

Treball final de grau

Estudi: Grau en Enginyeria Mecànica

Títol: Disseny, fabricació i muntatge d'un braç robòtic de 4 graus de llibertat

Document: Memòria i annexos

Alumne: Joan Luque Barrull

Tutor: Lluís Ripoll Masferrer

Departament: Enginyeria mecànica i de la construcció industrial

Àrea: Enginyeria mecànica

Convocatòria (mes/any): Juny 2022

Índex

1.	INTRODUCCIÓ	4
1.1	Antecedents	4
1.1.1	Peticionari	4
1.1.2	Estat actual i croquis	4
1.1.3	Exposició del problema	5
1.2	Objecte del projecte	5
1.3	Requeriments i abast	6
1.3.1	Requeriments tècnics i de projecte	6
1.3.2	Abast	7
2.	ESTUDI DEL DISSENY ACTUAL I PROPOSTES DE RE-DISSENY	8
2.1	Introducció	8
2.2	Subconjunt pinça (100)	10
2.3	Subconjunt canell (200)	13
2.4	Subconjunt colze (300)	15
2.5	Subconjunt base (400)	17
2.6	Altres (500)	18
3.	BANCADA	20
4.	TRAJECTÒRIES I TRANSMISSIÓ	21
4.1	Trajectòries	21
4.2	Transmissió	24
5.	ELECTRÒNICA	26
6.	FABRICACIÓ DEL BRAÇ ROBÒTIC	29
6.1	Procés de fabricació	29
6.2	Anàlisi de la solució	32

7. RESUM DEL PRESSUPOST	32
8. CONCLUSIONS	33
9. RELACIÓ DE DOCUMENTS	35
10. BIBLIOGRAFIA	36
ANNEXOS	38
ANNEX A: MATERIAL IMPRESSIÓ 3D	38
A.1 Valoració dels materials	39
A.2 Selecció dels filaments	41
ANNEX B: CÀLCULS	42
B.1 Càlcul de la base del colze	43
B.2 Càlcul del parell del motor de la base	46
B.3 Estudi de precisió del braç: repetibilitat de cicles	49
ANNEX C: ELECTRÒNICA I CONTROL	51
C.1. Diagrama de connexions i diagrama esquemàtic	52
C.2. Codi de programació IDE Arduino	54
ANNEX D: FABRICACIÓ I MUNTATGE	58
D.1 Fabricació de peces d'impressió 3D	59
D.2 Muntatge del braç robòtic	62
ANNEX E: MANUAL D'USUARI I MANTENIMENT	70
E.1 Descripció de la màquina	71
E.2 Advertències de seguretat	71
E.3 Manipulació i funcionament del equip	72
E.4 Precaucions, manteniment i transport	72

1. INTRODUCCIÓ

1.1 Antecedents

1.1.1 Peticionari

El departament d'Enginyeria mecànica i de la construcció industrial de l'Escola Politècnica Superior, ubicat al carrer de Maria Aurèlia Capmany i Farnés, 61, 17003 Girona.

Exposa que disposen de dos models de braços robòtics, de caràcter educatiu, inacabats.

1.1.2 Estat actual i croquis

A la següent *Figura 1* i *Figura 2* podem observar l'esquema bàsic proposat pel professorat i l'estat actual del model de braç robòtic.

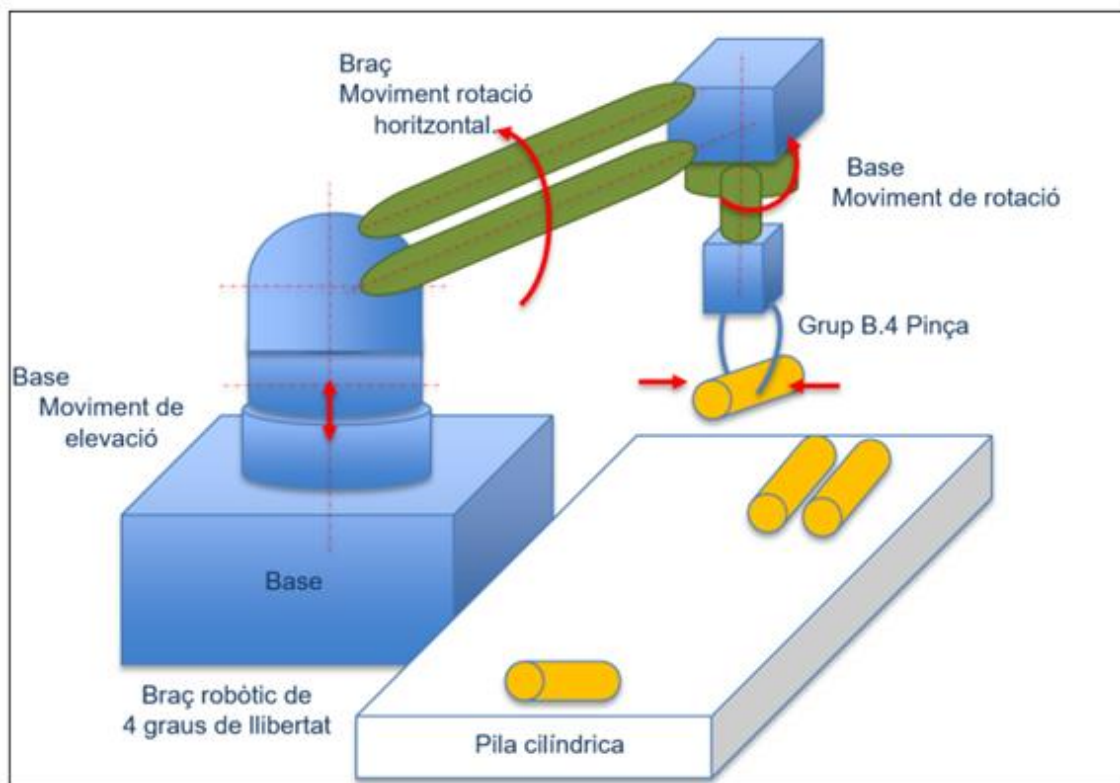


Figura 1: Esquema bàsic del braç robòtic.

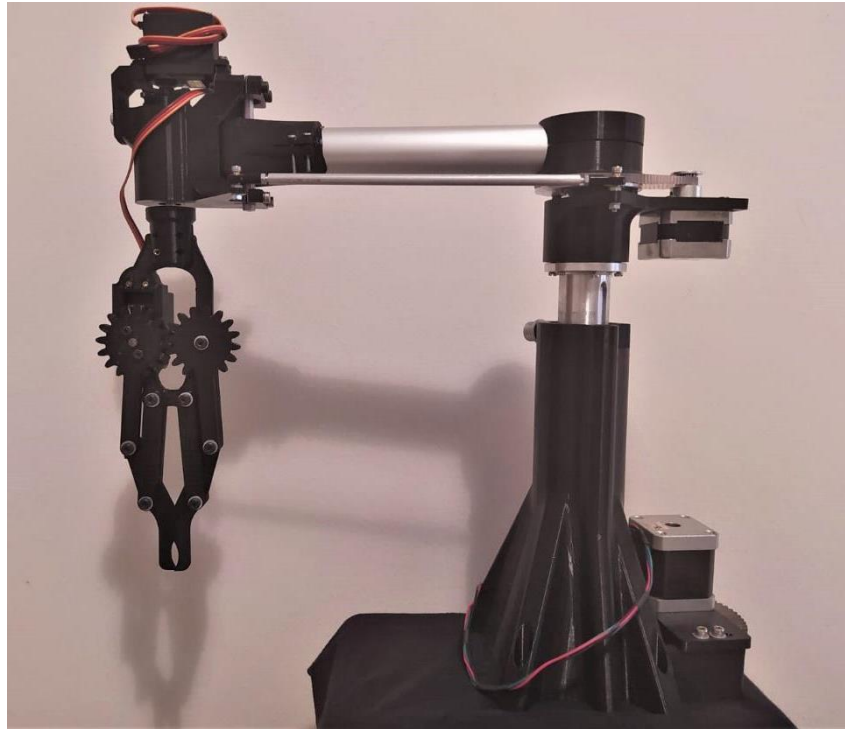


Figura 2: Estat actual del braç de 4 GdL.

Actualment el model compta amb un seguit de problemes que no el fan funcional. Problemes que van des de la necessitat del re-disseny i fabricació de peces, ja sigui per un mal disseny previ o per algun problema en la fabricació del mateix, fins a l'absència d'electrònica per poder-lo controlar o una base on poder-lo muntar.

1.1.3 Exposició del problema

El model va ser realitzats per estudiants durant les sessions pràctiques de l'assignatura de disseny de màquines del grau en enginyeria mecànica. Al finalitzar les classes, el model va ser abandonat en l'estat actual i, per tant, inacabat.

1.2 Objecte del projecte

L'objecte del projecte és, en primer lloc, analitzar l'estat actual del braç robòtic i, en segon lloc, realitzar els re-dissenys, fabricacions i muntatges necessaris per deixar-lo completament funcional.

1.3 Requeriments i abast

1.3.1 Requeriments tècnics i de projecte

Els requeriments previstos fixats pel departament al inici del projecte, com també els afegits durant l'etapa de millora i finalització del mateix, hauran de ser satisfets pel model final un cop acoblat i operatiu. Aquests requeriments són els següents:

- El conjunt ha de poder ser transportable per una sola persona.
- Ha de poder executar correctament els moviments en els seus quatre graus de llibertat.
- Ha d'aprofitar, en la mesura del possible, peces existents en el braç original.
- La pinça (eina) ha d'estar dissenyada per poder manipular, com a mínim, piles amb les següents característiques:
 - a. Piles amb un pes màxim de 75 grams.
 - b. Les piles podran tenir diferents diàmetres entre $18 \pm 7,5$ mil·límetres.
 - c. L'alçada de les piles variarà de 45 a 50 mil·límetres.

Aquestes condicions donen un rang d'ús entre les piles més comercials, les de la sèrie AAA fins a les de la sèrie D.



Figura 3: Rang de piles a poder manipular.

- La pila tindrà un moviment de rotació horitzontal, sense rotació en el seu extrem.
- El braç ha de tenir la capacitat de manipular 1 pila cada 20 segons.

1.3.2 Abast

El projectista s'encarregarà de finalitzar el projecte i s'assegurarà que compleixi els requisits acordats i realitzarà les següents tasques:

- Estudiar la viabilitat del projecte actual amb tal de modificar i/o canviar les peces necessàries per tal de poder satisfer l'objectiu acordat.
- Disseny estètic del braç per tal de que sigui atractiu de cares a ser exposat en jornades universitàries o d'educació.
- Disseny i fabricació d'una base pel braç.
- Modificar en la seva totalitat el conjunt que actua com a pinça.
- Disseny d'un algoritme amb Arduino fàcilment editable per tal de poder programar les trajectòries del braç.
- Selecció i muntatge del total de l'electrònica del braç, es a dir, plaques controladores, cablejat, finals de carrera, actuadors i motors.
- Realització dels plànols i del 3D de les peces finals.

2. ESTUDI DEL DISSENY ACTUAL I PROPOSTES DE RE-DISSENY

2.1 Introducció

El cicle de vida d'aquest projecte, com en la gran majoria, no ha seguit una progressió lineal, sinó en forma d'espiral tal i com es pot veure en la següent imatge.

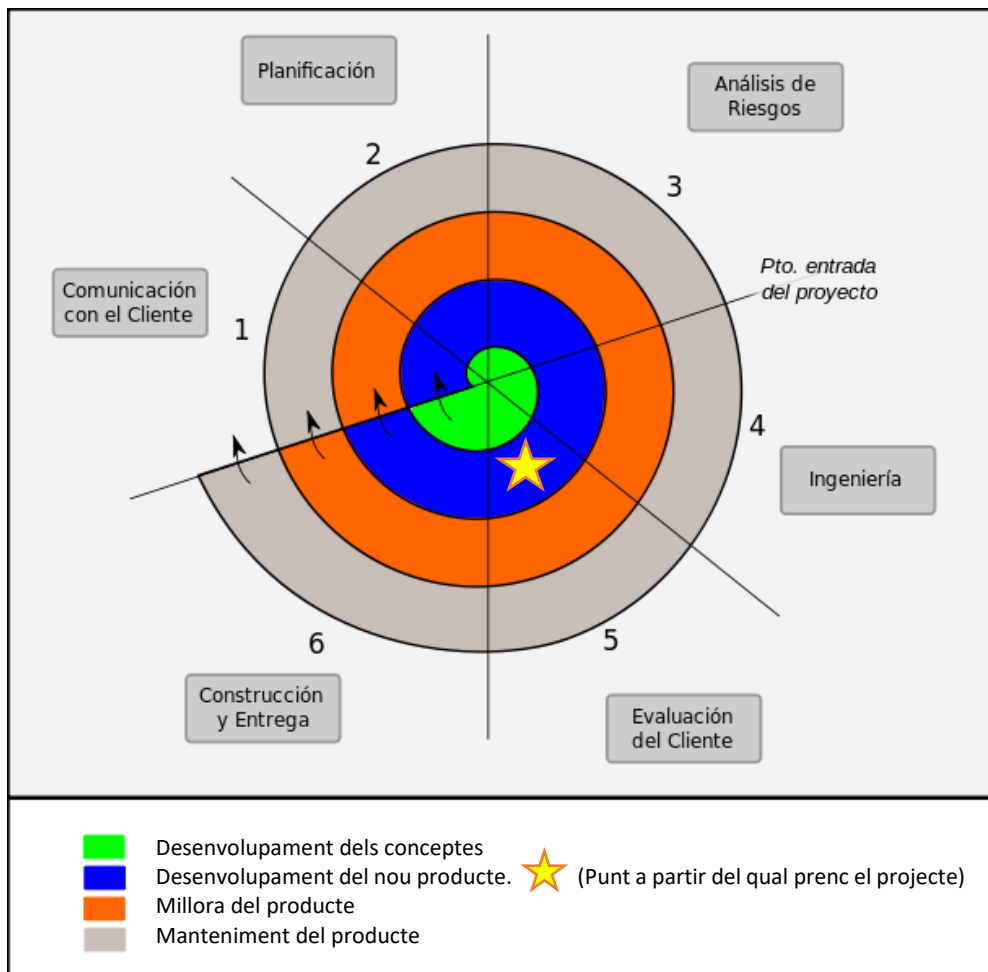


Figura 4: Cicle de vida d'un projecte.

L'avantatge principal d'haver participat prèviament en totes les etapes del projecte, ja sigui directe o indirectament, és que ara em permet poder analitzar-lo més fàcilment sense haver de fer massa ús d'enginyeria inversa per entendre com funciona cada conjunt i avaluar-ne els punts forts, dèbils o els possibles errors de disseny.

Així doncs, en els següents capítols d'aquest apartat s'exposarà l'anàlisi realitzat a cada subconjunt i els re-dissenys totals o parcials adoptats en cada cas per millorar el conjunt inicial explicant detalladament el motiu dels mateixos.

En el transcurs del desenvolupament del projecte s'ha seguit la metodologia del següent diagrama:

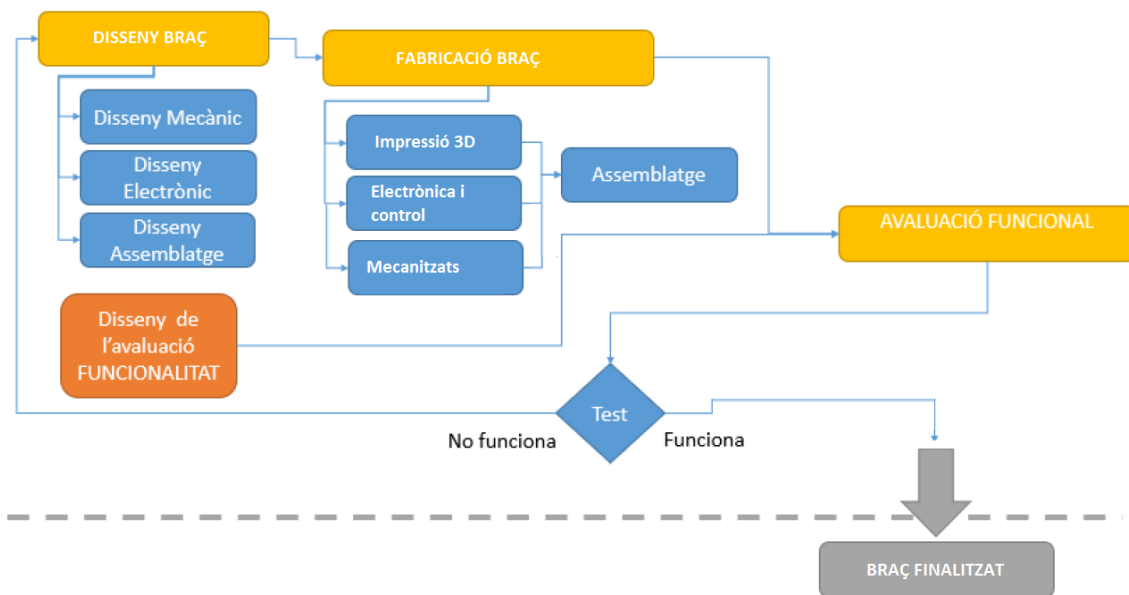


Figura 5: Diagrama de flux en el que s'ha basat el re-disseny del braç.



Figura 6: Disseny 3D final del braç robòtic incorporant els re-disseny.

2.2 Subconjunt pinça (100)

En el cas del subconjunt de la pinça, es va acordar realitzar un re-disseny complet. És a dir, no s'aprofitaria cap concepte ni peça impresa del model inicial el qual podem observar en la següent imatge:

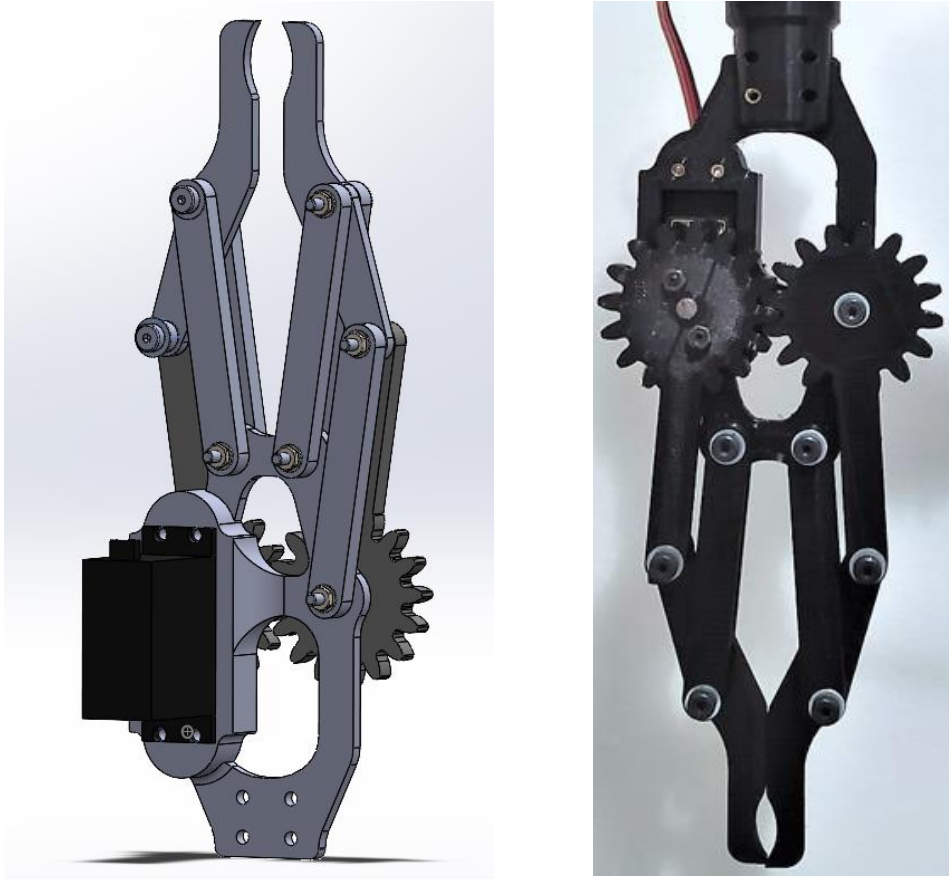


Figura 7: Disseny 3D (esquerra) i assemblatge final (dreta) de la pinça inicial .

