

Treball final de grau

Estudi: Grau en Enginyeria Mecànica

Títol: Disseny i Desenvolupament d'una Plataforma Modular de Braç Robòtic per a Finalitats Docents

Document: 1. Memòria

Alumne: Raul Gonzalez Moreno

Tutor: Narcís Palomeras Rovira

Departament: Enginyeria Mecànica i de la Construcció Industrial

Àrea: Enginyeria Mecànica

Convocatòria (mes/any): Setembre/2024

ÍNDEX

1. INTRODUCCIÓ	4
1.1. Antecedents.....	4
1.2. Objecte	4
1.3. Especificacions i abast	4
2. ESTAT DE L'ART	5
2.1. Definició de robot.....	5
2.2. Instal·lació de robots industrials.....	5
2.3. Solucions comercials de braços robòtics modulars	7
2.3.1. WLKATA Mirobot.....	8
2.3.2. RBX1 Roboteurs.....	8
2.3.3. THOR V2.0	9
2.3.4. DOBOT MAGICIAN	10
2.4. Conclusions solucions robots educatius estudiats	10
3. ESTRUCTURA MECÀNICA D'UN ROBOT	11
4. TIPUS D'ACTUADORS	14
4.1. Motor pas a pas	14
4.2. Motor brushless	14
4.3. Servomotors	15
4.4. Actuadors seleccionats	15
4.4.1. DM-S2000MD	16
4.4.2. Servomotor MG996R.....	17
4.4.3. Servomotor MG92B	17
5. DISSENY MECÀNIC.....	19
5.1. Requisits de disseny.....	19
5.2. Esbossos inicials	19
5.3. Càlculs parell dels motors.....	21
5.3.1. Motor colze.....	22
5.3.2. Motor segon colze	24

5.3.3.	Motor base	25
5.3.4.	Articulació lineal.....	27
5.3.5.	Gripper	28
5.4.	Base	30
5.5.	Connector	32
5.6.	Braç articulat.....	34
5.7.	Articulació lineal.....	36
5.8.	Elements terminals	37
5.8.1.	Gripper	37
5.8.2.	Eina tipus llapis.....	40
5.9.	Ensamblatge entre elements	40
6.	MUNTATGES.....	43
6.1.	2 GDL	43
6.1.1.	Manipulador RR ($\theta_1 - \theta_2$).....	43
6.1.2.	Manipulador RP ($\theta_1 - r_2$)	44
6.2.	3 GDL	45
6.2.1.	SCARA	45
6.2.2.	Angular	47
6.2.3.	Polar	48
6.3.	4 GDL	49
6.3.1.	SCARA	49
6.3.2.	Angular	50
7.	FABRICACIÓ	52
8.	LLISTA DE MATERIALS (BOM)	54
9.	MANUAL DE MUNTATGE.....	56
9.1.	Muntatge base articulada.....	56
9.2.	Muntatge connector	58
9.3.	Muntatge braç articulat	61
9.4.	Muntatge articulació lineal	64

9.5.	Muntatge Gripper.....	66
9.6.	Muntatge element terminal SCARA	68
10.	RESUM DEL PRESSUPOST	70
11.	CONCLUSIONS.....	71
12.	RELACIÓ DE DOCUMENTS.....	73
13.	BIBLIOGRAFIA	74
14.	GLOSSARI.....	75
A.	CÀLCULS DETALLATS	76
A.1.	Primer colze	76
A.1.1.	Forces inercials muntatge angular 4GDL.....	76
A.1.2.	Forces gravetat muntatge angular 4GDL	76
A.2.	Segon colze	77
A.2.1.	Forces inercials muntatge angular 4GDL.....	77
A.3.	Base	77
A.3.1.	Forces inercials muntatge SCARA 4GDL.....	77
B.	PARÀMETRES D'IMPRESSIÓ	79

1. INTRODUCCIÓ

1.1. Antecedents

La robòtica és una disciplina en ràpida expansió amb aplicacions en àmbits tan diversos com la indústria, la medicina, la logística i l'educació. A l'Escola Politècnica de la Universitat de Girona, és imperatiu comptar amb recursos didàctics eficaços per a la formació en robòtica. En aquest context, l'ús de braços robòtics modulars es presenta com una eina de gran valor per a la docència, ja que permet als estudiants explorar conceptes de cinemàtica, dinàmica i control en un entorn pràctic. Malauradament, a excepció de la família de manipuladors OpenManipular i els seus derivats, hi ha poques solucions comercials modulars disponibles, i les que existeixen són relativament costoses (més de 1000 €) i manquen de flexibilitat en termes de personalització i adaptació als requisits específics del programa educatiu.

1.2. Objecte

L'objectiu d'aquest Treball Final de Grau (TFG) és abordar aquestes limitacions mitjançant el disseny i la construcció d'una plataforma modular que ofereixi articulacions angulars i prismàtiques amb un grau de llibertat (1 DoF) que es puguin connectar fàcilment entre elles per a construir diferents manipuladors adaptables amb finalitats docents. Aquesta plataforma ha de ser econòmica i fàcil de replicar i muntar.

1.3. Especificacions i abast

Per assolir aquest objectiu, es realitzarà un estudi exhaustiu de les diferents alternatives de servomotors, motors pas a pas i encòders disponibles. Així mateix, es durà a terme una investigació sobre els materials i els processos de fabricació més idonis per a construir els elements que permetran la connexió dels motors seleccionats. Es dissenyarà cada articulació amb l'objectiu de facilitar-ne la connexió mecànica entre elles i d'oferir la major diversitat de configuracions possibles. Es construiran almenys quatre articulacions i un element terminal tipus pinça. Finalment, es procedirà a l'avaluació dels diversos manipuladors resultants en un context docent. El projecte es publicarà en codi obert de tal manera que pugui ser fàcilment reproduïble per altres centres educatius.

2. ESTAT DE L'ART

2.1. Definició de robot

La IFR (International Federation of Robotics) defineix el terme de robot industrial basant-se en la definició que dona la *ISO 8373:2021* com a un manipulador controlat automàticament, reprogramable, polivalent, programable en tres o més eixos, que pot estar fixat en un lloc o en una plataforma mòbil per a utilitzar-lo en aplicacions d'automatització en un entorn industrial. Els termes utilitzats en la definició volen dir:

- Controlat automàticament: el sistema del control del robot opera d'acord amb el programa de tasques. El programa de tasques és un conjunt d'instruccions per al moviment i les funcions auxiliars que defineixen la tasca específica prevista. L'operació oposada és l'operació manual, on un operador humà utilitza dispositius d'entrada per controlar els moviments de la màquina.
- Reprogramable: dissenyat perquè els moviments programats o les funcions auxiliars es puguin canviar sense alteració física. Les alteracions físiques són alteracions del sistema mecànic.
- Polivalent: capaç de ser adaptat a una aplicació diferent amb alteració física.
- Manipulador: màquina amb la finalitat d'agafar i/o moure objectes com peces o eines. L'element terminal no forma part del manipulador.
- Fixat en un lloc o mòbil: el robot pot estar muntat en un punt fix, però també pot estar en un punt mòbil com unes guies.

2.2. Instal·lació de robots industrials

D'acord amb la informació presentada per la IFR, la instal·lació de robots industrials està creixent notablement any rere any. La *Figura 1* mostra com l'any 2022 es va assolir un nou rècord d'instal·lacions de robots industrials, amb un total de 553,052 unitats. Per segon any consecutiu, les instal·lacions van superar la marca de 500,000 unitats, sumant un 5% a la xifra d'unitats instal·lades el 2021.

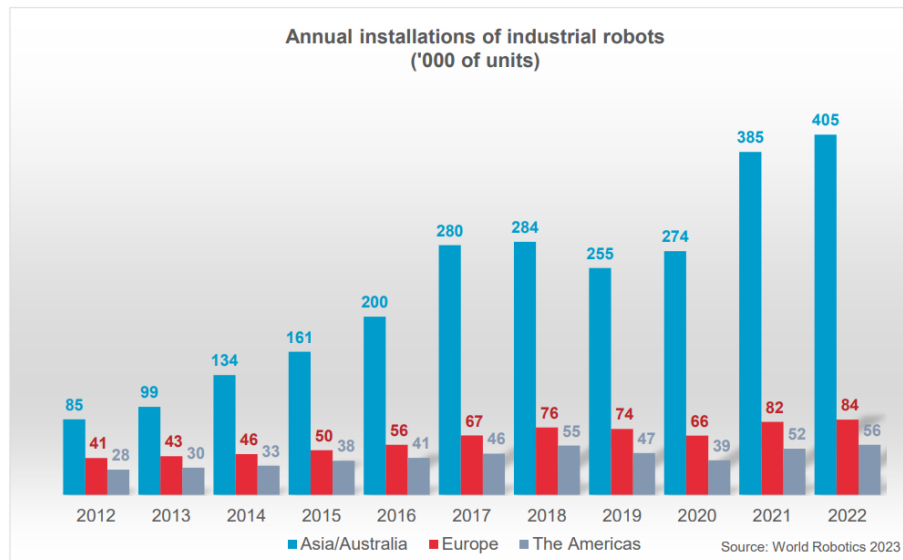


Figura 1. Instal·lacions anuals de robots industrials per zones ('000 unitats). (World Robotics, 2023)

La *Figura 2* mostra les instal·lacions anuals de robots industrials per indústria a nivell mundial, destaca la indústria de l'electrònica, sent la principal clienta de robots industrials el 2022, amb 157,000 unitats instal·lades, seguint una tendència creixent des del 2020. La indústria de l'automòbil, que havia perdut el primer lloc l'any 2020, va instal·lar 136,000 robots, mantenint-se en segona posició amb un creixement notable. Tot i les interrupcions en la cadena de subministrament i la pandèmia, la demanda de robots en aquestes indústries ha continuat augmentant, impulsada per la necessitat de modernitzar la producció i la transició cap a tecnologies més avançades. Les densitats de robots han crescut especialment a Àsia, Europa i "Les Amèriques", i s'espera que les subvencions governamentals ajudin a impulsar encara més aquesta tendència.

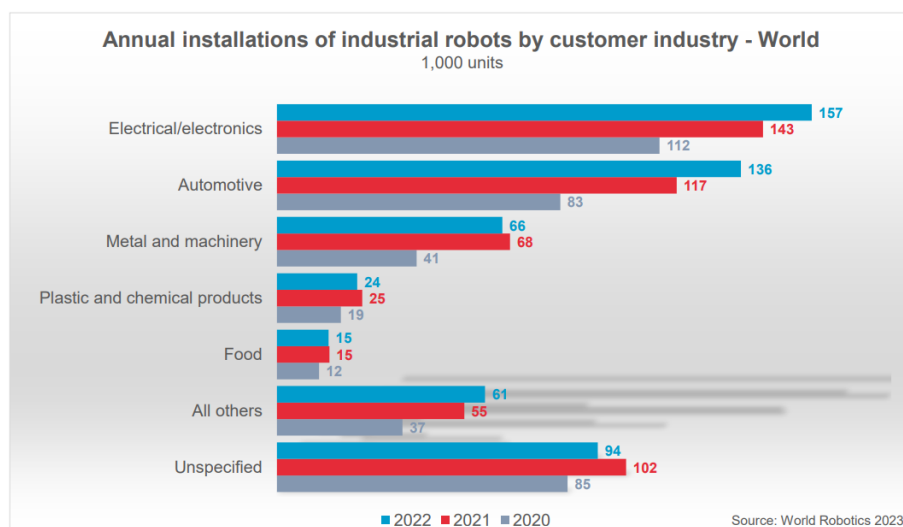


Figura 2. Instal·lacions anuals de robots industrials per tipus d'indústria. (World Robotics, 2023)

La *Figura 3* mostra les instal·lacions anuals de robots industrials a nivell mundial des del 2017 amb una projecció fins al 2026, destacant un creixement constant al llarg dels anys. S'espera que aquesta tendència positiva faci assolir les 600,000 unitats instal·lades el 2024 i superant les 700,000 unitats el 2026. Tot i les perspectives de recessió a Europa, el mercat Nord-americà i asiàtic mantindran un fort creixement en la demanda de robots, especialment a la Xina i al Japó.

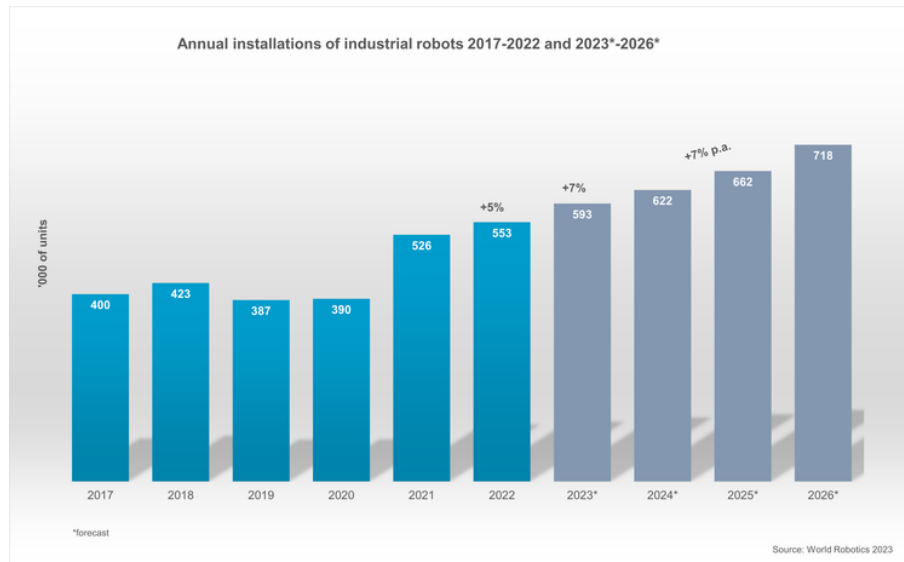


Figura 3. Instal·lacions anuals de robots industrials 2017-2022 i previsió 2023-2026. (World Robotics, 2023)

2.3. Solucions comercials de braços robòtics modulars

Ha quedat demostrada la presència de la robòtica en la indústria actual i la tendència d'aquesta en un futur proper, sobretot quan parlem de processos de fabricació i automatització. Degut a aquest creixement és necessari que les universitats formin als futurs enginyers en aquests camps, ja que seran els encarregats de dissenyar i programar aquests robots.

Perquè el procés de formació sigui correcte i complet, caldrà que no només s'apregui la teoria de robots, sinó que a més els estudiants disposin d'una formació pràctica per comprendre la matèria i posar en pràctica solucions a possibles conflictes o problemes. S'ha dut a terme una petita recerca sobre les solucions comercials actuals de braços robòtics educatius.

2.3.1. WLKATA Mirobot

WLKATA Mirobot és un braç robòtic d'escriptori dissenyat per a l'educació, la investigació i la pràctica en robòtica. Compta amb 6 GDL, que li donen versatilitat per realitzar una àmplia gamma de moviments i tasques amb precisió. Està construït principalment amb plàstic ABS i alumini, a més compta amb diversos elements terminals per variar la seva funcionalitat. Té un pes de 1,5 kg i pot carregar amb una càrrega màxima de 400 g, tot i que la càrrega recomanada és de 250 g amb una precisió de 0,2 mm. Pel que fa a la programació, el seu controlador principal és un Arduino 2560 i pot ser controlat mitjançant diverses plataformes i llenguatges com ROS, Matlab, Arduino, Python o Blockly entre altres. El preu del WLKATA Mirobot varia segons el kit i els accessoris inclosos, però generalment es troba en un rang de 1500 a 1800 €. A la *Figura 4* es mostra el WLKATA Mirobot.



Figura 4. WLKATA Mirobot. (WLKATA, 2024)

2.3.2. RBX1 Roboteurs

El RBX1 és un braç robòtic de 6 GDL, construït íntegrament amb components impresos. Funciona amb 7 stepper motors i utilitza mecanismes de corretges en el seu interior, el controlador principal és una Raspberry Pi. El preu del kit amb la resta de components que no són imprimibles és de 800 €. A la *Figura 5* es mostra el RBX1 Roboteurs.

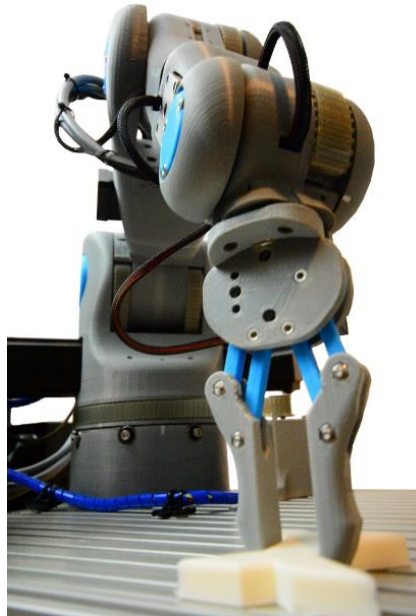


Figura 5. RBX1 Roboteurs. (Roboteurs, 2024)

2.3.3. THOR V2.0

Thor V2.0 és un braç robòtic Open Source imprès en 3D, amb 6 GDL, amb força per a carregar fins a 750 g i un abast de 300 mm que el converteix en un robot capaç d'executar qualsevol tasca a nivell de braços robòtics d'entre 3000 i 4000 €. La seva armadura i engranatges són completament impresos en 3D, utilitza un total de 7 stepper motors per transmetre el moviment a les diferents articulacions. Tot el conjunt es controlat per un microprocessador Arduino Mega. El cost total del Thor V2.0 és d'aproximadament 400 €. La *Figura 6* mostra el THOR V2.0.



Figura 6. THOR V2.0. (Upctmakers, 2024)

2.3.4. DOBOT MAGICIAN

El Dobot Magician és un braç robòtic d'escriptori multifuncional de reduïdes dimensions, pensat per a la educació en la robòtica de forma pràctica. Compta amb 4 GDL i diferents elements terminals que li permet realitzar una varietat de moviments i tasques com són la impressió 3D, gravat làser, escriptura i dibuix. Construït principalment de plàstic ABS i aliatge d'alumini, té un pes de 3,4 kg i pot manipular pesos de fins a 500 g amb una precisió de 0,2 mm. En quant a la programació, pot ser controlat a través de múltiples plataformes i llenguatges, incloent Blockly, Python i C++. El preu del Dobot Magician varia depenent dels accessoris inclosos, generalment es troba en un rang d'entre 1300 a 1800 €. A la *Figura 7* es mostra el DOBOT MAGICIAN.



Figura 7. DOBOT MAGICIAN. (Dobot, 2024)

2.4. Conclusions solucions robots educatius estudiats

No s'ha trobat cap plataforma robòtica amb finalitats educatives modular. Els braços robòtics educatius estudiats estan tancats a una únic muntatge, sent únicament multifuncional canviant l'element terminal. La majoria tenen un elevat preu fent-los difícilment accessibles per a determinats centres educatius, que necessiten adquirir-ne diverses unitats. A més, comporten un risc en la manipulació d'aquests sense certs coneixements previs consolidats amb una costosa reparació en cas de mal ús o trencament.

3. ESTRUCTURA MECÀNICA D'UN ROBOT

Mecànicament, un robot està format per una sèrie d'elements o eslavons units mitjançant articulacions, permetent un moviment relatiu entre dos elements consecutius. Un gran nombre de robots manipuladors industrials guarden certes similituds amb la anatomia del braç humà, el que fa que en ocasions es faci referència a certs elements que componen el robot, utilitzant termes com cos, colze i canell.

El moviment de cada articulació pot ser de desplaçament, de gir o una combinació de tots dos. L'any 1876, Franz Reuleaux va identificar els possibles moviments relatius entre dos elements en contacte, denominant parells inferiors a aquells en el que el contacte es realitza entre superfícies i parells superiors als que es produeixen en un contacte puntual o lineal. La *Figura 8*, mostra els sis possibles parells inferiors establerts per Reuleaux. Cada un dels moviments independents que poden realitzar cada articulació respecte a l'anterior, es denomina grau de llibertat. S'indiquen el numero de GDL de cada tipus d'articulació corresponent als parells inferiors.

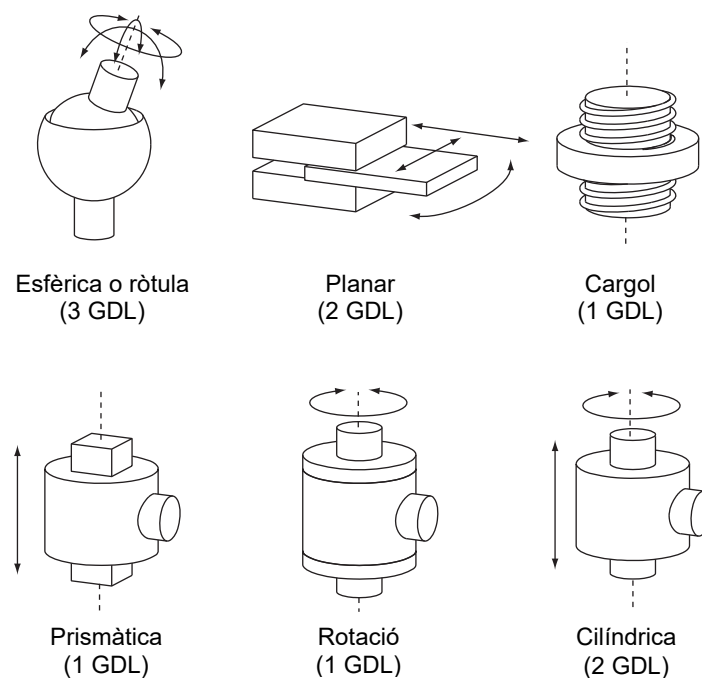


Figura 8 – Els sis parells inferiors de Reuleaux. (Fundamentos de Robótica 2ª Edición, 2024)

A la pràctica, la gran majoria de robots només utilitzen les articulacions de rotació i prismàtica. En cas que un robot tingués alguna articulació amb més d'un grau de llibertat, es podria assumir que es tracta de varies articulacions diferents, unides per eslavons de longitud nul·la. Una cadena cinemàtica és una sèrie de eslavons o barres unides per articulacions, els robots

manipuladors son, en la gran majoria, cadenes cinemàtiques obertes amb les articulacions de tipus rotació o prismàtica (un sol GDL cadascuna), sent generalment senzill trobar el nombre de graus de llibertat del robot, ja que, coincideixen amb el nombre d'articulacions que es compona. L'ús de diferents combinacions d'articulacions en un robot dona lloc a diferents configuracions, amb característiques a tenir en compte tant en el disseny i construcció del robot com a la seva aplicació. La *Figura 9* mostra les combinacions més freqüents de robots amb cadenes cinemàtiques obertes.

