

Treball final de grau

Estudi: Grau en Enginyeria Mecànica

Títol: Disseny i fabricació del prototip d'una pròtesis biònica de mà

Document: Memòria i Annexos

Alumne: Pau Quintana Casanovas

Tutor: Jordi Bayer Resplandis

Departament: Enginyeria Química, agrària i tecnologia agroalimentària

Àrea: Enginyeria Química

Convocatòria (mes/any) FEBRER 2022

ÍNDIX

ÍNDIX	2
1 INTRODUCCIÓ	4
1.1 Antecedents.....	4
1.2 Objecte del projecte.....	4
1.3 Requeriments i abast.....	5
1.3.1 Requeriments	5
1.3.2 Abast	5
2 MÈTODE	7
3 ESTAT DE L'ART	8
4 DETALLS MECÀNICS I GEOMETRIA	11
4.1 Dimensions principals.....	11
4.2 Disseny del mecanisme dels dits	12
4.3 Disseny del mecanisme de retorn.....	13
4.4 Disseny del mecanisme d'accionament	14
4.5 Evolució del disseny	17
4.6 Dimensions de disseny per a la impressió	20
5 MATERIAL	21
5.1 Tipus de material	21
5.2 Direcció d'impressió.....	21
6 ELECTRÒNICA	23
6.1 Components principals	23
6.2 Tecnologia EMG.....	26
7 FABRICACIÓ DEL PROTOTIP	27
7.1 Procés de fabricació	27
7.2 Anàlisi de la solució	30
7.3 Millores del disseny	31
8 FABRICACIÓ EN SÈRIE	32

8.1	Fabricació per SLS (Plàstic)	32
8.2	Fabricació per Multijet Fusion (Plàstic)	33
8.3	Fabricació per LCD/DLP (Resina).....	34
8.4	Polyjet (Resina)	35
8.5	Comparativa de costos	36
9	RESUM DEL PRESSUPOST.....	37
10	CONCLUSIONS.....	38
11	RELACIÓ DE DOCUMENTS.....	40
12	BIBLIOGRAFIA	41
	ANNEXOS	43
	ANNEX A: DISSENY	43
	A.1. Materials proposats i les seves propietats.....	44
	A.2. Geometria i disseny mecànic: Escaneig 3D	45
	A.3. Electrònica i control.....	48
	A.3.1. Diagrama de connexions	48
	A.3.2. Codi programació Arduino	48
	ANNEX B: CÀLCULS MECÀNICS	50
	B.1. Càlculs de forces i reaccions.....	51
	B.2. Càlculs de tensions	56
	B.2.1. Càlcul de tensions de la guia.....	56
	B.2.2. Càlcul de tensions passador més desfavorable	58
	B.2.3. Càlcul de tensions peça unió servo - guia.....	59
	ANNEX C: FABRICACIÓ I MUNTATGE	62
	ANNEX D: MANUAL D'USUARI I MANTENIMENT	71
	D.1. Descripció general	72
	D.2. Manipulació i funcionament del prototip	72
	D.3. Precaucions.....	72
	D.4. Manteniment.....	73

1 INTRODUCCIÓ

1.1 Antecedents

Al llarg dels anys les pròtesis han evolucionat de manera considerable. L'aparició d'eines informàtiques avançades, la introducció de noves tècniques de disseny i noves tecnologies de fabricació permet obtenir productes cada vegada més adaptats a les necessitats dels usuaris, oferint també una experiència d'ús més real.

Tot i aquesta evolució, fins fa pocs anys la major part de l'evolució es centrava sobretot en les pròtesis d'extremitats inferiors, ja que son les que es presenten en major percentatge respecte al total d'amputacions arreu del món.

Això no treu importància a les dificultats que se li presenten a una persona que pateix una amputació de les extremitats superiors, encara que el percentatge sigui molt menor. Cal considerar que en el cas de les pròtesis transradials amb amputació entre el colze i el canell, (representa el percentatge més elevat pel que fa a les amputacions d'extremitats superiors amb un 53 %, segons la publicació "Niveles de Amputación" a la pàgina web del Dr. Carlos Arce, especialista en cirurgia plàstica i pròtesis), el disseny es simplifica ja que l'usuari disposa de mobilitat fins a l'avantbraç.