Com és pot observar, el mecanisme era bàsic i bastant comú però alhora funcional, simple i econòmic al tenir un servomotor com a accionador. Al fer ús de cargols de fixació ISO 7379 conjuntament amb coixinets IGUS també resultava en un conjunt prou sòlid i sense jocs excepte si s'aplicava una força alterna i perpendicular en cada pota de la pinça.

Tot i els punts observats, és decideix fer un nou disseny, que tot i ser més complex i contenir més elements, sigui més atractiu visualment i tingui més presència dins el conjunt.

El disseny resultant es pot observar en les següents imatges:

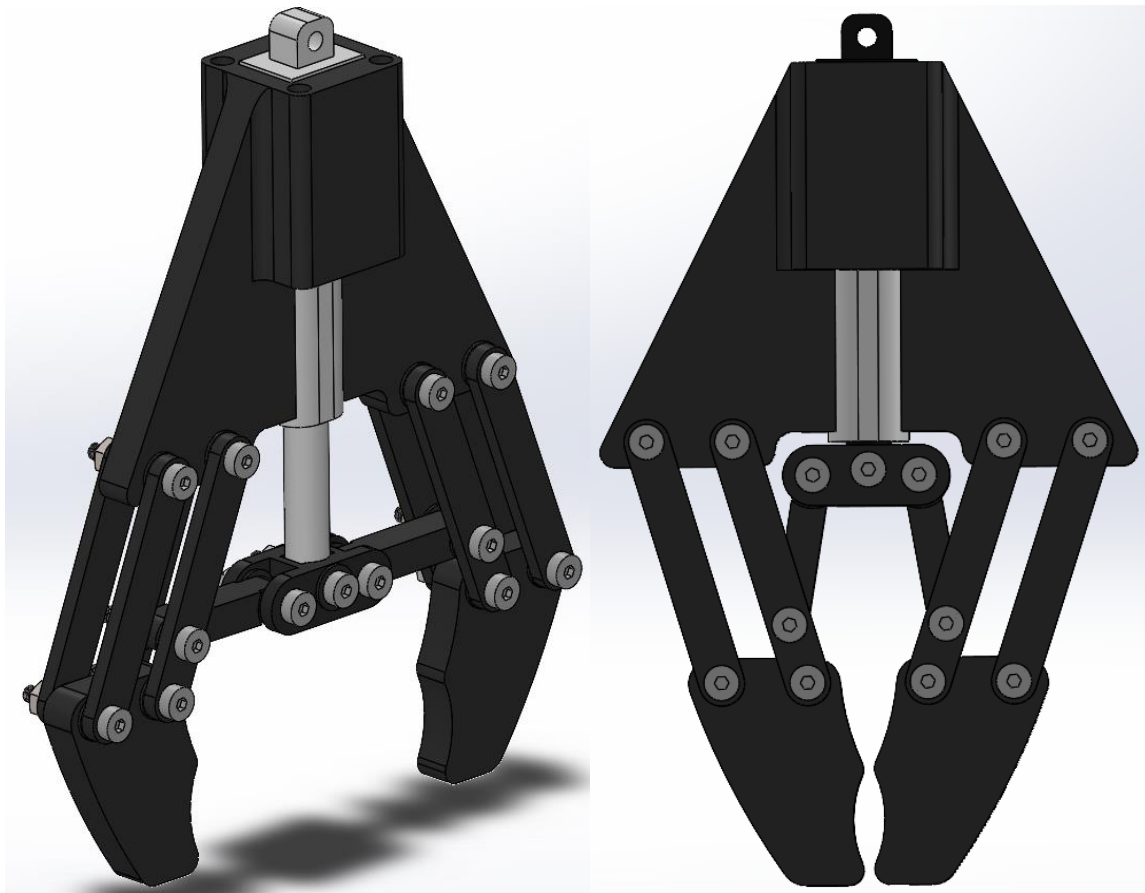


Figura 8: Disseny 3D de la pinça final .

Com podem veure, el nombre d'elements ha augmentat, però ara el conjunt és veu molt més consistent, atractiu i integrat dins del braç robòtic.

Es conserva l'ús d'elements de fixació ISO 7379 i coixinets IGUS per minimitzar el joc entre les parts mòbils. També s'afegeix cinta d'espuma en les zones de contacte interior dels dits de la pinça per tal d'aconseguir un millor contacte i no fer malbé l'objecte que pugui agafar.

En aquest cas es decideix que el dispositiu d'accionament sigui un actuator lineal, no tan comú però més interessant i més atractiu visualment aportant la dualitat de colors negre – gris metàl·lic en la qual es vol basar tot el conjunt del braç.

Finalment podem avaluar el pes de cada pinça.

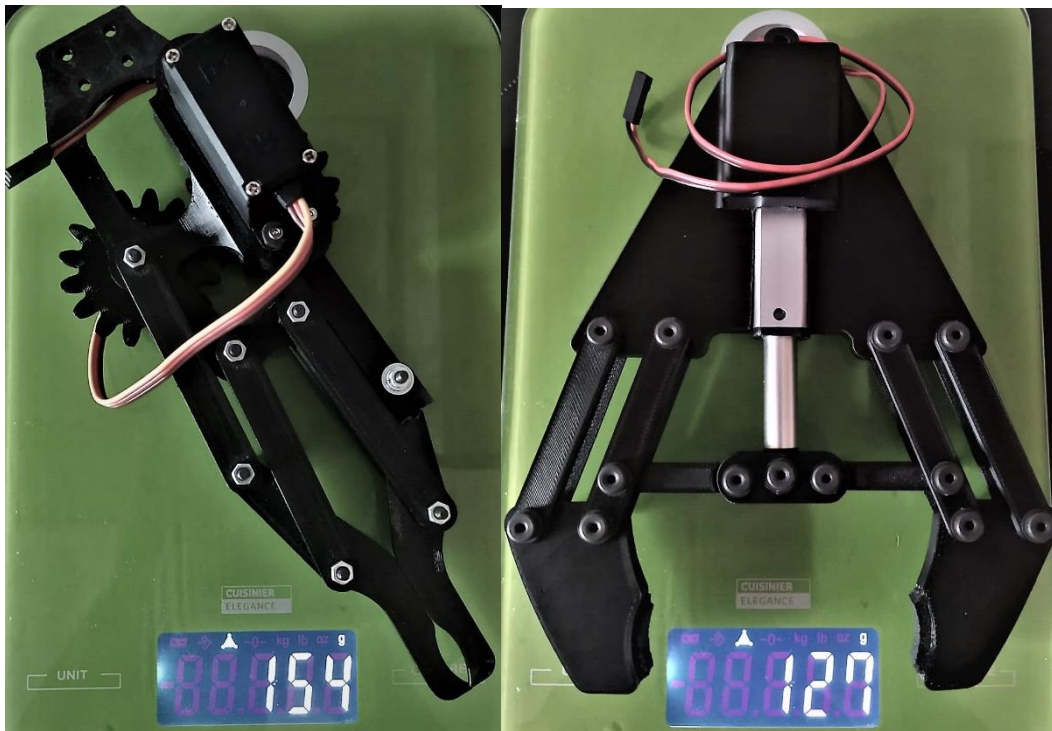


Figura 9: Disseny 3D de la pinça final .

Contra-intuïtivament observem com el conjunt amb més elements té un pes inferior. Això és degut al fet que s'ha optimitzat el material de millor manera configurant els paràmetres d'impressió i també al seleccionar un actuator de menor pes.

En definitiva, podem dir que el nou disseny aconsegueix el que buscàvem inicialment quan és va plantejar el re-disseny, i tot això, sense aportar més pes en el conjunt; al contrari, reduint-lo un 20% aproximadament.

2.3 Subconjunt canell (200)

En el cas del canell, a diferència de la pinça, s'ha aprofitat la major part del disseny i peces inicials, ja que satisfien correctament totes les necessitats tant funcionals com estètiques.

Així doncs, les dues úniques peces que han fet falta re-dissenyar o crear han estat:

1. La peça d'unió entre el canell i el tub (203. *Suport unió tub*) la qual uneix aquest amb el colze.
2. Una nova peça per tal d'organitzar tot el cablejat que surt tant d'aquest conjunt com del de la pinça i que no s'havia previst inicialment (204. *Suport cablejat*).

Aquests dos es poden veure d'un color vermell per diferenciar de la resta en la imatge inferior.

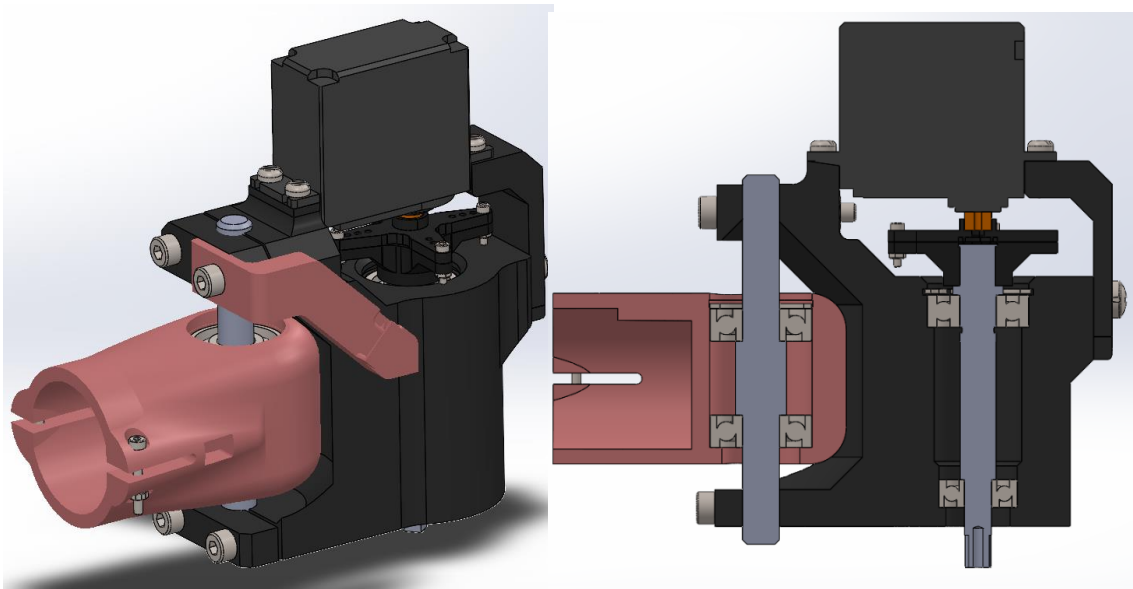


Figura 10: Disseny 3D del canell.

Si bé el motiu de fer el suport pel cablejat és evident, ja que no es va preveure, el motiu de re-dissenyar el suport d'unió del canell al tub és degut a que aquest presentava errors en el disseny i en la fabricació que no el feien apte per conservar en el model final del braç i els quals són els següents:

- a) El diàmetre del forat on anava el tub era excessiu i això permetia al canell rotar sobre l'eix del tub.
- b) L'obertura lateral per pressionar el suport contra el tub era massa petita i els cargols anaven roscats al propi plàstic i en conseqüència no es podia fer gaire parell de collament.

- c) La tolerància del forat on van els 2 rodaments era incorrecta o durant el procés de post-impresió és va llimar massa i aquests presentaven un joc excessiu.

A més, l'acabat superficial era molt dolent degut a una mala configuració de la impressora 3D i el disseny no tenia cap previsió de com fer passar el cablejat per l'interior de la peça tal i com estava projectat que passés. Podem veure tots aquests punts a les següents imatges:



Figura 11: Errors en el disseny a), b) i c) respectivament .

Tots aquests errors de disseny o defectes de fabricació / assemblatge van ser solucionats amb el nou disseny que es pot veure a continuació:

- a') S'ha ajustat el diàmetre del forat i s'hi ha fet un sortit que entrarà en una osca del tub i impedirà mecànicament la rotació del canell respecte l'eix del tub.
- b') L'obertura lateral per pressionar el suport contra el tub s'ha fet més gran i ubicat en ambdós costats de la peça amb forats passants per poder roscar el cargol a una femella i poder-ho collar bé.
- c') S'ha ajustat el diàmetre del forat dels rodaments adequadament i millorat l'acabat superficial amb els paràmetres d'impresió correctes.

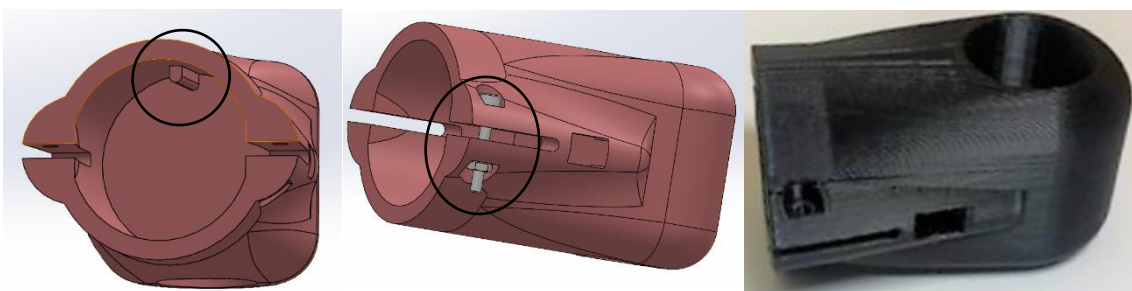


Figura 12: Solucions en el disseny a'), b') i c') respectivament.

2.4 Subconjunt colze (300)

Pel que fa al colze tenim una situació semblant al anterior conjunt. Es respecte bastant la idea inicial i és limita a solucionar problemes de disseny, acoblament i/o falta de previsió.

Per aquets conjunt es van identificar els següents:

- d) La tensió que fa la corretja combinada amb l'escalfor que genera el motor provoca una flexió en el cos de la base, la qual a la llarga acaba deformada i destensant la corretja amb el perill que el motor perdi els passos.
- e) No es va preveure la ubicació ni l'activament del fi de cursa pel control del motor, ni com organitzar el cablejat que ve del servomotor i la pinça, ni com portar el conjunt de cablejat de manera adequada per després poder dirigir-lo cap a l'electrònica.
- f) Els inserts amb els quals s'uneix el conjunt al eix del telescopi no estaven ben instal·lats i presentaven joc.

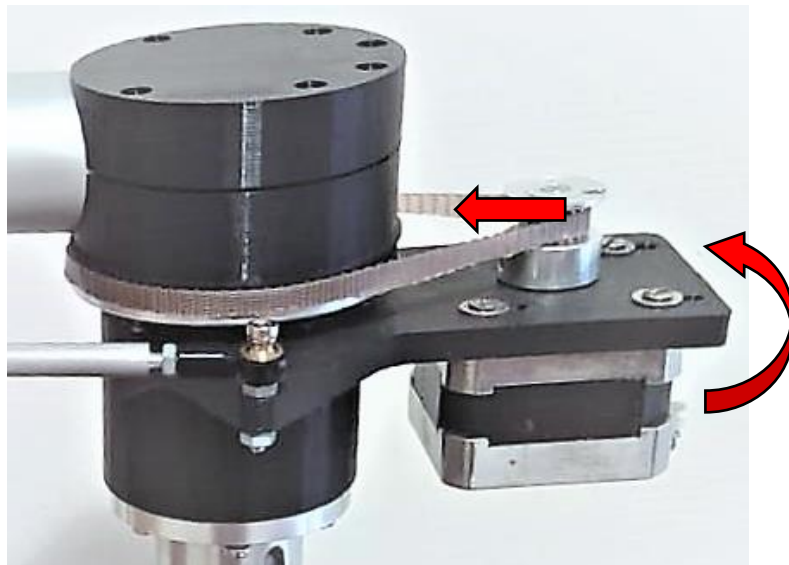


Figura 13: Conjunt inicial del colze del braç robòtic. I representació problema d).

Tots aquests problemes s'han solucionat re-dissenyant únicament la peça de la base del colze i generant una petita pota que activi el contacte del fi de carrera en el moment adequat. La solució del nou conjunt es pot veure a continuació:

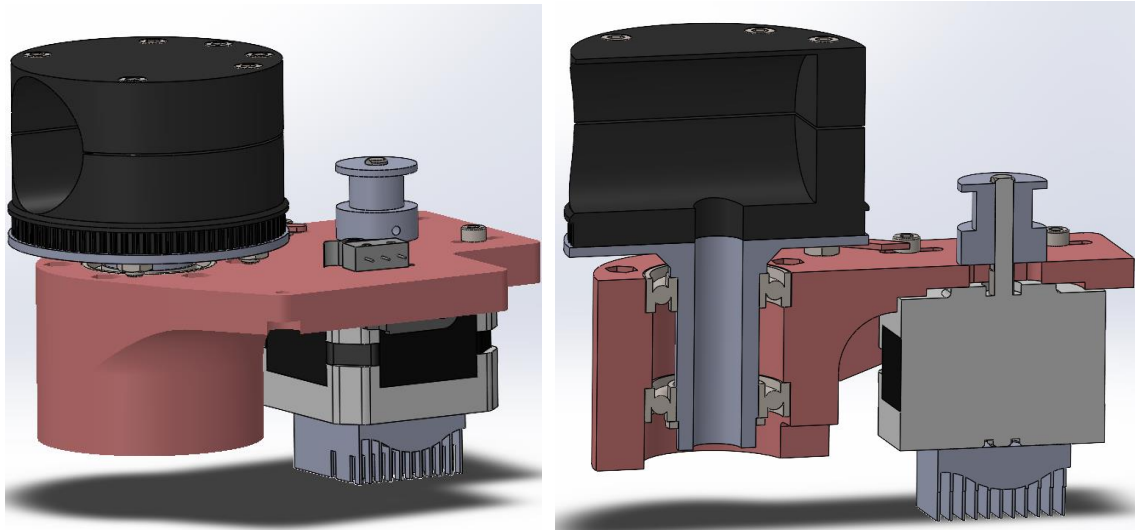


Figura 14: Disseny 3D del colze.