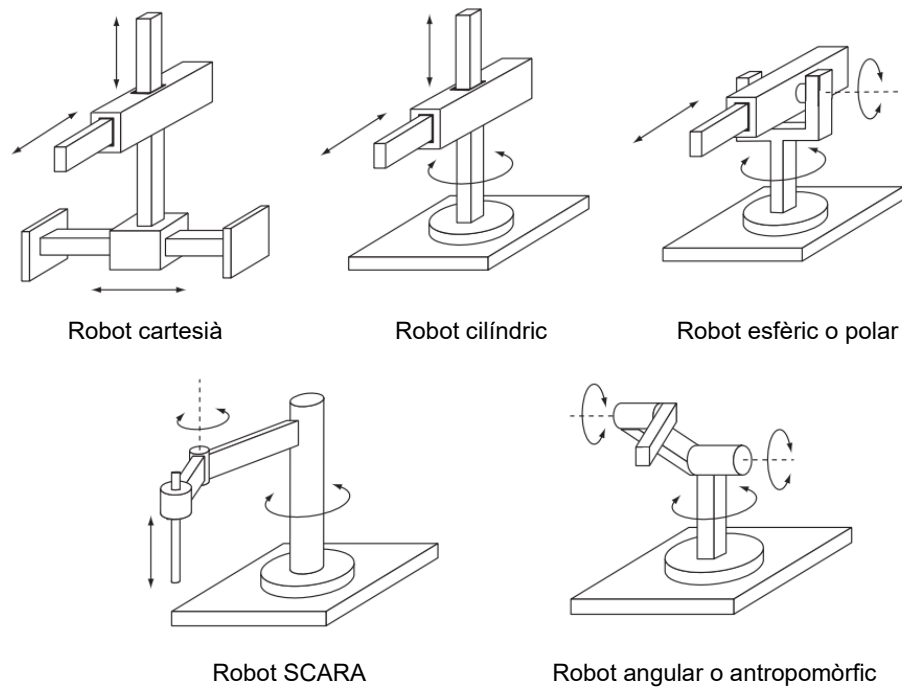


Figura 9 – Configuracions més freqüents en robots industrials. (Fundamentos de Robótica 2ª Edición, 2024)

La major part de robots manipuladors actuals, responen a l'estructura angular, també coneguda com antropomòrfica, representant aproximadament el 45%, seguits de les configuracions cartesiana i SCARA.

- **Cartesiana:** configuració caracteritzada per les articulacions prismàtiques, les quals fan el posicionament a l'espai de treball. Disposa de tres moviments lineals que coincideixen amb els moviments en eixos X, Y i Z. Configuració utilitzada per a aplicacions amb un gran camp de treball i que requereixin una gran exactitud, normalment treballs de "pick and place".
- **Cilíndrica:** es compta amb una base rotatòria i una articulació prismàtica per als moviments d'alçada i radi, es a dir, compta amb un moviment rotacional i dos lineals. Útil quan es busca una adaptació en espais cilíndrics, es sol utilitzar per a assemblatges o soldadura per punts.

- Esfèrica: configuració composta per dos juntes rotatòries i una prismàtica, això permet apuntar cap a moltes direccions. Compta amb tres moviments bàsics: rotació, angular i radial. Es sol utilitzar per a manipulació en màquines eines i varis tipus de soldadures.
- SCARA: es sol utilitzar en treballs de "pick and place".
- Angular: configuració en què s'utilitzen tres eixos de rotació, per la qual cosa l'espai de treball que es genera és esfèric. Dues de les articulacions compten amb moviment rotacional respecte al pla vertical i l'altra (la base) respecte al pla horitzontal. Aquest disseny està basat en un braç humà.

Una vegada analitzades les principals configuracions, es va decantar per que les configuracions més complicades que inclogués la plataforma modular fossin les configuracions SCARA i angular de 4GDL. A les configuracions SCARA i angular de 3GDL vistes prèviament a la *Figura 9* li afegiríem una altra articulació rotacional a la configuració SCARA i una articulació prismàtica a la configuració angular, tenint així 4GDL en ambdues configuracions (sense comptar l'element terminal). S'ha tingut en compte que es poguessin realitzar també altres configuracions de menys GDL a disposició de l'usuari. Aquestes configuracions com s'ha comentat anteriorment són les més utilitzades en els manipuladors actuals i a més, faciliten la robustesa de la plataforma, sense la necessitat d'haver d'ampliar excessivament el disseny mecànic.

4. TIPUS D'ACTUADORS

Els actuadors del robot són una de les peces claus, ja que gràcies a aquests aconseguim el moviment del braç, es podrien comparar amb els músculs d'un ésser humà. Existeix una varietat de motors amb diferents característiques, formes de control, avantatges i desavantatges. Per tant, per a l'elecció d'un actuator s'han de considerar tots aquests factors, quedant-nos finalment amb l'actuator que més s'ajusti al nostre disseny i aplicació.

4.1. Motor pas a pas

Els motors pas a pas converteixen impulsos elèctrics en moviments angulars discrets, amb cada impuls movent el rotor una quantitat fixa d'angle, anomenat pas. El motor té diverses bobines organitzades en fases que s'activen seqüencialment per a fer girar el rotor. El controlador de motor envia una sèrie d'impulsos elèctrics precisos a les bobines, creant camps magnètics que fan girar el rotor en passos definits.

Les principals avantatges en l'ús d'aquest tipus de motors són la seva precisió, un fàcil control de la posició i velocitat, a més d'un alt parell a baixes velocitats i al no comptar amb escombretes, una bona durabilitat. No obstant, compta amb una sèrie de desavantatges, com el continu requeriment d'energia, tant en moviment com en parat i una disminució severa del parell i fiabilitat augmentant les revolucions per minut o la càrrega. Una insuficiència de parell produeix un efecte anomenat desplaçament o pèrdua de passos, requerint la instal·lació d'un sistema de retroalimentació per comprovar el correcte funcionament del motor, com pot ser un encoder.

4.2. Motor brushless

Els motors brushless utilitzen imants permanents al rotor i bobines a l'estator, amb el corrent a les bobines commutat electrònicament per crear un camp magnètic giratori que fa girar el rotor. A diferència dels motors amb escombretes, els motors brushless no tenen contactes físics per a la commutació, la qual cosa elimina el desgast mecànic i millora la durabilitat. La commutació electrònica permet un control precís de la velocitat i del parell.

Els motors brushless són duradors, ja que no tenen escombretes que es desgastin, i tenen una alta eficiència energètica generant menys calor. Ofereixen un control excel·lent de la velocitat i del parell, i són ideals per a aplicacions que requereixen un rendiment constant i

fiable. No obstant això, són més cars a causa dels components electrònics necessaris per a la commutació i requereixen controladors electrònics més complexos. A més, pot ser complicat integrar-los en sistemes existents sense modificar el disseny del controlador.

4.3. Servomotors

Un servomotor és un actuator rotatiu que permet controlar la seva posició de manera senzilla gràcies a la combinació de components que el conformen. Un motor simple és accionat pel servo controlador i el gir del motor és mesurat per un potenciòmetre o un encoder, aconseguint així un sistema de control en bucle tancat. A més, un sistema de regulació format per engranatges augmenta el parell. Un microcontrolador extern controla els servos enviant una senyal cada 20 mil·lisegons, que el servo controlador interpreta per desplaçar el servo a un angle concret segons l'amplada del pols. Generalment, els servos tenen un angle de gir de 180°, alguns permeten un gir total de 360°, però mai poden donar més d'una volta (excepte els continus). La connexió dels servomotors sol ser de tres cables: alimentació (entre 4 i 9 volts), terra i senyal. En alguns casos, un cable extra proporciona retroalimentació al control principal, retornant la posició del servo llegida per l'encoder o potenciòmetre.

Els servomotors ofereixen diverses avantatges i desavantatges. Com a avantatges principals, destaca el seu fàcil control i programació, ja que només necessiten un microcontrolador que envia els polsos necessaris, així com el seu fàcil muntatge i simplicitat, perquè tot està integrat dins del servo, incloent-hi el controlador i l'encoder per al control de posició. A més, tenen un parell acceptable, que varia segons el model, gràcies a la reductora d'engranatges. Com a desavantatges, els servos estan limitats al seu angle de gir i no poden donar més d'una volta completa. També presenten dificultats per triar els components interns, com l'encoder o el controlador, cosa que és possible si es munta el sistema de manera personalitzada. A més, la dependència d'una senyal d'entrada per mantenir la posició fixa provoca una lleugera vibració, ja que el servo es mou cap endavant i cap enrere entre polsos, la qual cosa pot causar una lleu falta de precisió.

4.4. Actuadors seleccionats

S'han triat els servomotors com a principals actuadors de la plataforma modular, degut a que les seves característiques són les que més s'avenen als requisits del projecte, com l'objectiu és el desenvolupament d'un manipulador amb finalitats educatives, els servomotors seran els més adequats degut a la seva velocitat instantània, la suavitat dels moviments i el rendiment.

Mecànicament també simplifica el muntatge i la manipulació de la plataforma modular, requisit primordial del projecte. Si es volgués desenvolupar un manipulador industrial, s'hagués fet una altra selecció, valorant altres paràmetres com la carrega a manipular i possiblement duent a terme un sistema de transmissió per engranatges o corretges per dotar al manipulador de molt més torque.

Es va dur a terme una cerca de servomotors, comparant les característiques entre ells i mirant quin s'avé més a cada articulació amb l'ajuda dels càlculs. Com cada articulació requeriria d'un torque diferent, s'han triat tres servomotors, un per la base amb un torque més elevat, un per la resta d'articulacions (braços) i un més petit amb un parell i pes inferior per l'articulació prismàtica i l'element terminal. A continuació s'exposen els tres tipus de servomotors que s'utilitzaran per a dur a terme la plataforma modular i les seves principals característiques.

4.4.1. DM-S2000MD

El servomotor DM-S2000MD és un servomotor digital de la marca DOMAN RC, funciona amb pinyonera metàl·lica amb rodament de boles intern, tal i com es mostra a la *Figura 10*.



Figura 10. Servomotor DM-S2000MD pinyonera metàl·lica interna. (DOMAN RC, 2024)

A la *Taula 1* es mostren les característiques principals del servomotor DM-S2000MD.

Servomotor DM-S2000MD	
Voltatge d'operació (V)	4,8 - 7,4
Corrent de funcionament (mA)	500 - 900
Velocitat d'operació (s/60°)	0,18 - 0,16
Torque (kg·cm)	17,8 - 21,5
Capacitat de rotació (°)	180
Dimensions (mm)	40 x 20 x 43
Pes (g)	55

Taula 1. Característiques servomotor DM-S2000MD

4.4.2. Servomotor MG996R

El servomotor MG996R és un servomotor digital que també funciona amb pinyonera metàl·lica amb rodament de boles intern, és molt més comú i accessible que el DM-S2000MD però té un torque considerablement inferior. A la *Figura 11* es mostra el servomotor MG996R.



Figura 11. Servomotor MG996R. (TowerPro, 2024)

A la *Taula 2* es mostren les característiques principals del servomotor MG996R.

Servomotor MG996R	
Voltatge d'operació (V)	4,8 - 7,2
Corrent de funcionament (mA)	500 - 900
Velocitat d'operació (s/60°)	0,17 - 0,14
Torque (kg·cm)	9,4 - 11
Capacitat de rotació (°)	180
Dimensions (mm)	40,7 x 19,7 x 42,9
Pes (g)	55

Taula 2. Característiques servomotor MG996R.

4.4.3. Servomotor MG92B

El MG92B és un micro servo digital que també funciona amb pinyonera metàl·lica amb rodament de boles intern, és una versió millorada del MG90S (típic micro servo que es fan servir en els kits d'Arduino). La seva mida i pes, el fa ideal per el motor de l'element terminal de tipus pinça. A la *Figura 12* es mostra el servomotor MG92B.



Figura 12. Micro servomotor MG92B (TowerPro, 2024)

A la *Taula 3* es mostren les característiques principals del servomotor MG92B.

Servomotor MG92B	
Voltatge d'operació (V)	5 – 6,6
Corrent de funcionament (mA)	200 - 400
Velocitat d'operació (s/60°)	0,13 - 0,08
Torque (kg·cm)	3,1 - 3,5
Capacitat de rotació (°)	360
Dimensions (mm)	22,8 x 12 x 31
Pes (g)	13,8

Taula 3. Característiques servomotor MG92B.

5. DISSENY MECÀNIC

En aquest capítol es relatarà tot el procés seguit fins a arribar a la versió final de la plataforma modular, partint de les especificacions inicials i esmentant altres factors de disseny de cada articulació o component.

5.1. Requisits de disseny

Les principals premisses per al disseny són les següents:

- Disseny modular: permetent múltiples configuracions, assegurant flexibilitat i adaptabilitat.
- Disseny simplificat: fàcil d'assemblar i manipular, per facilitar l'ús i manteniment.
- Cost econòmic baix: per garantir que la reparació o substitució de peces sigui assequible en cas de ruptura o desgast.
- Reproduïble i replicable: que permeti una alta relació entre alumnes i plataformes modulares, promovent una àmplia implementació educativa.

5.2. Esbossos inicials

La idea principal era que la plataforma modular pogués incorporar el màxim nombre de muntatges (configuracions de robots) diferents amb el mínim nombre de peces i que fossin les mateixes per qualsevol muntatge. Tenint en compte els requisits de disseny esmentats anteriorment i utilitzant fins a 3 articulacions angulars i una articulació prismàtica.

Es va inspirar el disseny en les dues estructures amb més GDL i més utilitzades en la indústria, la configuració SCARA (*Figura 13*) i la configuració angular (*Figura 14*).

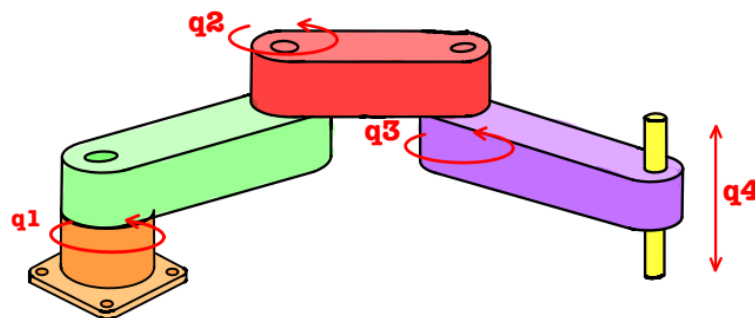


Figura 13. Esbós inicial inspirat en la configuració SCARA.

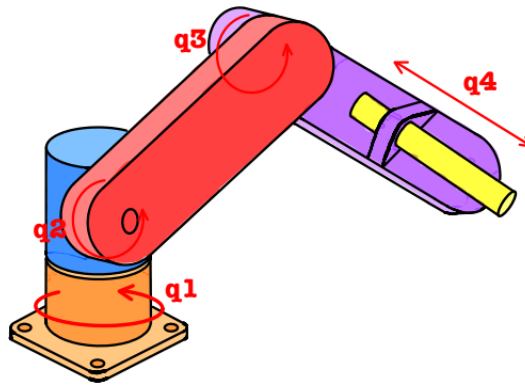


Figura 14. Esbós inicial inspirat en la configuració angular.

Alguns problemes que van sorgir durant la primera fase de disseny era quins components articular i quins no, és a dir, articulant el braç vermell, era útil i funcional per al muntatge angular un cop s'ensamblava amb la base, en canvi, en el muntatge "SCARA", requeria d'una peça no articulada prèvia entre la base i el braç, per no fer coincidir dos articulacions rotacionals en el mateix eix.

Es van valorar altres muntatges del tipus SCARA, com mostra la *Figura 12*, es va descartar degut a que per donar-li una mínima estabilitat a l'articulació lineal, requeria d'un sobredimensionament i dificultava la manipulació i canvi de muntatge. Per tant, es va optar per deixar sempre l'articulació prismàtica com a últim GDL de qualsevol muntatge que la inclogués.

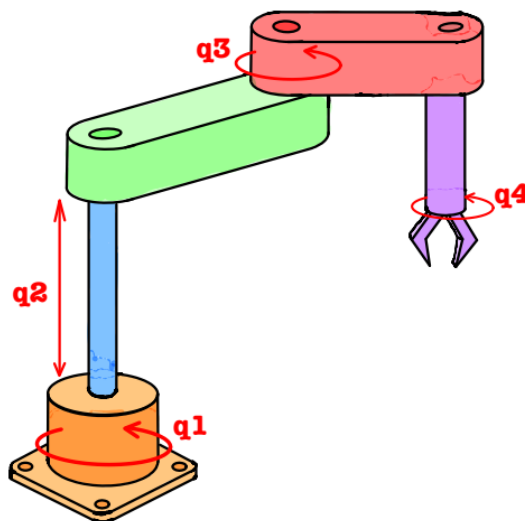


Figura 15. Esbós configuració SCARA descartada.

Per a l'element terminal, es va començar amb el més convencional de tipus pinça (gripper), però es va veure que era poc funcional en el muntatge de tipus SCARA, per aquest tipus de

muntatge era més útil una eina que explotés el treball en el pla horitzontal com podia ser un element de subjecció d'un retolador o llapis, tal i com es mostra a la *Figura 16*.

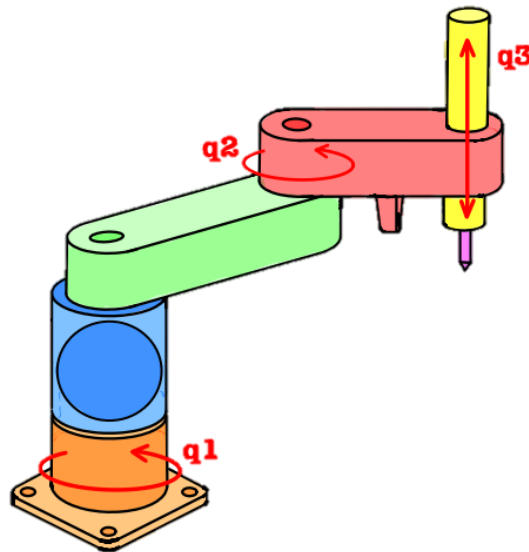


Figura 16. Esbós muntatge SCARA amb element terminal tipus llapis

Polint aquesta idea és varen dissenyar les diferents peces que formaven la plataforma modular articulada, a continuació es detalla breument el procés de disseny de cada part. Posteriorment es mostren alguns dels muntatges que es poden dur a terme amb les parts esmentades.

5.3. Càlculs parell dels motors

Per al dimensionament dels motors en cada articulació, s'han centrat els càlculs en els muntatges més crítics i exigents per a la plataforma modular, els dos de 4 GDL. Centrant-se en els punts que més parell requereixen del braç (els colzes i la base), realitzant els càlculs quan el braç està en la seva màxima extensió (paral·lel a terra) i l'articulació lineal estirada al seu màxim. Si el parell del motor és major al parell requerit, significa que el motor no tindrà problema en moure l'articulació.

Alguns dels paràmetres principals que s'han de conèixer són les dimensions de cada articulació i pesos que actuen. A la *Taula 4* es mostren els principals paràmetres que s'han utilitzat per als càlculs i nomenclatura d'aquests. Les longituds de les parts surten directament del disseny, el pes s'ha pogut aproximar a partir dels arxius STL i l'Slicer, tenint en compte la resta de components que porten (inserts roscats, cargols,...). La informació dels motors s'ha extret directament dels seus datasheet corresponents, el temps d'acceleració es suposa que es d'un segon.

Nomenclatura	Descripció	Valor	Unitats
L_B	Longitud braç	0,085	m
m_B	Massa braç	0,200	kg
L_{AL}	Longitud articulació lineal	0,170	m
m_{AL}	Massa articulació lineal	0,150	kg
L_P	Longitud pinça	0,090	m
m_P	Massa pinça	0,150	kg
L_c	Longitud al connector	0,090	m
m_c	Massa connector	0,050	kg
m_{Mg}	Massa motor gran	0,055	kg
m_{Mp}	Massa motor petit	0,013	kg
L_{MP}	Longitud al motor petit	0,025	m
m_O	Massa objecte	0,025	kg
L_O	Longitud a l'objecte	0,030	m
rps	Velocitat de gir del servo	1	rps
t_a	Temps d'acceleració	1	s

Taula 4. Paràmetres principals utilitzats en els càlculs.

Es mostren els càlculs simplificats, la resta de càlculs detallats es poden trobar a l'Annex A del present document.

