon ,s.a. Proveïdor perfileria d'alumini i accessoris. Enllaç a catàleg: <http://www.sinerges.com/catalogo-de-productos/perfiles-de-aluminio> (Data consulta: 16/05/2019).

Towerhobbies.com. Proveïdor material electrònic. Enllaç catàleg: <https://www.towerhobbies.com/cgi-bin/wti0095p?FVSEARCH=futaba+servos> (Data consulta: 14/06/2019)

Arduino.cc. Tutorials programació Arduino i descàrrega llibries. <https://www.arduino.cc/en/Tutorial/HomePage?from=Main.Tutorials> (Data consulta: 15/07/2019)

ANNEX A: CÀLCULS

En aquests annex es mostren els càlculs realitzats que demostren la validesa de la solució i l'elecció d'alguns components de la maqueta.

A.1 Càlculs cinemàtics

Per tal que la màquina pugui operar amb els moviments desitjats, necessitem realitzar els càlculs cinemàtics pertinents amb la finalitat de relacionar la posició de l'end effector amb el gir dels motors. Això s'anomena cinemàtica inversa. A diferència de la cinemàtica directa, no s'està calculant la posició de la part final segons el gir dels motors, sinó al revés: necessitem trobar quin angle giren els motors segons una posició de la part final determinada.

A la Figura 28 es mostra esquemàticament la màquina, amb els angles que necessitem trobar i la posició de l'end effector E_0 .

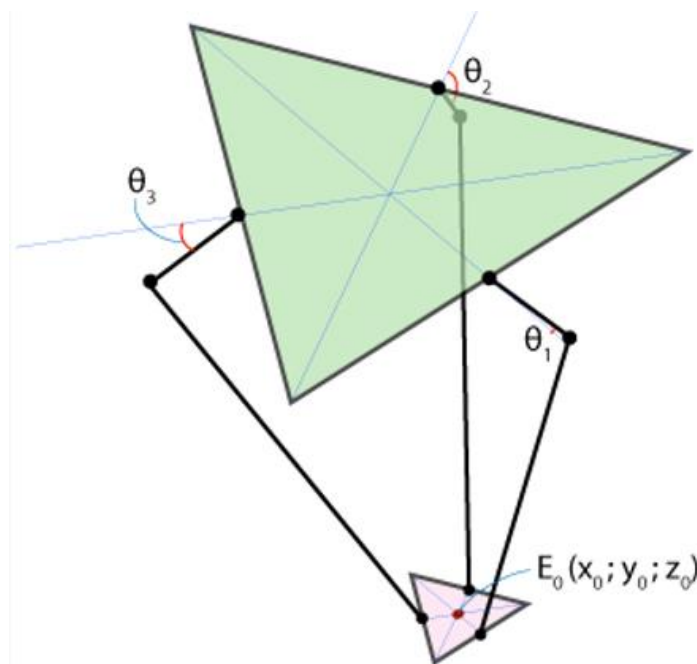


Figura 28. Representació del robot delta.
(Imatge extreta de *trossenrobotics.com*)

Hi ha varis procediments per trobar aquesta relació. Per aquest cas, el mètode que s'utilitzarà consisteix en resoldre el problema de cinemàtica inversa mitjançant trigonometria. Aquest càlcul és vàlid gràcies a la suposició que la plataforma superior i inferior estan en paral·lel en tot moment.

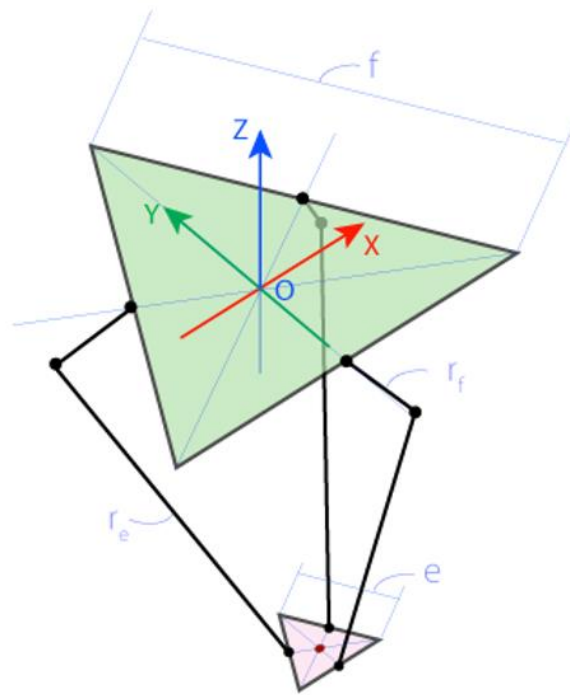


Figura 29. Definició de paràmetres geomètrics

Iniciem el càlcul definint el punt $(0,0,0)$ del mecanisme, que estarà situat al centre de la plataforma superior. El sistema de coordenades és el mostrat a la Figura 29. Per tant, el valor de z sempre serà negatiu. Les distàncies que ens serviran pel càlcul estan també indicades a la figura, essent f i e les llargades del costat del triangle superior i inferior respectivament. Els braços se'ls assigna el nom de r_f pel superior i r_e per l'inferior.

Amb aquests paràmetres definits, podem començar a estudiar la cinemàtica.