Tot i aquests avantatges, a dia d'avui l'adquisició d'una pròtesis funcional implica un gran cost econòmic per a l'usuari que la necessita, en moltes ocasions, un cost que no es pot assumir.

1.2 Objecte del projecte

L'objecte d'aquest projecte és el disseny mecànic del prototip funcional d'una pròtesi de mà. També es realitza el disseny i la programació de l'electrònica que dona moviment i funcionalitat a la pròtesi.

Per últim, també forma part de l'objecte del projecte la fabricació i test funcional del prototip.



Figura 1: Exemple de pròtesis de braç

1.3 Requeriments i abast

1.3.1 Requeriments

Els principals requeriments del projecte venen donats en certa manera pels diferents models que hi ha actualment al mercat, ja que es vol desenvolupar un producte competent a nivell funcional però reduint de manera considerable els costos, per tal de fer-lo més accessible per tothom qui el necessiti, sense haver de desemborsar una gran quantitat econòmica.

Així mateix, pel que fa als aspectes descriptius dictats pel *Ministerio de Sanidad y Consumo* al document *Guía Descriptiva de Ortopròtesis Tomo III*, s'ha utilitzat el codi homologat referent a les pròtesis transradials (ISO 06 18 09) segons la norma ISO 9999:2017.

Per tant, definint els requeriments del projecte, es vol:

Tema	O/D	Descripció
Pes pròtesi	O	Que no superi la mitjana de pes d'un braç humà: 2,3 kg.
Funció	O	Aixecar objectes de 10 kg de pes en posició tancada
Dimensions	D	Adaptades a cada usuari
Material	D	Que permeti implementar tècniques d'impressió 3D tant pel procés de prototipatge com la fabricació en sèrie
Disseny	D	Integrat amb l'antropometria
Disseny electrònic	O	Dissenyar i implementar l'electrònica que doni moviment i funcionalitat a la pròtesi
Cost	O	Cost de construcció màxim de 1.000 euros.

1.3.2 Abast

El disseny del prototip es farà d'acord amb la necessitat que ha de cobrir, donant per vàlid un moviment en forma de pinça. Per tal de dur a terme el projecte:

- S'estudiarà el disseny mecànic i electrònic.
- S'aplicarà a un procés de fabricació del prototip mitjançant tecnologies additives.
- S'implementarà la instal·lació electrònica.
- Es realitzarà un test del moviment en forma de pinça dels cinc dits de la mà.
- S'analitzarà la solució obtinguda.
- Es proposaran possibles millores al disseny enfocat a la fabricació en sèrie.

El projecte no inclou el disseny de la unió braç-pròtesis mitjançant el monyó, ja que és un tema molt extens i complex, ple de possibles millores, creient convenient que caldria desenvolupar-lo amb un projecte a part.

2 MÈTODE

Per a la realització del projecte s'ha seguit la metodologia mostrada a la Figura 2.