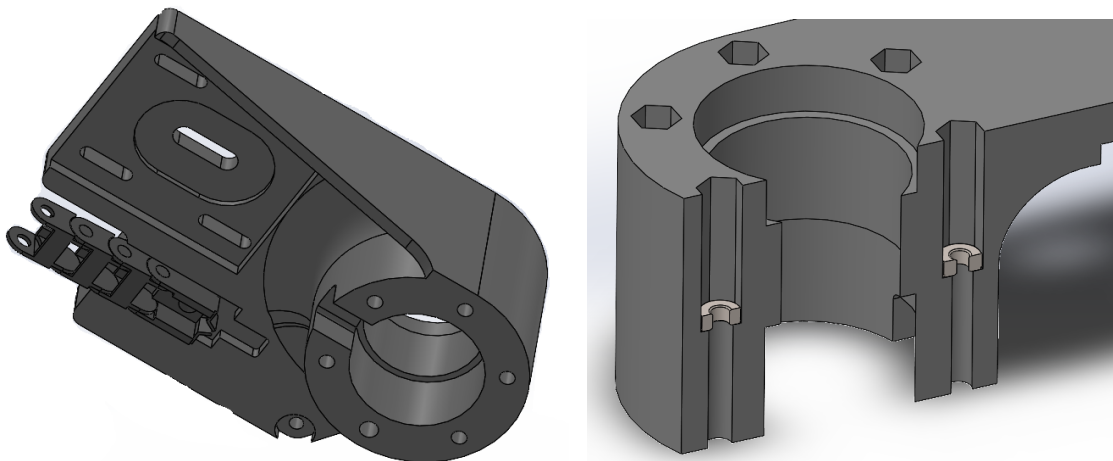


Figura 15: Detalls de la base del colze i inici del porta-cables.

d') S'ha solucionat el problema de la flexió incorporant una cartella lateral a la base i augmentat la seva inèrcia. També prevenim la deformació de la peça seleccionant com a filament PETG en comptes de PLA el qual és més estable tèrmicament. A més a més, afegim un dissipador al motor i trenquem el pont tèrmic cap a la peça incorporant una làmina de cartró entre la unió del motor i la base del colze.

e') S'han previst zones on acoblar la cadena porta-cables i el interruptor de final de carrera. També s'ha fet un forat a la part inferior posterior de la base per on poder treure tot el cablejat provinent dels altres conjunts i redirreccionar-ho per la cadena porta-cables fins a la base del braç.

f') S'han eliminat els inserts i s'ha optat per generar uns forats en forma hexagonal on s'introduiran femelles i així poder collar millor el conjunt a l'eix del telescopi de la base.

2.5 Subconjunt base (400)

Pel subconjunt de la base, independentment de aplicar-hi modificacions o no, era precís fabricar de nou la peça que en conforma el cos. Això és degut a un mal dimensionat del forat on es troben encastades les guies lineals i també el de la obertura posterior on va el pinyó, fet que va obligar a llisar tant la peça que va quedar-hi dipositat gran quantitat d'encenalls plàstics els quals, bé per presses o oblit, no van ser retirats abans de l'assemblatge, resultant amb un mal ajustatge de les guies.

Aprofitant doncs, es van realitzar les modificacions pertinents per, a més d'evitar els problemes detectats anteriorment, dotar la peça d'un suport on cargolar la part inferior del porta-cables i preveure els forats per la instal·lació del final de carrera.

A més, com també va passar amb els del conjunt anterior, dos dels quatre inserts metàl·lics utilitzats per collar el suport del motor van cedir i tan sols es podia collar pels altres dos. Com a resultat, el motor no quedava prou ben collat i no es podia utilitzar. Es va optar per usar en aquest cas la mateixa solució que en el cas anterior i prescindir dels inserts i utilitzar femelles.

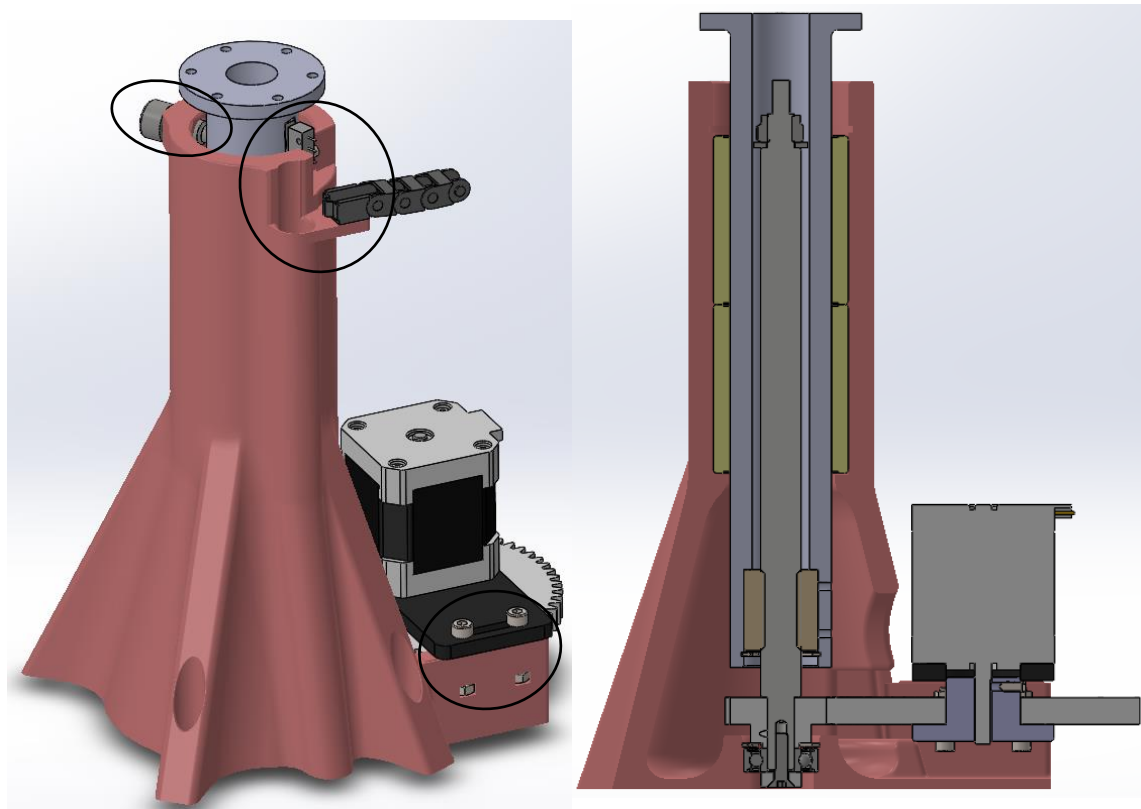


Figura 16: Disseny 3D de la base del braç.

També es va detectar un joc entre el cargol guia ubicat a un lateral de la part superior del cos. Aquest es va haver de fabricar de nou per tal de reduir el joc existent entre aquest i la guia mecanitzada en l'eix del telescopi.

Un cop fabricat i assemblet el braç robòtic amb els nous re-dissenys en els conjunts i amb l'electrònica també instal·lada, ens vam adonar que era convenient substituir el pinyó metàl·lic gros de Z=60 per un que fos de Nylon reforçat amb fibra de vidre per tal de reduir el soroll que generava aquest engranatge. Així doncs, es va demanar el nou pinyó i es va mecanitzar un nou casquet per unir-lo a l'eix del motor.

2.6 Altres (500)

A part de les peces que conformen els subconjunts, també es va haver de mecanitzar el tub que uneix el canell amb el colze ja que, aquest no tenia cap previsió de com fer passar pel seu interior el cablejat provinent del actuador de la pinça i del servomotor del canell. També se li va mecanitzar l'osca per allotjar el sortint del suport del canell i així evitar la rotació que presentava aquest prèviament.



Figura 17: Mecanitzacions en tub 501. Tub unió colze – canell.

També es van haver de substituir les boles d'enllaç als extrems de la barra paral·lela al tub ja que aquestes havien estat mal instal·lades prèviament.

Finalment, es va haver de dissenyar i fabricar un suport per elevar els elements a desplaçar pel braç a la seva alçada de treball (en aquest cas cilindres de petites dimensions).

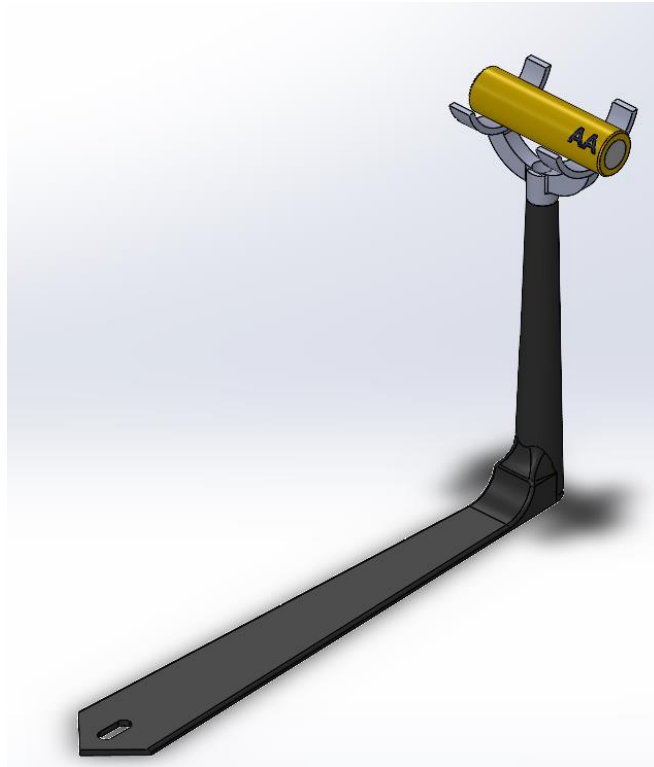


Figura 18: Suport per les piles.

De la mateixa manera que en les cares internes dels dits de les pinces, la superfície on contacte la pila amb el suport també està recoberta amb espuma.

3. BANCADA

Una de les tasques acordades en aquest projecte era la de dissenyar i fabricar una bancada pel conjunt del braç. Aquesta havia de satisfer els següents requeriments:

- Facilitar el desplaçament del braç robòtic de tal manera que quedi tot integrat i una sola persona el pugui moure agafant-lo pels extrems paral·lels de la bancada.
- Que eviti la bolcada del braç robòtic en qualsevol dels seus punts de treball.
- Que pugui contenir-hi de manera discreta tot el conjunt de l'electrònica del braç.

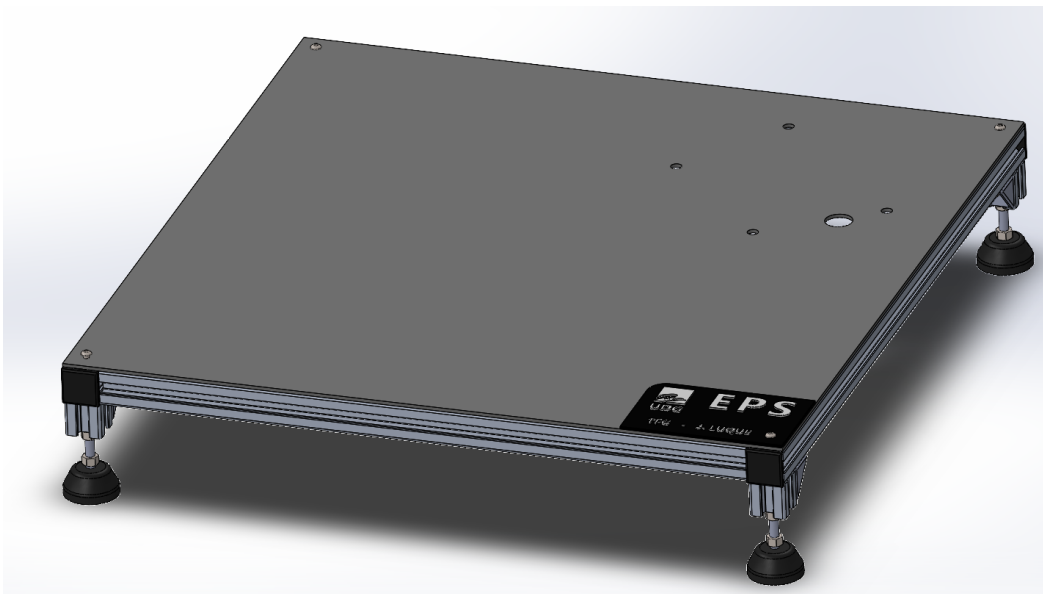


Figura 19: Disseny 3D de la bancada del braç robòtic.

Per tal de satisfer els requeriments és va decidir fer una estructura amb perfils d'alumini de 20x20 mm units entre ells amb esquadres i, utilitzar una superfície a la cara superior de metacrilat negre. Amb aquest conjunt aconseguíem una línia continuïsta amb tot el disseny del projecte.

Tenint en compte el camp de treball del braç robòtic es va decidir que la superfície d'aquesta bancada fos de 400x400 mm.

Per tal d'evitar possibles talls durant el seu ús, es van instal·lar tapetes als extrems dels perfils d'alumini per tal que no quedessin exposades superfícies tallants.

Com que era convenient que l'electrònica quedés el més amagada possible, aquesta s'instal·la a la cara interna de la placa de metacrilat i queda unida a aquesta amb cinta *Velcro* per tal que sigui fàcilment desmuntable en cas d'haver-la de revisar o canviar.

4. TRAJECTÒRIES I TRANSMISSIÓ

4.1 Trajectòries

En el següent apartat es descriuen tots els moviments que pot realitzar el braç robòtic en els seus quatre graus de llibertat (G.d.L).

1er – Moviment lineal vertical del eix telescòpi (base)

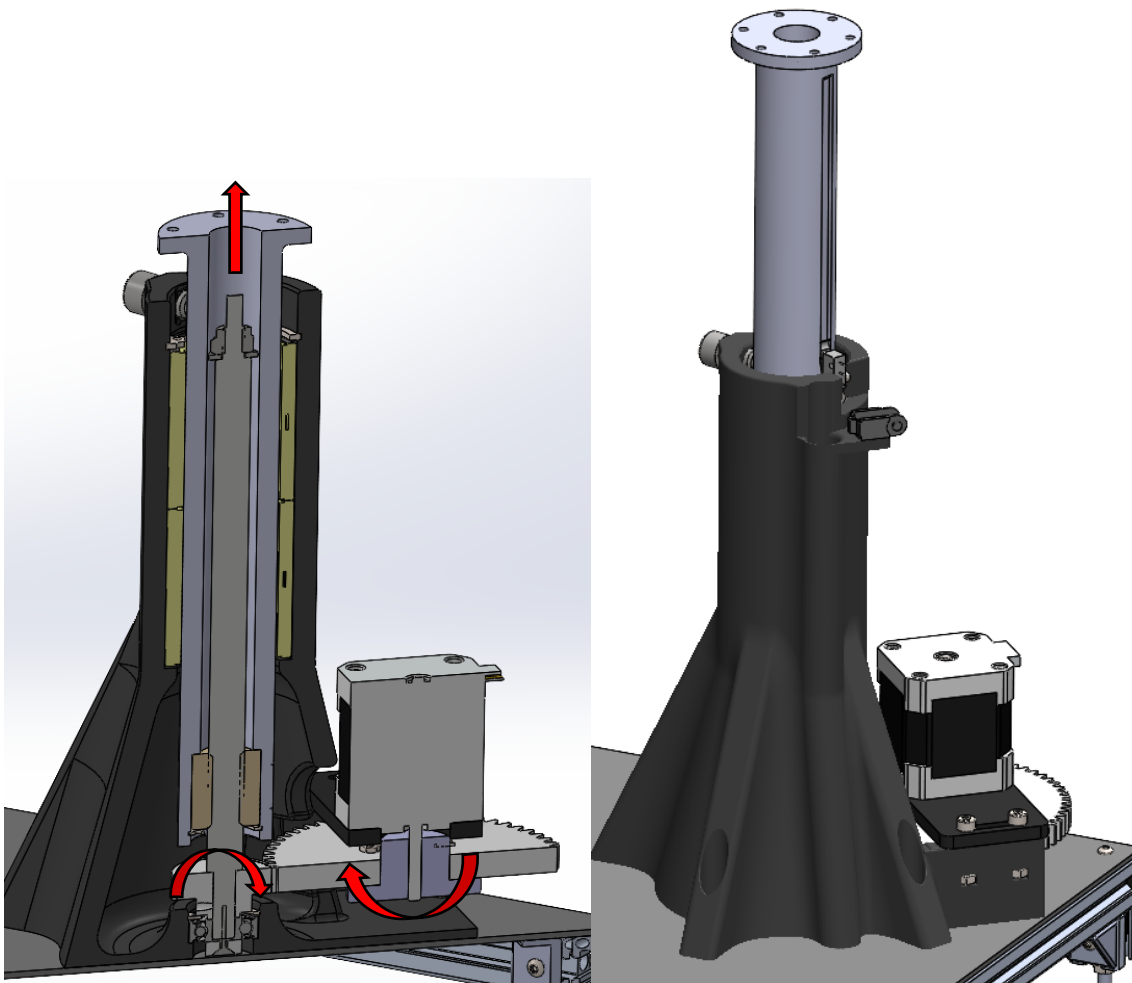


Figura 20: Moviment del telescopi.

Al girar el motor en sentit anti-horari acciona el pinyó petit que gira en sentit horari i aquest fa rodar en el mateix sentit el vis-sens-fi que conseqüentment fa elevar l'eix telescòpic.

2n – Rotació respecte l'eix de la base (colze)

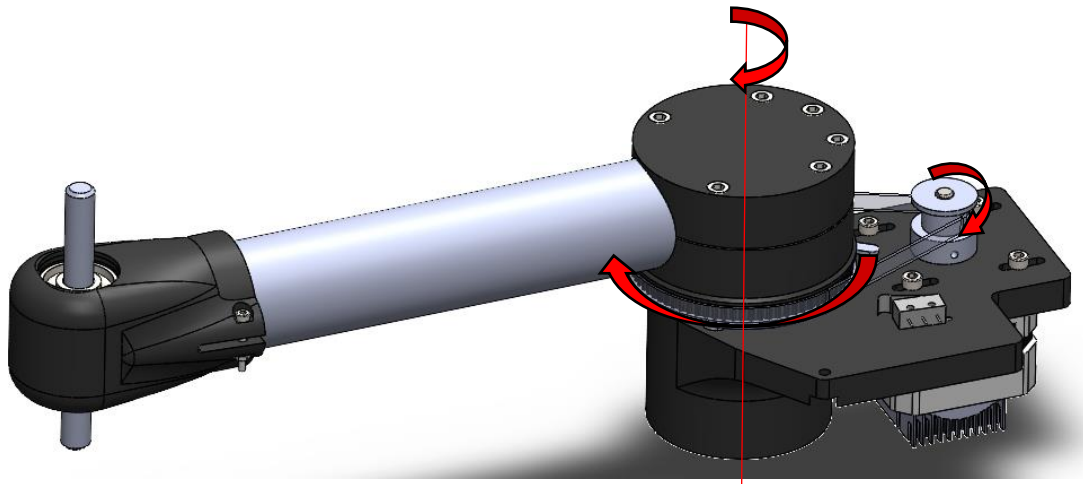


Figura 21: Moviment del colze.

La politja gira solidària al motor i transmet el moviment de gir a la tapa inferior del tub que fa girar tot el braç respecte l'eix vertical de la base (senyalat en vermell a la figura 21).