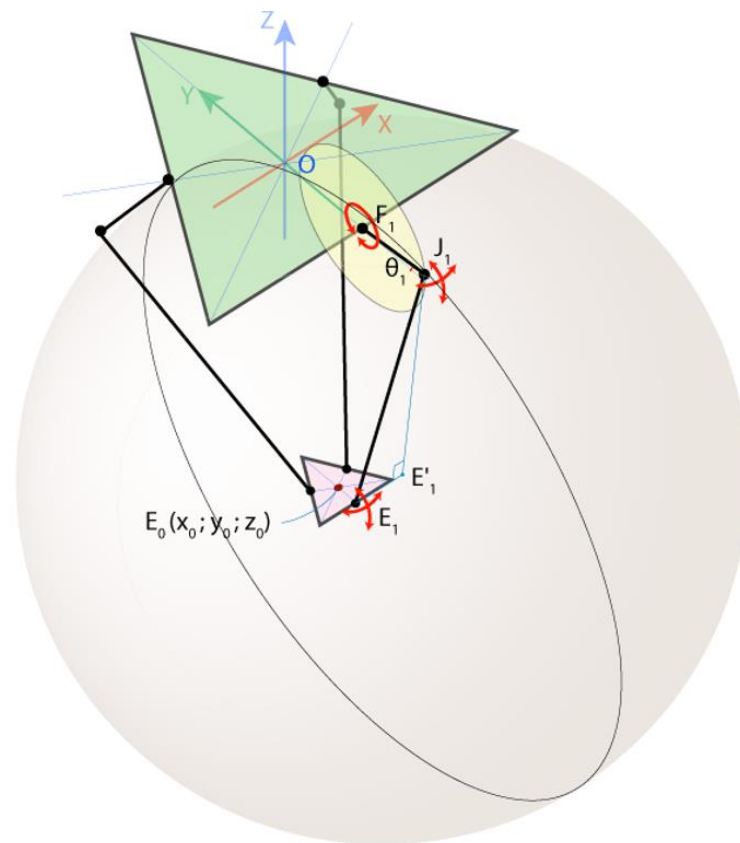


Figura 30. Representació de l'esfera i circumferència

Com que el braç rf només pot girar al pla YZ , podem dibuixar una circumferència de radi rf en aquest pla, tal i com es mostra a la Figura 30. Definim també el punt F_1 i J_1 , corresponents als extrems del braç rf . Com que els punts E_1 i J_1 poden girar lliurement al haver-hi una ròtula, definim una esfera que engloba totes les posicions on podria arribar el braç, amb centre a E_1 i radi re .

El següent pas és dibuixar la intersecció de la esfera amb el pla YZ . D'aquesta intersecció en resulta una circumferència amb centre a E'_1 i de radi E'_1J_1 .

Arribats a aquest punt, es pot observar que el punt J_1 serà el resultat de la intersecció de la circumferència de radi E'_1J_1 amb la circumferència de radi F_1 .

Per començar amb el càlculs pertinents per trobar les coordenades de J1, necessitem saber les coordenades de F1 i el seu anàleg a la part inferior E1.

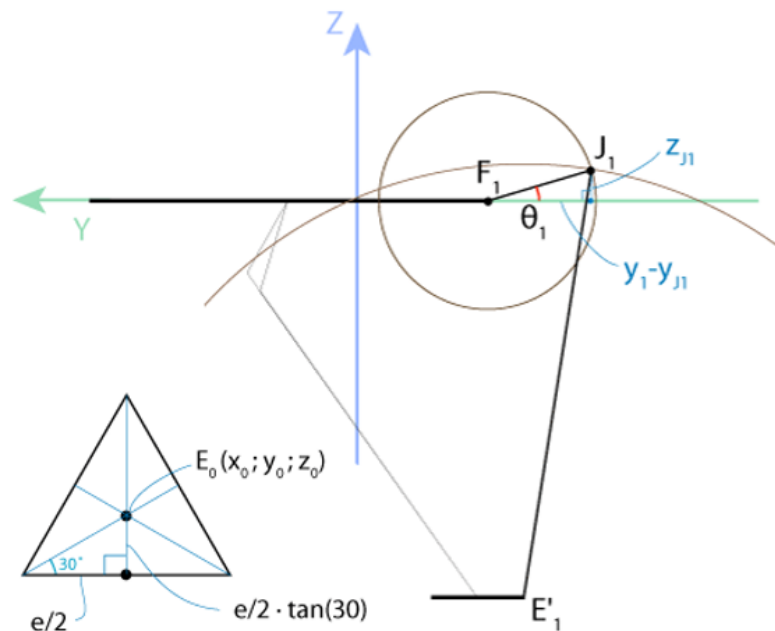


Figura 31. Vista pla YZ

A la imatge superior es pot observar com extreure les coordenades del punt E1, que corresponen a:

$$E1 \left(x_0, y_0 - \frac{e}{2 \cdot \tan(30^\circ)}, z_0 \right)$$

El punt F1 serà semblant, amb la diferència que al ser un punt fixe x_0 , z_0 serà 0.

$$F1 \left(0, -\frac{f}{2 \cdot \tan(30^\circ)}, 0 \right)$$

També podem saber les coordenades del punt E'1, que seran les mateixes que E1 a diferència de que x_0 és zero, al estar situat sobre l'eix Y.

$$E'1 \left(0, y_0 - \frac{e}{2 \cdot \tan(30)}, z_0 \right)$$

Per altra banda, amb el triangle format per E1, E'1 i J1 podem saber que la distància entre E'1 i J1 serà:

$$E_1 E'_1 = x_0$$

$$E'_1 J_1 = \sqrt{E_1 J_1^2 - E_1 E'_1^2} = \sqrt{r_e^2 - x_0^2}$$

Arribats a aquest punt, podem escriure les dues equacions que relacionen la plataforma inferior i superior. Aquesta relació, com ja s'ha comentat, consisteix a trobar les coordenades del punt J1.

$$\begin{cases} (y_{J1} - y_{F1})^2 + (z_{J1} - z_{F1})^2 = r_f^2 \\ (y_{J1} - y_{E1})^2 + (z_{J1} - z_{E1})^2 = r_e^2 - x_0^2 \end{cases}$$

Les dues equacions són similars. Substituint els paràmetres per les expressions abans descrites, tenim un sistema d'equacions amb dues incògnites.

$$\begin{cases} \left(y_{J1} + \frac{f}{2\sqrt{3}} \right)^2 + z_{J1}^2 = r_f^2 \\ \left(y_{J1} - y_0 + \frac{e}{2\sqrt{3}} \right)^2 + (z_{J1} - z_0)^2 = r_e^2 - x_0^2 \end{cases}$$

Els únics paràmetres que es desconeixen de les equacions anteriors són Y_{J1} i Z_{J1} . La X_{J1} ja és coneguda, i val 0 al estar sobre l'eix Y.