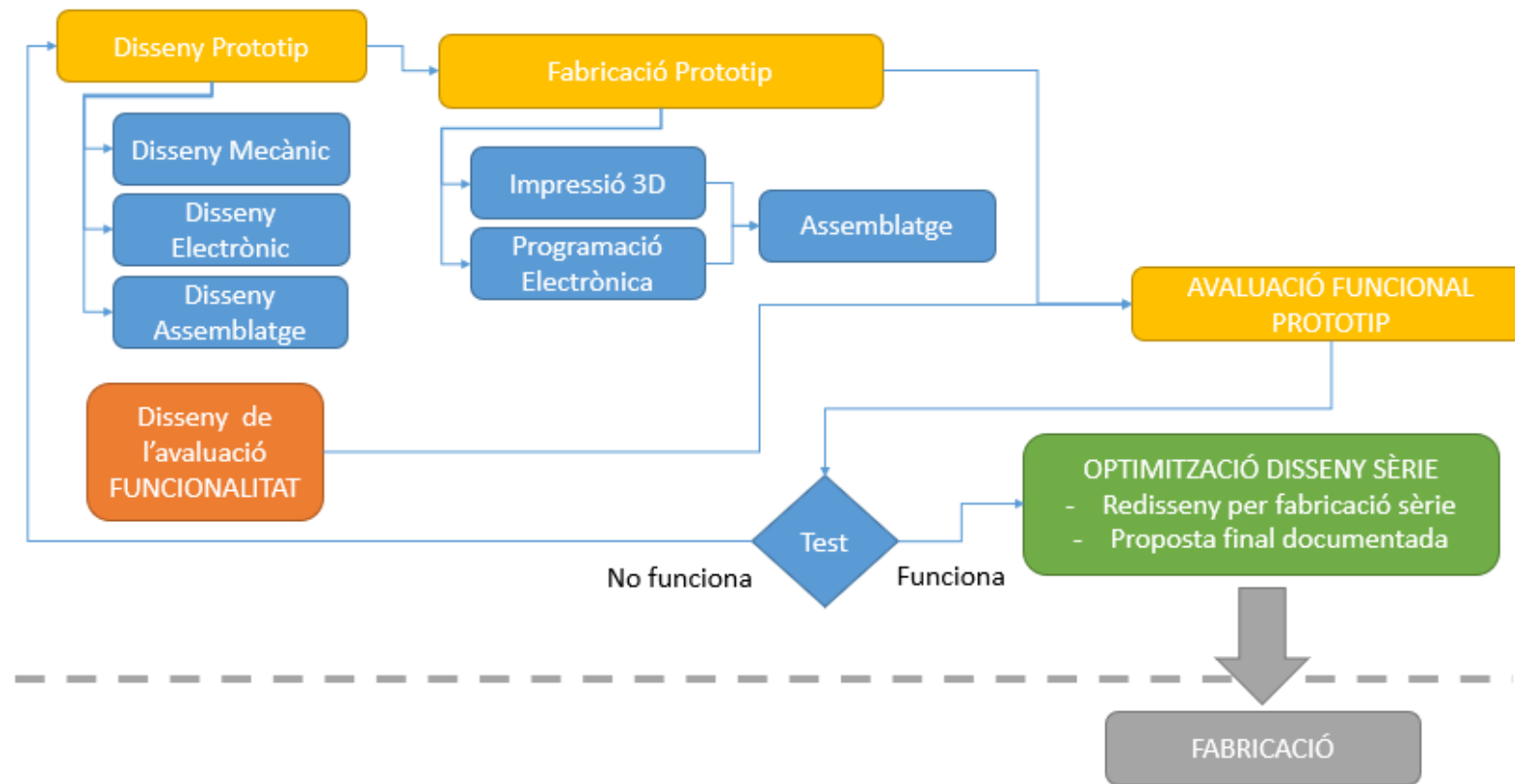


Figura 2: Diagrama de flux del procés seguit al llarg del projecte

3 ESTAT DE L'ART

Per tal d'introduir el context del projecte, primer de tot es definirà el concepte de pròtesi.

Una pròtesi és una peça o aparell que s'utilitza per tal de substituir un òrgan o un membre del cos, ja sigui de manera parcial o total, aplicable tant per membres inferiors (cames), membres superiors (braços), dentadura, pròtesis mamàries o ulls, entre molts altres. És per això, que en observar la trajectòria de les pròtesis s'ha de separar del concepte d'un aparell ortopèdic, el qual s'utilitza com a aparell auxiliar únicament per corregir un defecte, però en cap cas per substituir cap part del cos ni la seva funcionalitat.

Al llarg de la història, el món de la prostètica ha patit una evolució més aviat modesta, i no ha estat fins els últims anys que s'han produït canvis més significatius.

Antigament, les pròtesis es fabricaven amb fusta, acer, coure i ferro i eren enfocades a generar una sensació estètica de plenitud en el cos, sense buscar-hi funcionalitat.

Actualment, es fabriquen utilitzant plàstics, alumini i materials compòsits que les fan més lleugeres, i incorporen microprocessadors, microxips, microcontroladors i tot tipus d'elements electrònics i robòtics que les fan més funcionals.