5.3.1. Motor colze

La Figura 17 mostra el cas crític per al muntatge de 4 GDL angular.

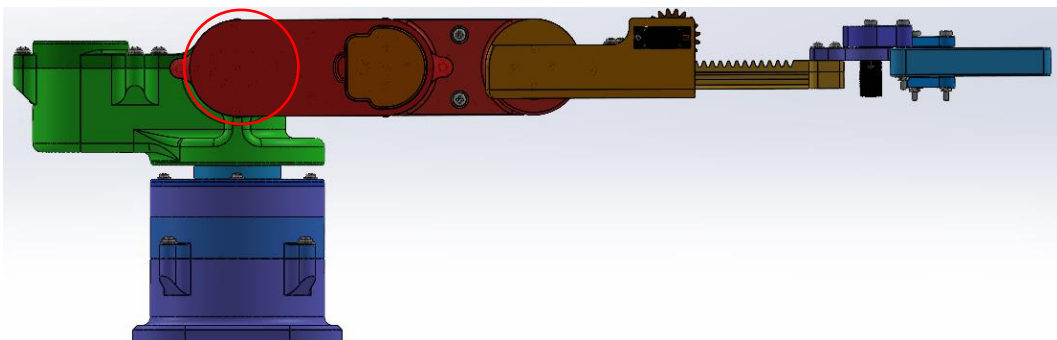


Figura 17. Cas crític colze muntatge angular 4GDL.

Començant per el càlcul del parell del motor del colze, es tindrà en compte la força que genera la gravetat i les forces inercials. Es suposa que el centre de gravetat dels braços, articulació lineal i pinça estan en el centre. Es suposa que s'aixeca un objecte de 25 g. El diagrama de forces és el següent (Figura 18):

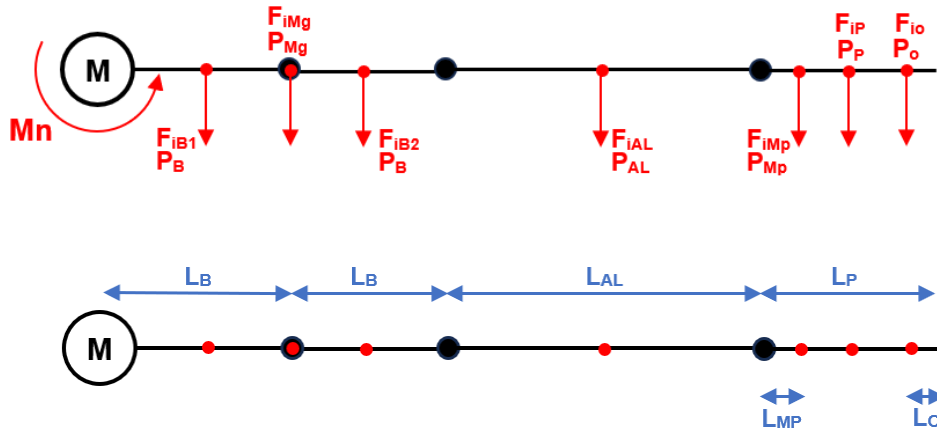


Figura 18. Diagrama de forces primer colze muntatge angular 4GDL.

En primer lloc es calculen les forces inercials a partir de la fórmula:

$$F_i = m \cdot a = m \cdot \frac{rps \cdot 2\pi \cdot L}{t_a} \quad (\text{Eq 1.})$$

A continuació es calculen les forces de la gravetat, multiplicant cada massa per la gravetat.

$$P_X = m_X \cdot g \quad (\text{Eq 2.})$$

Finalment, es calcula el parell necessari multiplicant cada força (inercial i per gravetat, calculades prèviament) per la seva distància corresponent.

$$\begin{aligned} Mn = & (F_{iB1} + P_B) \cdot \frac{L_B}{2} + (F_{iMg} + P_{Mg}) \cdot L_B + (F_{iB2} + P_B) \cdot \left(L_B + \frac{L_B}{2}\right) + (F_{iAL} + P_{AL}) \cdot \left(2L_B + \frac{L_{AL}}{2}\right) \\ & + (F_{iMp} + P_{Mp}) \cdot (2L_B + L_{AL} + L_{MP}) + (F_{iP} + P_P) \cdot \left(2L_B + L_{AL} + \frac{L_P}{2}\right) + (F_{iO} + P_O) \\ & \cdot (2L_B + L_{AL} + L_P - L_O) = 1,727 \text{ Nm} \end{aligned}$$

A partir de les especificacions dels motors, el colze requerirà d'un servomotor que tingui un parell de treball de 2 Nm, per tant, el servomotor DM-S2000MD compleix amb el parell requerit.

El pes màxim que podria agafar aquest muntatge és de 80 g, en cas de superar aquest pes el motor treballaria per sobre del seu parell recomanat i es podria trencar.

5.3.2. Motor segon colze

Per al segon colze, el cas més crític és el mateix cas que l'anterior, el muntatge de 4 GDL angular. La *Figura 19* mostra el cas crític per al segon colze.

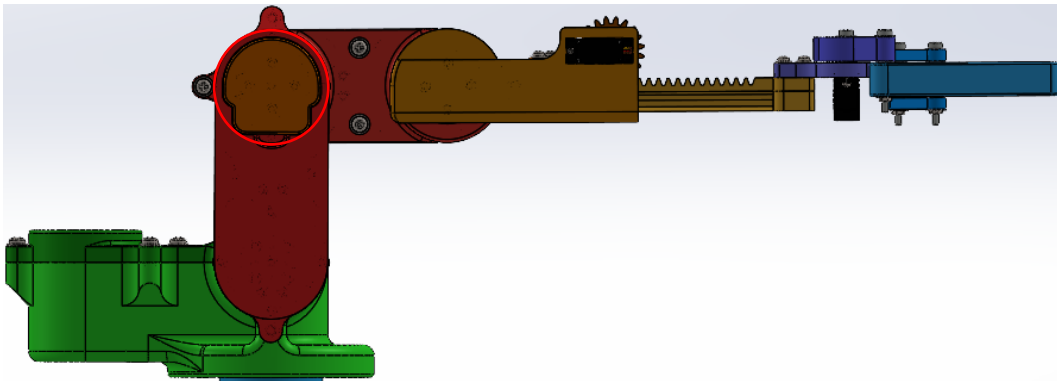


Figura 19. Cas crític segon colze muntatge angular 4GDL.

El diagrama de forces és mostra a continuació en la *Figura 20*. La força deguda a la gravetat serà la mateixa que el cas anterior.

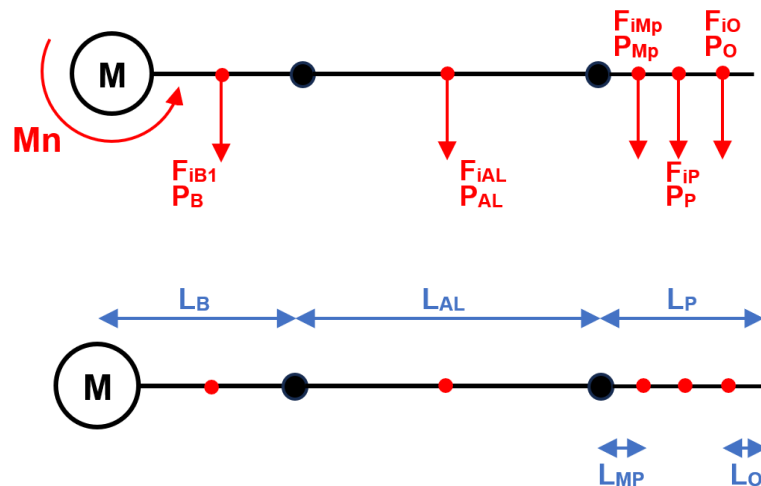


Figura 20. Diagrama de forces segon colze muntatge angular 4GDL.

En primer lloc es calculen les forces inercials a partir de la fórmula (Eq 1.) mostrada anteriorment. Es calcula el parell necessari multiplicant les forces inercials i les forces degut a la gravetat (són les mateixes que els càlculs anteriors) per la seva distància d'aplicació.

$$Mn = (F_{iB1} + P_B) \cdot \frac{L_B}{2} + (F_{iAL} + P_{AL}) \cdot \left(L_B + \frac{L_{AL}}{2} \right) + (F_{iMp} + P_{Mp}) \cdot (L_B + L_{AL} + L_{MP}) + (F_{iP} + P_P) \cdot \left(L_B + L_{AL} + \frac{L_P}{2} \right) + (F_{iO} + P_O) \cdot (L_B + L_{AL} + L_P - L_O) = 0.956 \text{ Nm}$$

Aquest segon colze no requereix de tant parell com el primer, per tant s'utilitzarà un servomotor MG996R que compta amb un parell de treball de 1 Nm. El pes màxim que podrà aixecar aquest colze és de 40 g, per tant serà el pes màxim d'aquest muntatge, limitant i sent més estricte que els 80 g calculats anteriorment.

5.3.3. Motor base

Per al motor de la base es realitzaran els càlculs des dels dos muntatges crítics de 4 GDL. Començant pel muntatge angular (*Figura 21*):

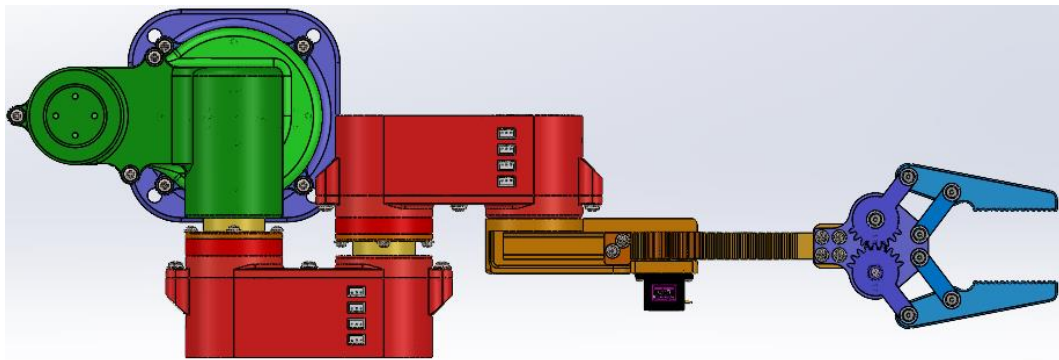


Figura 21. Cas crític base muntatge angular 4GDL.

El diagrama de forces es mostra a continuació a la *Figura 22*:

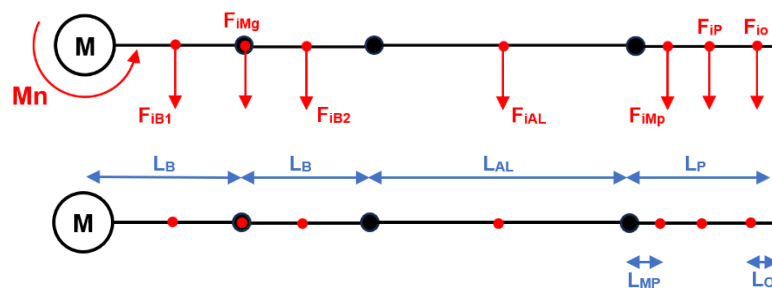


Figura 22. Diagrama de forces base muntatge angular 4GDL.

Les forces inercials són les mateixes que en els càlculs anteriors dels colzes i les forces degudes a la gravetat no intervenen, per tant, el parell necessari és el següent:

$$Mn = F_{iB1} \cdot \frac{L_B}{2} + F_{iMg} \cdot L_B + F_{iB2} \cdot \left(L_B + \frac{L_B}{2}\right) + F_{iAL} \cdot \left(2L_B + \frac{L_{AL}}{2}\right) + F_{iMp} \cdot (2L_B + L_{AL} + L_{MP}) + F_{iP} \cdot \left(2L_B + L_{AL} + \frac{L_P}{2}\right) + F_{iO} \cdot (2L_B + L_{AL} + L_P - L_O) = 0.261 Nm$$

Qualsevol dels servomotors triats compleix amb el parell requerit, s'ha escollit el DM-S2000MD per donar més estabilitat i fermesa a la base.

El segon muntatge del qual s'han realitzat càlculs del parell de la base és l'SCARA de 4 GDL (Figura 23):

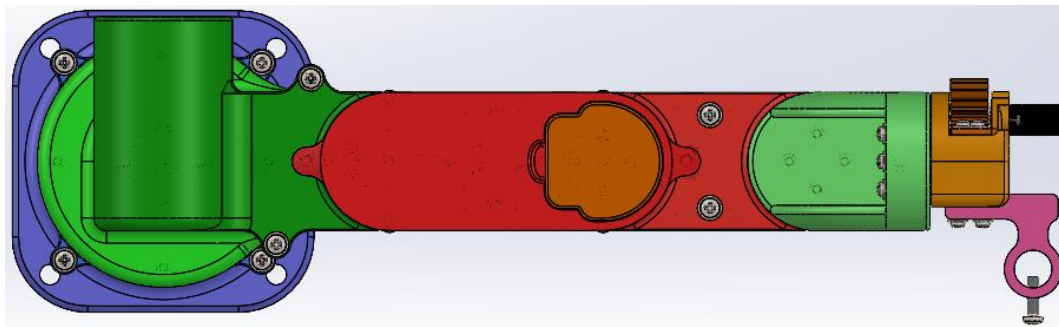


Figura 23. Cas crític base muntatge SCARA 4GDL.

El diagrama de forces és mostra a la Figura 24:

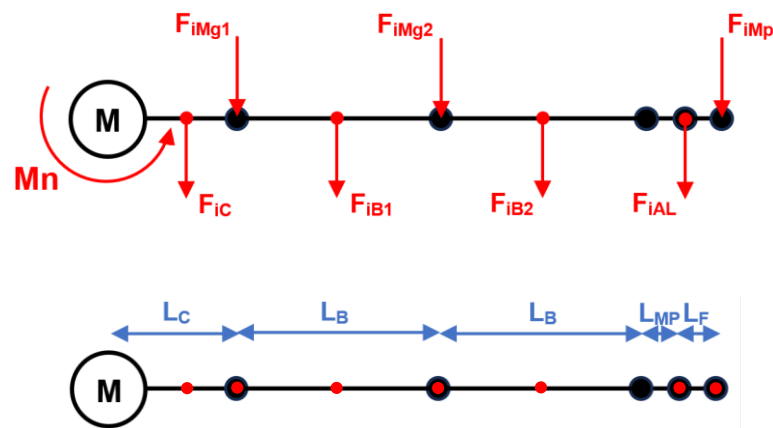


Figura 24. Diagrama de forces base muntatge SCARA 4GDL.

En primer lloc es calculen les forces inercials a partir de la fórmula anterior (Eq 1.). Calculem el parell necessari multiplicant les forces inercials per la seva distància corresponent, quedant:

$$Mn = F_{iC} \cdot \frac{L_C}{2} + F_{iMg1} \cdot L_C + F_{iB1} \cdot \left(L_C + \frac{L_B}{2} \right) + F_{iMg2} \cdot (L_C + L_B) + F_{iB2} \cdot \left(L_C + L_B + \frac{L_B}{2} \right) + F_{iAL} \cdot (L_C + 2L_B + L_{MP}) + F_{iMp} \cdot (L_C + 2L_B + L_{MP} + L_F) = 0.190 \text{ Nm}$$

Aquest segon cas és molt similar al primer, complint de sobres amb el parell requerit que demanda la base.

5.3.4. Articulació lineal

Per la articulació lineal s'ha realitzat els càlculs tenint en compte que s'utilitzarà el servomotor MG92B, degut a les seves dimensions reduïdes al igual que el pes. Es comprovarà que el parell que exerceix es suficient per desplaçar la cremallera, quan aquesta subjecta l'element terminal de tipus gripper. A la *Taula 5* s'adjunten altres paràmetres que s'han tingut en compte per els càlculs de l'articulació lineal a part dels esmentats anteriorment.

Nomenclatura	Descripció	Valor	Unitats
$\varnothing_P$	Diàmetre primitiu engranatge	0,030	m
T_{MP}	Torque motor petit	0,35	Nm
μ_{PETG}	COF PETG	0,25	-

Taula 5. Altres paràmetres per al càlcul de l'articulació lineal.

La *Figura 25* mostra l'articulació lineal en el cas que es vol estudiar.

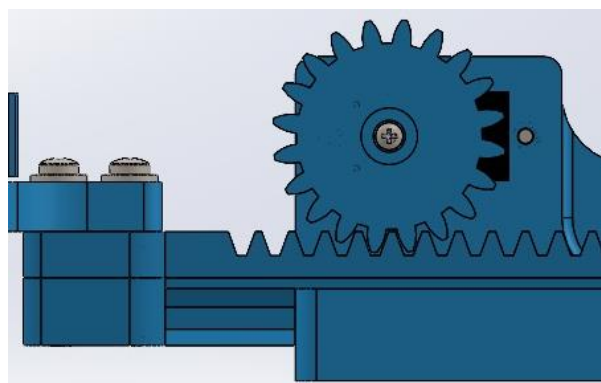


Figura 25. Cas crític articulació lineal.

Es mostra el diagrama de forces a continuació en la *Figura 26*.

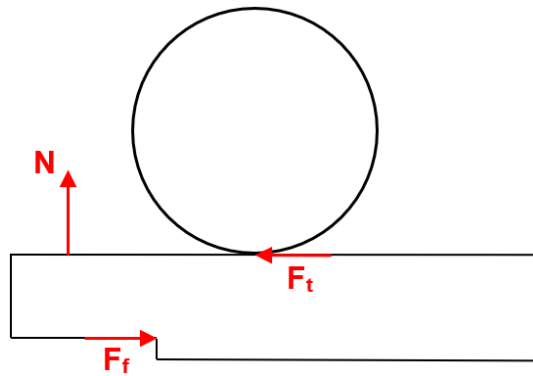


Figura 26. Diagrama de forces articulación lineal.

Per calcular la F_t (Força tangencial) que exerceix l'engranatge, es fa a partir de la següent equació:

$$F_t = \frac{T}{r} \quad (\text{Eq. 3})$$

$$F_t = \frac{0,35}{\frac{0,030}{2}} = 23,34 \text{ N}$$

Per calcular la F_f (Força de fricció), es fa a partir de la normal deguda al pes, que s'aplica sobre l'articulación lineal (la pinça) i el COF (Coefficient Of Friction) del PETG.

$$F_f = \mu \cdot N \quad (\text{Eq. 4})$$

$$F_f = 0,25 \cdot 9,81 \cdot (0,150 + 0,150 + 0,013 + 0,025) = 0,83 \text{ N}$$

La força que exerceix el motor és molt més gran que la força de fricció per tant el servomotor MG92B no tindrà cap problema per moure l'articulación lineal.

5.3.5. Gripper

Els càlculs del gripper s'han realitzat tenint en compte que s'utilitzarà el servomotor MG92B. Es comprovarà que el parell que exerceix es suficient per agafar inicialment un cub de 30 mm de 25 g, en la posició més crítica possible (vertical). A més s'aplicarà un factor de seguretat de 2 tenint en compte que un cop agafat l'objecte es desplaçarà. A la

Per la articulació lineal s'ha realitzat els càlculs tenint en compte que s'utilitzarà el servomotor MG92B, degut a les seves dimensions reduïdes al igual que el pes. Es comprovarà que el parell que exerceix es suficient per desplaçar la cremallera, quan aquesta subjecta l'element terminal de tipus gripper. A la *Taula 5* s'adjunten altres paràmetres que s'han tingut en compte per els càlculs de l'articulació lineal a part dels esmentats anteriorment. La *Figura 26* mostra el gripper en el cas que es vol estudiar.

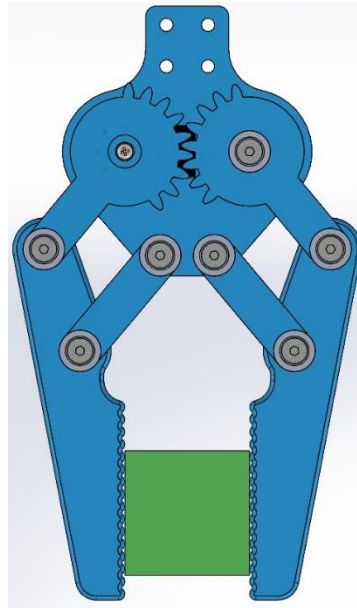


Figura 27. Cas crític gripper.

Es mostra el diagrama de forces a continuació en la *Figura 28*.

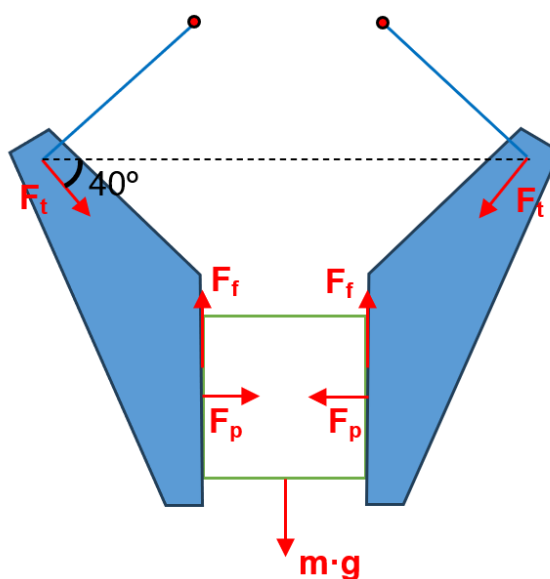


Figura 28. Diagrama de forces gripper.