El darrer pas, on ja podrem conèixer l'angle de gir del motor, consisteix en relacionar els dos catets del triangle rectangle que forma J1, F1 i l'eix Y.

Per tant, relacionant els dos catets amb la tangent, obtenim l'expressió del gir del motor.

$$\theta_1 = \arctan\left(\frac{z_{J1}}{y_{F1} - y_{J1}}\right)$$

Coneixent el gir d'un dels motors, podem aprofitar la simetria de la geometria del robot delta per trobar el gir dels altres dos motors, aplicant el mateix procediment. Els tres braços estan situats a 120° un de l'altre. Per tant, el primer pas serà rotar els eixos originals a un angle de 120° , tal i com es representa a la Figura 32.

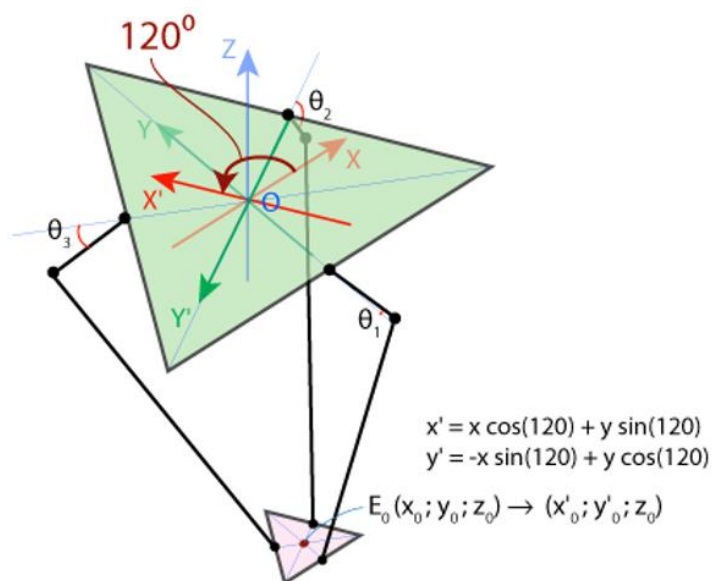


Figura 32. Rotació dels eixos

Amb els nous eixos s'ha de tornar a utilitzar el mateix procediment, tenint en compte que les coordenades del punt E_0 canviaran, i es podran trobar utilitzant la matriu de rotació corresponent.

A.2 Càlcul de deformació

Un dels requisits fonamentals que ha de complir la maqueta és una bona precisió a l'hora d'efectuar els moviments. Per tant, és convenient fer un càlcul estructural per assegurar una fletxa prou petita perquè afecti el mínim possible en el joc de la part final de la màquina. Aquests càlculs també serveixen per justificar l'elecció d'un perfil enfront d'un altre. Cal que el perfil tingui prou robust per minimitzar la deformació durant el moviment.

El càlcul de la fletxa s'ha realitzat per un cas estàtic, degut a que les forces en moviment seran relativament semblants.

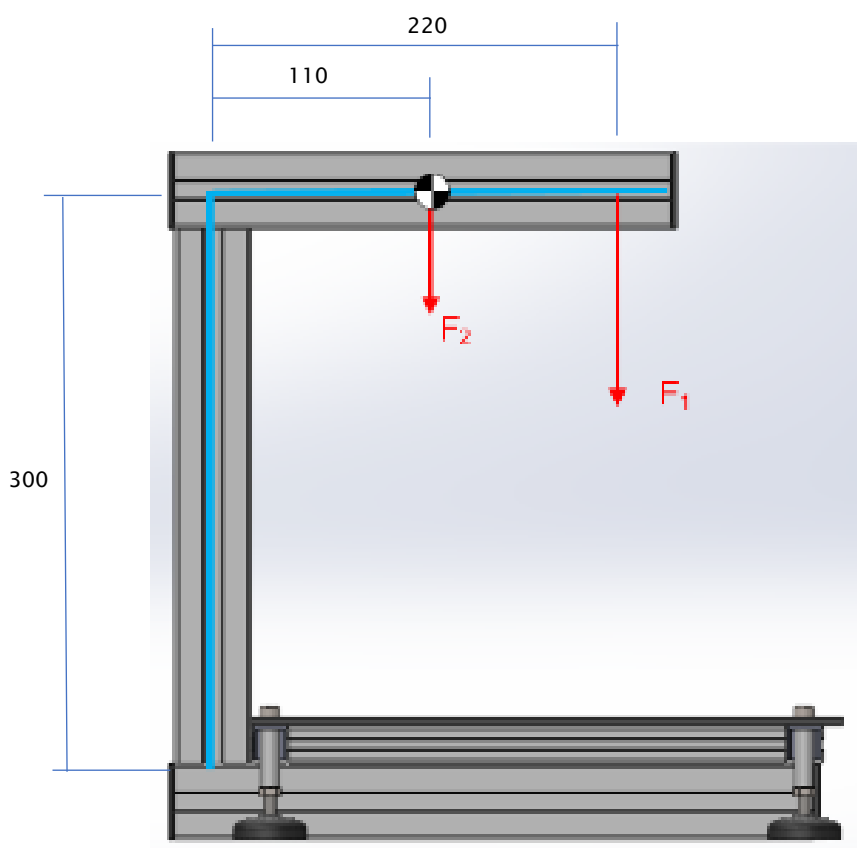


Figura 33. Forces i distàncies de l'estructura

Primer cal determinar les dues forces que afecten al conjunt i creen moment, que són el pes del mecanisme i de la barra superior. Les anomenarem F1 i F2 respectivament.