En serien exemple diverses pròtesis comercials que s'han valorat a l'hora de veure les diferents opcions que hi ha a l'actualitat, i que es mostren a la següent taula en forma de comparació (dades extretes de *bionicsforeveryone.com*):

Model	Preu (EUR)	Disponibilitat a
Ability Hand	30.000	EUA
Adam's Hand	40.000	EUA, Europa (2022)
Atom Touch	60.000	EUA (2024)
BeBionic Hand	40.000	Global
BrainRobotics Hand	30.000	EUA (2022)
Hero Arm	20.000	EUA, UK, EU, Aus, Nz
i-Limb Access	60.000	Global
MeHandA	40.000	Rússia, Alemanya
Michelangelo Hand	65.000	Global

Model	Preu (EUR)	Disponibilitat a
MyHand	20.000	EUA, UK, EU, Aus, Japó
Nexus Hand	30.000	EUA, EU, CA, Aus, Nz
OHand 8-Channel	40.000	Xina

Fent una valoració de l'estudi de mercat es pot veure que existeixen diferents rangs pel disseny de pròtesis de mà, oferint solucions més o menys complexes en funció del preu.

Com es pot apreciar a la taula, inclús els models més senzills representen un cost econòmic de més de 20 o 30.000 euros, una xifra que queda fora de l'abast de molts usuaris.



Figura 3: MyHand (20.000 €)

Per a les pròtesis de menys valor, s'obté un moviment simultani dels cinc dits de la mà i un disseny poc integrat amb l'antropometria, mentre que les de més valor ofereixen diversos patrons predefinits pel fabricant que permeten moure els dits de manera independent, amb una estètica més treballada. Cal tenir en compte que aquests models dupliquen el cost dels models econòmics per la qual cosa només són accessibles per usuaris amb molts recursos econòmics.



Figura 4: BeBionic Hand (40.000 €)

Un altre punt important és que les pròtesis comercialitzades a dia d'avui no ofereixen una personalització de les dimensions, oferint una o dues talles estandarditzades que fan que sigui l'usuari qui s'ha d'adaptar a la pròtesi i no al revés.

Finalment i deixant de banda els models més comercials, aquests últims anys han sorgit una sèrie de moviments socials per tal d'ajudar a les persones sense recursos necessitades de pròtesis de braç, oferint models molt econòmics impresos en 3D, però molt limitats a nivell d'estètica i funcionalitat.

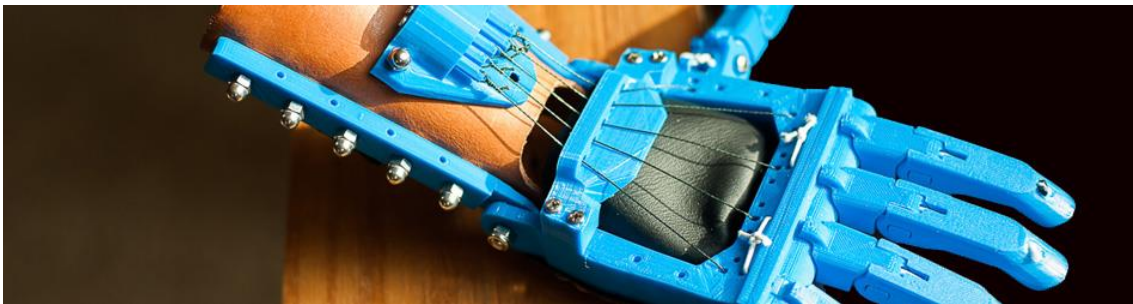


Figura 5: Exemple de pròtesis impresa moviment social

En aquest projecte es pretén seguir en certa manera el fil del moviment social però dotant la pròtesi d'un acabat estètic més integrat i donant-li més funcionalitat. Amb la finalitat d'aconseguir un model amb un cost final ajustat s'opta pel disseny d'una pròtesi amb moviment simultani dels dits en forma de "pinça", amb actuació electrònica que simuli la utilització real d'una mà humana, personalitzant les dimensions a l'usuari.