La força que exerceix la meitat del gripper és:

$$F = \frac{T}{d} \cdot \cos(40) \quad (\text{Eq. 5})$$

$$F = \frac{0,35}{0,0305} \cdot \cos(40) = 8,791 \text{ N}$$

La força de fricció, aplicant el factor de seguretat de transport esmentat anteriorment es calcula:

$$F_f = \frac{m \cdot g}{\mu} \cdot 2 \quad (\text{Eq. 6})$$

$$F_f = \frac{0,025 \cdot 9,81}{0,25} \cdot 2 = 1,962 \text{ N}$$

La força que exerceix el servomotor MG92B compleix amb la força requerida per subjectar un objecte de 25 g amb un factor de seguretat de 2. Amb aquest factor de seguretat de transport podria manipular un objecte de fins a 110 g.

5.4. Base

Component fonamental que proporciona estabilitat i mobilitat al sistema, al ser el primer element, és el que haurà de suportar una major força, per tant es va decidir fer-la articulada i que el motor formés part d'ella.

A part de les especificacions de disseny principals nombrades anteriorment, s'han tingut altres paràmetres en compte. Per tal de simplificar el muntatge es va decidir que l'eix del servomotor estigués al centre de la base, es van manejar altres propostes però es van descartar per el sobredimensionament que comportaven. Per tant la transmissió amb l'eix del servomotor és directa. La *Figura 29* mostra el primer disseny que es va dur a terme, amb una vista de tall interior per veure la fixació.

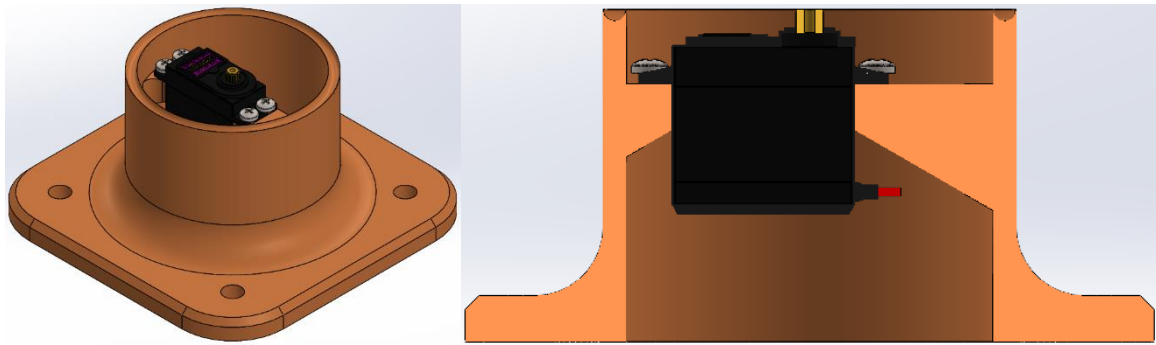


Figura 29. Disseny primera versió base articulada.

La primera versió complia al màxim amb el requisit de simplicitat, fins i tot massa, mecànicament era molt pobre. Després d'imprimir-la per fer unes quantes proves (no només de la base), l'estabilitat era nul·la quan es treballava amb 3GDL o fins i tot amb 2GDL, afectant greument a la precisió. Per això es va optar per un redisseny, afegint components mecànics que milloressin l'estabilitat, tal i com es mostra a la *Figura 30*.

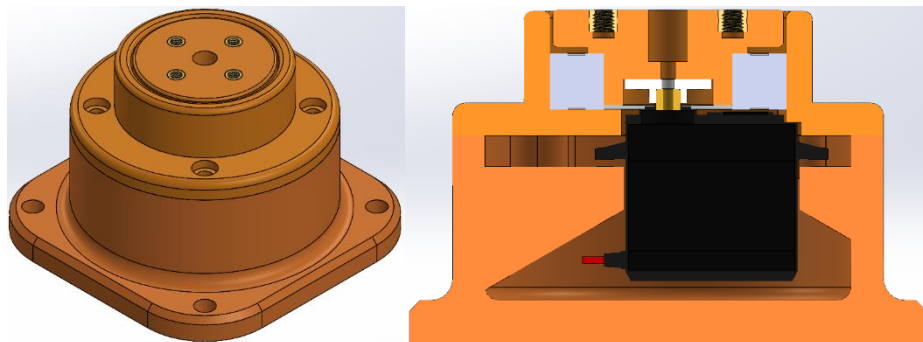


Figura 30. Disseny segona versió base articulada.

En aquesta segona versió es va implementar un rodament per tal de donar-li a la base aquesta estabilitat que mancava en la versió anterior. Es van afegir més parts impreses (tapa, peça de sortida acoblada al acoblador cilíndric del servo,...) pensades per incorporar aquest rodament. No es va arribar a provar aquesta versió, degut a que es va optar per una millora més en la que va ser la versió final, que es mostra a la *Figura 31*.

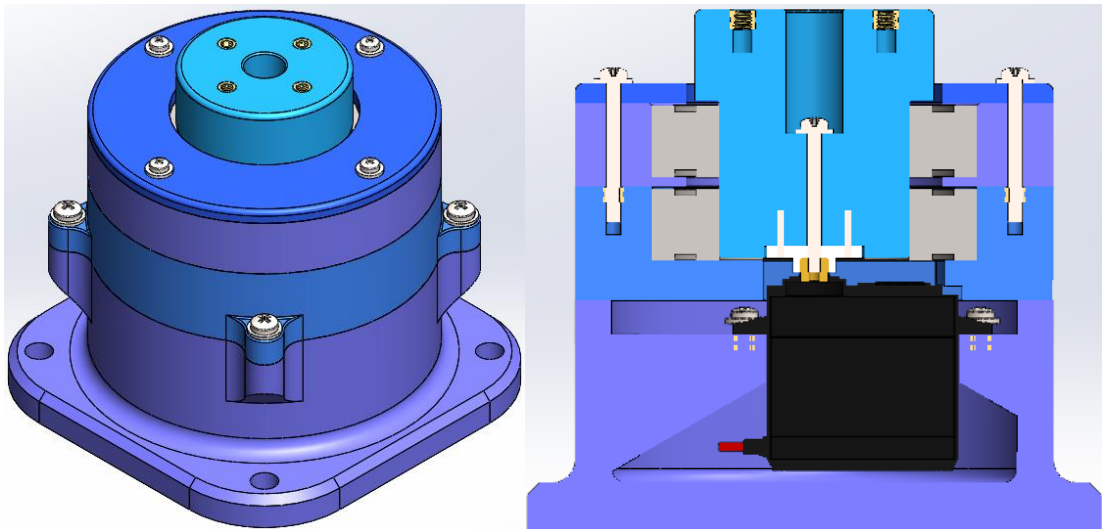


Figura 31. Disseny final base articulada.

En aquesta versió final es va afegir un segon rodament, el que es coneix com una disposició en tàndem. Aquesta disposició absorbeix molt millor les forces, permet suportar una major càrrega axial, reduint així la desviació axial. A la secció es poden veure els passadors cilíndrics que transmeten el parell de l'acoblador cilíndric del servomotor a la peça de sortida.

5.5. Connector

Component no articulat que s'encarrega de donar la versatilitat de diferents muntatges, on el moviment sigui en el pla horitzontal (SCARA) o en el pla vertical (Angular). Al estar buit per dins (per poder cargolar-la a la base i ensamblar els braços articulats), comporta unes dificultats de disseny majors, ja que, s'ha de tenir en compte la seva viabilitat a l'hora de fabricar-la amb una impressora 3D. Altres factors que s'han tingut en compte és que sigui fàcil d'ensamblar a la base (amb estabilitat i rigidesa), i d'igual manera als braços articulats.

La primera versió (*Figura 32*) recollia els paràmetres de disseny inicials (simplicitat) i els esmentats anteriorment, la possibilitat d'ensamblar el braç articulat en dos posicions diferents i tapes extraïbles per poder collar els cargols. Aquesta primera versió no es podia fabricar amb una impressora 3D.

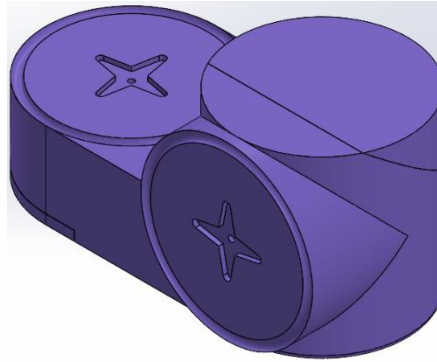


Figura 32. Disseny primera versió connector.

A la *Figura 33* es mostra la segona versió, aquesta separava el cos en dues parts (tallant la peça en el pla vertical), també afegia connectors per facilitar el cablejat i un canvi en el acoblador de servomotor (aspa de 6 puntes) tot i que la idea era acoblar el braç només amb un cargol (poca rigidesa i estabilitat). Després d'imprimir les peces i ensamblar-les, es varen dur a terme unes quantes proves, on es va poder comprovar que es requeria de més punts de fixació amb els braços articulats i el tall pel pla vertical per separar les peces no havia sigut la millor idea, ja que, deixava el cilindre de subjecció amb la base una mica descentrat (degut a la impressió 3D) i tenia molt de joc.

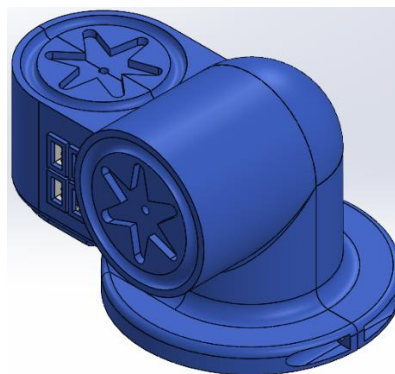


Figura 33. Disseny segona versió connector.

El disseny final (*Figura 34*) separa el connector tallant pel pla horitzontal, facilitant així la impressió d'ambdues peces i l'assemblatge d'elles. Tot i això el cos inferior és de mal imprimir, però degut a la dificultat de la peça, es va decidir que aquesta era la millor opció. Es va decidir treure el cablejat dins del connector i passar els cables directament dels braços articulats a la control box. El canvi més important és l'ensamblatge amb els motors dels braços i la base, on es va passar d'un sol punt de fixació a quatre (donant-li molta més estabilitat i rigidesa).

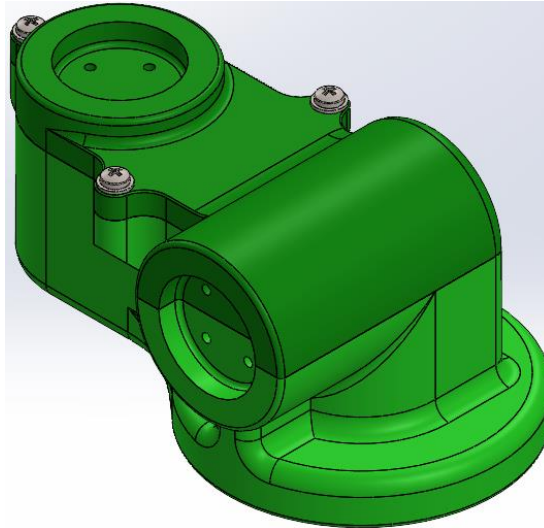


Figura 34. Disseny final connector.

5.6. Braç articulat

Articulació rotacional amb capacitat per moure's en un pla. Bàsicament són les articulacions angulars de la plataforma modular (a part de la base). La *Figura 35* mostra el primer disseny de braç articulat que es va dur a terme.

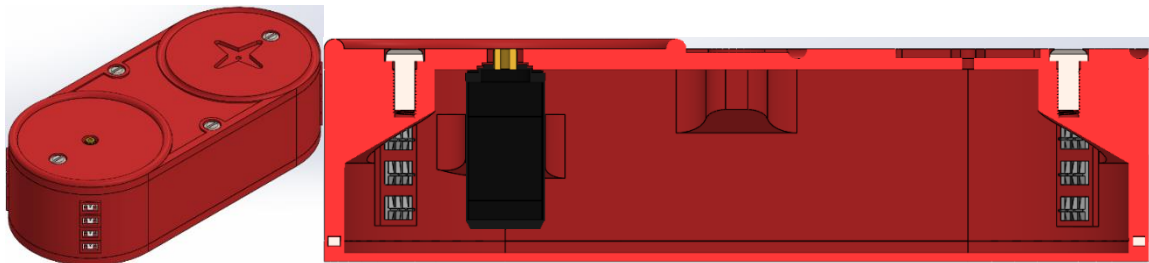


Figura 35. Disseny primera versió braç articulat.

La primera versió estava dissenyada per un ensamblatge directe del servomotor amb el connector, incorporava connectors per passar els cables que vinguessin de l'element terminal per dins del cos, una tapa superior collada al cos principal per 4 cargols i una base inferior fàcil de treure (amb imants) per poder manipular i collar el següent braç o l'element terminal a la sortida del braç amb facilitat. No es va arribar a dur a terme aquesta primera versió degut a la mida d'aquest, estava sobredimensionat, generant un moment massa gran i més amb un sistema tan simple amb tan poca estabilitat. Per això es va dur a terme una segona versió, que es mostra a la *Figura 36*.

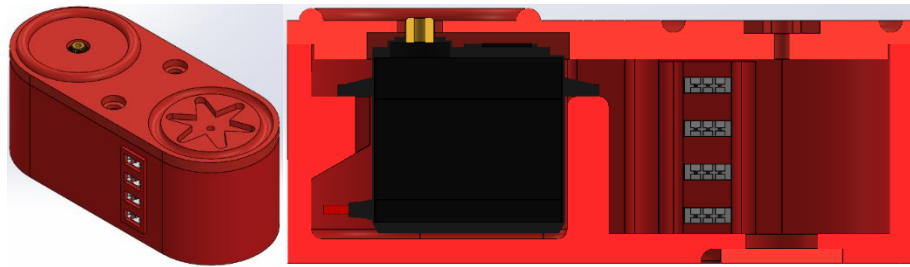


Figura 36. Disseny segona versió braç articulat.

La segona versió reduïa la llargada del braç, gràcies sobretot al canvi d'orientació i subjecció del servomotor. També reduïa la tapa inferior (fent-la més fàcil d'imantar). El sistema de fixació continuava sent el mateix, a partir de l'acoblador de servomotor (en aquest cas de 6 puntes) i per un sol cargol. Es va imprimir el prototip per realitzar algunes proves, i es varen poder comprovar alguns errors de disseny. En primer lloc la fixació de la tapa superior per només 2 cargols era insuficient, ja que, generava molt de joc en els extrems (just on es situen els motors i és més important que hagi una bona fixació). El sistema de fixació era mecànicament molt pobre i donava poca estabilitat i rigidesa al sistema.

La versió final (*Figura 37*) atacava tots els errors de la versió anterior, donant una fixació per 4 cargols amb la tapa superior (bona fixació), i un canvi en la transmissió amb el servomotor. Replicant el sistema de la base vist anteriorment, es va optar per afegir dos rodaments en disposició tàndem, i una peça que transmet el parell des d'uns passadors cilíndrics que connecten amb l'acoblador cilíndric de servo.

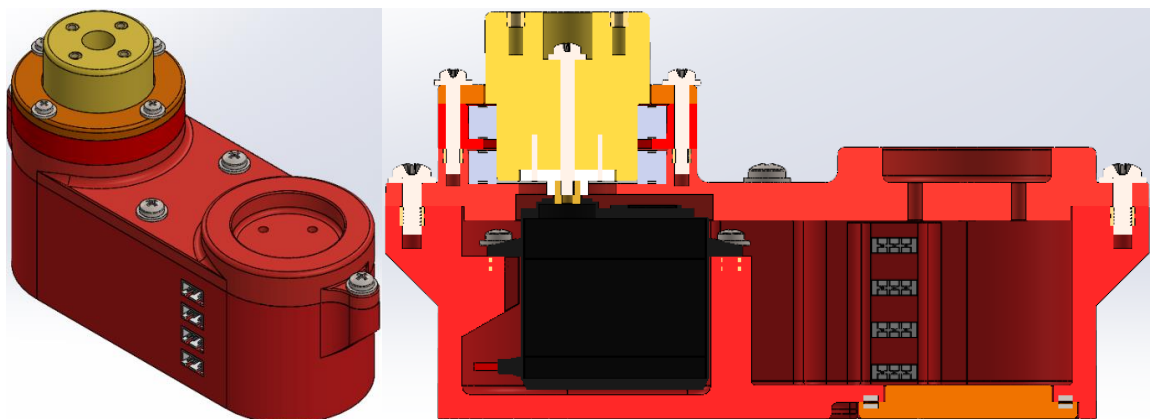


Figura 37. Disseny final braç articulat.

5.7. Articulació lineal

Com s'ha esmentat anteriorment, s'ha dissenyat l'articulació lineal tenint en compte que sempre serà l'últim GDL de qualsevol muntatge, per tant ha de ser robusta però no exageradament, complint així amb els requisits de simplicitat i facilitat de muntatge.

El disseny inicial (*Figura 38*) consistia en un mecanisme engranatge – cremallera, una forma molt senzilla de convertir el moviment rotatori del servomotor en un moviment lineal. La cremallera inclou una cua de milà, per donar-li subjecció al sistema, a la part final d'aquesta incloïa dos forats pensats per poder cargolar l'element terminal desitjat. No es va arribar a imprimir per fer proves, degut a que es va haver d'adaptar a canvis al braç articulat.

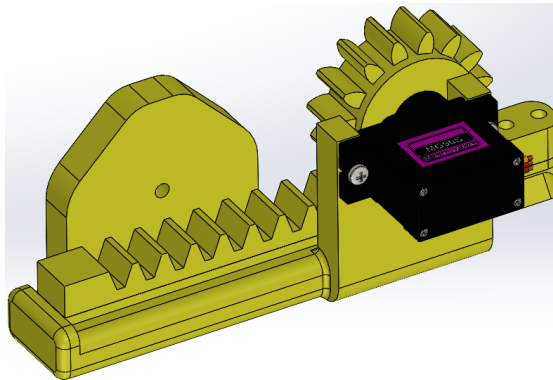


Figura 38. Disseny primera versió articulació lineal.

La *Figura 39* mostra la segona versió, aquesta s'adaptava als canvis del braç articulat, bàsicament s'ensamblava amb aquest a partir d'una pre-forma d'un acoblador de 6 puntes de servomotor i un cargol. Aquesta versió també canviava la forma de la cua de milà, facilitant així la seva fabricació amb una impressora 3D. També s'afegeix un fi de cursa mecànic per evitar que la cremallera pugui sortir, i sigui fàcil afegir un fi de cursa electrònic.

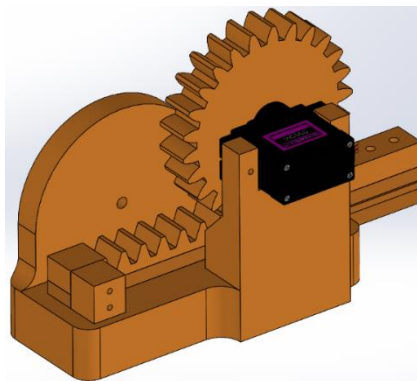


Figura 39. Disseny segona versió articulació lineal.

Després d'imprimir i fer proves amb aquesta versió, es va veure que el funcionament era correcte, l'engrenatge era massa gran i presentava molt de joc. La subjecció de l'element terminal només per dos cargols tampoc era estable. La versió final (*Figura 40*) solucionava els errors esmentats anteriorment, canviant el sistema d'ensamblatge amb el braç (4 cargols) i donant més subjecció a l'element terminal. Es va adaptar el cos de l'articulació lineal, donant-li un aspecte visual més arrodonit, semblant a la resta de parts de la plataforma, per tant de no trencar amb l'estètica de la resta de components.

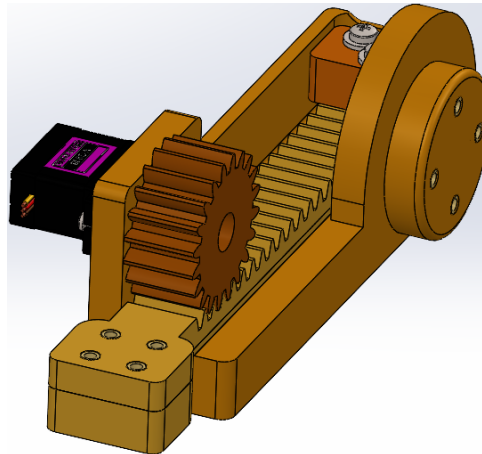


Figura 40. Disseny final articulació lineal.

5.8. Elements terminals

Els elements terminals, també anomenats efectors finals (end effector), són els encarregats d'interaccionar directament amb l'entorn del robot. Poden ser tant elements de presa com eines. Tot i que un mateix robot industrial és, dins d'uns límits lògics, versàtil i readaptable a una gran varietat d'aplicacions, no passa el mateix amb els elements terminals, que són en molts casos específicament dissenyats per a cada tipus de treball.

S'han dut a terme dos elements terminals, un de tipus gripper (pinça) i un de tipus "llapis". És un model obert a altres elements terminals que puguin ser fàcilment dissenyats i ensamblats segons el requeriment de la tasca que es vulgui realitzar.