Per determinar la força F1 ens cal conèixer el valor de les masses de tots els elements que formen el mecanisme. Per alguns dels components només ha calgut consultar la documentació proporcionada pel fabricant. Per altres, ha calgut fer un càlcul ràpid per determinar la seva massa. Per exemple, pel cas dels elements d'impressió 3D, la massa és tant petita que es podria negligir, però degut a que la impressora facilita les dades de filament necessari per cada peça, s'ha pogut fer el càlcul de la massa, tenint en compte la seva densitat.

Les masses pel càlcul de F1 es troben resumides a la Figura 34 en forma de taula.

Peça	Material	Quant.	Massa	Descripció
Suport servos	PLA	1	5,9 g	Calculat a partir del filament necessari (2 metres) i la densitat del material, que és de 1,38 g/cm ³
Braç superior	ABS	3	51 g	Mateix procediment que el suport dels servos, però tenint en compte que és PLA enlloc d'ABS
Braç inferior	Inox	6	380,2 g	Trobat a partir del volum i la densitat de l'inox: 7,96 g/cm ³
Ròtules	Plàstic	12	78 g	Dades fabricant
Cargols, femelles i volanderes	Inox	-	40 g	Mesura experimental
Servomotors	Varis	3	168 g	Dades fabricant
Pes càrrega	-	1	400 g	Massa de la càrrega sobreestimada

Figura 34. Taula de masses dels elements del mecanisme

El pes total del mecanisme és de 1123 g. Per tant:

$$F1 = 1123 \cdot 10^{-3} \cdot 9,81 = 11 \text{ N}$$

Per determinar F_2 , la força que provoca la massa de la barra superior, partim de les dades del fabricant, que ens diu que la secció té una superfície de $5,07 \text{ cm}^3$. Sabent que té una llargada de 260 mm i l'alumini té una densitat de $2,7 \text{ g/cm}^3$, trobem F_2 .

$$F_2 = 5,07 \cdot 26 \cdot 2,7 \cdot 10^{-3} \cdot 9,81 = 3,49 \text{ N}$$

El següent pas és dibuixar el diagrama de moments de l'estructura per procedir amb el càlcul de deformació a l'extrem.

$$11 \cdot 0,22 + 3,49 \cdot 0,11 = 2,8 \text{ Nm}$$

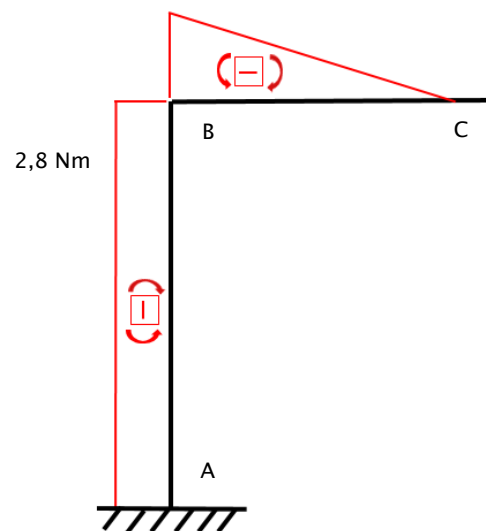


Figura 35. Diagrama de moments de l'estructura

Degut a les petites masses presents al mecanisme i per facilitar el càlcul, s'ha considerat la part superior del diagrama de moments com un triangle rectangle, tot i que idealment tindria una forma més complexa, amb un trapezi i un triangle rectangle. A efectes de càlcul aquesta simplificació no suposa una alteració significativa dels resultats.

El mètode utilitzat per trobar la fletxa és el mètode de Navier Bresse.

$$\delta_{vc} = \delta_{vA} + \theta_A \cdot L_{AC} - \frac{1}{EI} \cdot M_{est}(AC, C)$$

On $E = 70 \text{ Gpa}$, $I = 7,38 \text{ cm}^4$, $\delta_{vA} = 0$ i $\theta_A = 0$.

El moment estàtic per aquest cas és:

$$M_{est} = 2,8 \cdot 0,3 \cdot 0,22 + 2,8 \cdot \frac{1}{2} \cdot 0,22 \cdot \frac{2}{3} \cdot 0,22 = 0,229 \text{ Nm}$$

El resultat del desplaçament vertical per un perfil de 40x40 mm de secció és:

$$\delta_{vc} = -0,0446 \text{ mm}$$

Repetim el procés pel desplaçament horitzontal. Aquí el moment estàtic ens variarà:

$$\delta_{hc} = \delta_{hA} + \theta_A \cdot L_{AC} - \frac{1}{EI} \cdot M_{est}(AC, C)$$

El moment estàtic per aquest cas és:

$$M_{est} = 2,8 \cdot 0,3 \cdot \frac{0,3}{2} = 0,126 \text{ Nm}$$

El resultat del desplaçament horitzontal per un perfil de 40x40 mm de secció és:

$$\delta_{hc} = 0,0244 \text{ mm}$$

Per tal de tenir una referència amb un altre perfil per poder comparar resultats, s'ha repetit el càlcul anterior per un perfil de 20 x 20 mm de secció. Les dades que cal modificar al càlcul anterior és la inèrcia de la secció, que es pot trobar a les especificacions del material dins el catàleg del fabricant ($0,72 \text{ cm}^4$) i la massa a partir del volum i la densitat (126 g). També la F2 serà menor a causa de la disminució de pes.