3er – Rotació respecte l'eix de l'eina (canell)

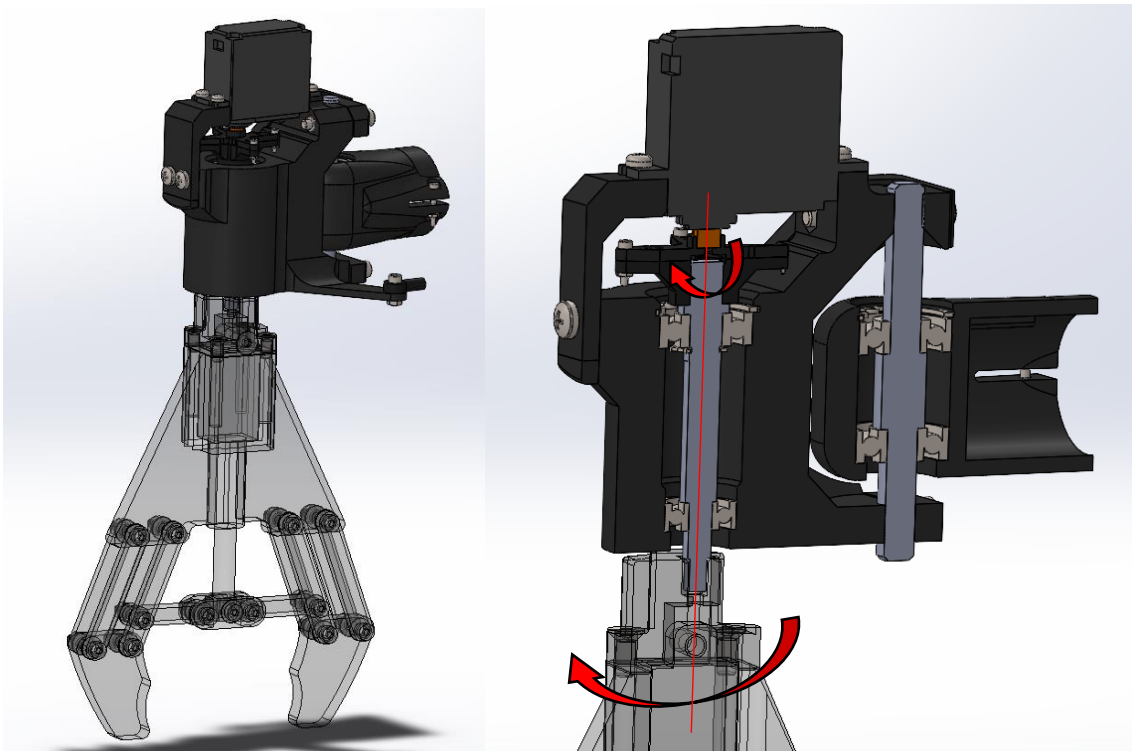


Figura 21: Moviment del canell.

Al girar el servomotor, l'eix del qual n'és solidari fa girar en el mateix sentit i velocitat tot el conjunt de l'eina (la pinça).

4t – Moviment lineal del actuator que obre/tenca l'eina (pinça)

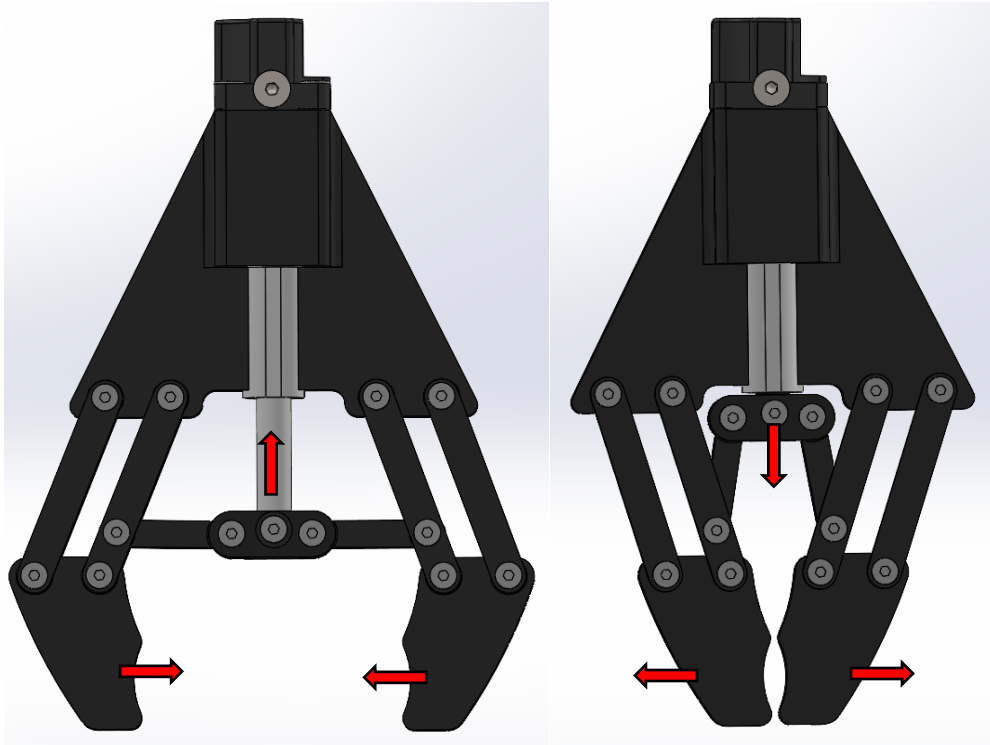


Figura 22: Moviment de la pinça.

Finalment, tenim l'obertura i el tancament de la pinça que es produeix al desplaçar-se l'actuator cap a baix i cap a dalt respectivament tal i com podem observar a la Figura 22.

4.2 Transmissió

En aquest punt es descriuen les 2 relacions de transmissió presents en el conjunt del braç robòtic.

La primera es dona entre el gir del motor del colze respecte el gir del propi braç.

La segona es troba en l'altre motor pas a pas, el que fa actuar el pinyó de 60 dents que engrana amb un pinyó més petit solidari al vis-sens-fi que eleva l'eix telescòpic del braç.

1era:

Com podem observar la relació de transmissió és una simple relació dintre els diàmetres de la politja i de la tapa inferior del tub que uneix el colze amb el canell.

$$i_c = \frac{\varnothing \text{ politja}}{\varnothing \text{ tapa inferior}} = \frac{12}{60} = 0,2$$

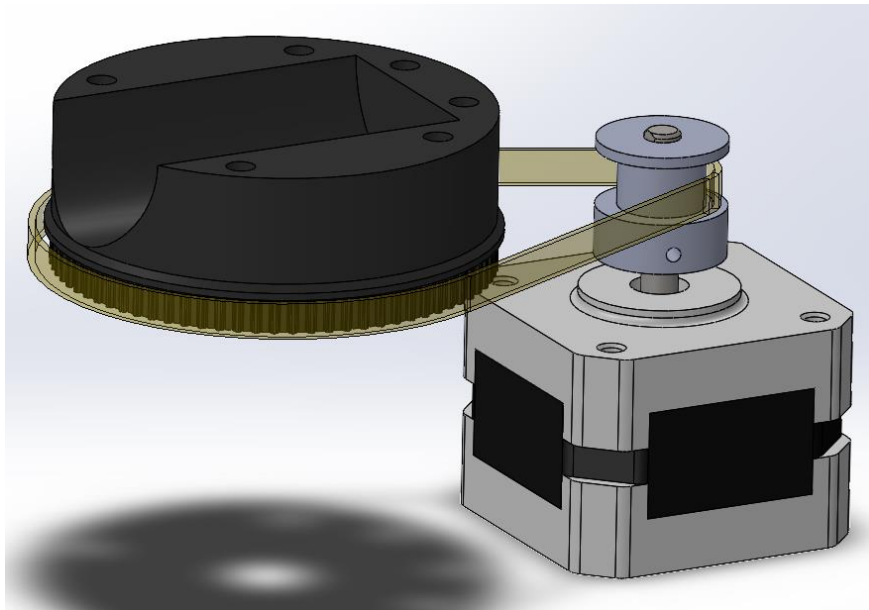


Figura 23: Relació de transmissió al colze.

2na:

La segona la trobem ubicada a la base del braç. Es produeix a través de tres elements; un pinyó conductor de 60 dents, un pinyó conduït de 20 dents i, finalment, un vis-sens-fi amb un pas de 4mm.

$$i_{b1} = \frac{Z \text{ pinyó conductor}}{Z \text{ pinyó conduït}} = \frac{60}{20} = 3$$

Després tenim una relació entre el gir del pinyó conduït i l'elevació de l'eix telescòpic la qual segueix l'expressió següent:

$$i_{b2} = \frac{N \text{ pinyó conduït}}{p \text{ vis-sens-fi}} = \frac{1 \text{ rpm}}{4 \text{ mm}} = 0,25 \frac{\text{rpm}}{\text{mm}} = 4 \frac{\text{mm}}{\text{rpm}}$$

Per tant, l'expressió que relaciona el gir del motor amb el desplaçament del telescòpic es defineix com:

$$i_{b1} \cdot i_{b2} = 3 \cdot 4 \frac{\text{mm}}{\text{rpm}} = 12 \frac{\text{mm}}{\text{rpm}}$$

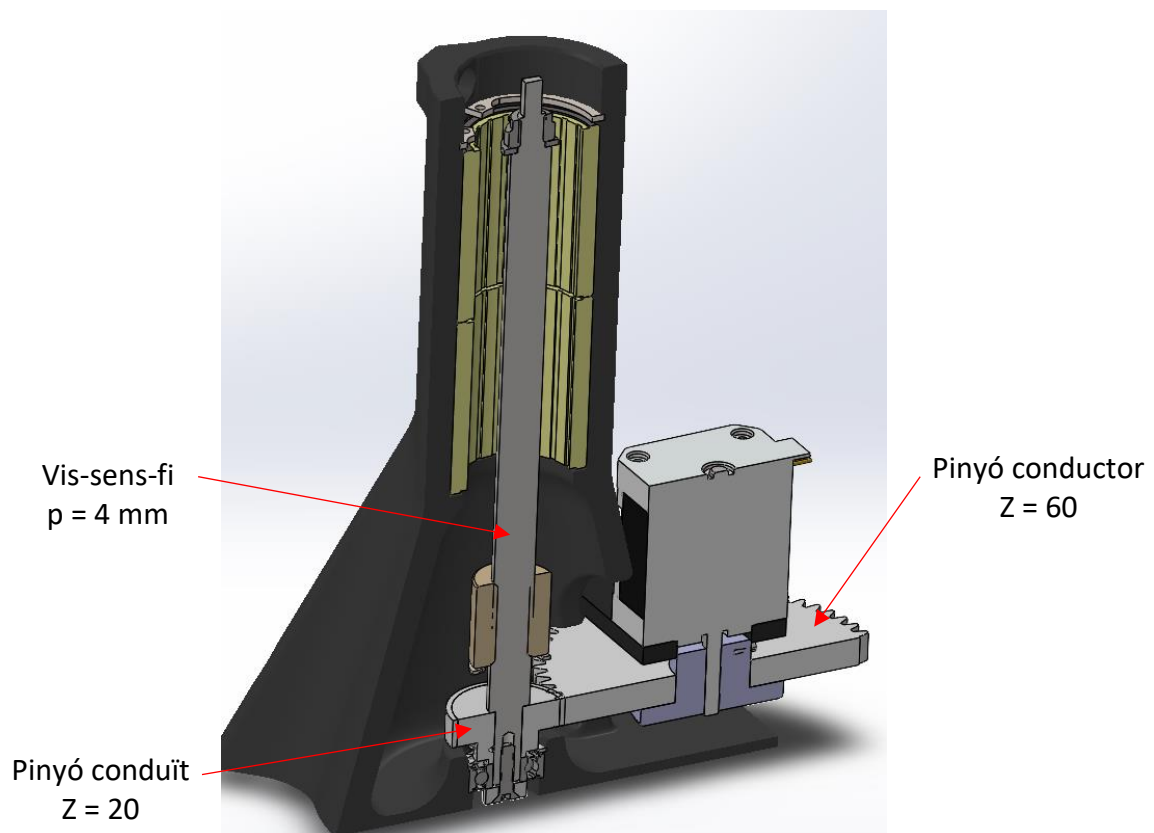


Figura 24: Relació de transmissió a la base.

5. ELECTRÒNICA

Al tractar-se d'un braç robòtic de 4 G.d.L ja sabem d'entrada que ens faran falta com a mínim 4 accionadors. S'ha optat per diversos tipus de components segons la seva funció i requeriments dins el braç, i aquests són els següents:

1. Actuador lineal per la pinça.



Figura 25: Actuador lineal 12v 15mm/s IP54.

2. Servomotor pel gir del canell.



Figura 26: Servomotor MG995.

3. Motor pas a pas pel gir del colze.



Figura 27: Motor pas a pas Nema 17 Usongshine 17HS4023.

4. Motor pas a pas per l'eix telescòpic de la base.



Figura 28: Motor pas a pas Nema 17 Usongshine 17HS4401S.

L'elecció d'aquesta gama de accionadors és per la seva facilitat de controlar i programar utilitzant una controladora Arduino i també pel seu cost relativament baix. També ofereixen un alt nivell de precisió (destacant els motor pas a pas), qualitat essencial si volem obtenir bons resultats en la repetibilitat de cicles del braç robòtic.

Per tal de controlar tots aquests accionadors i poder-los programar dins un ambient de treball còmode per un usuari no especialitzat en electrònica s'ha optat per fer el muntatge de l'electrònica sobre una placa controladora Arduino UNO R3. Aquesta placa és molt polivalent i molt utilitzada per projectes d'aquest estil gràcies a les seves possibilitats, comunitat on-line i llibreries de programació.

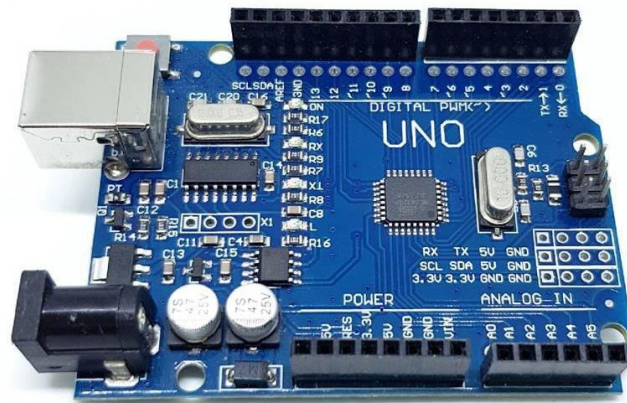


Figura 29: Placa controladora Arduino UNO R3.

Per tal de controlar els actuadors amb llibreries específiques s'escull una placa controladora "shield" la qual va col·locada sobre la UNO R3 a través dels seus pins. Aquesta segona placa amb uns controladors específics per motors, s'encarregarà de comunicar-se entre la placa base i els actuadors facilitant així la seva programació i implementació.

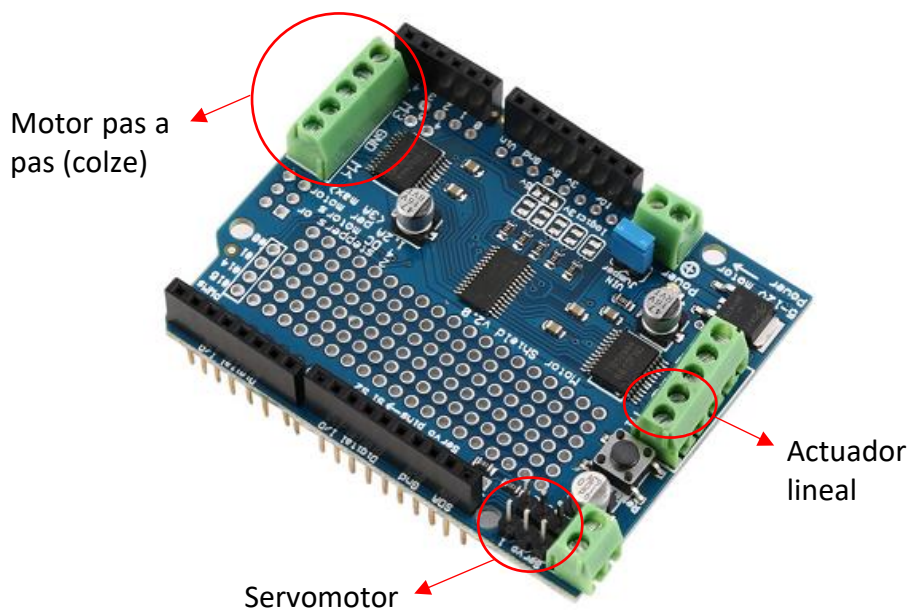


Figura 30: Placa controladora dels actuadors Adafruit Motorshield V2.

Finalment, per controlar el motor pas a pas més gran (el que a través d'una transmissió de pinyons fa moure l'eix del telescopi de la base) s'utilitzarà un "driver" específic que anirà soldat a la "shield" que hem vist anteriorment.



Figura 31: Controlador driver A4988 del motor pas a pas de la base.

Per a més informació relacionada amb l'electrònica i el control del braç robòtic es pot consultar l'ANNEX C: *Electrònica i control*.

6. FABRICACIÓ DEL BRAÇ ROBÒTIC

6.1 Procés de fabricació

Per a la fabricació de les noves peces impreses del braç robòtic es parteix dels dissenys escollits amb els detalls explicats a l'apartat 2. ESTUDI DEL DISSENY ACTUAL I PROPOSTES DE RE-DISSENY, amb impressió FDM i utilitzant PLA o PETG segons la peça.

Totes les peces a imprimir es poden observar en els plànols. Principalment es distribueixen en els 4 subconjunts del braç (pinça, canell, colze i base).

El procés de fabricació i assemblatge es fa d'acord amb els passos indicats a l'ANNEX D: *Fabricació i muntatge* i les indicacions corresponents del plec de condicions.

El resultat final del procés de fabricació i acoblament del braç robòtic incorporant les peces re-dissenyades es pot veure representat en les següents fotografies:



Figura 32: Muntatge final del braç robòtic.



Figura 33: Execució de moviments.

6.2 Anàlisi de la solució

Una vegada finalitzat el procés de fabricació del re-disseny es valora i analitza la solució final respecte el model inicial. Per tal de facilitar-ho i extreure'n els punts forts i els dèbils de cada aspecte valorat, s'elabora una taula comparativa de la primera i la segona versió del braç robòtic, amb el pes indicatiu de la importància de cada aspecte (0-100) i la valoració que se li atorga (0-10).

Taula comparativa		Versió original		Versió redissenyada	
Aspecte valorat	Pes (0-100)	Puntuació			
Jocs entre peces	90	7	630	8	720
Funcionalitat	100	4	400	9	900
Toleràncies	90	6	540	8	720
Nombre de peces	60	8	480	7	420
Facilitat muntatge	50	8	400	5	250
Suma total (x10)	4000		2450		3010

Taula 1: Taula comparativa.

7. RESUM DEL PRESSUPOST

El cost total de la fabricació i assemblatge del braç robòtic puja un total de **CINC-CENTS SEIXANTA-UN AMB SETANTA-TRES CÈNTIMS (561,73 €)** sense IVA.

Es pot veure el pressupost en detall al *Document 5: Pressupost*.

8. CONCLUSIONS

Un cop finalitzat el projecte es poden extreure una sèrie de conclusions sobre el desenvolupament del disseny del braç robòtic i, també, sobre la fabricació de peces mitjançant fabricació additiva amb impressió 3D.

Abans, a mode de resum, s'exposaran tots els objectius assolits respecte els marcats al inici del projecte:

OBJECTIU	ASSOLIMENT %
Estudiar la viabilitat i aprofitament peces existents i en el seu defecte dissenyar-ne i fabricar-ne de noves.	90
Disseny estètic atractiu enfocat a ser exposat a les JPO.	90
Disseny i fabricació d'una base pel braç robòtic.	100
Nou disseny del conjunt de la pinça per manipular cilindres de petites dimensions.	100
Disseny editable d'un algoritme pel control del braç.	80
Selecció i muntatge del total de l'electrònica del braç.	90
Realització de plànols i del 3D de les peces finals.	100
Correcta execució dels moviments del braç en el seus quatre graus de llibertat.	100
El conjunt ha de poder ser transportable per una sola persona.	100

En la realització d'aquest seguit de treballs s'ha pogut experimentar la dificultat que presenta voler materialitzar un concepte el qual, tot i trobar-se molt ben definit, ja sigui a nivell teòric o a nivell de disseny, resulta complex d'executar.

Això és degut a la poca familiarització com a estudiants a precisament això, a materialitzar les idees, els dissenys i en definitiva, els projectes i, és que com bé diu la frase: "el paper ho aguanta tot". I així és, el paper no entén d'errors de fabricació, de muntatge, de connexionat, de programació o de disseny, el món real, sí.

Tot i així s'ha de reconèixer que avui dia comptem amb molts més recursos per tirar endavant projectes d'aquest estil, tant per la facilitat d'accés al conjunt de peces que el conformen com a la informació necessària. Un dels recursos més interessants és el de la fabricació additiva mitjançant impressores 3D, molt utilitzades en projectes d'aquest estil per la seva capacitat de prototipatge ràpid i econòmic.