5.8.1. Gripper

El primer element terminal és el més típic, de tipus pinça. El funcionament de la pinça o gripper és simple, es tracta d'un mecanisme de paral·lelogram articulat (4 bar linkage) on la part de la pinça exerceix una força sincronitzada i paral·lela. Aquest mecanisme ofereix diverses

avantatges, permet que les mandíbules de la pinça es mantinguin paral·leles entre si durant tot el moviment, tret crucial per a una presa segura i uniforme. El disseny mecànic és relativament simple i robust, donant-li fiabilitat i un manteniment senzill. Per últim, aquest tipus de mecanisme pot adaptar-se a diferents mides i formes d'objectes simplement ajustant les dimensions i el disseny dels esclavons. La *Figura 41* mostra el disseny final del gripper.

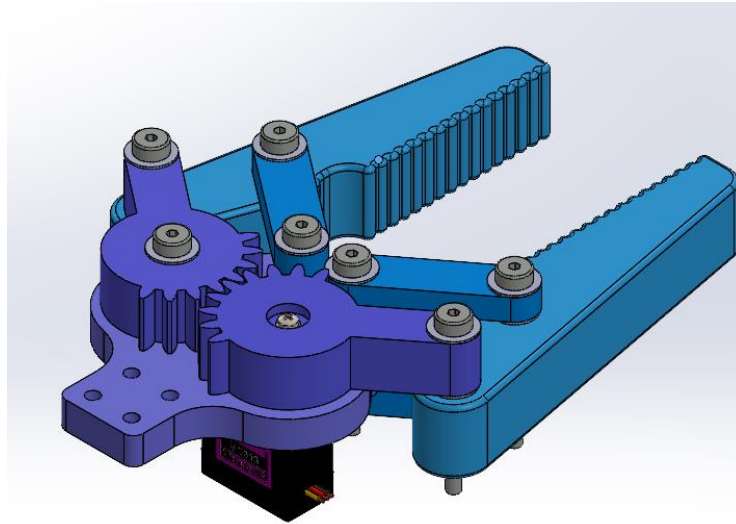


Figura 41. Disseny final gripper.

Per fer aquest disseny, s'ha dut a terme un model iteratiu (*Figura 42*) a la plataforma GeoGebra que permet canviar la longitud de cada barra i l'angle entre aquestes. Adaptant les longituds i posició inicial de les barres a la mida desitjada de la pinça es va arribar a aquesta solució, la qual permet agafar objectes de fins a 70 mm de forma paral·lela. Per garantir el moviment paral·lel es va jugar amb el centre instantani que formen les barres d'entrada i de sortida (línies discontinues), mirant que aquest quedés el més allunyat possible.

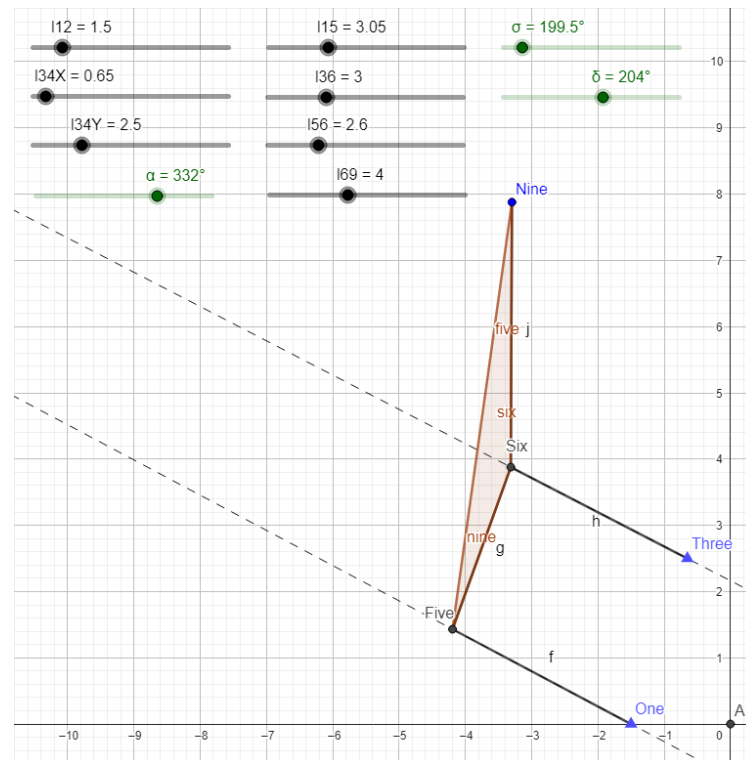


Figura 42. Model iteratiu gripper plataforma GeoGebra.

Per les unions articulades de les barres amb el cos i la pinça s'ha dut a terme una unió articulada amb coixinets de fricció amb valona i cargols rectificats. Aquesta cargol evita que l'articulació quedi clavada a l'articular el cargol, deixant el joc necessari per obrir i tancar la pinça amb fluïdesa. La *Figura 43* mostra la secció d'aquesta unió.

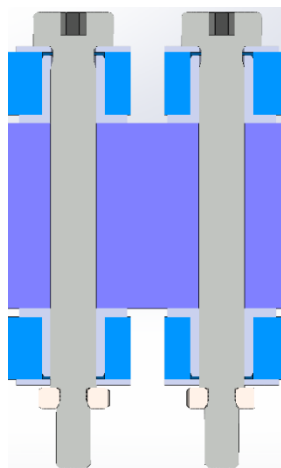


Figura 43. Unions articulades gripper.

5.8.2. Eina tipus llapis

El segon element terminal és molt més senzill, és una eina que permet collar un retolador o un altre objecte amb unes característiques similars (llapis, làser,...) i realitzar tasques amb ell. Està pensat sobretot per els muntatges on el robot treballa en un pla horitzontal (SCARA). Es mostra a continuació a la *Figura 44*.

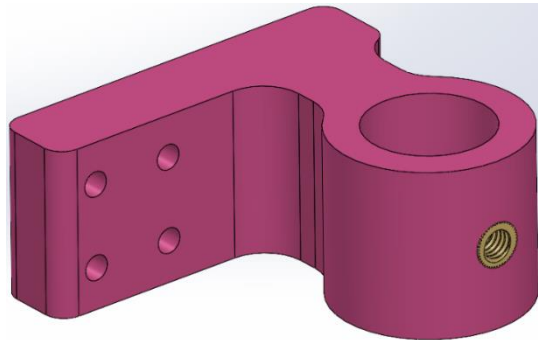


Figura 44. Element terminal llapis

5.9. Ensamblatge entre elements

En primer lloc l'ensamblatge entre la base i el connector, és probablement el més important, ja que són elements que sempre estan presents en qualsevol muntatge. L'ensamblatge s'ha de dur a terme abans de muntar la peça superior del connector, es fixarà amb la base amb 4 cargols de M4 x 16 mm. La *Figura 45* mostra la secció d'aquest ensamblatge.

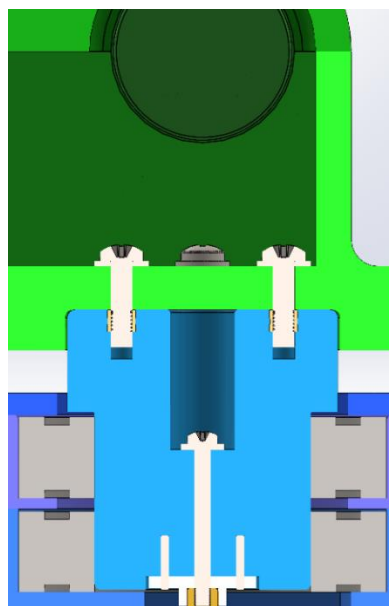


Figura 45. Secció ensamblatge base articulada - connector.

L'ensamblatge dels braços articulats, tant entre ells com amb el connector es fixarà d'igual manera amb 4 cargols de M3 x 16 mm. Per muntar-los amb facilitat s'haurà de retirar la tapa imantada tant del connector com del braç articulat, segons calgui. La *Figura 46* mostra la secció de l'ensamblatge del braç articulat amb el connector i entre dos braços articulats.

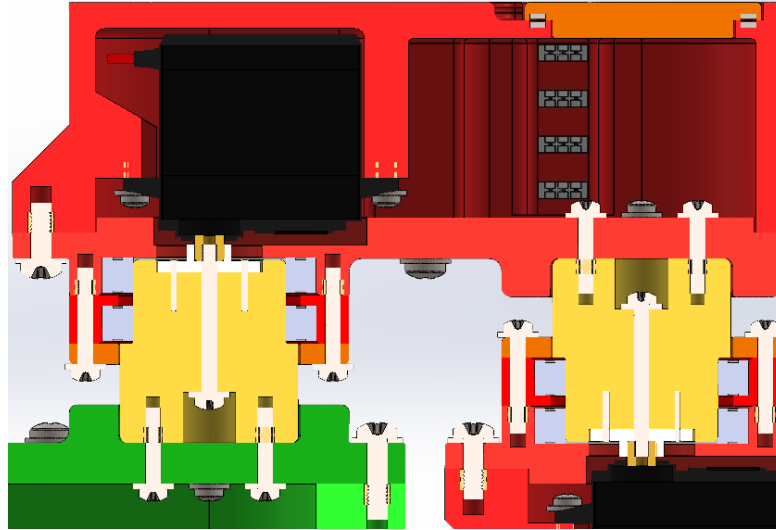


Figura 46. Ensamblatge braç articulat.

L'articulació lineal es fixarà amb els braços articulats o la base (segons el muntatge) d'igual manera que els braços articulats, amb 4 cargols de M3 x 16 mm, tal i com es mostra a la *Figura 47*. Per realitzar el muntatge s'haurà de retirar la tapa imantada del connector o del braç articulat.

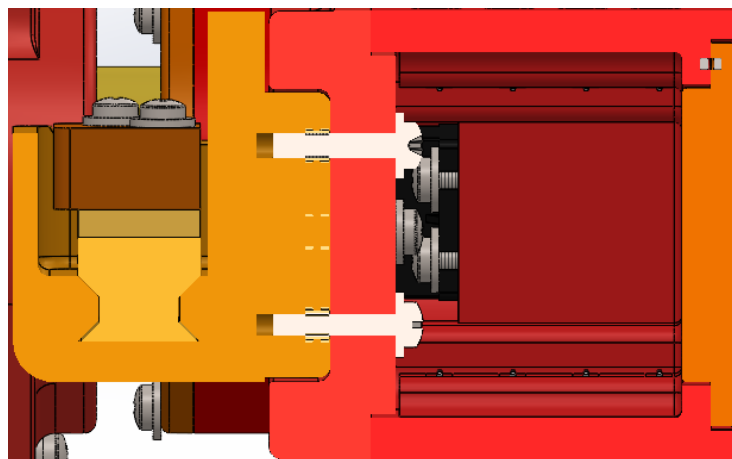


Figura 47. Ensamblatge articulació lineal.

Finalment, l'element terminal es fixarà amb l'articulació lineal per 4 cargols de M3 x 16 mm, tal i com es mostra a la *Figura 48*. La cremallera de l'element terminal permet collar la pinça o

qualsevol altre element per ambdós costats, facilitant així la implementació de qualsevol element terminal que es desitgi.

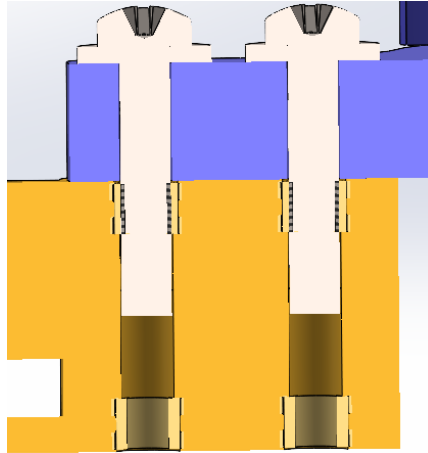


Figura 48. Ensamblatge element terminal.

6. MUNTATGES

Es mostren a continuació alguns dels muntatges que es poden dur a terme amb els components dissenyats, mostrats anteriorment. Cal remarcar que al ser un disseny obert, és fàcil implementar alguna peça o component per afegir un altre muntatge diferent, segons vulgui l'usuari, d'igual manera pel disseny de l'element terminal. S'afegeix l'espai de treball de cada muntatge, per donar una idea de l'espai i moviments que es poden aconseguir amb cada muntatge. L'espai de treball d'un robot està definit com el grup de punts que poden ser assolits pel seu element terminal.

En la classificació per GDL no es tenen en compte els que tinguin o puguin tenir l'element terminal.

6.1. 2 GDL

6.1.1. Manipulador RR ($\theta_1 - \theta_2$)

Configuració que compta amb dos articulacions angulars. La base del robot rota al voltant d'un eix fix i la segona articulació permet la rotació del braç respecte el connector. Aquesta configuració és útil per a tasques que requereixen precisió en un pla, com soldadura en punts específics, dibuix o pintura en superfície plana, i en operacions de muntatge on les peces es troben en una sola capa. La *Figura 49* mostra la configuració esmentada.

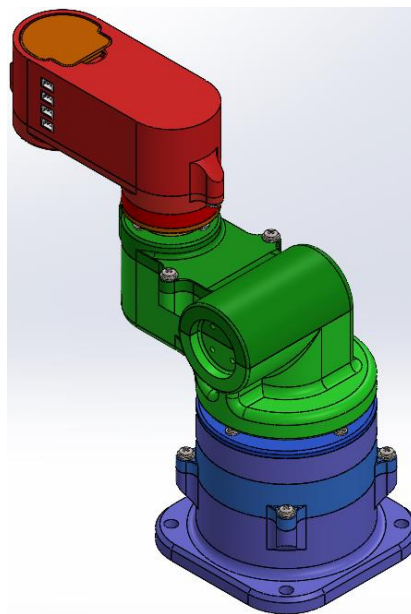


Figura 49. Configuració manipulador RR ($\theta_1 - \theta_2$) 2 GDL.

La *Figura 50* mostra l'espai de treball del manipulador RR ($\theta_1 - \theta_2$).

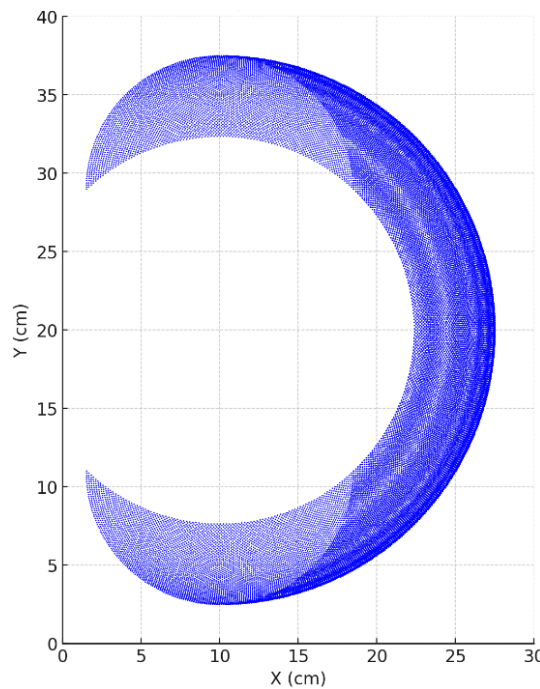


Figura 50. Espai de treball manipulador RR ($\theta_1 - \theta_2$).

6.1.2. Manipulador RP ($\theta_1 - r_2$)

En aquesta configuració, el braç té la articulació angular de la base i una articulació prismàtica en el connector, permet el gir del braç al voltant de l'eix de la base, mentre que l'articulació lineal permet l'extensió o contracció lineal del segment del braç. Aquesta configuració és adequada per a aplicacions que requereixen moviments lineals a més de rotacionals, com la càrrega i descàrrega de materials en una línia de producció, on el braç necessita moure's horitzontalment per assolir diferents posicions i després estendre's o contraure's per agafar o deixar objectes. La *Figura 51* mostra la configuració esmentada.

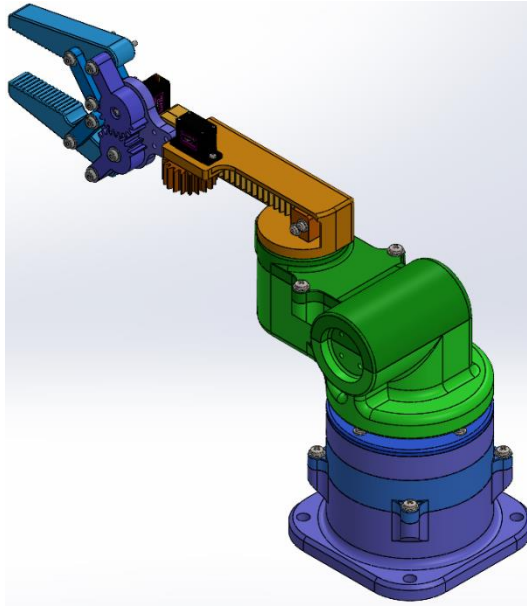


Figura 51. Configuració manipulador RP ($\theta_1 - r_2$) 2 GDL.

La Figura 52 mostra l'espai de treball del manipulador RP ($\theta_1 - \theta_2$).

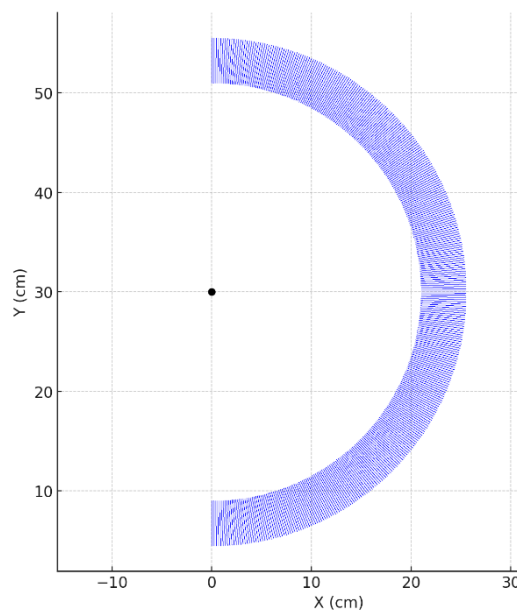


Figura 52. Espai de treball manipulador RP ($\theta_1 - r_2$).

6.2. 3 GDL

6.2.1. SCARA

Configuració típica SCARA, compta amb dues articulacions angulars seguides d'una articulació prismàtica. Les dues articulacions rotacionals permeten moviments en el pla XY,

mentre que l'articulació lineal permet moviments en l'eix Z (vertical). Els robots SCARA són ideals per a tasques de muntatge ràpid, inserció de components i manipulació de materials en línies de producció, on es requereixen moviments precisos i repetitius en un pla. També són comuns en aplicacions de pick-and-place, soldadura i embalatge. La *Figura 53* mostra la configuració esmentada.

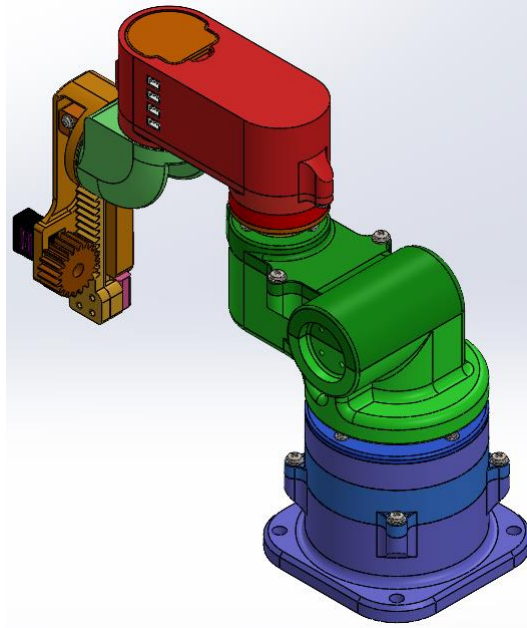


Figura 53. Configuració manipulador SCARA ($\theta_1 - \theta_2 - r_3$).

La *Figura 54* mostra l'espai de treball del manipulador SCARA 3GDL ($\theta_1 - \theta_2 - r_3$), es mostren totes les posicions que l'extrem del robot pot aconseguir, incloent tant el pla horitzontal (XY) com el desplaçament vertical (Z).

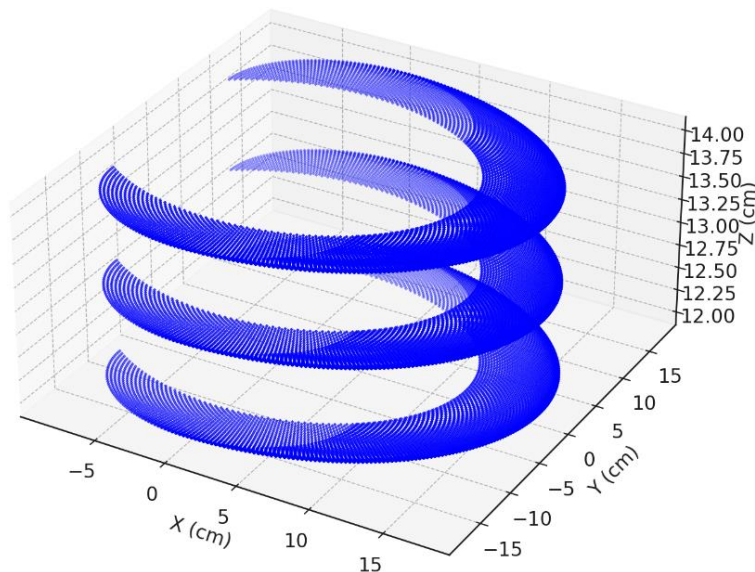


Figura 54. Espai de treball manipulador SCARA ($\theta_1 - \theta_2 - r_3$).