4 DETALLS MECÀNICS I GEOMETRIA

4.1 Dimensions principals

Essent conscients que la incorporació d'una pròtesi en el dia a dia d'un pacient suposa un canvi substancial en la vida d'aquest i tal com s'ha mencionat, les dimensions principals del model s'enfoquen per tal d'aconseguir un prototip a escala 1:1 de l'usuari. Per arribar a tenir una geometria antropomètrica s'utilitza la tecnologia d'escaneig 3D, amb sistema actiu sense contacte (veure *Annex A.2.1. Escaneig 3D*), oferint un model rèplica exacta del braç de l'usuari, mitjançant la operació de simetria que ens permeten els programes CAD si es tracta d'un usuari sense un braç.

Per aquest projecte, les dimensions generals utilitzades són les que es mostren a la imatge següent (Figura 6).

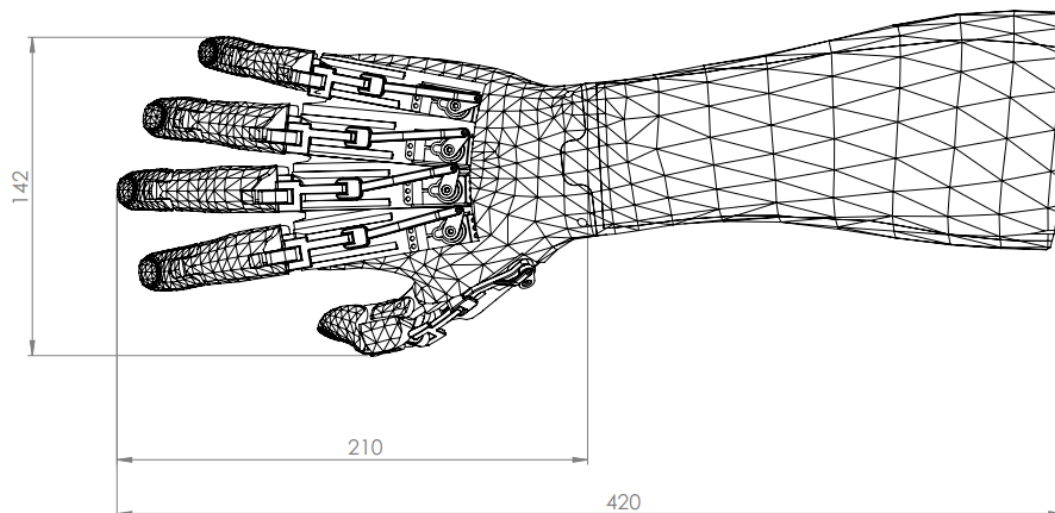


Figura 6: Dimensions generals

Pel que fa als punts de rotació de cada dit es decideix aplicar-ne dos per facilitar el mecanisme, en comptes dels 3 que té el dit real, tot i que el moviment final aconseguit és similar. Després de valorar-ho, s'estableixen els punts mostrats a continuació, per aconseguir la rotació del dit respecte el palmell, i a la falange distal per aconseguir més tancament a la punta dels dits.