Si bé és cert que la impressió 3D ha estat una gran aliada en la materialització del braç robòtic, també s'han de reconèixer els problemes que han derivat d'escollir aquest mètode de fabricació com, per exemple, la falta de precisió dimensional, la qual és pot compensar amb un estudi de la mateixa i calibrant la impressora. També els errors durant la impressió (salt de passos dels motors, mala adherència de capes, problemes en l'extrusor etc.) recurrents sobretot en peces grans i de més de 24 hores de temps de impressió.

Finalment, puc dir que el grau de satisfacció personal a la finalització del projecte és alt, ja que s'han pogut assolir en gran mesura tots els objectius acordats, fins i tot els referents a l'electrònica i control del braç els quals no es troben dins el meu àmbit d'estudi.

El braç robòtic va poder ser exposat en la jornada de portes obertes de la universitat el febrer d'aquest 2022 i va generar gran interès en els alumnes visitants. Resulta molt gratificant poder veure finalitzat un projecte iniciat conjuntament amb els companys del grau i no tan sols això, sinó que aquest sigui el primer braç funcional al llarg dels anys de l'assignatura de disseny de màquines.



Figura 34: Exposició del braç a la JPO 2022.

9. RELACIÓ DE DOCUMENTS

Document 1. Memòria i Annexos

Annex A: Material impressió 3D

Annex B: Càlculs

Annex C: Electrònica i control

Annex D: Fabricació i muntatge

Annex E: Manual d'usuari i manteniment

Document 2: Plànols

Document 3: Plec de condicions

Document 4: Estat d'amidaments

Document 5: Pressupost

Annex E: Annex del pressupost

10. BIBLIOGRAFIA

- a) Richard G. Budynas, J. Keith Nisbett. (2012) THE MCGRAW-HILL, Mexico
DISEÑO EN INGENIERÍA MECÁNICA DE SHIGLEY, 9ª edició
(ISBN 978-607-15-0771-6)
- b) JOSE BELLVEHI CASADELLA (2021). *GRAU ENGINYERIA MECÀNICA PROJECTES TEORIA*. (Online Moodle UdG).
- c) RUI ALMEIDA , RAINER BÖRRET , WOLFGANG RIMKUS. (2020) International Refereed Journal of Engineering and Science (IRJES) ISSN (Online) 2319-183X
Simulation of the elastic properties of 3D printed plastic tension rods using Fused Deposition Modeling (FDM)
(<http://www.irjes.com/Papers/vol9-issue5/D09051824.pdf>)
- d) ALI GUJJAR, HAAD. Discuss simulations: PLA Material
(<https://forum.ansys.com/discussion/23165/pla-material>)
- e) HOW TO ELECTRONICS. *How to Control Stepper Motor with A4988 Driver & Arduino*
(<https://how2electronics.com/control-stepper-motor-with-a4988-driver-arduino/>)
- f) HOW TO ELECTRONICS. *How to Control Servo Motors with Arduino – Complete Guide* (<https://howtomechatronics.com/how-it-works/how-servo-motors-work-how-to-control-servos-using-arduino/>)
- g) PROMETEC. *ADAFRUIT MOTOR SHIELD V2 usando el motor shield v2 con arduino*
(<https://www.prometec.net/adafruit-motor-shield-v2/>)
- h) DEJAN. *Stepper Motors and Arduino – The Ultimate Guide*
(<https://howtomechatronics.com/tutorials/arduino/stepper-motors-and-arduino-the-ultimate-guide/>)
- i) CARLOS SÁNCHEZ DE MIGUEL. (2020) *¿CÓMO IMPRIMIR EN 3D CON DOS (O MÁS) COLORES Y UN SOLO EXTRUSOR?*
(<https://diocesanos.es/blogs/equipotic/2020/06/14/como-imprimir-en-3d-con-dos-o-mas-colores-y-un-solo-extrusor/>)

- j) JORGE LORENZO. *PLA vs ABS vs PETG: COMPARATIVA*
(<https://of3lia.com/pla-vs-abs-vs-petg-comparativa/>)

- k) IBERMETAL. *Plasticos PETG - VIVAK*
(<http://ibermetal.es/plasticos/petg-vivak/>)

- l) CHEMICAL COMPOUNDS DEEP DATA SOURCE. *Images of PETG Based on Quantum Mechanical Computation*
(<https://www.molinstincts.com/image/PETG-img-CT1103556678.html>)

- m) MIRCO SLEPKO. (2019) *DIY Robot Arm 6 Axis (with Stepper Motors)*
(<https://www.instructables.com/DIY-Robot-Arm-6-Axis-with-Stepper-Motors/>)

ANNEX A: MATERIAL IMPRESSIÓ 3D

A.1 Valoració dels materials

El material amb el qual s'alimenta la impressora 3D se'l coneix com a filament. Per aquest projecte en particular es compten amb 2 impressores 3D, fàcilment configurables per ser alimentades amb els diversos tipus de material pensats per a fabricació FDM que veurem a continuació.

PROPIEDAD	PLA	ABS	PETG
Precio	20€ - 25€	20€ - 25€	25€ - 30€
Tª fusión	200-215°C	220-240°C	230-250°C
Tª cama caliente	0-40°C	90-110°C	60-90°C
Ventilador de capa	100%	0%	30-50%
Densidad [g/cm³]	1.24	1.07	1.27
Facilidad de impresión	Muy Alta	Muy baja	Alta
Calidad de impresión	Muy alta	Media	Alta
Resistencia	Alta	Media	Media-Baja
Rigidez	Muy alta	Media	Baja
Resistencia al impacto	Muy baja	Muy alta	Media
Resistencia térmica	Muy baja (30°C)	Muy alta (<100°C)	Alta (80°C)
Adhesión entre capas	Media	Baja	Alta
Olor	Nada	Mucho	Poco

Taula A.1 – Propietats dels materials. Extreta de of3lia.com

Tª Fusió: la temperatura a què es fon el filament. A menys temperatura, menys despesa.

Tª Llit: temperatura necessària al llit calent perquè el PLA, ABS o PETG s'imprimeixi bé.

Ventilador de capa: La potència del ventilador. A més %, els detalls petits s'imprimiran millor.

Densitat: Per cada kg de filament, si hi ha més densitat, menys metres imprimibles.

Facilitat d'impressió: Els problemes que ens donarà a l'hora de fer-lo servir (sobretot la primera vegada).

Qualitat d'impressió: Com queden les peces en una impressora normal i corrent.

Resistència: La càrrega que és capaç d'assumir el material abans del trencament.

Rigidesa: La deformació que pateix un material en funció de la força que hi apliquem.

Resistència a l'impacte: Si ens cau a terra, com de fràgil és aquesta peça.

Resistència tèrmica: La deformació del material en funció de la temperatura.

Adhesió entre capes: Com de bé s'enganxen les capes entre si (té a veure amb la fragilitat)

Olor: Si el filament fa olor o treu vapors al imprimir-se.

1. ABS:

L'acrilonitril butadiè estirè és el material més utilitzat després del PLA en les impressions 3D. És un material difícil de ser extruït però ofereix molta resistència, mecànica com química, i durabilitat. També és reciclable.

- Avantatges: la seva alta resistència als impactes, la durabilitat i la polivalència. Pot oferir un acabat professional fàcilment si es poleix químicament amb vapors de acetona.
- Desavantatges: és complicat de treballar i imprimir correctament, necessita unes condicions de temperatura molt estables.

2. PET-G:

El polietilè tereftalat glicol és un derivat modificat del polietilè (PET) i també és un dels materials més utilitzats en la impressió 3D, més resistent tèrmicament, més flexible i menys fràgil que el PLA.

- Avantatges: és un material més fàcil d'imprimir que el ABS, té una bona flexibilitat i resistència. És resistent també a certs químics.
- Desavantatges: l'acabat superficial no és gaire bo, podria destacar la rugositat de les superfícies amb suports.

3. PLA:

L'àcid polilàctic és un tipus de plàstic biodegradable provinent del blat de moro. És un filament molt versàtil i ecològic. Majoritàriament s'utilitza per fabricar objectes que no tinguin molt de desgast.

- Avantatges: econòmic, és el material més fàcil d'imprimir, té una alta resistència i rigidesa en condicions òptimes. També ofereix diversos colors de filament.
- Desavantatges: baixa resistència a les temperatures i al impacte, dificultats en preveure les toleràncies degut a les dilatacions tèrmiques.

A.2 Selecció dels filaments

Un cop vistes les propietats dels filaments més utilitzats en impressió 3D, es decideix utilitzar el PLA en una de les impressores per fer aquelles peces sense requeriments de càrregues importants ni temperatures elevades. Per aquestes altres peces s'utilitzarà el PET-G per les raons observades en la comparació inicial.

D'aquesta manera podem seleccionar segons ens convingui un material o altre i imprimir simultàniament amb les 2 impressores els 2 materials, agilitant així el procés de fabricació.

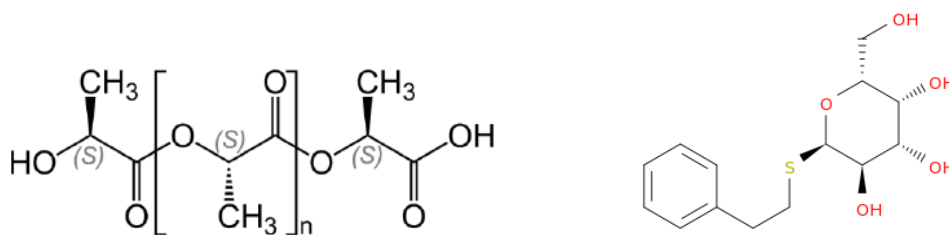


Figura A.2: Estructura química del PLA (esquerra) i del PET-G (dreta).

Material	Densitat (g/cm ³)	Resistència al impacte (kJ/m ²)	Resistència a tracció (MPa)	Mòdul de Young E (MPa)	Mòdul elàstic G (MPa)	Coefficient de Poisson
PLA	1,24	20	47 - 70	3.400	55 - 72	0,38 - 0,4
PETG	1,27	105	53	2.200	79	0,4

Taula A.2 – Propietats mecàniques dels materials.

ANNEX B: CÀLCULS

B.1 Càlcul de la base del colze

La finalitat d'aquest càlcul és la d'avaluar numèricament si hi ha una millora substancial entre el model re-dissenyat de la base del colze respecte el model original.

Les característiques que es volen avaluar són la tensió equivalent màxima i la deformació que apareix en la zona on va el motor quan es sotmet a la peça a una càrrega equivalent a la que efectua la corretja, la qual és de 120N en el seu punt d'aplicació, a 10mm de la superfície de la peça i en el sentit que es pot veure a la Figura B.1.4.

Per realitzar aquest anàlisi utilitzarem el software *Ansys Workbench*. Definirem un bloc "Steady-State Thermal" per contemplar també les càrregues tèrmiques aproximades i un "Static Structural" per estudiar les deformacions un cop aplicada la càrrega.

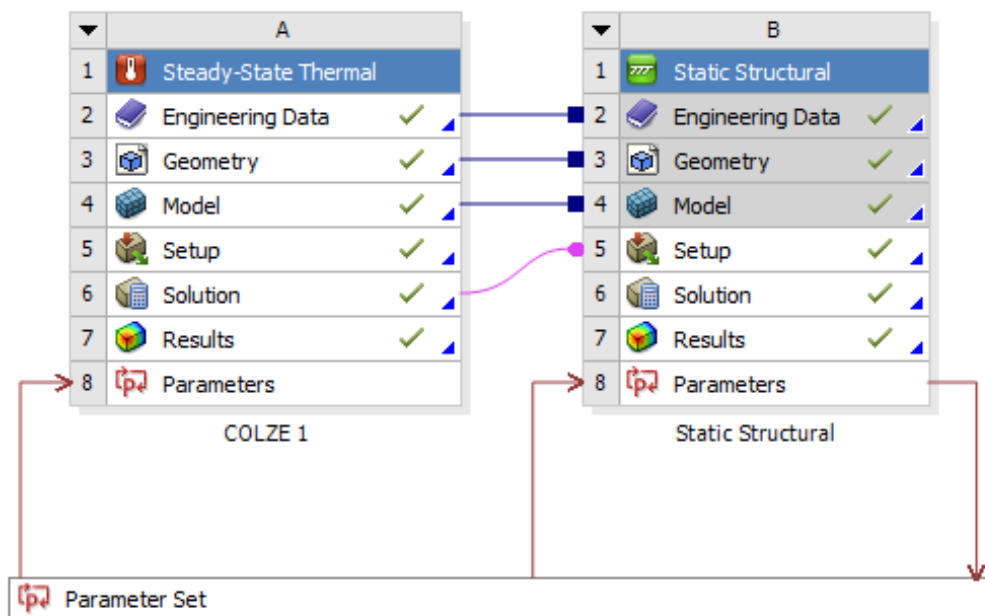


Figura B.1.1 – Blocs dins Ansys Workbench

Seguidament definirem el material a estudiar i importarem els 2 models, l'original i el re-dissenyat.



Figura B.1.2 – Engineering data importada del material.

Després definim el mallat per a cada una de les peces, assegurant que aquest sigui adequat i tingui una qualitat acceptable dins el que ens permet la versió d'estudiants d'Ansys. En aquest cas hem seleccionat elements de mida 2mm.

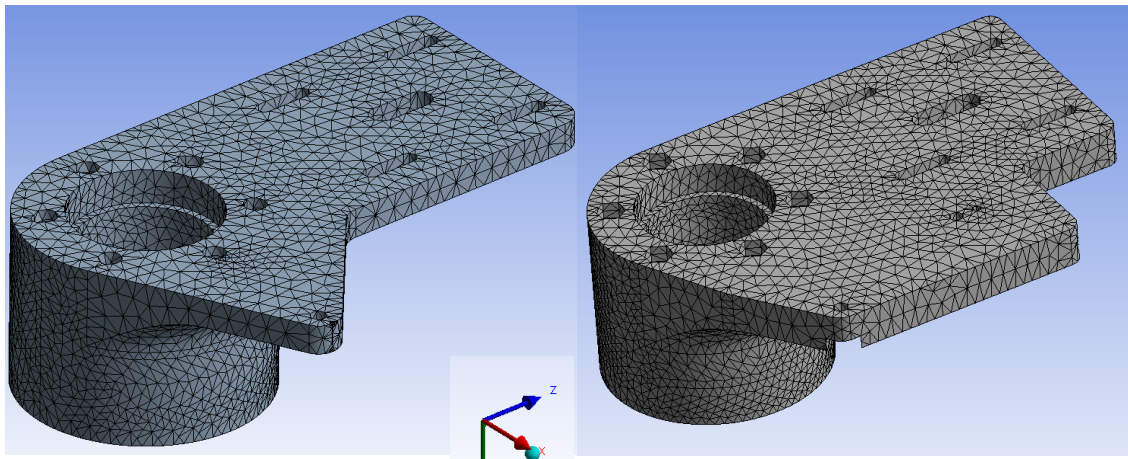


Figura B.1.3 – Mallat del model original (esquerra) i re-dissenyat (dreta).

Seguidament definim la càrrega i les condicions de contorn, iguals per ambdós casos:

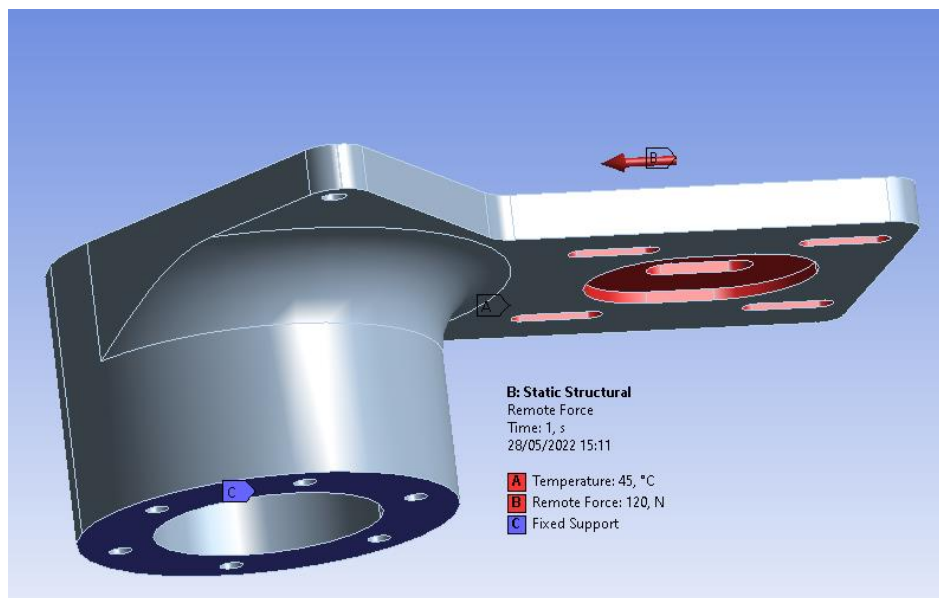


Figura B.1.4 – Càrrega i condicions de contorn.

I avaluem els resultats per a cada situació, els quals són els següents:

	A	B	C	D	E	F
Name	P5 - Remote Force Z Component	P6 - BASE COLZE U ANSYS-FreeParts Redondeo4 Assignment	P2 - Total Deformation Maximum	P3 - Directional Deformation Minimum	P4 - Equivalent Stress Maximum	
Units	N		mm	mm	MPa	
ORIGINAL	-120	Plastic, PET-G	1,2343	-1,215	44,66	
RE-DISENY	-120	Plastic, PET-G	0,4498	-0,40037	36,575	

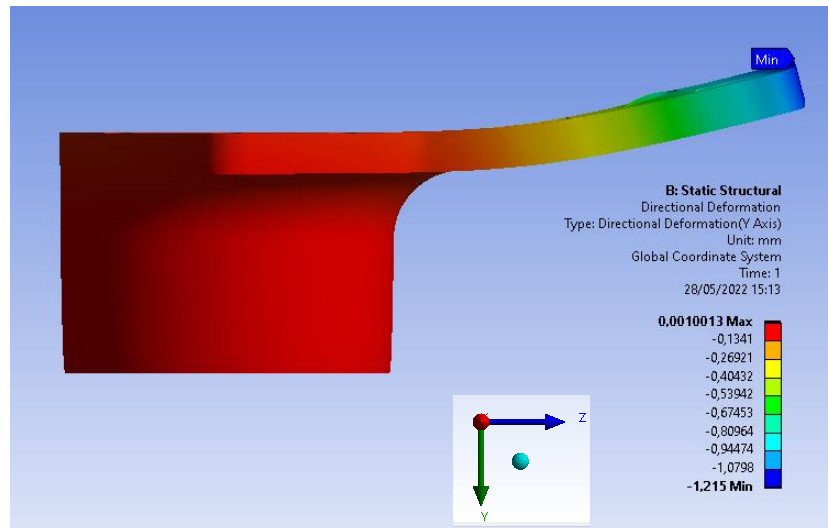


Figura B.1.5 – Deformació eix Y model original.