6.2.2. Angular

Configuració amb tres articulacions rotacionals disposades de manera que permeten moviments angulars en un espai tridimensional. La primera articulació és a la base, permet el gir en el pla horitzontal, la segona i la tercera permeten el gir en el pla vertical, en dos segments diferents. Són útils per a aplicacions que requereixen una gran flexibilitat i amplitud de moviment, com ara la manipulació d'objectes en espais estrets, tasques de pintura en superfícies complexes, i muntatge en llocs difícils d'accedir. La *Figura 55* mostra la configuració esmentada.

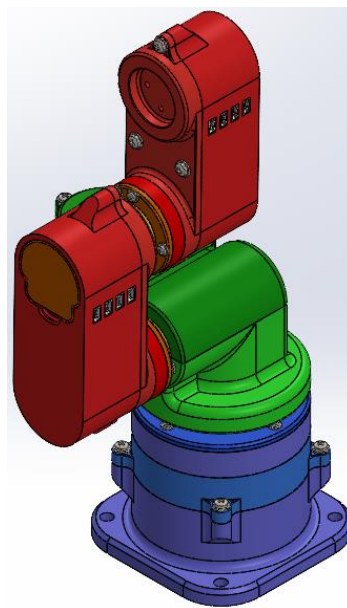


Figura 55. Configuració manipulador angular 3GDL ($\theta_1 - \theta_2 - \theta_3$).

La *Figura 56* mostra l'espai de treball del manipulador angular 3GDL ($\theta_1 - \theta_2 - \theta_3$).

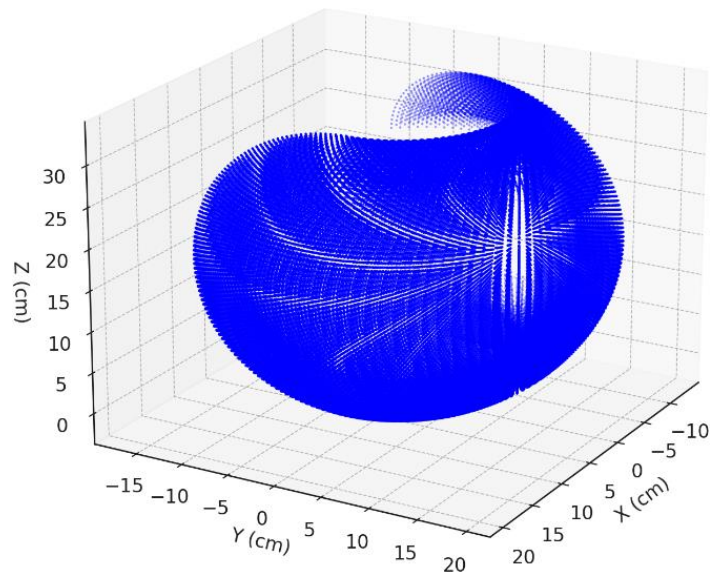


Figura 56. Espai de treball manipulador angular 3GDL ($\theta_1 - \theta_2 - \theta_3$).

6.2.3. Polar

Els robots polars tenen una articulació rotacional a la base, una articulació angular per l'elevació del braç i una articulació prismàtica per l'extensió lineal de l'element terminal, permeten així moviments en un espai esfèric. Aquesta configuració és adequada per a tasques que necessiten abastar una gran àrea amb flexibilitat angular, com manipulació de materials, operacions de manteniment en entorns industrials, i aplicacions que requereixen moviments de gran abast en entorns oberts, com ara la paletització. La *Figura 57* mostra la configuració esmentada.

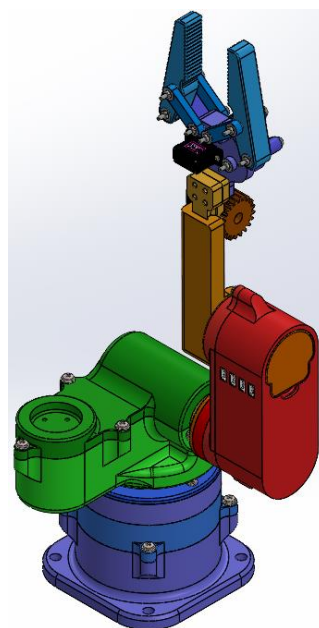


Figura 57. Configuració manipulador polar 3GDL ($\theta_1 - \theta_2 - r_3$).

La *Figura 58* mostra l'espai de treball del manipulador angular 3GDL ($\theta_1 - \theta_2 - r_3$).

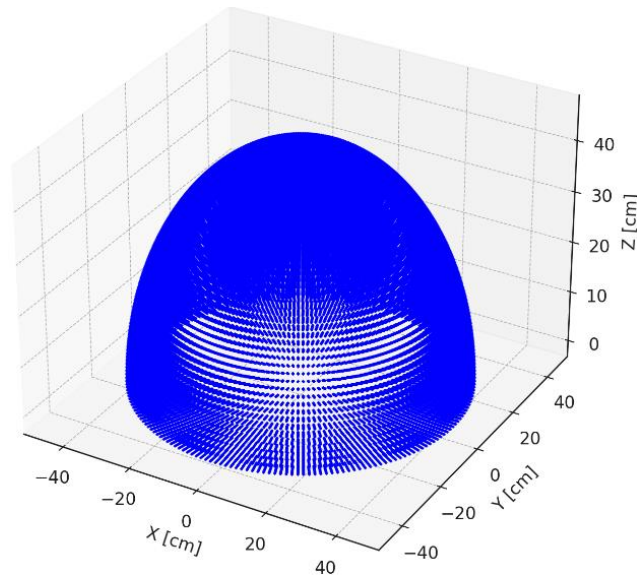


Figura 58. Espai de treball manipulador angular 3GDL ($\theta_1 - \theta_2 - r_3$).

6.3. 4 GDL

6.3.1. SCARA

És una configuració redundant respecte a l'SCARA de 3 GDL, afegint una altra articulació rotacional permet arribar a un punt de diferents maneres, sent més fàcil per exemple seguir una línia recta o arribar d'una manera molt específica. Ideal per la manipulació d'objectes en espais confinats (pick & place), pintura en superfícies amb formes complexes i muntatge en llocs amb accessibilitat limitada. La *Figura 59* mostra la configuració esmentada.

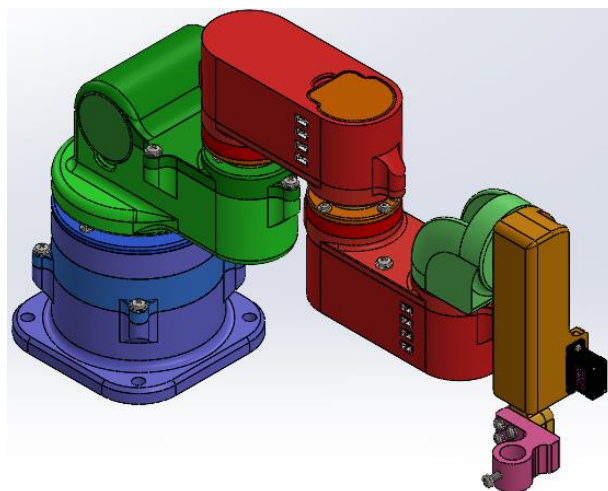


Figura 59. Configuració manipulador SCARA 4GDL ($\theta_1 - \theta_2 - \theta_3 - r_4$).

La *Figura 60* mostra l'espai de treball del manipulador SCARA 4GDL ($\theta_1 - \theta_2 - \theta_3 - r_4$).

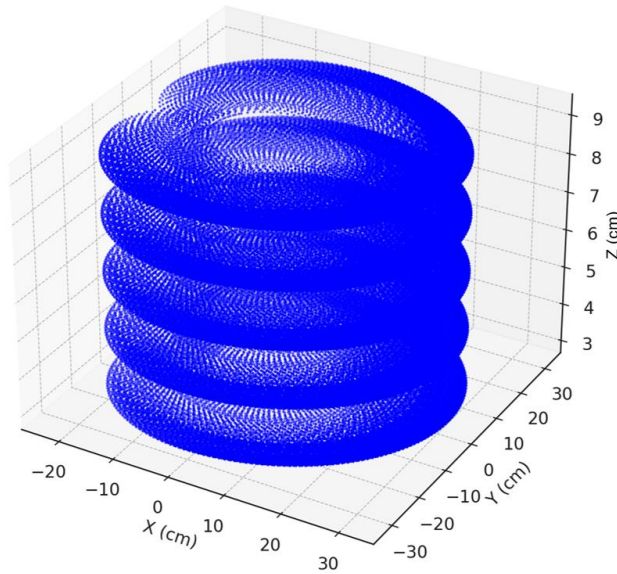


Figura 60. Espai de treball manipulador SCARA 4GDL ($\theta_1 - \theta_2 - \theta_3 - r_4$).

6.3.2. Angular

Aquesta configuració es coneguda per la seva capacitat de realitzar moviments complexos i precisos en un espai tridimensional. Les tres articulacions rotacionals permeten al robot girar i orientar el seu extrem en diferents direccions, mentre que la articulació prismàtica ajusta la distància entre el robot i l'objecte o superfície de treball. Aquest tipus de robot és àmpliament utilitzat en automatització de línies d'ensamblatge, càrrega i descàrrega de peces en sistemes d'emmagatzematge, soldadura per punts i inspecció de qualitat en línies de producció. La *Figura 61* mostra la configuració esmentada.

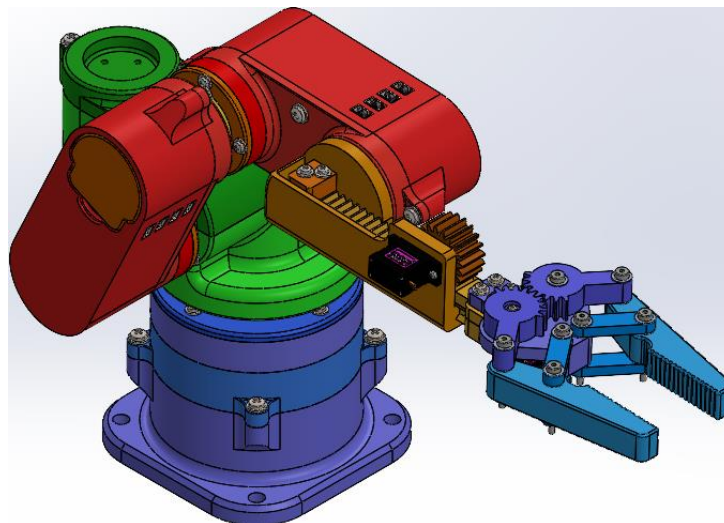


Figura 61. Configuració manipulador angular 4GDL ($\theta_1 - \theta_2 - \theta_3 - r_4$).

La *Figura 62* mostra l'espai de treball del manipulador angular 4GDL ($\theta_1 - \theta_2 - \theta_3 - r_4$).

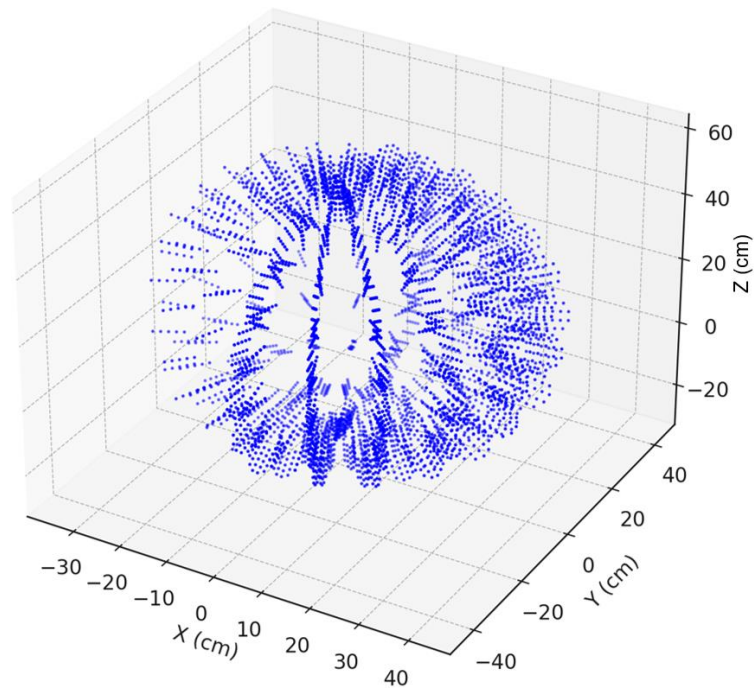


Figura 62. Configuració manipulador angular 4GDL ($\theta_1 - \theta_2 - \theta_3 - r_4$).

7. FABRICACIÓ

Per a dur a terme la fabricació de les peces dissenyades, s'ha escollit el mètode d'impressió 3D, complint així els requisits principals del projecte de baix cost i fàcil de reproduir. La tecnologia d'impressió escollida és FDM (Fused Deposition Modeling), tot i que es van estudiar altres tecnologies de fabricació 3D, es va decantar per aquesta degut que és la més comuna i accessible a qualsevol centre educatiu o usuari. Una impressora 3D de FDM funciona mitjançant la disposició de capes successives de material fos (normalment material plàstic, tot i que algunes poden treballar amb materials metàl·lics) per crear un objecte tridimensional. Primer el filament de material es fon en un extrusor a alta temperatura (en funció del material), a continuació, seguint les instruccions d'un fitxer digital 3D (G-Code). L'extrusor es mou verticalment, permetent que cada nova capa es posi sobre l'anterior fins a completar l'objecte. Aquest procés permet la creació de formes complexes amb un alt nivell de precisió i detall.

La impressora de que disposen al CIRS és la "Prusa i3 MK3", es mostra a la *Figura 63*. El software per generar els G-Code, des de els arxius STL guardats del propi SolidWorks és el propi de la marca Prusa, el PrusaSlicer.

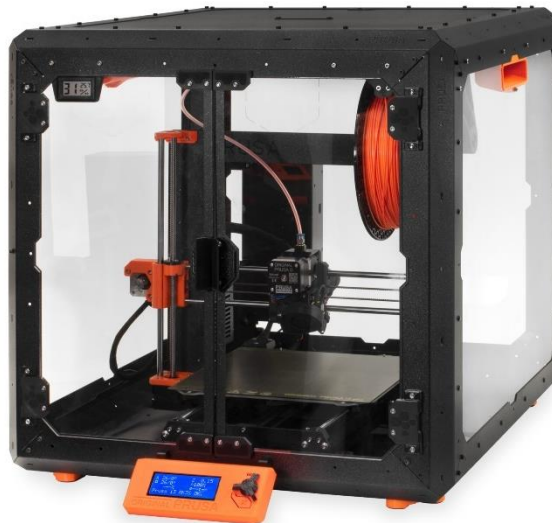


Figura 63. Impressora 3D utilitzada - Prusa i3 MK3. (Prusa3d, 2024)

La Prusa i3 MK3, permet la impressió amb diferents materials: PLA, ABS, PETG, altres plàstics, materials compostos amb partícules metàl·liques o de fusta,... Com els més comuns, accessibles i econòmics són el PETG i el PLA, es va centrar l'estudi entre aquests dos materials. A la *Taula*, es poden comparar ràpidament les principals propietats i diferències entre ells.

	PLA	PETG
Preu	20 – 25 €	25 – 30 €
Temperatura d'impressió	180 – 220 °C	220 – 250 °C
Temperatura lliat	0 – 40 °C	50 – 90 °C
Densitat [g/cm³]	1,24	1,27
Facilitat d'impressió	Molt alta	Alta
Resistència mecànica	Baixa	Mitja
Resistència a l'impacte	Molt baixa	Mitja
Resistència tèrmica	Baixa (30 °C)	Alta (80 °C)
Adhesió entre capes	Mitja	Alta
Qualitat d'impressió	Molt alta	Alta

Taula 6. Comparació propietats PLA vs PETG.

Són dos materials amb propietats semblants, finalment es va decantar per la utilització del PETG, degut a que dona una major resistència i durabilitat i també aguanta millor a temperatures altes. S'han fet servir diferents colors per diferenciar les peces en els muntatges i donar un millor aspecte.

Totes les peces s'han dissenyat generant el mínim material de suport possible. El patró d'infill és de triangles, per donar-li més resistència a les peces. S'adjunten tots els arxius G-Code i 3mf (configuració de l'Slicer) perquè l'usuari pugui canviar el material o altres paràmetres. A l'Annex B s'adjunten els principals paràmetres d'impressió de cada peça.

Per la resta de components mecànics que intervenen en la fabricació (rodaments, cargols,...), s'ha procurat sempre fer servir components més normalitzats i econòmics, assegurant així la fàcil reproducció i replicabilitat del projecte.

8. LLISTA DE MATERIALS (BOM)

BOM				
		BOM ID	DESCRIPCIÓ	QUANTITAT
COMPONENTS	1	Servomotor DM-S2000MD	1	
	2	Servomotor MG996R	2	
	3	Servomotor MG92B	2	
	4	Connector 3 pin JST	17	
	5	Rodament de boles 6008 (40 x 68 x 15 mm)	2	
	6	Rodament de boles 6806 (30 x 42 x 7 mm)	4	
	7	Acoblador cilíndric de servomotor	3	
	8	Acoblador d'aspa de servomotor	2	
	9	Imant de neodimi 3 x 1 mm	56	
FIXACIONS	30	Insert roscat M2 (3 x 3,2 mm)	4	
	31	Cargol zincat DIN-7985 M2 x 8 mm	4	
	32	Cargol zincat DIN-7985 M2 x 10 mm	2	
	33	Volandera DIN-9021 M2	6	
	34	Insert roscat M3 (3 x 4,2 mm)	50	
	35	Cargol zincat DIN-7985 M3 x 10 mm	12	
	36	Cargol zincat DIN-7985 M3 x 16 mm	22	
	37	Cargol zincat DIN-7985 M3 x 20 mm	8	
	38	Cargol zincat DIN-7985 M3 x 30 mm	7	
	39	Volandera DIN-9021 M3	49	
	40	Insert roscat M4 (4 x 6 mm)	20	
	41	Cargol zincat DIN-7985 M4 x 12 mm	8	
	42	Cargol zincat DIN-7985 M4 x 16 mm	12	
	43	Volandera DIN-9021 M4	19	
	44	Passador cilíndric 1,5 x 10 mm	12	
	45	Volandera de fricció 4 x 0,5 mm	14	
	46	Coixinet de fricció 4 x 6 mm	11	
	47	Cargol rectificat ISO 7379-4-M3-25	1	
	48	Cargol rectificat ISO 7379-4-M3-30	6	
	49	Femella DIN-934 M3	7	
PARTS IMPRESSES	BOM ID	PART	DESCRIPCIÓ	QUANTITAT
	100	Base articulada	Cos inferior base	1
	101	Base articulada	Cos segon rodament base	1
	102	Base articulada	Cos superior base	1
	103	Base articulada	Tapa rodament base	1
	104	Base articulada	Peça sortida base	1
	110	Connector	Cos inferior connector	1
	111	Connector	Cos superior connector	1
	112	Connector	Tapa superior imantada connector	1
	113	Connector	Tapa inferior imantada connector	1
	120	Braç articulad	Cos inferior braç	2

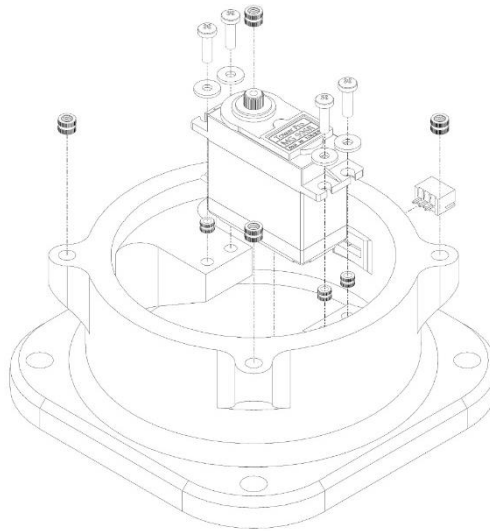
PARTS IMPRESSES	BOM ID	PART	DESCRIPCIÓ	QUANTITAT
	121	Braç articulat	Tapa imantada braç	2
	122	Braç articulat	Cos superior braç	2
	123	Braç articulat	Cos segon rodament braç	2
	124	Braç articulat	Tapa rodament braç	2
	125	Braç articulat	Peça sortida braç	2
	130	Articulació lineal	Cos articulació lineal	1
	131	Articulació lineal	Cremallera articulació lineal	1
	132	Articulació lineal	Engranatge articulació lineal	1
	133	Articulació lineal	Bloqueig articulació lineal	1
	140	Gripper	Cos gripper	1
	141	Gripper	Pinça gripper	2
	142	Gripper	Engranatge dret gripper	1
	143	Gripper	Engranatge esquerra gripper	1
	144	Gripper	Barra biarticulada gripper	4
	150	Element terminal SCARA	Connector muntatge SCARA	1
	151	Element terminal SCARA	Element terminal llapis	1