Els resultats del desplaçament vertical per un perfil de 20 x 20 mm de secció és:

$$\delta_{vc} = 0,415 \text{ mm}$$

Els resultats del desplaçament horitzontal per un perfil de 20 x 20 mm de secció és:

$$\delta_{hc} = 0,227 \text{ mm}$$

Per tant, la conclusió que podem extreure del càlcul és que fent servir el perfil de 40 x 40 mm de secció, tenim una fletxa 10 vegades menor que un perfil de 20 x 20 mm. La robustesa que es guanyarà serà considerable, i la precisió també se'n veurà beneficiada. Per aquest motiu s'ha usat la secció de 40 x 40 mm per la construcció de la maqueta.

A.3 Càlcul parell. Elecció dels servomotors

Pel càlcul del parell s'ha decidit estudiar un cas estàtic. Degut a que la massa dels components és mínima, les forces d'inèrcia que reben els motors seran petites. Per tant, amb un càlcul estàtic es pot demostrar la validesa de la solució.

Pel càlcul s'ha tingut en compte només un dels braços del mecanisme, amb totes les masses que el formen, i en una posició el que el moment que rebi el motor sigui màxim. La posició que s'ha estudiat és el cas en que el braç superior està horitzontal, i el braç inferior està a 90° d'aquest. Tot i que el rang de moviments de l'actual maqueta no permet arribar a aquest angle, cal tenir en compte que modificant algun dels paràmetres podria arribar-hi. I sempre és necessari estudiar el cas més desfavorable.

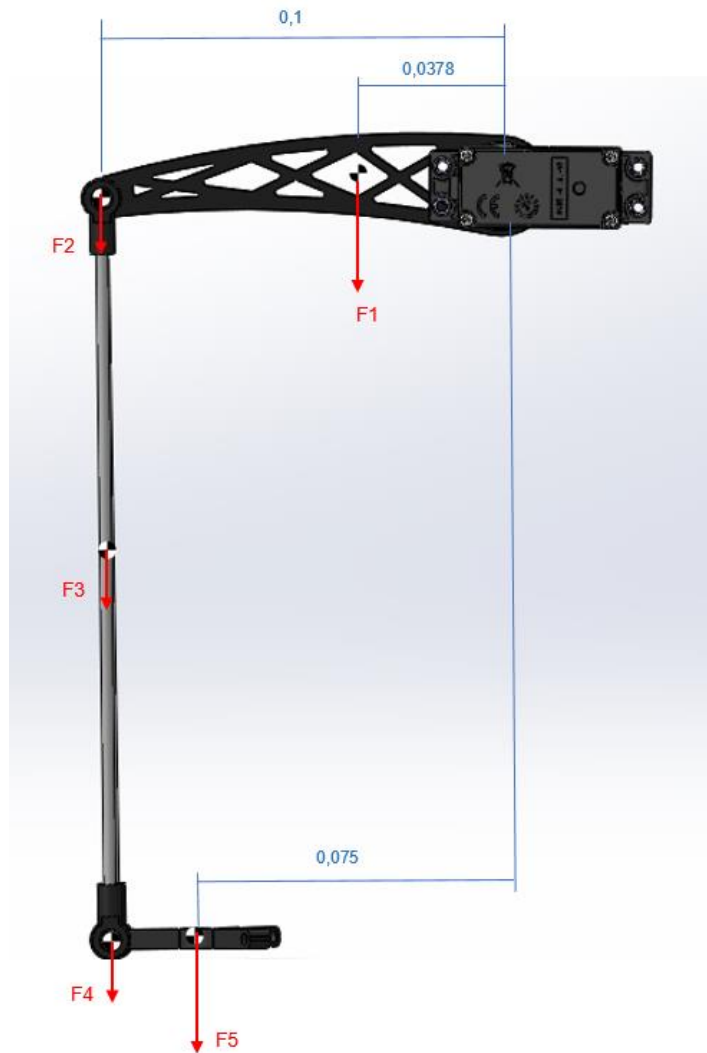


Figura 36. Representació de forces i distàncies

En aquesta posició, les forces que hi intervenen són provocades per totes les masses que ha d'elevat cada servomotor, que són: el braç superior, les dues vares d'acer inoxidable, quatre ròtules, dos cargols i dues femelles, i la càrrega inferior, que es pren un valor sobreestimat de 400 g. Com que només s'estudia un braç, aquesta massa de 400 g es dividirà entre tres. A la Figura 36 es representen totes les forces i distàncies que es troben en cadascun dels braços de la màquina.

Els valors de les forces i moments es representen a la Figura 37 en forma de taula.

Força	Components	Massa	Pes	Dist. (m)	Moment (Nm)
F1	Braç superior	17 g	0,167 N	0,0378	0,006
F2	2 ròtules. Cargol, femella i volan.	16 g	0,157 N	0,1	0,0155
F3	Vara acer inox	63,3 g	0,62 N	0,1	0,062
F4	2 ròtules. Cargol, femella i volan.	16 g	0,157 N	0,1	0,0155
F5	Enf effector i càrrega	140 g	1,37 N	0,075	0,103

Figura 37. Representació de forces i distàncies

La suma de tots els moments és de 0,201 Nm. Per posar en context aquesta xifra i poder comparar amb models de servomotors, cal convertir les unitats a kg cm, que són les unitats més comunes en les que es donen els valors de parell en servomotors.

La conversió és la següent:

$$0,201 \text{ Nm} \cdot \frac{1 \text{ Kg}}{9,81 \text{ N}} \cdot \frac{1 \text{ cm}}{0,01 \text{ m}} = 2,04 \text{ kg cm}$$

Per tant, el servomotor que s'esculli haurà necessàriament de tenir un valor de parell més gran de 2,04 Nm. Aquesta xifra no és massa elevada, i es poden trobar servomotors econòmics que el poden vèncer sense problemes. Els únics servomotors que quedarien exclosos serien els de petites dimensions destinats a ser usats en joguines o petita electrònica.