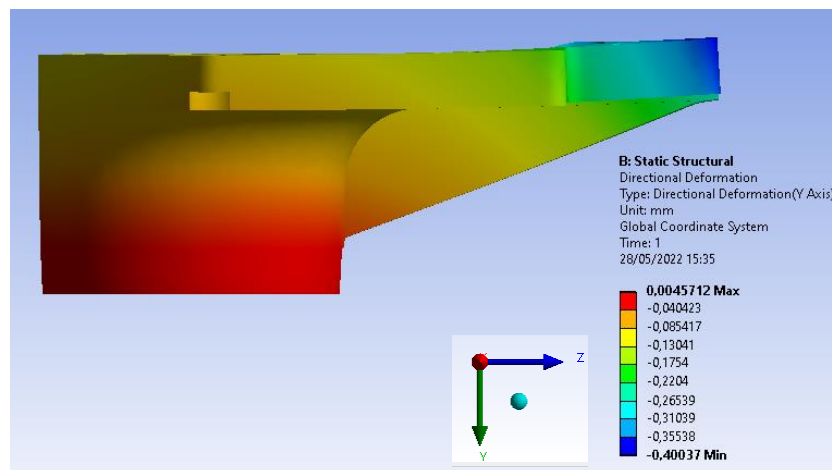


Figura B.1.6 – Deformació eix Y model re-dissenyat.

*En les dos representacions l'escala de deformació visual s'observa amb un multiplicador x10.

Com podem observar, amb el re-disseny, les deformacions es redueixen a una tercera part.

! Cal tenir en compte que per simplificar la simulació, aquesta s'ha fet amb models amb un percentatge de densitat d'impressió del 100%, per tant, els resultats de deformació i tensions en les peces reals no seria el mateix.

B.2 Càlcul del parell del motor de la base

La finalitat d'aquest càlcul és la d'avaluar si el dimensionament realitzat pel motor pas a pas ubicat al cos de la base del braç és el correcte o faria falta seleccionar un model diferent al actual, el qual és el següent:

17HS4401S 1.7A Torque:43N.cm Stepper Motor



Brief Data:

- Nema17 Bipolar.
- Number of Phase: 2.
- Step Angle: 1.8°.
- Phase Voltage: 2.6Vdc.
- Phase Current: 1.7A.
- Resistance/Phase: 1.5Ω ±10%.
- Inductance: 2.8mH ±20% (1KHz).
- Number of Wire: 4 (100cm Length).
- Holding Torque: 43Ncm.
- Shaft Diameter: Ø5mm.
- Motor Length: 40mm.
- Rotor Inertia: 54gcm².
- Temperature rise: 80°C Max.
- Insulation Class: B.
- Dielectric Strength: 500VAC/1-minute.
- Mass: 280g.

Figura B.2.1 – Motor pas a pas amb informació tècnica.

Per tal de comprovar-ho, estudiarem analíticament el parell necessari d'accionament en l'eix del motor en el pitjor escenari possible, quan volem elevar la càrrega.

Tot el procediment i formulació s'ha extret del llibre *Diseño en ingeniería mecánica de Shingley*, apartat 8-2 *Mecánica de los tornillos de potencia*.

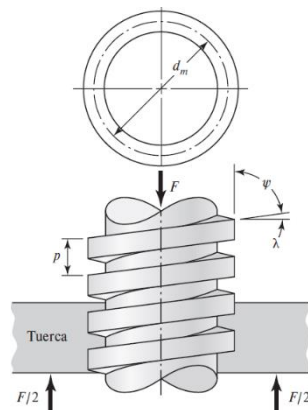


Figura B.2.2 – Part del cargol de potència.

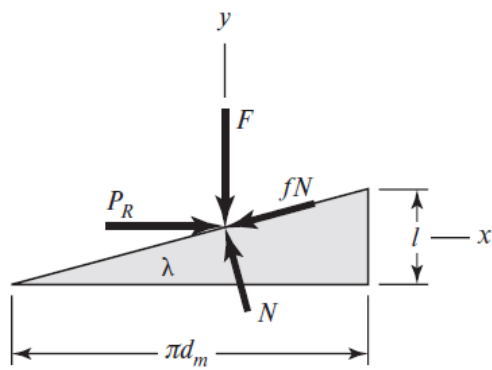


Figura B.2.3 –
Diagrama de forces al pujar la càrrega.

A la figura B.2.2 es presenta un cargol de potència de rosca quadrada simple, amb un diàmetre mig d_m , un pas p , un angle d'avanç λ , i l'angle de l'hèlix ψ sotmès a la força de compressió axial F . Es vol trobar l'expressió del parell de torsió requerit per elevar la càrrega.

Primer, imagineu que una rosca del cargol es desenrotlla (figura B.2.3). La vora de la rosca formarà la hipotenusa d'un triangle rectangle la base del qual és la circumferència del cercle de diàmetre mitjà de la rosca, mentre que l'alçada està donada per l'avenç. La suma de totes les forces unitàries axials que actuen sobre l'àrea normal de la rosca es representa per F . Per elevar la càrrega, una força P_R actua a la dreta (vegeu la figura B.2.3). La força de fricció és el producte del coeficient de fricció f per la força normal N , i actua oposant-se al moviment. El sistema està en equilibri sota l'acció d'aquestes forces, per la qual cosa, per elevar la càrrega, es té:

$$\begin{aligned} \sum F_x &= P_R - N \sin \lambda - fN \cos \lambda = 0 \\ \sum F_y &= -F - fN \sin \lambda + N \cos \lambda = 0 \end{aligned} \quad (a)$$

Com que no interessa la força normal N , s'elimina de cadascun dels sistemes d'equacions i s'aïlla P . Per elevar la càrrega, això ens dona:

$$P_R = \frac{F(\sin \lambda + f \cos \lambda)}{\cos \lambda - f \sin \lambda} \quad (b)$$

Després, es divideix el numerador i el denominador d'aquesta equació entre cosinus λ i es fa servir la relació $\lambda = l/d_m$ (figura B.2.3). Aleshores es té:

$$P_R = \frac{F[(l/\pi d_m) + f]}{1 - (fl/\pi d_m)} \quad (c)$$

Finalment, si observem que el parell de torsió és el producte de la força P i el radi mitjà $d_m/2$, per elevar la càrrega es pot escriure com:

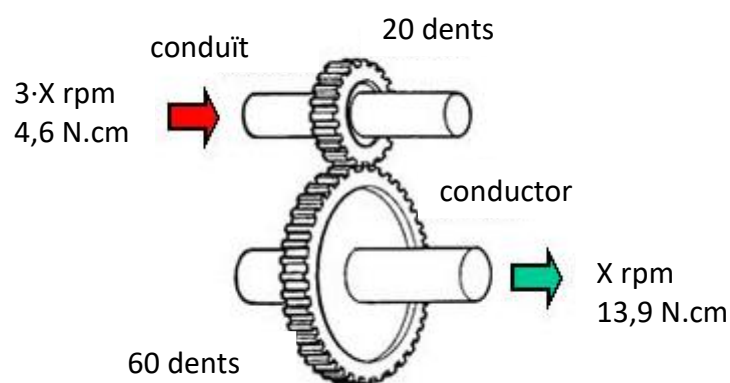
$$T_R = \frac{Fd_m}{2} \left(\frac{l + \pi f d_m}{\pi d_m - fl} \right) \quad (d)$$

On T_r representa el parell de torsió que es requereix per a dos propòsits: superar la fricció a la rosca i elevar la càrrega.

$$T_r = \frac{(3 \cdot 9,81) \cdot 1,2}{2} \cdot \left(\frac{0,4 + \pi \cdot 0,15 \cdot 1,2}{\pi \cdot 1,2 - 0,15 \cdot 0,4} \right) = 4,6 \text{ N.cm}$$

Finalment, hem de calcular amb la relació de transmissió dels engranatges el parell resistent al eix del motor, el qual serà:

$$T_{r,m} = T_r \cdot i_{b1} = 3,07 \cdot 3 = 13,9 \text{ N.cm}$$



Com podem observar, el parell de torsió que és requereix és inferior al que la fitxa tècnica ens indica que ens pot proporcionar el nostre motor pas a pas ($42 > 13,9 \text{ N.cm}$), per tant, el podem fer servir pel nostre muntatge final.

B.3 Estudi de precisió del braç: repetibilitat de cicles

En robòtica és molt important tenir un control de la precisió. Per aquest motiu, s'ha dissenyat un estudi per avaluar en quins valors de precisió es mou el braç robòtic quan aquest repeteix cíclicament uns mateixos moviments.

Per tal de realitzar l'estudi es compta amb un rellotge comparador ben calibrat i amb una superfície plana i anivellada on poder fer treballar el braç robòtic.

El cicle que executarà el braç serà el següent:

- 1- Parteix d'una posició en la que la punta de la pinça es troba en contacte amb el rellotge comparador, del qual es prendrà la mesura com a referència en aquesta posició abans de començar l'estudi.
- 2- El braç rotarà en sentit anti-horari 36° (100 passos del motor pas a pas del colze).
- 3- El servomotor del canell rotarà en sentit anti-horari 90° i llavors tornarà a rotar 90° en sentit horari.
- 4- El telescopi pujarà 12mm (200 passos del motor pas a pas de la base) per tot seguit baixar-los.
- 5- El braç rotarà en sentit horari 36° per tornar a la posició inicial i en prendrà la mesura del rellotge comparador.

Nº de cicle	Lectura rellotge comparador (mm)	Nº de cicle	Lectura rellotge comparador (mm)
0	4,30	8	3,10
1	3,26	9	2,71
2	3,12	10	2,44
3	3,51	11	2,10
4	3,10	12	1,68
5	2,21	13	2,04
6	2,17	14	1,97
7	2,68	15	1,89

Taula B.3 – Resultats del estudi.



Figura B.3 – Realització del estudi.

Càlcul del valor mitjà:

$$\bar{X} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + \dots + x_n}{N} = 2,64 \text{ mm}$$

Càlcul del error absolut:

$$Ea = \frac{\sum_{i=1}^{20} |\bar{X} - X_i|}{n} = 0,58 \text{ mm}$$

Càlcul del error relatiu:

$$\varepsilon_r = (\text{Error absolut} / \text{valor mitjà}) \cdot 100 = 21,9 \%$$

Com podem observar tenim uns valors de precisió del ordre de $\pm 0,58 \text{ mm}$, que si bé queda lluny dels valors de precisió per un braç robòtic industrial ($\pm 0,05 \text{ mm}$) són valors suficients com per executar els moviments de demostració pels quals està pensada aquesta unitat.

Cal tenir en compte que en aquest valor es sumen els errors tant del gir del colze, el del canell com també l'error degut al joc existent en l'eix d'unió entre el canell i la pinça. Per tant, si s'estudiés el valor de la precisió per cada grau de llibertat independentment tindríem uns resultats des valors de precisió més elevats.

ANNEX C: ELECTRÒNICA I CONTROL

C.1. Diagrama de connexions i diagrama esquemàtic

Utilitzant el software *Fritzing* s'ha realitzat el següent diagrama de connexions de la *Figura C.1.1* i el diagrama esquemàtic de la *Figura C.1.2*.

En ells s'hi poden trobar el total d'elements que configuren l'electrònica del projecte:

- a) Servomotor MG995 (Servo 1)
- b) Motor DC del actuador lineal (M1)
- c) Motor pas a pas del telescopi (connectat al Driver A4988)
- d) Motor pas a pas del colze superior (M3 i M4)
- e) Els dos finals de carrera.
- f) La placa controladora Arduino UNO.
- g) La placa controladora dels motors Adafruit Motorshield v2.

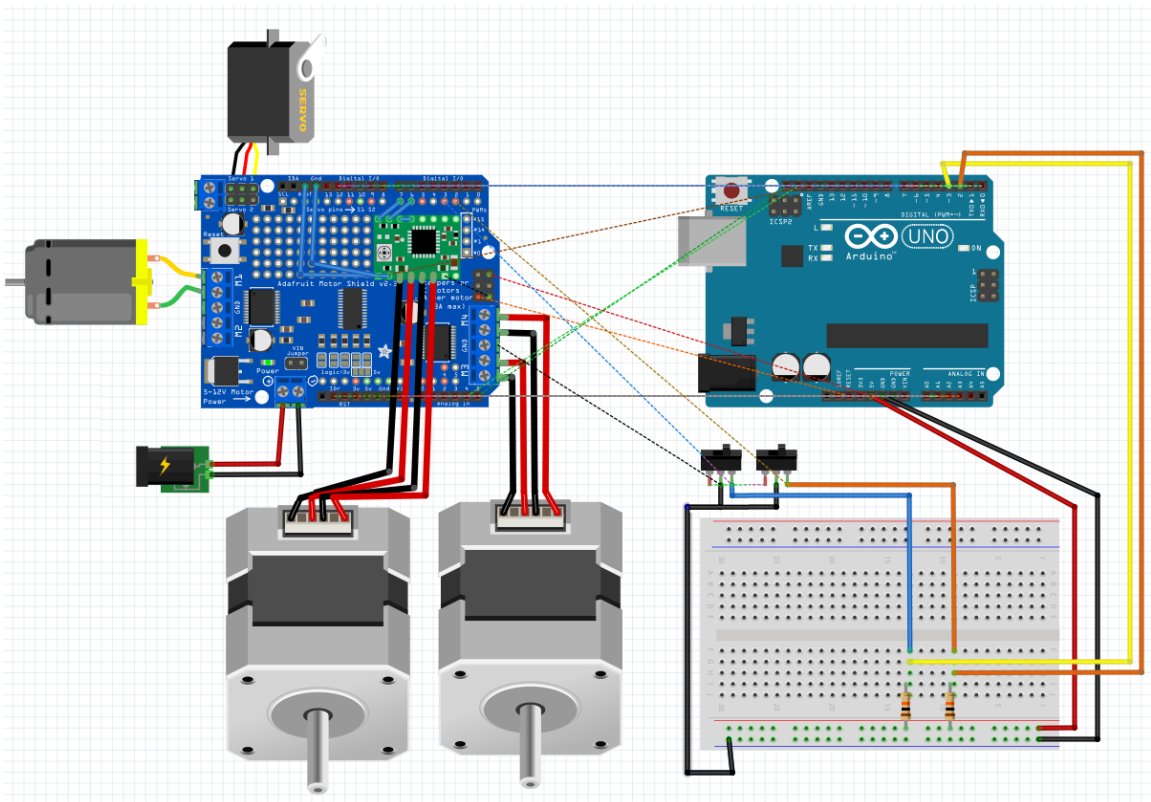


Figura C.1.1: Diagrama de connexions de l'electrònica del braç robòtic.

A continuació s'adjunta la figura amb el mateix diagrama de connexions però aquest cop de forma esquemàtica.

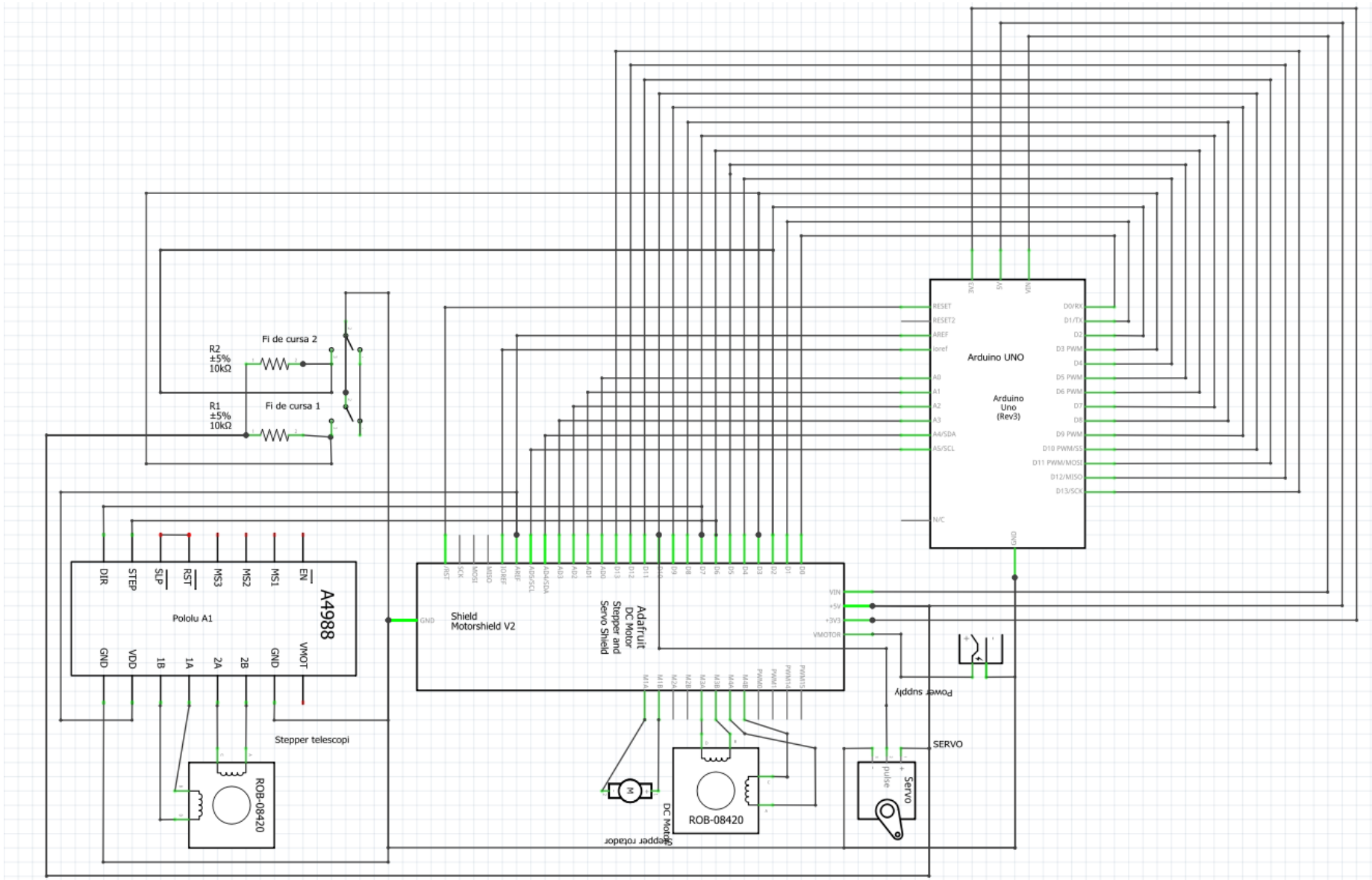


Figura C.1.2: Diagrama esquemàtic de l'electrònica del braç robòtic.