Taula 7. BOM – Llista de components

9. MANUAL DE MUNTATGE

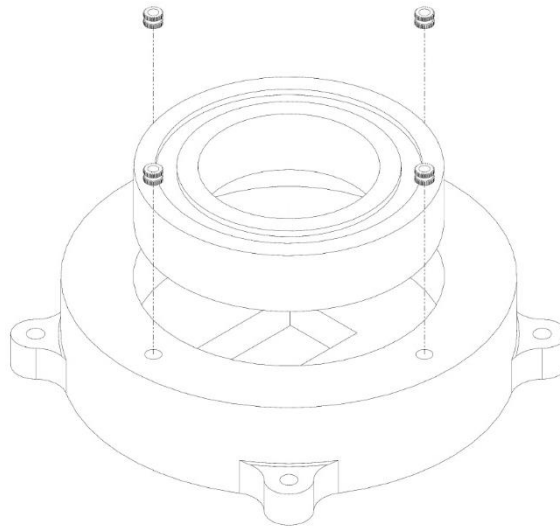
9.1. Muntatge base articulada

Pas 1



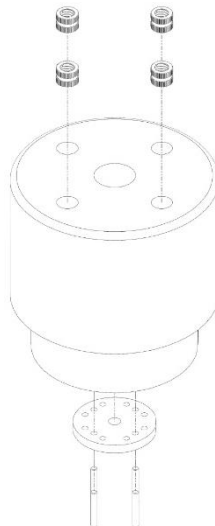
BOM ID	Descripció	Quantitat
100	Cos inferior base	1
1	Servomotor DM-S2000MD	1
4	Connector 3 pin JST	1
34	Insert roscat M3 (3 x 4,2 mm)	8
35	Cargol zincat DIN-7985 M3 x 10 mm	4
39	Volandera DIN-9021 M3	4

Pas 2



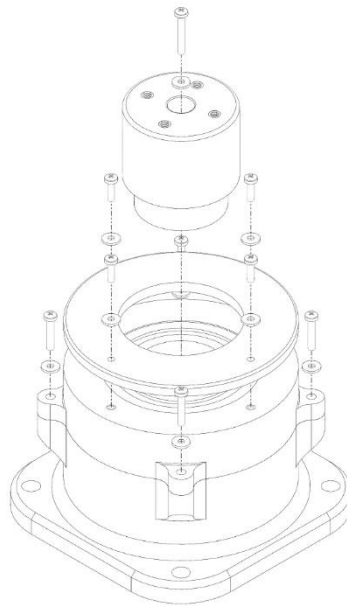
BOM ID	Descripció	Quantitat
2	Cos segon rodament base	1
5	Rodament de boles 6008 (40 x 68 x 15 mm)	1
34	Insert roscat M3 (3 x 4,2 mm)	4

Pas 3



BOM ID	Descripció	Quantitat
104	Peça sortida base	1
7	Acoblador cilíndric de servomotor	1
40	Insert roscat M4 (4 x 6 mm)	4
44	Passador cilíndric 1,5 x 10 mm	4

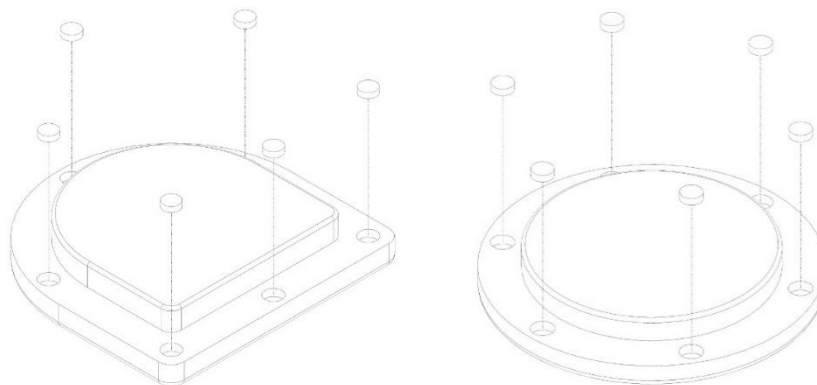
Pas 4



BOM ID	Descripció	Quantitat
103	Tapa rodament base	1
35	Cargol zincat DIN-7985 M3 x 10 mm	4
36	Cargol zincat DIN-7985 M3 x 16 mm	4
38	Cargol zincat DIN-7985 M3 x 30 mm	1
39	Volandera DIN-9021 M3	9

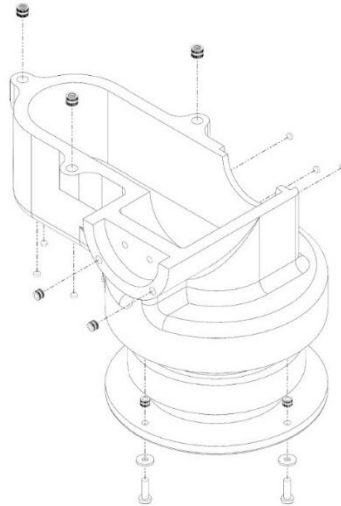
9.2. Muntatge connector

Pas 1



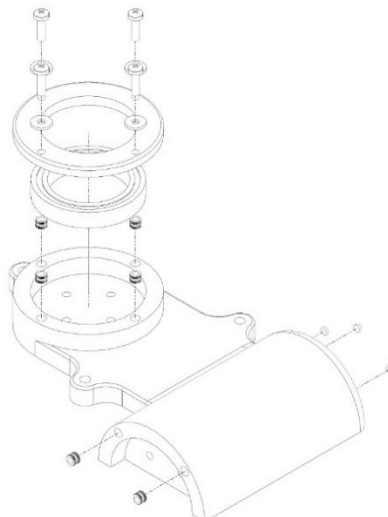
BOM ID	Descripció	Quantitat
113	Tapa inferior imantada connector	1
112	Tapa superior imantada connector	1
9	Imant de neodimi 3 x 1 mm	12

Pas 2



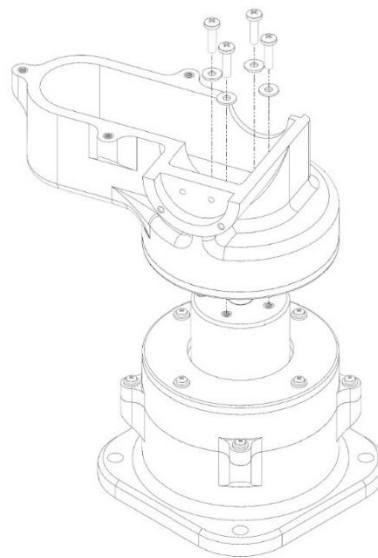
BOM ID	Descripció	Quantitat
110	Cos inferior connector	1
5	Rodament de boles 6008 (40 x 68 x 15 mm)	1
9	Imant de neodimi 3 x 1 mm	9
34	Insert roscat M3 (3 x 4,2 mm)	6
40	Insert roscat M4 (4 x 6 mm)	3
35	Cargol zincat DIN-7985 M3 x 10 mm	4
39	Volandera DIN-9021 M3	4

Pas 3



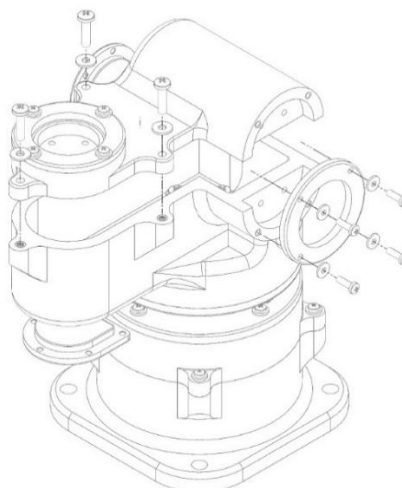
BOM ID	Descripció	Quantitat
111	Cos superior connector	1
114	Tapa rodament superior connector	1
6	Rodament de boles 6806 (30 x 42 x 7 mm)	1
9	Imant de neodimi 3 x 1 mm	3
34	Insert roscat M3 (3 x 4,2 mm)	6
35	Cargol zincat DIN-7985 M3 x 10 mm	4
39	Volandera DIN-9021 M3	4

Pas 4



BOM ID	Descripció	Quantitat
42	Cargol zincat DIN-7985 M4 x 16 mm	4
43	Volandera DIN-9021 M4	4

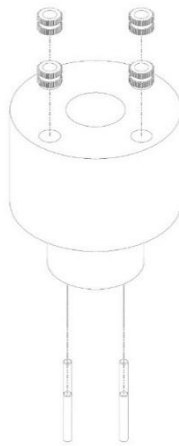
Pas 5



BOM ID	Descripció	Quantitat
114	Tapa rodament superior connector	1
6	Rodament de boles 6806 (30 x 42 x 7 mm)	1
35	Cargol zincat DIN-7985 M3 x 10 mm	4
39	Volandera DIN-9021 M3	4
42	Cargol zincat DIN-7985 M4 x 16 mm	3
43	Volandera DIN-9021 M4	3

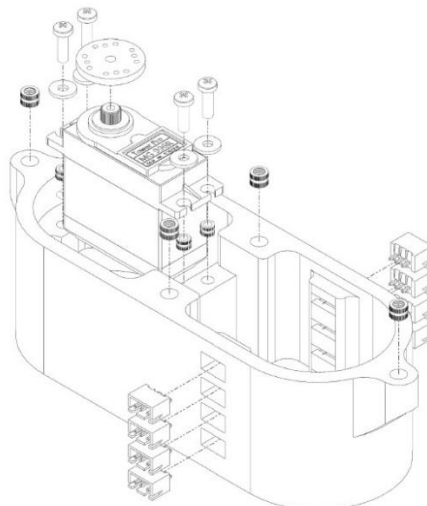
9.3. Muntatge braç articulat

Pas 1 (x2)



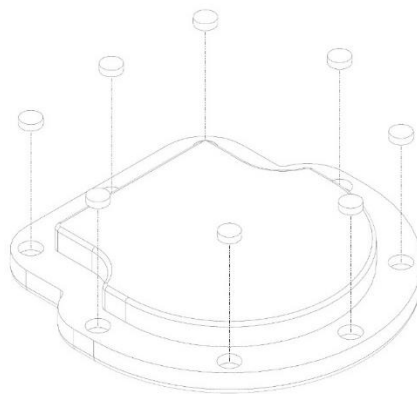
BOM ID	Descripció	Quantitat
125	Peça sortida braç	2
34	Insert roscat M3 (3 x 4,2 mm)	8
44	Passador cilíndric 1,5 x 10 mm	8

Pas 2 (x2)



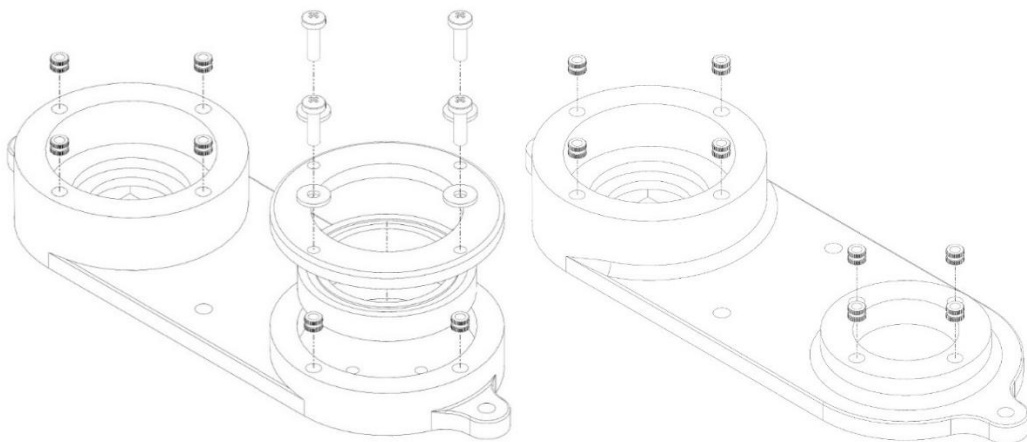
BOM ID	Descripció	Quantitat
120	Cos inferior braç	1
9	Imant de neodimi 3 x 1 mm	8
2	Servomotor MG996R	2
7	Acoblador cilíndric de servomotor	2
4	Connector 3 pin JST	16
34	Insert roscat M3 (3 x 4,2 mm)	8
35	Cargol zincat DIN-7985 M3 x 10 mm	8
39	Volandera DIN-9021 M3	8
40	Insert roscat M4 (4 x 6 mm)	8

Pas 3



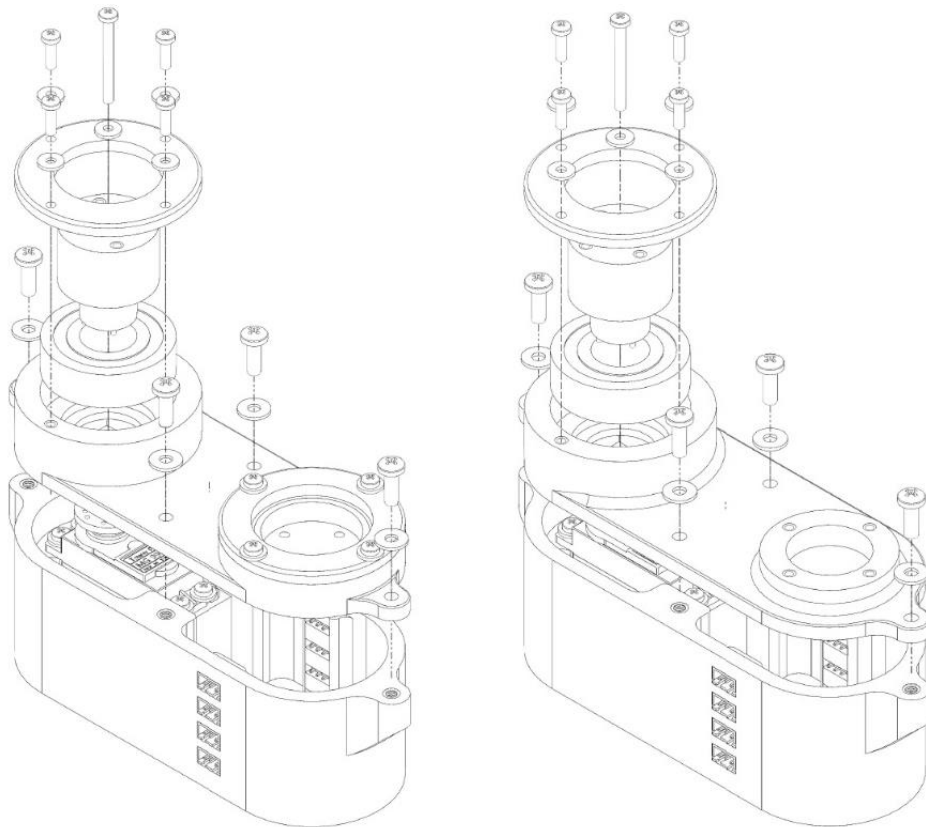
BOM ID	Descripció	Quantitat
121	Tapa imantada braç	1
9	Imant de neodimi 3 x 1 mm	8

Pas 4



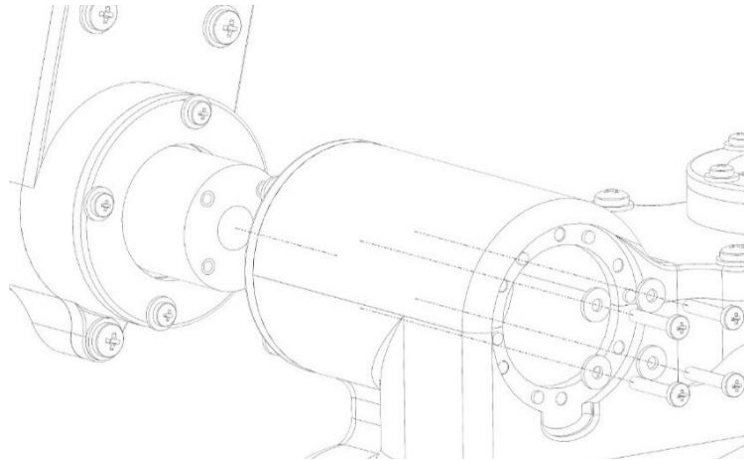
BOM ID	Descripció	Quantitat
122	Cos superior braç	1
124	Tapa rodament braç	1
6	Rodament de boles 6806 (30 x 42 x 7 mm)	1
34	Insert roscat M3 (3 x 4,2 mm)	16
35	Cargol zincat DIN-7985 M3 x 10 mm	4
39	Volandera DIN-9021 M3	4

Pas 5



BOM ID	Descripció	Quantitat
124	Tapa rodament braç	2
6	Rodament de boles 6806 (30 x 42 x 7 mm)	2
35	Cargol zincat DIN-7985 M3 x 10 mm	8
36	Cargol zincat DIN-7985 M3 x 30 mm	2
39	Volandera DIN-9021 M3	10
42	Cargol zincat DIN-7985 M4 x 16 mm	8
43	Volandera DIN-9021 M4	8

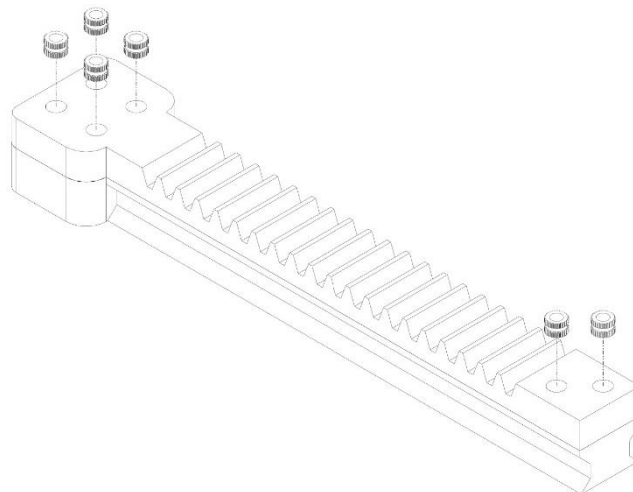
Pas 6



BOM ID	Descripció	Quantitat
36	Cargol zincat DIN-7985 M3 x 16 mm	4
39	Volandera DIN-9021 M3	4

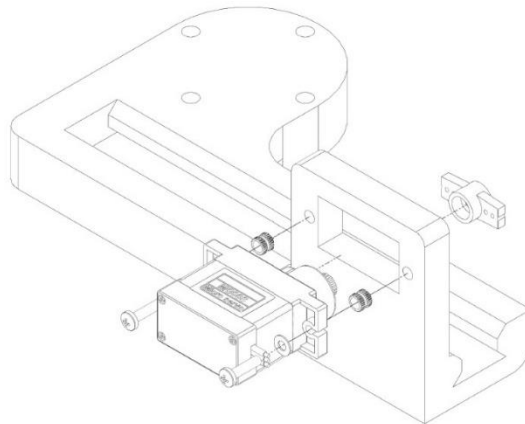
9.4. Muntatge articulació lineal

Pas 1



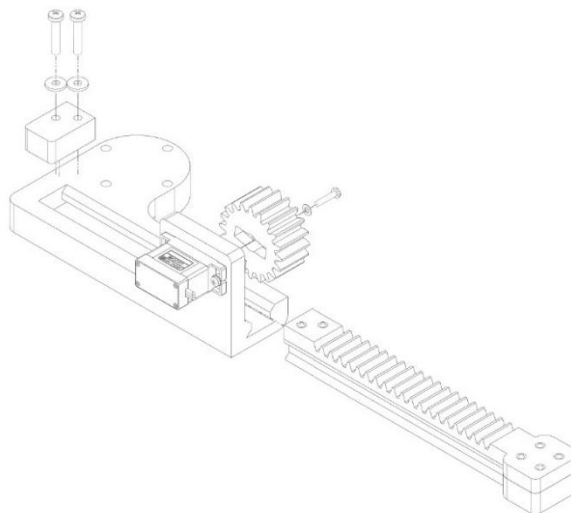
BOM ID	Descripció	Quantitat
131	Cremallera articulació lineal	1
34	Insert roscat M3 (3 x 4,2 mm)	6

Pas 2



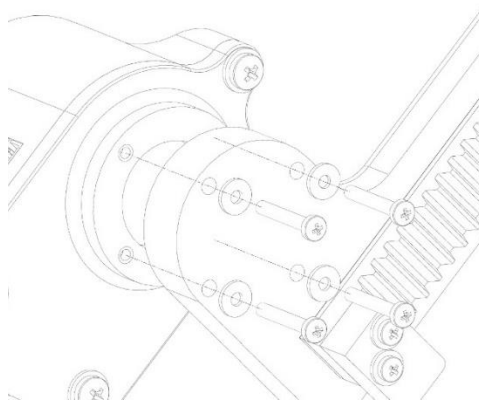
BOM ID	Descripció	Quantitat
130	Cos articulació lineal	1
3	Servomotor MG92B	1
8	Acoblador d'aspa de servomotor	1
30	Insert roscat M2 (3 x 3,2 mm)	2
31	Cargol zincat DIN-7985 M2 x 8 mm	2
33	Volandera DIN-9021 M2	2

Pas 3



BOM ID	Descripció	Quantitat
132	Engranatge articulació lineal	1
133	Bloqueig articulació lineal	1
36	Cargol zincat DIN-7985 M3 x 16 mm	2
39	Volandera DIN-9021 M3	2
32	Cargol zincat DIN-7985 M2 x 10 mm	1
30	Volandera DIN-9021 M2	1

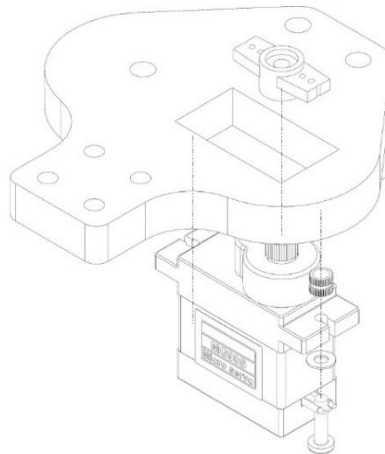
Pas 4



BOM ID	Descripció	Quantitat
37	Cargol zincat DIN-7985 M3 x 20 mm	4
39	Volanderà DIN-9021 M3	4