Els servomotors escollits són els Futaba S3003. A l'Annex C: Descripcions tècniques se'n poden consultar les característiques.

Fixant-nos en la dada del fabricant del parell, ens mostra que per 4,8 volts d'alimentació, el parell que pot vèncer és de 3,2 kg cm, i per 6 Volts el parell és de 4,1 kg cm. Per facilitar l'electrònica no es fa servir alimentació externa per alimentar els motors, i la placa pot proporcionar 5V com a màxim. Per tant, el valor de parell que ens interessa és de 3,2 kg cm. Per visualitzar millor el resultat, és necessari calcular el coeficient de seguretat que tenim:

$$n = \frac{3,2 \text{ Kg cm}}{2,04 \text{ Kg cm}} = 1,56$$

El valor del coeficient és correcte, tenint en compte que s'ha considerat una càrrega elevada a la part final del mecanisme.

ANNEX B: PROGRAMACIÓ DE LA MÀQUINA

En aquest annex es mostra el codi utilitzat per controlar la màquina.

```
#include <Servo.h>

// Es declaren els tres servos

Servo servo1;
Servo servo2;
Servo servo3;

int PULSADOR = 2;    // S'indica que el pulsador estarà situat al pin 2
int LED = 3;        // S'indica que el led estarà situat al pin 3
int estado=LOW;     // Es declara una variable anomenada 'estado', que a l'inici estarà desactivada
int posini = -24.255; // Es declara la posició inicial, amb coordenades (0,0,-100)

// Es defineixen els paràmetres d'inici del programa

void setup() {

  pinMode(PULSADOR, INPUT);    // S'indica que el pulsador és una entrada
  pinMode(LED, OUTPUT);       // S'indica que el led és una sortida
  digitalWrite(LED, LOW);     // Es defineix que el led estarà originàriament en LOW (apagat)

  // S'indica a quin pin de la placa Arduino estan connectats els servomotors

  servo1.attach(9);
  servo2.attach(10);
  servo3.attach(11);

void loop() {

  // El loop consisteix en un while: mentre el pulsador no es premi el programa no actuarà.
  // Al prémer el pulsador i passi a l'estat HIGH, es llegeix el subprograma movimentservos

  while(digitalRead(PULSADOR)==LOW){};
  movimentservos();
  while(digitalRead(PULSADOR)==HIGH){};
  estado = digitalRead(LED);
  digitalWrite(LED, !estado);
}

void movimentservos(){          // Funció que es crida dins el loop

// Es canvia l'estat del led a HIGH a l'inici del programa, i el desactiva al acabar

  estado = digitalRead(LED);
  digitalWrite(LED, !estado);

//_____ SEQUÈNCIA DE MOVIMENTS _____//

  // Es defineix la posició que han d'adoptar els servomotors a l'inici del programa

  servo1.write(posini);
  servo2.write(posini);
  servo3.write(posini);
  delay (4000);
```

```
// Inici del quadrilàter exterior

servo1.write(71.673);
servo2.write(17.581);
servo3.write(62.119);
delay (500);

servo1.write(27.777);
servo2.write(45.398);
servo3.write(75.432);
delay (500);

servo1.write(27.777);
servo2.write(75.432);
servo3.write(45.398);
delay (500);

servo1.write(71.673);
servo2.write(62.119);
servo3.write(17.581);
delay (500);

servo1.write(71.673);
servo2.write(17.581);
servo3.write(62.119);
delay (500);

servo1.write(posini);
servo2.write(posini);
servo3.write(posini);
delay (4000);

// Inici de la creu interior

servo1.write(54.978);
servo2.write(18.845);
servo3.write(46.924);
delay (500);

servo1.write(25.152);
servo2.write(58.908);
servo3.write(35.814);
delay (500);

servo1.write(posini);
servo2.write(posini);
servo3.write(posini);
delay (2000);

servo1.write(54.978);
servo2.write(46.924);
servo3.write(18.845);
delay (500);
```

```
servo1.write(25.152);
servo2.write(35.814);
servo3.write(58.908);
delay (500);

servo1.write(posini);
servo2.write(posini);
servo3.write(posini);
delay (4000);

// Inici del quadrilàter interior

servo1.write(54.978);
servo2.write(18.845);
servo3.write(46.924);
delay (500);

servo1.write(25.152);
servo2.write(35.814);
servo3.write(58.908);
delay (500);

servo1.write(25.152);
servo2.write(58.908);
servo3.write(35.814);
delay (500);

servo1.write(25.152);
servo2.write(58.908);
servo3.write(35.814);
delay (500);

servo1.write(54.978);
servo2.write(46.924);
servo3.write(18.845);
delay (500);

servo1.write(54.978);
servo2.write(18.845);
servo3.write(46.924);
delay (500);

servo1.write(posini);
servo2.write(posini);
servo3.write(posini);
delay (500);

}

// _____ FI DE PROGRAMA _____
```

ANNEX C: DOCUMENTACIÓ TÈCNICA

C.1 Documentació tècnica de l'estructura

Materiales usados en todos los productos citados a continuación:

Al, anodizado



Perfil 8 40x40 E



A [cm ²]	m [kg/m]	I _x [cm ⁴]	I _y [cm ⁴]	I _t [cm ⁴]	W _x [cm ³]	W _y [cm ³]	
5,07	1,37	7,38	7,38	1,09	3,69	3,69	
natural, corte máx. 6000 mm							7.0.000.09
natural, 1 pza. long. 6000 mm							0.0.452.79