C.2. Codi de programació IDE Arduino

```
int PinRotador = 3;           // fi de cursa connected to
digital pin 2
int PinTelescopi = 2;        // fi de cursa connected to
digital pin 3
int flagRotador = 0;         // variable per actuar un
cop arribi a
                               fi de cursa
int flagTelescopi = 0;

//Incluim llibreries de la shield per motors i servos

#include <Wire.h>
#include <Adafruit_MotorShield.h>
#include "utility/Adafruit_MS_PWM_ServoDriver.h"
#include <Servo.h>
#include <AccelStepper.h> // Llibreria Estandard del IDE
de Arduino.

Adafruit_MotorShield AFMS = Adafruit_MotorShield(0x60);
//Adreça per la shield (sense ponts 0000)

Adafruit_StepperMotor *motorgir = AFMS.getStepper(200, 2);
//Variable per controlar el motor pas a pas "motor" (M3M4)

Adafruit_DCMotor *actuador = AFMS.getMotor(1);
//Variable per controlar l'actuador "actuador" (M1)

Servo
servo;

//Variable per controlar el servomotor "servo" a PIN 10
(pins servo 1)

AccelStepper stepper(AccelStepper::DRIVER, 6,
7);
// Configura els pins 6 per pulsos del motor i pin 7 per el
control del sentit de gir

void setup() {

    Serial.begin(9600);           //velocitat
d'enviament
    AFMS.begin();                //iniciem adafruit
motorshield
    servo.attach(10);            //iniciem servo

    motorgir->setSpeed(30);      //indiquem velocitat del motor
```

```

                                pas a pas del rotador (12 rpm)
actuador->setSpeed(250);        //indiquem velocitat del
                                actuador (de 0 a 250)

stepper.setMaxSpeed(4000);     // configura la velocidad
                                máxima del motor del telescopi

stepper.setSpeed (2000);       // velocitat negativa =
                                sentit anti- horari, telescopi puja

stepper.setAcceleration (400); //definim acceleracio

stepper.setEnablePin(12);

pinMode(PinRotador, INPUT);    //definim els pins 2 i 3
                                com a INPUTS

pinMode(PinTelescopi, INPUT);

delay (300);

stepper.enableOutputs();

//INICI MANIOBRA "HOMMING"

while((digitalRead(PinTelescopi)==HIGH&&flagTelescopi==0)

stepper.setSpeed (-1000);      // velocitat positiva =
sentit horari,                telescopi baixa

stepper.move(-10);
stepper.runToPosition();

flagTelescopi = 1;            //Arribada a posició de casa
                                del telescopi i parada

while((digitalRead(PinRotador)==HIGH)&& flagRotador == 0)

motorgir->step(1, FORWARD, MICROSTEP);

flagRotador = 1;              //Arribada a posició de casa del
                                rotador i parada

if (flagRotador == 1) && (flagTelescopi == 1)

delay (200);

servo.write(72);              //Centrem pinça amb la pila
```

```
    delay(200);

    actuator->run(FORWARD); //Surt el pisto (s'obre la pinça)
    delay(500);

    motorgir->step(120, BACKWARD, DOUBLE);
//Iniciem gir braç sentit anti-horari fins a situar-nos
sobre la pila amb mode double coil
(possibles: SINGLE/DOUBLE/INTERLEAVE/MICROSTEP)

    delay(1300);

    stepper.enableOutputs();
    stepper.setAcceleration(400);
    stepper.setSpeed(900); // velocitat positiva =
                           sentit horari, telescopi baixa

    stepper.move(300);
    stepper.runToPosition(); // Blocks until is in position

    delay(1000);
}

//INICI CICLE

void loop() {

    actuator->run(BACKWARD);
//Entra el pisto (es tenca la pinça) i agafem la pila

    delay(2000);

    stepper.enableOutputs();
    stepper.setAcceleration(400);
    stepper.setSpeed(-900)
// velocitat neagtiva = sentit anti-horari, telescopi puja

    stepper.move(-300);
    stepper.runToPosition(); // Blocks until is in position

    delay(1000);

    motorgir->step(100, BACKWARD, DOUBLE);
//Iniciem gir braç sentit anti-horari i presentem la pila

    delay(2000);
    servo.write(0);
}
```



```
    delay(1000);
    servo.write(140);
    delay(1000);

    motorgir->step(200, FORWARD, DOUBLE);
//Iniciem gir braç sentit horari i presentem la pila

    delay(2000);
    servo.write(0);
    delay(1000);
    servo.write(140);
    servo.write(72);
    delay(400);

    motorgir->step(100, BACKWARD, DOUBLE);
//Iniciem gir braç sentit anti-horari i tornem pila suport

    stepper.setSpeed (900);
// velocitat positiva = sentit horari, telescopi Baixa

    stepper.setAcceleration (400);
    stepper.move(300);
    stepper.runToPosition(); // Blocks until is in position
    stepper.disableOutputs();

    actuator->run(FORWARD);
//Surt el pisto (s'obre la pinça i deixem la pila)

    delay(3000);

    Serial.println("Fi cicle");
    delay(10000);
}

}
```

ANNEX D: FABRICACIÓ I MUNTATGE

D.1 Fabricació de peces d'impressió 3D

A continuació s'indica la metodologia a seguir per a la fabricació del conjunt de peces d'impressió 3D del braç robòtic.

1. Exportar independentment els fitxers del disseny de cada peça a format STL per tal de poder-los obrir amb un programa específic d'impressió 3D (Ultimaker Cura 4.10.0 per aquest exemple).

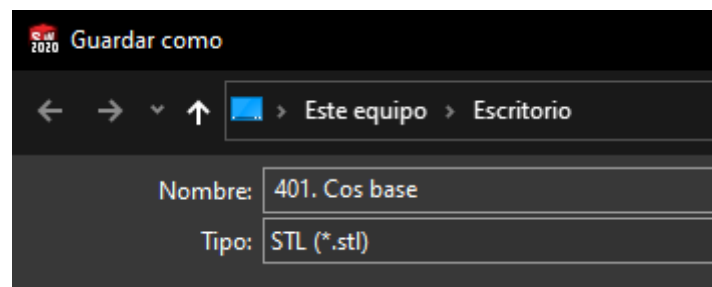


Figura D.1.1: Exportar arxiu de la peça a STL.

2. Configurar els paràmetres d'impressió segons el nostre material, peça i qualitat (velocitat i densitat d'impressió, estructura del mallat intern, temperatura del extrusor, temperatura del llit calent, alçada de capa) dins el programa i situar la peça dins dels límits de la taula d'impressió, sempre assegurant una cara plana de la peça contra la seva superfície i intentant minimitzar les estructures de suport.

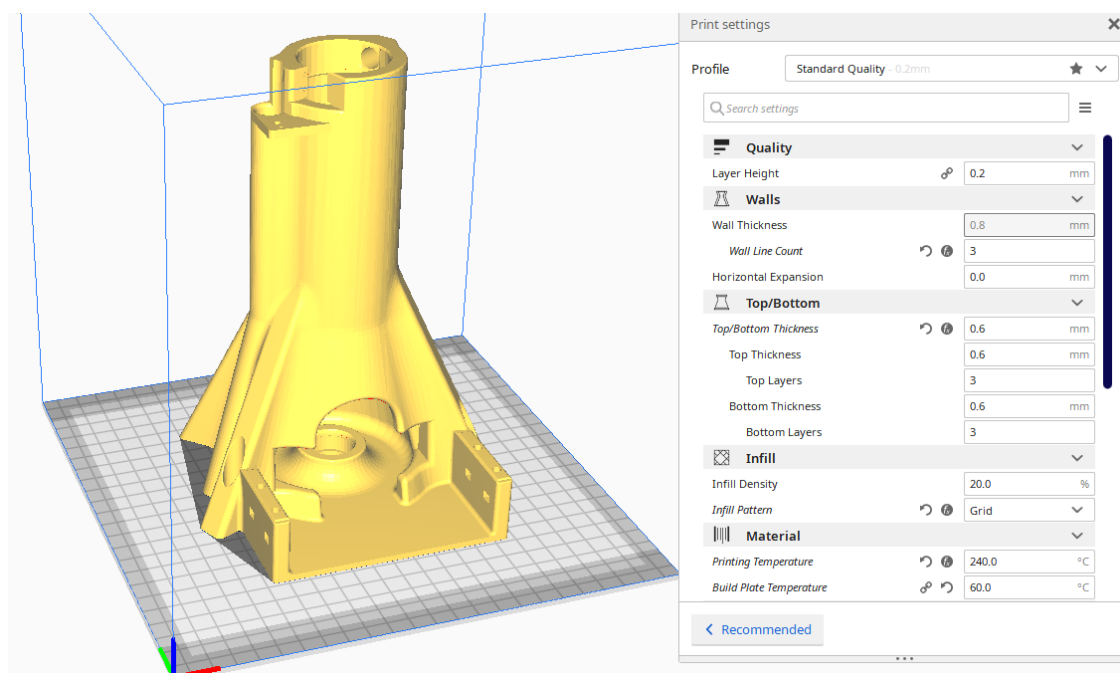


Figura D.1.2: Col·locació de la peça i configuració de paràmetres.

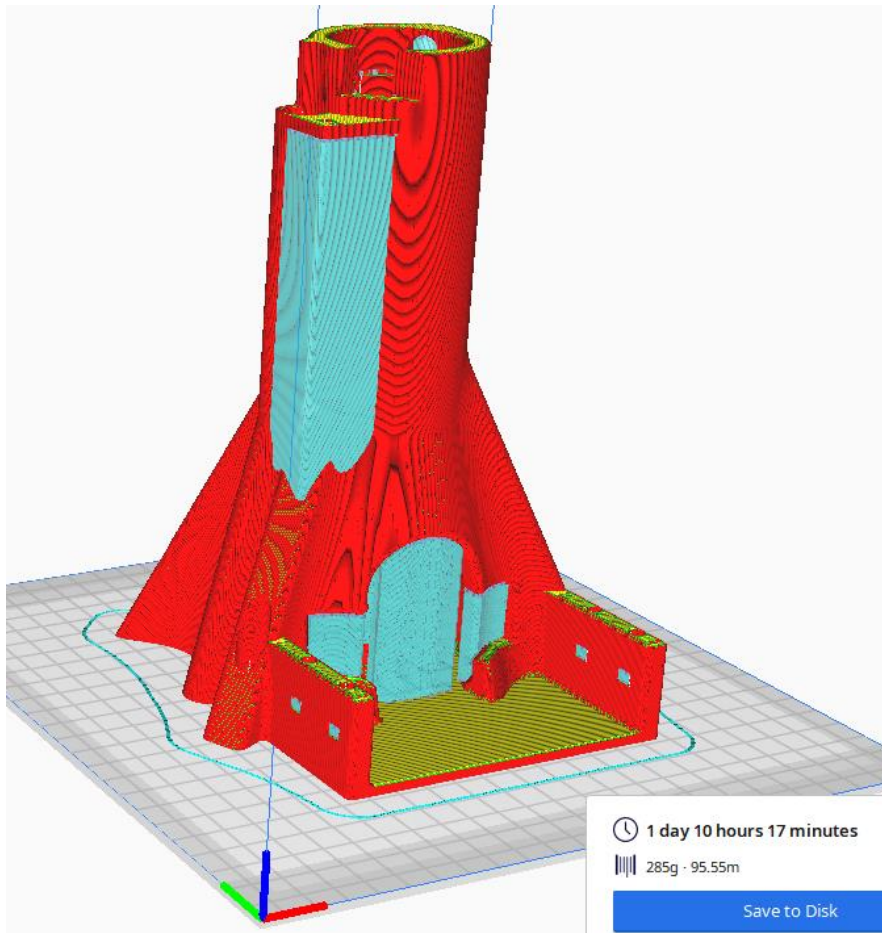


Figura D.1.3: Visualització dels suports (en blau), temps d'impressió i metres de filament a utilitzar.

3. Un cop configurat i revisat, es guardarà l'arxiu G-code que genera el programa en un dispositiu extern que admeti la impressora 3D (per exemple un pen drive o targeta SD).

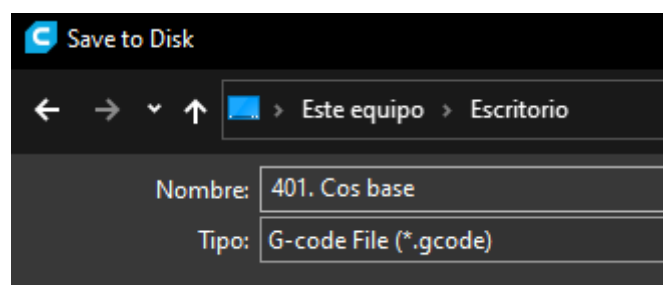


Figura D.1.4: Exportar arxiu de la peça a gcode.

4. S'introdueix el dispositiu on tenim guardat l'arxiu a la impressora 3D i prèviament a iniciar la impressió es verifica que aquesta es troba amb el filament carregat adequat i que la bobina té suficients metres com per imprimir el total de la peça o les peces. També es procedeix a calibrar la superfície d'impressió. Verificar sempre l'adhesió de la primera capa d'impressió abans de deixar-la treballant autònomament. Es recomana revisar el procés d'impressió cada cert temps.

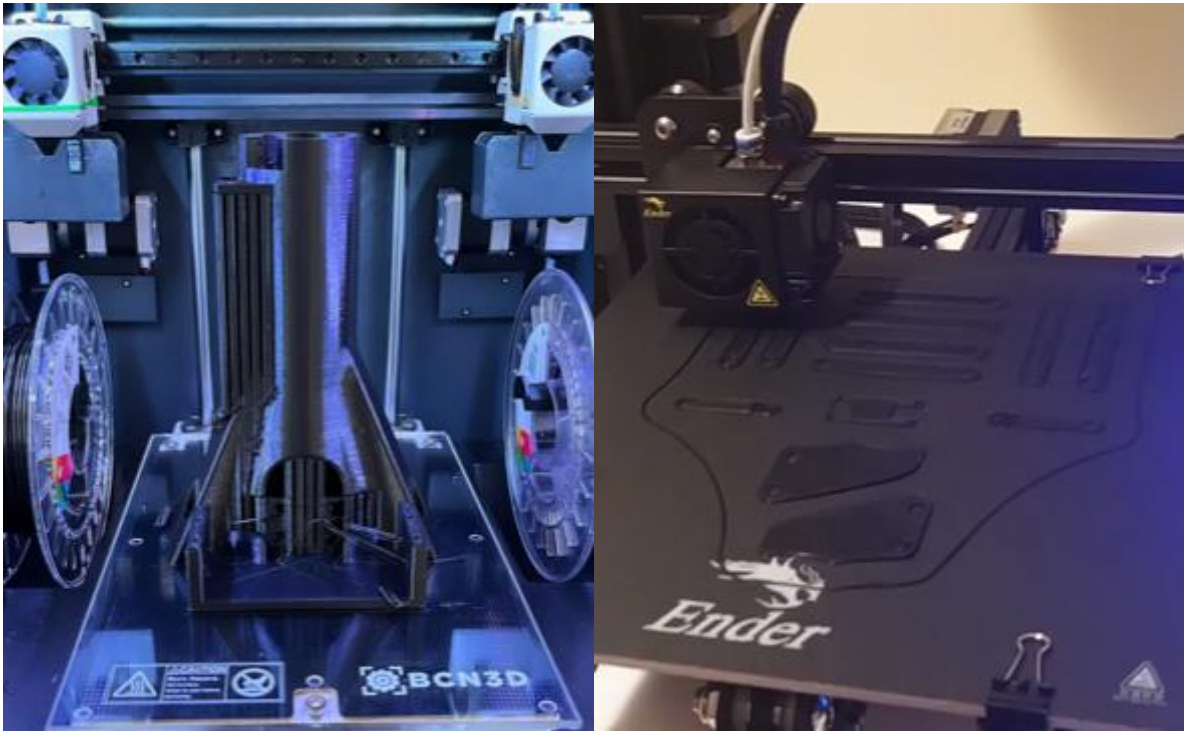


Figura D.1.5: Peça impresa (esquerra) peces imprimint-se (dreta).

5. Es procedeix a desenganxar amb compte la peça del llit d'impressió i seguidament es retiren els suports de la peça si aquesta en conte.

6. Finalment es realitza un control de qualitat verificant dimensions i l'acabat general de la peça per valorar si és òptima per passar al procés d'assemblatge.

D.2 Muntatge del braç robòtic

Tot i que no es considera un requisit estricte, si que és altament recomanat seguir la seqüència que s'exposarà seguidament a l'acoblar el braç robòtic per tal d'assegurar que aquest funcionarà correctament.

El muntatge està pensat per poder-se fer per subconjunts que un cop ensamblats independentment, s'acabin d'unir entre ells per així conformar el braç robòtic.

És molt recomanable realitzar aquests treballs en un lloc ampli, ben il·luminat i amb una superfície plana i gran on realitzar els muntatges. Per a tots els punts, primerament es verificarà que es compte amb tot el material necessari i que figura en el *Document 4. Estat d'amidaments*.

1. Acoblar la bancada

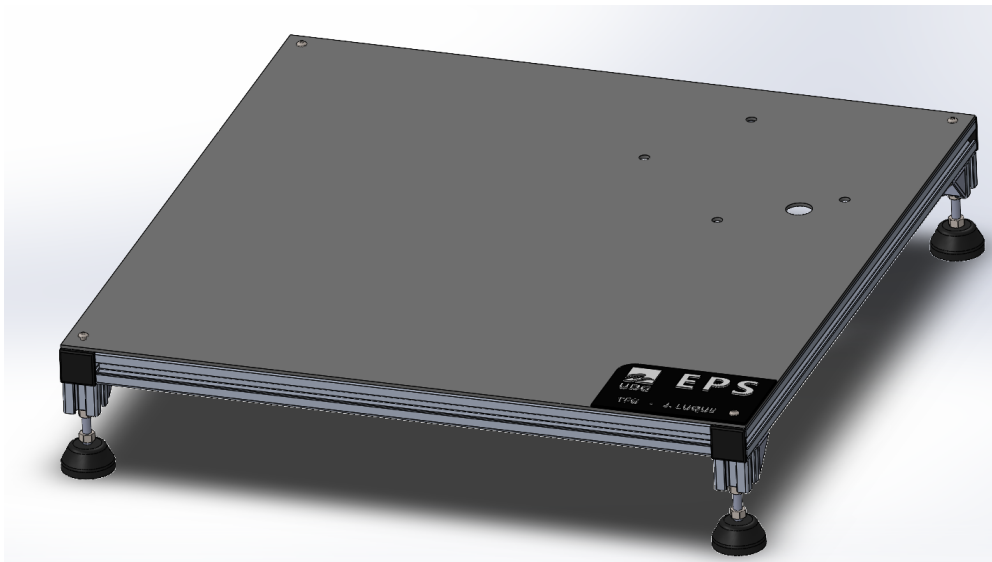


Figura D.2.1: Acoblament de la bancada.

- a) Posicionar paral·lelament i a la mateixa alçada les 2 barres de 400 mm dels perfils d'alumini de 20x20 mm. Posicionar perpendicularment a aquestes les altres 2 barres de 360 mm de manera que formin un quadrat de 400x400 mm.
- b) Col·locar dins els carrils les femelles necessàries a l'alçada aproximada on aniran posicionades les esquadres.
- c) Presentar les esquadres i collar-les alternament.
- d) Posar les tapetes negres en els extrems dels perfils d'alumini.

- e) Roscar les 4 potes autonivellants a els seus 4 respectius perfils de 20x20x20 mm.
- f) Unir amb 4 esquadres més les potes a cada extrem del quadrat que conforma l'estructura conformada prèviament.
- g) Presentar la placa de metacrilat sobre l'estructura i unir-la amb els cargols, collant-los alternament i assegurant que aquesta quedi ben centrada.

2. Acoblar la pinça

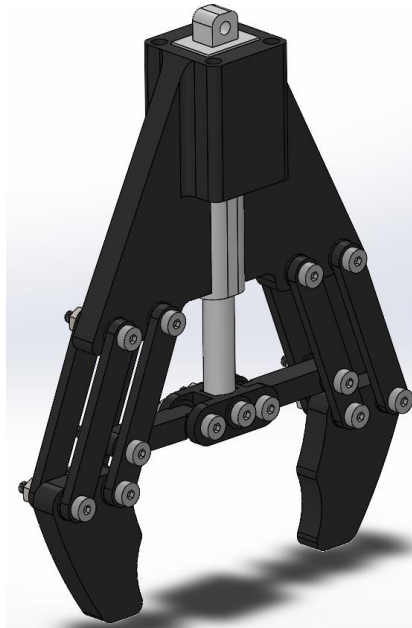


Figura D.2.2: Acoblament de la pinça.

- a) Col·locar degudament tots els coixinets ligus en els forats indicats.
- b) Acoblar els inserts en els forats del cos de la pinça.
- c) Unir els 4 tirants exteriors (de 2 forats) al seu respectiu dit i assegurar-los amb un cargol, volandera i femella autofixant, sense collar fort.
- d) Unir els 4 tirants interior (de 3 forats) al seu respectiu dit i assegurar-los amb un cargol, volandera i femella autofixant, sense collar fort.
- e) Unir els tirants interiors a els tirants centrals que uneixen aquests a la peça central i assegurar-los amb un cargol, volandera i femella autofixant, sense collar fort.