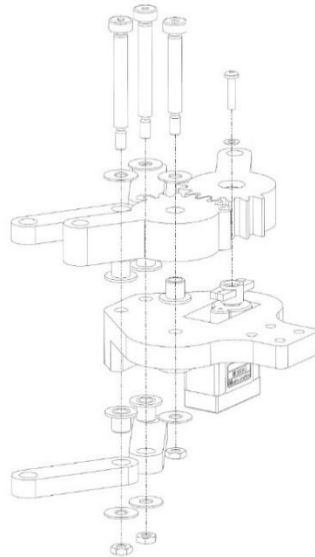
9.5. Muntatge Gripper

Pas 1



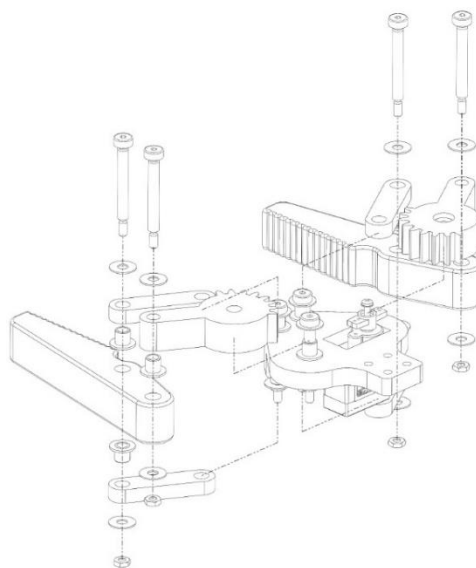
BOM ID	Descripció	Quantitat
140	Cos gripper	1
3	Servomotor MG92B	1
8	Acoblador d'aspa de servomotor	1
30	Insert roscat M2 (3 x 3,2 mm)	2
31	Cargol zincat DIN-7985 M2 x 8 mm	2
33	Volanderà DIN-9021 M2	2

Pas 2



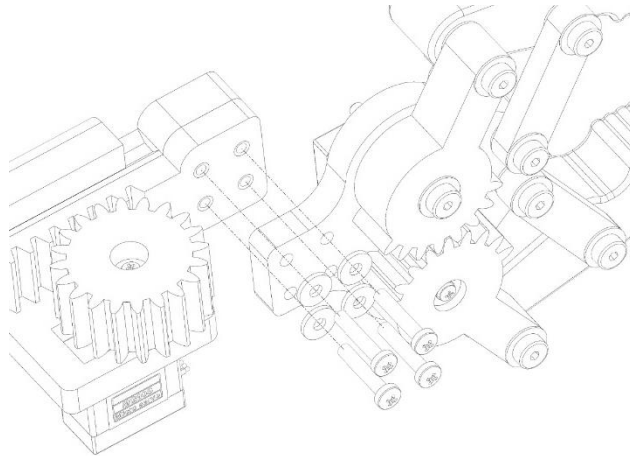
BOM ID	Descripció	Quantitat
142	Engranatge dret gripper	1
143	Engranatge esquerra gripper	1
144	Barra biarticulada gripper	4
45	Volandera de fricció 4 x 0,5 mm	6
46	Coixinet de fricció 4 x 6 mm	5
48	Cargol rectificat ISO 7379-4-M3-30	2
47	Cargol rectificat ISO 7379-4-M3-25	1
49	Femella DIN-934 M3	3
32	Cargol zincat DIN-7985 M2 x 10 mm	1
33	Volandera DIN-9021 M2	1

Pas 3



BOM ID	Descripció	Quantitat
141	Pinça gripper	2
45	Volandera de fricció 4 x 0,5 mm	8
46	Coixinet de fricció 4 x 6 mm	6
48	Cargol rectificat ISO 7379-4-M3-30	4
49	Femella DIN-934 M3	4

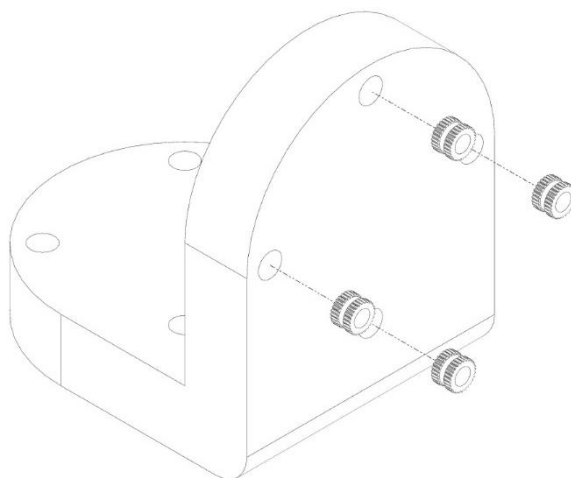
Pas 4



BOM ID	Descripció	Quantitat
36	Cargol zincat DIN-7985 M3 x 16 mm	4
39	Volandera DIN-9021 M3	4

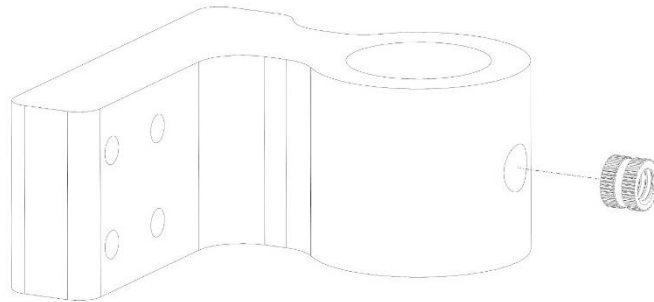
9.6. Muntatge element terminal SCARA

Pas 1



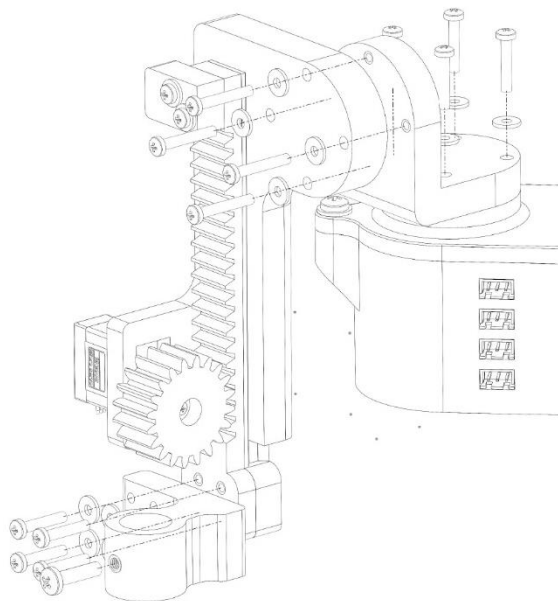
BOM ID	Descripció	Quantitat
150	Connector muntatge SCARA	1
34	Insert roscat M3 (3 x 4,2 mm)	4

Pas 2



BOM ID	Descripció	Quantitat
151	Element terminal llapis	1
40	Insert roscat M4 (4 x 6 mm)	1

Pas 3



BOM ID	Descripció	Quantitat
37	Cargol zincat DIN-7985 M3 x 20 mm	4
36	Cargol zincat DIN-7985 M3 x 16 mm	8
39	Volandera DIN-9021 M3	12
42	Cargol zincat DIN-7985 M4 x 16 mm	1

10. RESUM DEL PRESSUPOST

El cost total del projecte ascendeix a la quantitat de sis-cents noranta-nou euros amb noranta-dos cèntims, sense IVA.

11. CONCLUSIONS

Un cop finalitzat el projecte, es poden extreure una sèrie de conclusions sobre el disseny i desenvolupament de la plataforma modular. S'ha complert amb l'objectiu principal que era el disseny i la construcció de la plataforma modular, la *Figura 64* mostra la plataforma en aquest cas, amb el muntatge SCARA de 3GDL.

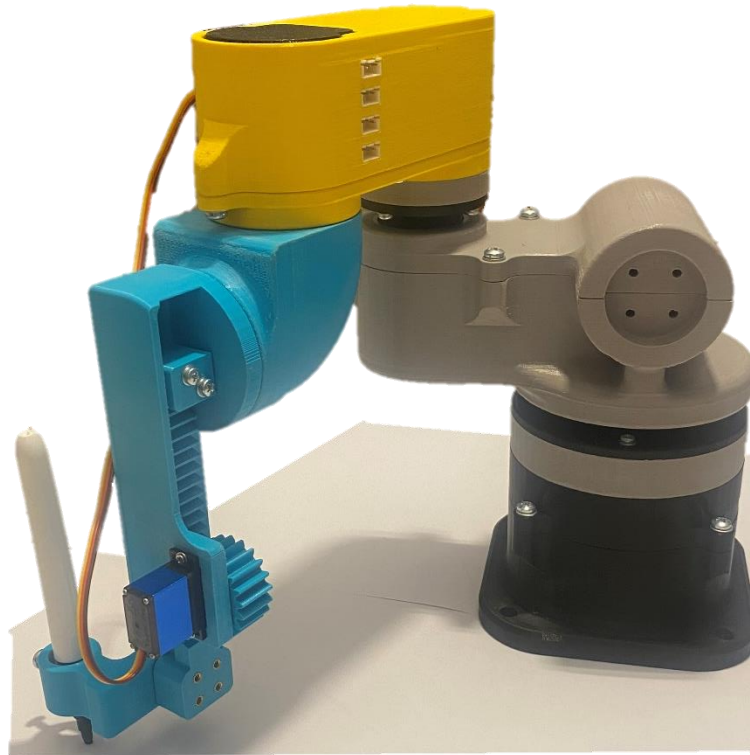


Figura 64. Plataforma modular muntatge SCARA 3GDL.

S'han respectat tots els requisits i premisses, per tant s'ha aconseguit desenvolupar una plataforma modular OpenSource de disseny modular, permetent múltiples configuracions i muntatges, amb un disseny simple, permetent que es pugui ensamblar i manipular amb facilitat i a un cost baix, assegurant així la seva replicabilitat i reproducció en qualsevol centre educatiu.

Durant la realització del projecte s'ha pogut experimentar la dificultat que presenta materialitzar un concepte, el qual tot i estar ben definit a nivell de disseny, ha resultat complex d'executar. Algunes possibles millores, seria utilitzar quan sigui possible inserts roscats més llargs per facilitar el seu muntatge.

El grau de satisfacció personal a la finalització del projecte és alt, s'han pogut assolir els objectius acordats i ha suposat un aprenentatge i familiarització amb el procés de disseny i desenvolupament molt enriquidor. En un futur es durà a terme la programació i control de la plataforma modular en els seus diferents muntatges, en un altre treball de recerca.

Raul Gonzalez Moreno
Graduat en Enginyeria Mecànica

Girona, 5 de juny de 2024

12. RELACIÓ DE DOCUMENTS

El projecte està format pel conjunt de cinc documents: memòria, plànols, plec de condicions, estat d'amidaments i pressupost.

13. BIBLIOGRAFIA

- IFR. International Federation of Robotics. Industrial robot definition . (<https://ifr.org/industrial-robots#>, 19 de març de 2024).
- WLKATA. WLKATA Mirobot. (<https://www.wlkata.com/>, 19 de març de 2024).
- ROBOTEURS. RBX1 3D Printed 6 Axis Robot Arm Beta Kit. (<https://roboteurs.com/products/rbx1-remix-3d-printed-6-axis-robot-arm-kit?variant=40314908751>, 19 de març de 2024).
- MAKERS. BRAZO ROBÓTICO THOR V2.0. (<https://www.upctmakers.com/brazo-robotico-thor/>, 19 de març de 2024).
- DOBOT. DOBOT MAGICIAN (https://www.dobot.com.mx/dobot_magician, 19 de març de 2024).
- Antonio Barrientos, Luis Felipe Peñín, Carlos Balaguer, Rafael Aracil. FUNDAMENTOS DE ROBÓTICA 2ª Edición. McGraw-Hill. 2007.
- PRUSA3D. Prusa i3 MK3S Manual. (<https://help.prusa3d.com/es/tag/mk3s>, 26 d'abril de 2024).
- Nikolay Stoimenov. Static and Kinetic Friction of 3D Printed Polymers and Composites. 2023.

14. GLOSSARI

- IFR: International Federation of Robotics
- DOF: Degrees Of Freedom
- GDL: Graus De Llibertat
- SCARA: Selective Compliant Articulated Robot Arm
- STL: Stereolithography / Standard Tessellation Language
- FDM: Fused Deposition Modeling
- 3mf: 3D Manufacturing Format
- G-Code: Geometric Code – Llenguatge de programació CNC utilitzat en màquines d'impressió 3D.
- BOM: Bill Of Materials

A. CÀLCULS DETALLATS

A.1. Primer colze

A.1.1. Forces inercials muntatge angular 4GDL

$$F_i = m \cdot a = m \cdot \frac{rps \cdot 2\pi \cdot L}{t_a} \quad (\text{Eq 1.})$$

$$F_{iB1} = m_B \cdot \frac{rps \cdot 2\pi \cdot \frac{L_B}{2}}{t_a} = 0.200 \cdot \frac{1 \cdot 2\pi \cdot \frac{0.085}{2}}{1} = 0.053 \text{ N}$$

$$F_{iMg} = m_{Mg} \cdot \frac{rps \cdot 2\pi \cdot L_B}{t_a} = 0.055 \cdot \frac{1 \cdot 2\pi \cdot 0.085}{1} = 0.029 \text{ N}$$

$$F_{iB2} = m_B \cdot \frac{rps \cdot 2\pi \cdot \left(L_B + \frac{L_B}{2}\right)}{t_a} = 0.200 \cdot \frac{1 \cdot 2\pi \cdot \left(0.085 + \frac{0.085}{2}\right)}{1} = 0.160 \text{ N}$$

$$F_{iAL} = m_{AL} \cdot \frac{rps \cdot 2\pi \cdot \left(2L_B + \frac{L_{AL}}{2}\right)}{t_a} = 0.150 \cdot \frac{1 \cdot 2\pi \cdot \left(2 \cdot 0.085 + \frac{0.170}{2}\right)}{1} = 0.240 \text{ N}$$

$$F_{iMp} = m_{Mp} \cdot \frac{rps \cdot 2\pi \cdot (2L_B + L_{AL})}{t_a} = 0.013 \cdot \frac{1 \cdot 2\pi \cdot (2 \cdot 0.085 + 0.170)}{1} = 0.028 \text{ N}$$

$$F_{iP} = m_P \cdot \frac{rps \cdot 2\pi \cdot \left(2L_B + L_{AL} + \frac{L_P}{2}\right)}{t_a} = 0.150 \cdot \frac{1 \cdot 2\pi \cdot \left(2 \cdot 0.085 + 0.170 + \frac{0.090}{2}\right)}{1} = 0.363 \text{ N}$$

$$F_{iO} = m_O \cdot \frac{rps \cdot 2\pi \cdot (2L_B + L_{AL} + L_P - L_O)}{t_a} = 0.025 \cdot \frac{1 \cdot 2\pi \cdot (0.34 + 0.09 - 0.025)}{1} = 0.063 \text{ N}$$

A.1.2. Forces gravetat muntatge angular 4GDL

$$P_X = m_X \cdot g \quad (\text{Eq 2.})$$

$$P_B = m_B \cdot g = 0.200 \cdot 9.81 = 1.962 \text{ N}$$

$$P_{Mg} = m_{Mg} \cdot g = 0.055 \cdot 9.81 = 0.540 \text{ N}$$

$$P_{AL} = m_{AL} \cdot g = 0.150 \cdot 9.81 = 1.472 \text{ N}$$

$$P_{Mp} = m_{Mp} \cdot g = 0.013 \cdot 9.81 = 0.128 \text{ N}$$

$$P_p = m_p \cdot g = 0.150 \cdot 9.81 = 1.472 \text{ N}$$

$$P_o = m_o \cdot g = 0.025 \cdot 9.81 = 0.245 \text{ N}$$

A.2. Segon colze

A.2.1. Forces inercials muntatge angular 4GDL

$$F_{iB1} = m_B \cdot \frac{rps \cdot 2\pi \cdot \frac{L_B}{2}}{t_a} = 0.200 \cdot \frac{1 \cdot 2\pi \cdot \frac{0.085}{2}}{1} = 0.053 \text{ N}$$

$$F_{iAL} = m_{AL} \cdot \frac{rps \cdot 2\pi \cdot (L_B + \frac{L_{AL}}{2})}{t_a} = 0.150 \cdot \frac{1 \cdot 2\pi \cdot (0.085 + \frac{0.170}{2})}{1} = 0.151 \text{ N}$$

$$F_{iP} = m_P \cdot \frac{rps \cdot 2\pi \cdot (L_B + L_{AL} + \frac{L_P}{2})}{t_a} = 0.150 \cdot \frac{1 \cdot 2\pi \cdot (0.085 + \frac{0.170}{2})}{1} = 0.264 \text{ N}$$

$$F_{iMp} = m_{Mp} \cdot \frac{rps \cdot 2\pi \cdot (L_B + L_{AL} + L_{MP})}{t_a} = 0.013 \cdot \frac{1 \cdot 2\pi \cdot (0.085 + 0.17 + 0.025)}{1} = 0.021 \text{ N}$$

$$F_{iO} = m_O \cdot \frac{rps \cdot 2\pi \cdot (L_B + L_{AL} + L_P - L_O)}{t_a} = 0.025 \cdot \frac{1 \cdot 2\pi \cdot (0.085 + 0.170)}{1} = 0.046 \text{ N}$$

A.3. Base

A.3.1. Forces inercials muntatge SCARA 4GDL

$$F_{iC} = m_C \cdot \frac{rps \cdot 2\pi \cdot \frac{L_C}{2}}{t_a} = 0.050 \cdot \frac{1 \cdot 2\pi \cdot \frac{0.090}{2}}{1} = 0.014 \text{ N}$$

$$F_{iMg1} = m_{Mg} \cdot \frac{rps \cdot 2\pi \cdot L_C}{t_a} = 0.055 \cdot \frac{1 \cdot 2\pi \cdot 0.090}{1} = 0.031 \text{ N}$$

$$F_{iB1} = m_B \cdot \frac{rps \cdot 2\pi \cdot (L_C + \frac{L_B}{2})}{t_a} = 0.200 \cdot \frac{1 \cdot 2\pi \cdot (0.090 + \frac{0.085}{2})}{1} = 0.167 \text{ N}$$

$$F_{iMg2} = m_{Mg} \cdot \frac{rps \cdot 2\pi \cdot (L_C + L_B)}{t_a} = 0.055 \cdot \frac{1 \cdot 2\pi \cdot (2 \cdot 0.090 + 0.085)}{1} = 0.060 \text{ N}$$

$$F_{iB2} = m_B \cdot \frac{rps \cdot 2\pi \cdot (L_C + L_B + \frac{L_B}{2})}{t_a} = 0.200 \cdot \frac{1 \cdot 2\pi \cdot (0.090 + 0.085 + \frac{0.085}{2})}{1} = 0.273 \text{ N}$$

$$F_{iAL} = m_{AL} \cdot \frac{rps \cdot 2\pi \cdot (L_C + 2L_B + L_{MP})}{t_a} = 0.150 \cdot \frac{1 \cdot 2\pi \cdot (0.090 + 0.170 + 0.025)}{1} = 0.268 \text{ N}$$

$$F_{iMp} = m_{mp} \cdot \frac{rps \cdot 2\pi \cdot (L_C + 2L_B + L_{MP} + L_F)}{t_a} = 0.030 \cdot \frac{1 \cdot 2\pi \cdot (0.09 + 0.17 + 0.05)}{1} = 0.058 \text{ N}$$

B. PARÀMETRES D'IMPRESSIÓ

PARÀMETRES IMPRESSIÓ						
Peça	Alçada de capa	Primera capa	Perímetres	Capes sòlides superiors	Capes sòlides inferiors	Infill [%]
Cos inferior base	0,15	0,2	5	6	5	20
Cos segon rodament base	0,15	0,2	5	8	7	20
Cos superior base	0,15	0,2	5	6	5	20
Tapa rodament base	0,15	0,2	5	8	7	20
Peça sortida base	0,15	0,2	5	10	8	100
Cos inferior connector	0,15	0,2	5	10	8	25
Cos superior connector	0,15	0,2	5	8	7	20
Tapa superior imantada connector	0,15	0,2	5	8	7	20
Tapa inferior imantada connector	0,15	0,2	5	8	7	20
Cos inferior braç	0,15	0,2	5	8	7	20
Tapa imantada braç	0,15	0,2	5	8	7	20
Cos superior braç	0,15	0,2	5	8	7	20
Cos segon rodament braç	0,15	0,2	5	8	7	20
Tapa rodament braç	0,15	0,2	5	8	7	20
Peça sortida braç	0,15	0,2	5	10	8	100
Cos articulació lineal	0,15	0,2	6	8	7	25
Cremallera articulació lineal	0,15	0,2	7	10	8	50
Engranatge articulació lineal	0,15	0,2	7	10	8	50
Bloqueig articulació lineal	0,15	0,2	7	10	8	50
Cos gripper	0,15	0,2	6	8	7	25
Pinça gripper	0,15	0,2	7	10	8	50
Engranatge dret gripper	0,15	0,2	7	10	8	50
Engranatge esquerra gripper	0,15	0,2	7	10	8	50
Barra biarticulada gripper	0,15	0,2	7	10	8	50
Connector muntatge SCARA	0,15	0,2	6	8	7	25
Element terminal llapis	0,15	0,2	6	8	7	25