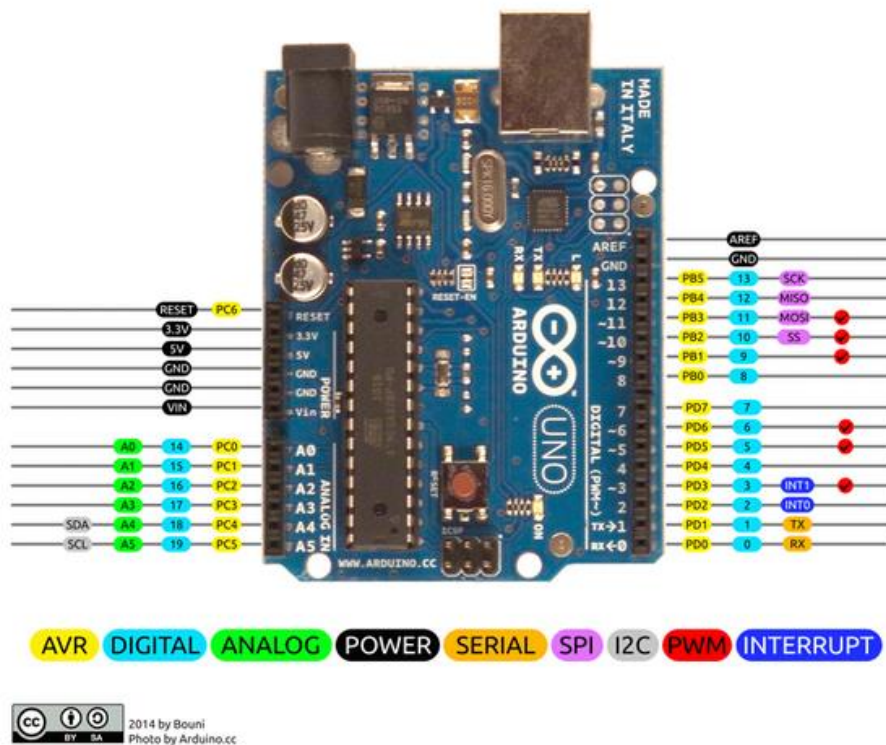


Perfil 8 40x40 L



A [cm ²]	m [kg/m]	I _x [cm ⁴]	I _y [cm ⁴]	I _t [cm ⁴]	W _x [cm ³]	W _y [cm ³]	
6,46	1,74	9,00	9,00	1,36	4,50	4,50	
natural, corte máx. 6000 mm							0.0.026.33
natural, 1 pza. long. 6000 mm							0.0.452.81
natural, 1 pza. long. 3000 mm							0.0.452.80
negro, corte máx. 6000 mm							0.0.026.35
negro, 1 pza. long. 6000 mm							0.0.452.83

C.2 Documentació tècnica de l'electrònica



Arduino Uno Technical Specifications

Microcontroller	ATmega328P – 8 bit AVR family microcontroller
Operating Voltage	5V
Recommended Input Voltage	7-12V
Input Voltage Limits	6-20V
Analog Input Pins	6 (A0 – A5)
Digital I/O Pins	14 (Out of which 6 provide PWM output)
DC Current on I/O Pins	40 mA
DC Current on 3.3V Pin	50 mA
Flash Memory	32 KB (0.5 KB is used for Bootloader)
SRAM	2 KB
EEPROM	1 KB
Frequency (Clock Speed)	16 MHz

S3003 FUTABA SERVO



...S3003 FUTABA SERVO...

Detailed Specifications

Control System:	+Pulse Width Control 1520usec Neutral	Current Drain (4.8V):	7.2mA/idle
Required Pulse:	3-5 Volt Peak to Peak Square Wave	Current Drain (6.0V):	8mA/idle
Operating Voltage:	4.8-6.0 Volts	Direction:	Counter Clockwise/Pulse Traveling 1520- 1900usec
Operating Temperature Range:	-20 to +60 Degree C	Motor Type:	3 Pole Ferrite
Operating Speed (4.8V):	0.23sec/60 degrees at no load	Potentiometer Drive:	Indirect Drive
Operating Speed (6.0V):	0.19sec/60 degrees at no load	Bearing Type:	Plastic Bearing
Stall Torque (4.8V):	44 oz/in. (3.2kg.cm)	Gear Type:	All Nylon Gears
Stall Torque (6.0V):	56.8 oz/in. (4.1kg.cm)	Connector Wire Length:	12"
Operating Angle:	45 Deg. one side pulse traveling 400usec	Dimensions:	1.6" x 0.8"x 1.4" (41 x 20 x 36mm)
360 Modifiable:	Yes	Weight:	1.3oz. (37.2g)



Cree 5-mm Round LED
C503B-BCS/BCN/GCS/GCN

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS (T_A = 25°C)

Items	Symbol	Absolute Maximum Rating	Unit
		Blue/Green	
Forward Current	I _F	30	mA
Peak Forward Current ^{Note1}	I _{FP}	100	mA
Reverse Voltage	V _R	5	V
Power Dissipation	P _D	120	mW
Operation Temperature	T _{opr}	-40 ~ +95	°C
Storage Temperature	T _{stg}	-40 ~ +100	°C
Lead Soldering Temperature	T _{sol}	Max. 260°C for 3 sec. max. (3 mm from the base of the epoxy bulb)	

Note:

1. Pulse width ≤0.1 msec, duty ≤1/10.

TYPICAL ELECTRICAL & OPTICAL CHARACTERISTICS (T_A = 25°C)

Characteristics	Color	Symbol	Condition	Unit	Minimum	Typical	Maximum
Forward Voltage	Blue/Green	V _F	I _F = 20 mA	V		3.2	4.0
Reverse Current	Blue/Green	I _R	V _R = 5 V	µA			100
Dominant Wavelength	Blue	λ _D	I _F = 20 mA	nm	465	470	480
	Green	λ _D	I _F = 20 mA	nm	520	527	535
Luminous Intensity	Blue	C503B-BCS/BCN (30 degree)	I _F = 20 mA	mcd	2130	4800	
	Green	C503B-GCS/GCN (30 degree)	I _F = 20 mA	mcd	5860	20000	
50% Power Angle	C503B-BCS/BCN/GCS/GCN		2θ _{1/2}	I _F = 20 mA	deg	30	