- f) Unir els 2 tirants centrals a la peça d'unió del centre i assegurar-los amb un cargol, volandera i femella autofixant, sense collar fort.
- g) Unir tot el conjunt de tirants a el cos de la pinça i assegurar-los amb un cargol, volandera i femella autofixant, sense collar fort.
- h) Introduir l'actuador lineal i collar-lo a la peça d'unió central a la resta del conjunt i assegurar-lo amb un cargol, volandera i femella autofixant.
- i) Collar adequadament totes les unions de manera progressiva.
- j) Afegir cinta d'espuma autofixant a les cares internes dels dits de la pinça.

3. Acoblar el canell

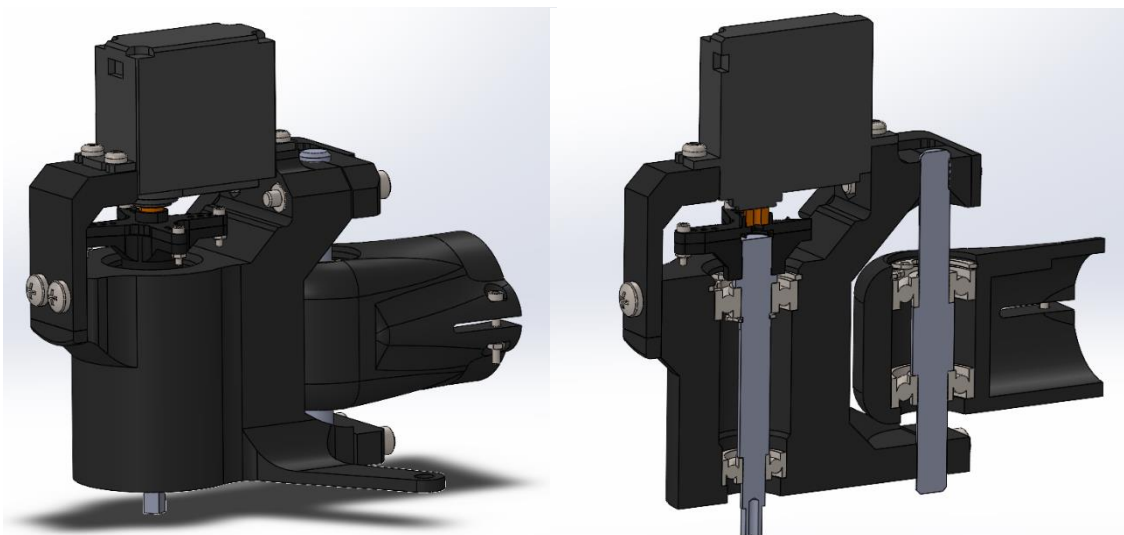


Figura D.2.3: Acoblament del canell.

- a) Col·locar el rodament inferior en el suport d'unió del tub. Seguidament col·locar l'eix mecanitzat cilíndric (208. Eix unió colze) i per sobre d'aquest el rodament superior. Finalment assegurar-ho amb un anell de fixació.
- b) Posar el rodament inferior dins el cos del canell. Col·locar l'anell de fixació a la ranura del eix mecanitzat (207. Eix unió pinça) seguit del rodament superior i introduir el conjunt dins el cos amb la punta quadrada mirant en dalt. Col·locar l'anell de fixació superior al cos del canell.

- c) Unir les dos parts de l'estrella del servomotor i assegurar-les amb els cargols corresponent. Unir aquesta al servomotor.
- d) Cargolar el suport del servomotor al cos del canell i seguidament unir el servomotor al conjunt.
- e) Acoblar el suport d'unió del tub a la resta del conjunt mitjançant les brides inferior i superior i assegurar amb cargols, excepte on va ubicat el suport pel cablejat el qual s'introduirà prèviament per l'eix del cargol i, seguidament, es collarà a la resta del conjunt.
- f) Presentar i roscar, sense tensor, els cargols laterals del suport d'unió del tub.

4. Acoblar el colze

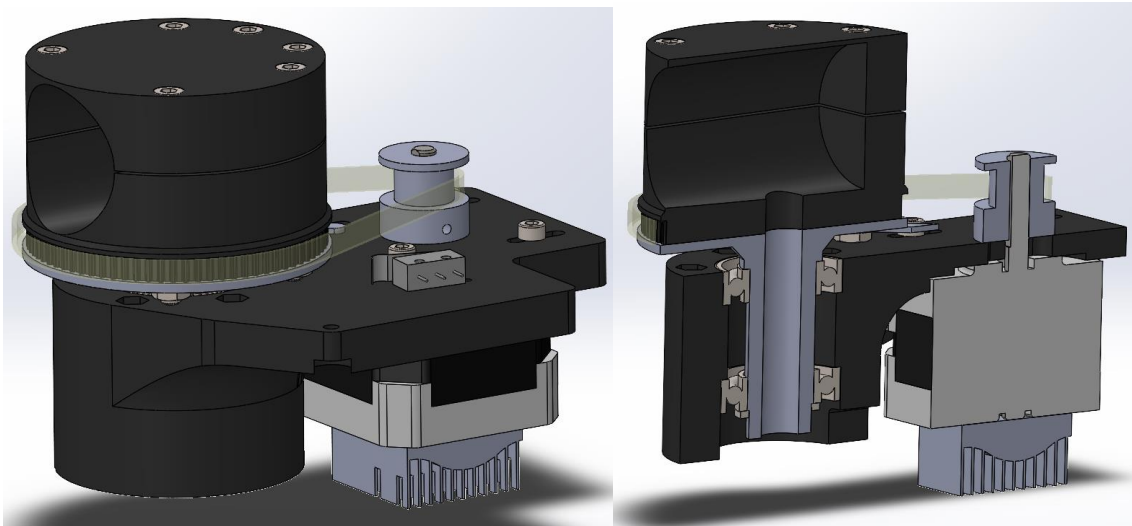


Figura D.2.4: Acoblament del colze.

- a) Unir la tapa tub superior amb la tapa tub inferior i aquestes 2 amb l'eix del colze tal i com es pot veure a la figura D.2.4. Assegurar el conjunt amb cargols, volanderes i femelles. Al tercer cargol (en sentit horari) de la imatge dreta de la figura D.2.4 afegir la pota del fi de cursa entre la volandera i la femella.
- b) Introduir el rodament inferior dins el cos del colze, seguidament introduir el superior.
- c) Col·locar el conjunt del eix amb les tapes dins del cos del colze i assegurar-lo amb un anell de retenció per la part inferior del eix.

- d) Unir el dissipador al motor per la part inferior i un cop unit introduir l'eix del motor pel forat central del cos del colze. Tot seguir assegurar el motor amb 4 cargols i fer passar la corretja per l'eix de tal manera que es pugui introduir la politja per després assegurar-la amb els cargols presoners.
- e) Finalment assegurar l'interruptor final de carrera en la seva posició correcta i l'extrem superior de la cadena porta-cables.

5. Acoblar la base

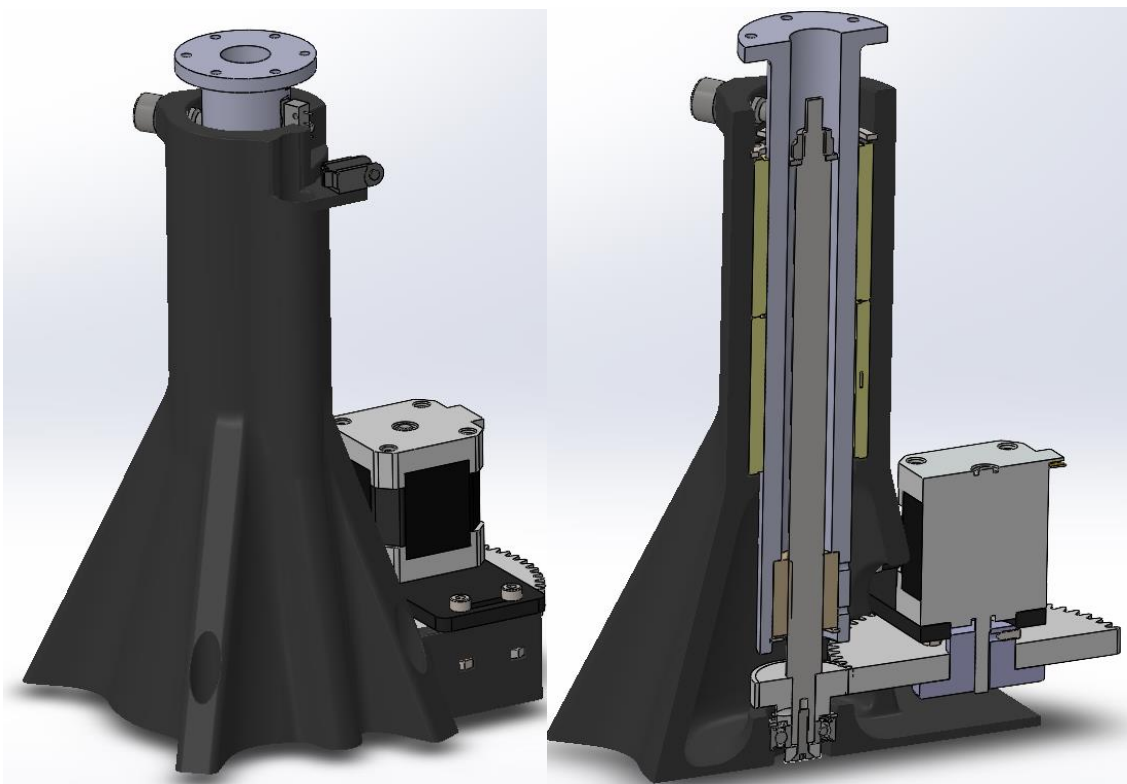


Figura D.2.5: Acoblament del colze.

- a) Primer de tot s'introduiran les boixes lineals dins del cos de la base, es lubricaran i s'assegura per la part superior amb un anell de retenció seeger.
- b) S'instal·la la torca del vis-sens-fi dins del eix telescòpic per la part inferior i s'assegura amb els dos cargols presoners i amb un anell de fixació.
- c) Es rosca el vi-sens-fi per la torca i s'assegura per la part superior.
- d) S'introdueix el rodament inferior del cos de la base i s'assegura amb un anell seeger.

- e) Es fa lliscar el conjunt del eix telescòpic per l'interior del cos assegurant de no danyar les guies lineals. Un cop aquest ha entrat, s'instal·la per la part inferior el pinyó de 20 dents de tal manera que la cara plana quedi a la part superior i es subjecta al eix amb els 2 cargols presoners.
- f) S'assegura el conjunt per la part inferior amb la volandera mecanitzada i un cargol avellanat DIN 7991.
- g) Es cargola el casquet al pinyó de 60 dents i s'instal·len les 4 femelles autofixants en els forats laterals del cos de la base.
- h) Es cargola el motor pas a pas al suport del motor i tot seguit s'introdueix el casquet per l'eix del motor i tot el conjunt es presenta sobre el cos de la base tal i com es pot veure a la figura D.2.5 on es regula la distància de contacte entre pinyons i finalment s'assegura el conjunt al cos amb els 4 cargols del suport del motor.
- i) Finalment es col·loca el cargol guia lateral de la part superior i també la part inferior del porta-cadenes i s'assegura amb un cargol a la base.

6. Acoblar subconjunts

Un cop acoblats tots els subconjunts independentment, cal unir-los entre ells per conformar el braç.

Es pot començar unint la pinça al canell mitjançant la peça 107. *Tapa unió*, la qual cal rosscar primerament al canell i després unir amb 4 cargols a la pinça.



Figura D.2.5: Acoblament dels subconjunts pinça (100) i canell (200).

Seguidament es pot fer passar tot el cablejat degudament per la peça 203. *Suport unió tub* i unir aquesta a la peça 501. *Tub unió colze-canell*.

Després es poden fer passar els cables a través del interior del tub fins al forat mecanitzat del final del mateix i portar-los per l'interior del cos del colze. Tot seguit unir el conjunt de pinça, canell i tub a el colze i instal·lar i assegurar la barra paral·lela.

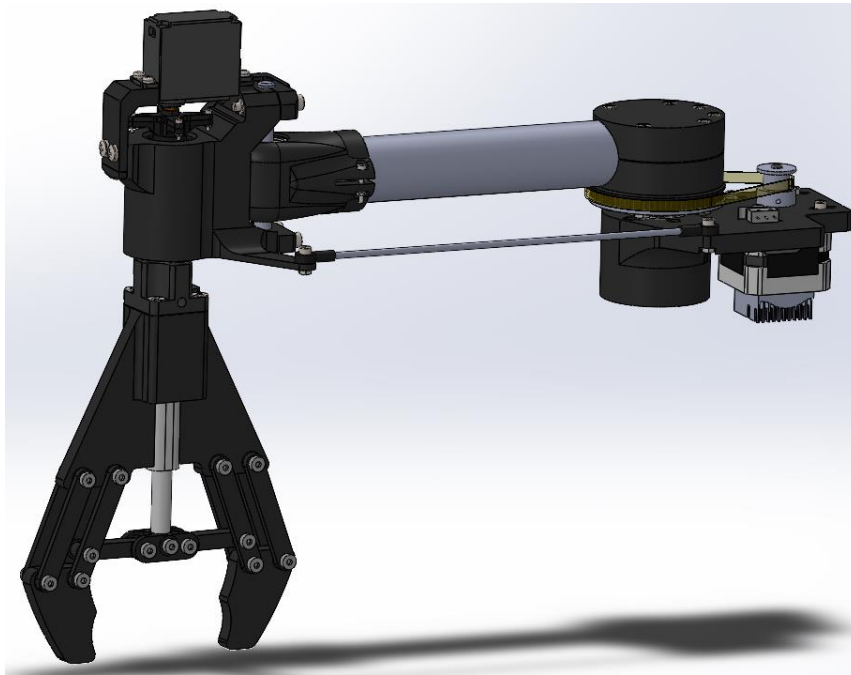


Figura D.2.6: Acoblament dels subconjunts pinça (100), canell (200) i colze (300).

Muntar la base del braç a la bancada i assegurar-la amb els cargols corresponents.

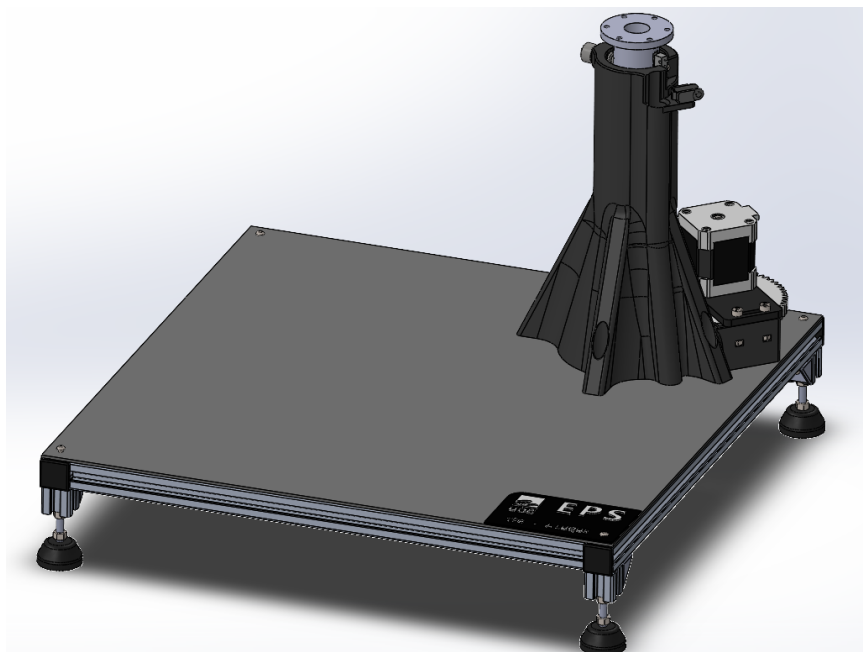


Figura D.2.6: Acoblament dels subconjunts base(400) i bancada (600).

Finalment tan sols cal unir tots 2 conjunts mitjançant els cargols d'unió entre l'eix telescòpic i la base del colze i acoblar la cadena porta-cables i conduir tot el cablejat per l'interior del cos de la base fins a la part inferior de la bancada.



Figura D.2.6: Acoblament completat del braç robòtic.

ANNEX E: MANUAL D'USUARI I MANTENIMENT

E.1 Descripció de la màquina

El braç robòtic dissenyat en aquest projecte té com a finalitat desplaçar cilindres de petites dimensions a mode d'exposició de les seves capacitats en jornades universitàries.

El conjunt està dissenyat per poder ser accionat a través d'un ordinador amb el software gratuït *Arduino IDE*.

El braç doncs, compta amb una electrònica pel control del mecanisme, una sèrie de actuadors com a transmissors del moviment i finalment la resta d'elements que conformen el braç, tots ells muntats sobre una bancada que fa de base per la màquina.

E.2 Advertències de seguretat

És essencial llegir, entendre i seguir les següents advertències i normes de seguretat abans d'utilitzar i manipular el producte, per tal d'evitar:

- Accidents personals i problemes de salut.
- Danys al producte i al sistema.
- Funcionament incorrecte del producte.

Els següents símbols indiquen la possibilitat de perill com a resultat al no seguir correctament les prescripcions:



PERILL:

Si aquestes instruccions no es segueixen correctament, poden resultar en descàrrega elèctrica i desencadenar danys personals.



PERILL:

Si aquestes instruccions no es segueixen correctament, poden resultar en danys per l'usuari.



ATENCIÓ:

Si aquestes instruccions no es segueixen correctament, poden resultar en danys en la màquina.



LLEGIR:

Llegir les instruccions amb detall abans d'utilitzar el producte.

E.3 Manipulació i funcionament del equip

L'equip està preparat per poder-se accionar en qualsevol posició inicial sempre que es trobi sobre una superfície plana. Un cop connectada la font d'alimentació a la corrent i l'electrònica al braç, aquest iniciarà la seqüència per la que ha estat programat i que sempre iniciarà amb un moviment conegut com a "Homming" a través del qual anirà a la seva posició 0 usant els finals de carrera.



Prèviament a la seva connexió, l'usuari haurà de verificar que no hi ha cap element amb el que pugui xocar el braç al realitzar els seus moviments.



El braç anirà repetint en un bucle tancat la seva seqüència fins que així ho desitgi l'usuari. Un cop es vulgui parar, es tan senzill com desconnectar de la corrent la font d'alimentació del braç i deixar d'alimentar l'electrònica (si es que s'estava alimentant simultàniament amb un cable USB connectat a un ordinador).

E.4 Precaucions, manteniment i transport



Per tal de fer un ús segur de la màquina i garantir que aquesta tingui una vida útil extensa cal seguir les següents indicacions:

- a) No manipular l'electrònica del braç quan aquest es troba connectat al corrent elèctric.
- b) No intentar parar amb la mà ni tocar el braç mentre aquest esta executant alguna trajectòria. Sempre primer és desconnectarà i llavors es manipularà.
- c) El braç serà inspeccionat visualment abans de cada posada en marxa.
- d) S'ha d'evitar deixar el conjunt a la intempèrie de manera prolongada, sempre caldrà guardar-lo cobert amb alguna lona protectora si no es preveu utilitzar durant un període superior a 1 mes.
- e) S'haurà de revisar i donar el manteniment requerit al conjunt de rodament, guies i cargols de fixació. Tanmateix s'inspeccionarà el cablejat de l'electrònica periòdicament.

- f)** No sotmetre la màquina a xocs i/o forts cops durant el seu transport, intentant bloquejar el moviment del braç i garantint la protecció dels elements mòbils.

El no compliment d'aquests punts podria esdevenir en el mal funcionament o inclús en danys en el sistema o en l'usuari.