ORDER CODE TABLE*

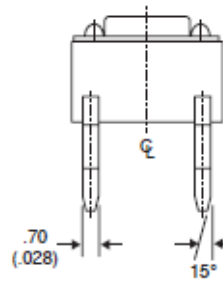
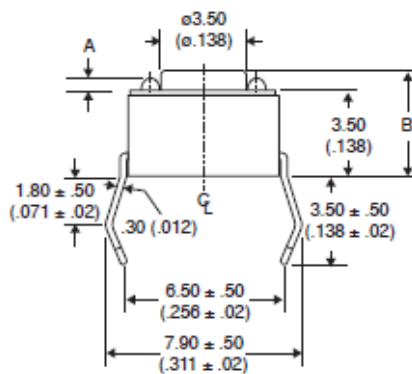
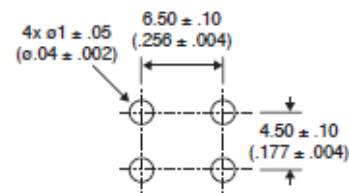
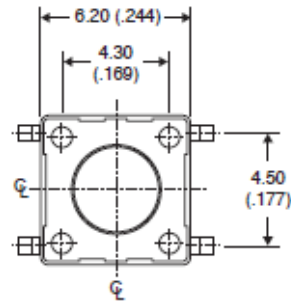
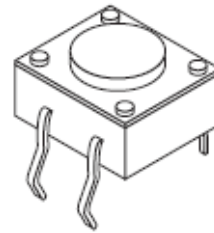
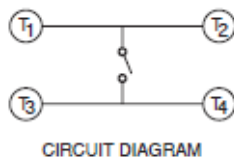
Green (30 degree)

Color	Kit Number	Viewing Angle	Luminous Intensity (mcd)		Dominant Wavelength				Package	Standoff
			Min.	Max.	Color Bin	Min. (nm)	Color Bin	Max. (nm)		
Green	C503B-GCS-CY0C0791	30	5860	32900	G7	520	G9	535	Bulk	Yes
Green	C503B-GCS-CA0B0781	30	12000	23500	G7	520	G8	530	Bulk	Yes
Green	C503B-GCS-CA0B0891	30	12000	23500	G8	525	G9	535	Bulk	Yes
Green	C503B-GCS-CB0C0781	30	16800	32900	G7	520	G8	530	Bulk	Yes
Green	C503B-GCS-CB0C0891	30	16800	32900	G8	525	G9	535	Bulk	Yes
Green	C503B-GCS-CY0C0792	30	5860	32900	G7	520	G9	535	Ammo	Yes
Green	C503B-GCS-CA0B0782	30	12000	23500	G7	520	G8	530	Ammo	Yes
Green	C503B-GCS-CA0B0892	30	12000	23500	G8	525	G9	535	Ammo	Yes
Green	C503B-GCS-CB0C0782	30	16800	32900	G7	520	G8	530	Ammo	Yes
Green	C503B-GCS-CB0C0892	30	16800	32900	G8	525	G9	535	Ammo	Yes
Green	C503B-GCN-CY0C0791	30	5860	32900	G7	520	G9	535	Bulk	No
Green	C503B-GCN-CA0B0781	30	12000	23500	G7	520	G8	530	Bulk	No
Green	C503B-GCN-CA0B0891	30	12000	23500	G8	525	G9	535	Bulk	No
Green	C503B-GCN-CB0C0781	30	16800	32900	G7	520	G8	530	Bulk	No
Green	C503B-GCN-CB0C0891	30	16800	32900	G8	525	G9	535	Bulk	No
Green	C503B-GCN-CY0C0792	30	5860	32900	G7	520	G9	535	Ammo	No
Green	C503B-GCN-CA0B0782	30	12000	23500	G7	520	G8	530	Ammo	No
Green	C503B-GCN-CA0B0892	30	12000	23500	G8	525	G9	535	Ammo	No
Green	C503B-GCN-CB0C0782	30	16800	32900	G7	520	G8	530	Ammo	No
Green	C503B-GCN-CB0C0892	30	16800	32900	G8	525	G9	535	Ammo	No

Last Update: 12/27/05

Ref. #: MS-100630

Dimensions: mm (In.)



Mechanical Specifications:

- Operating Life: 300,000 cycles min.
- Operating Temperature: -25°C to +70°C

Note:

- RoHS Compliant and process compatible with 260° solder

Electrical Specifications:

- Rating: 50mA / 12VDC
- Contact Resistance: 100mΩ max.
- Insulation Resistance: 100MΩ min.
- Dielectric Strength: 250VAC for 1 minute

Mouser Stock No.	Dimensions: mm (In)	
	A Max.	B
101-TS6111T1601-EV	0.5 (.02)	4.3 (.169)
101-TS6111T1602-EV	0.6 (.024)	5.0 (.197)
101-TS6111T1603-EV	0.6 (.024)	7.0 (.275)
101-TS6111T1606-EV	0.6 (.024)	9.5 (.374)
101-TS6111T1607-EV	0.6 (.024)	13.0 (.512)

Tactile Switches

101-TS6111T1601-EV, 101-TS6111T1602-EV,
101-TS6111T1603-EV, 101-TS6111T1606-EV,
101-TS6111T1607-EV



Available from Mouser Electronics

www.mouser.com

1-800-346-6873

Specifications are subject to change without notice. No liability or warranty implied by this information. Environmental compliance based on producer documentation.

Girona, 4 de setembre de 2019

Adrià Sabater Dilmé