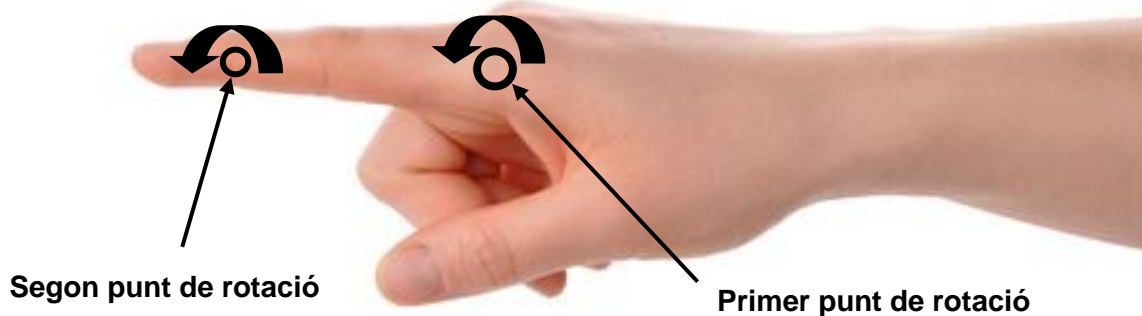


Figura 7: Punts de rotació

4.2 Disseny del mecanisme dels dits

A l'hora de transmetre el moviment des del mecanisme d'accionament cap als dits per donar-li el moviment de pinça desitjat, s'utilitzen els conceptes de triangle pivotant i de quadrilàter articulat pel disseny mecànic de cada dit.

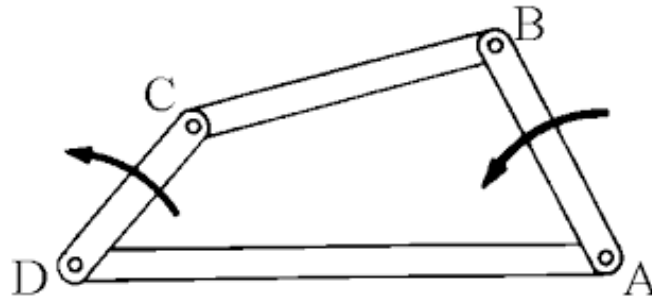


Figura 8: Representació mecanisme quadrilàter articulat

A les Figures 9 i 10 es mostra la posició mínima (mà oberta) i màxima (mà tancada) que tenen els dits en accionar-se.

Representant la força que arriba pel sistema d'accionament amb la fletxa vermella (explicat amb detall a l'apartat 4.4. *Disseny del mecanisme d'accionament*), es pot apreciar com cada dit tindrà un moviment de rotació respecte la bancada, i un moviment de rotació a la punta ocasionat per la transmissió del moviment a través del quadrilàter articulat quan la part inferior del dit entri en contacte amb un objecte.

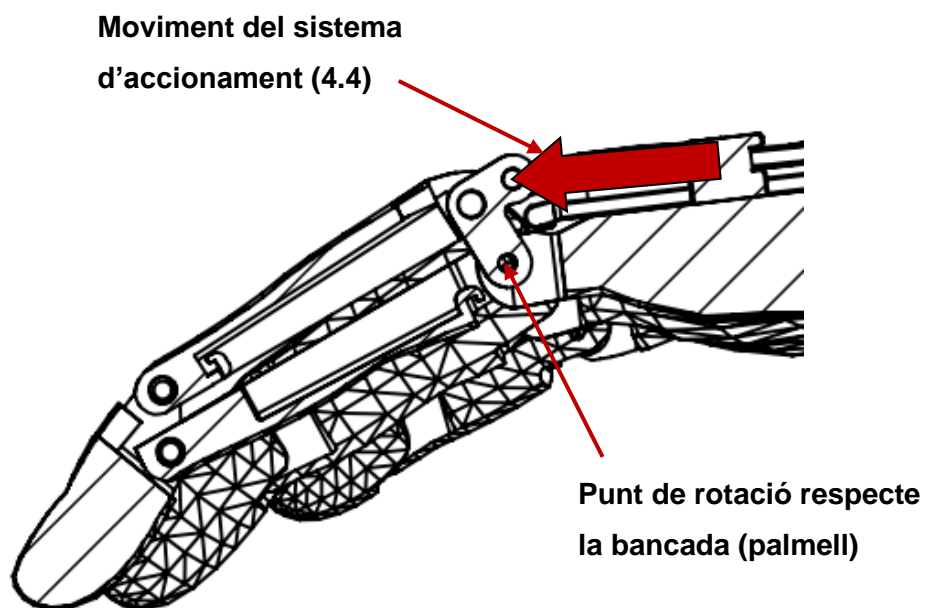


Figura 9: Representació posició mínima (mà oberta)

En girar tot el mecanisme i degut a la geometria, apareix un punt de contacte entre les parts inferior i superior de la falange del dit. Aquest punt és el que fa que el sistema quedi bloquejat i es puguin agafar i aixecar objectes.

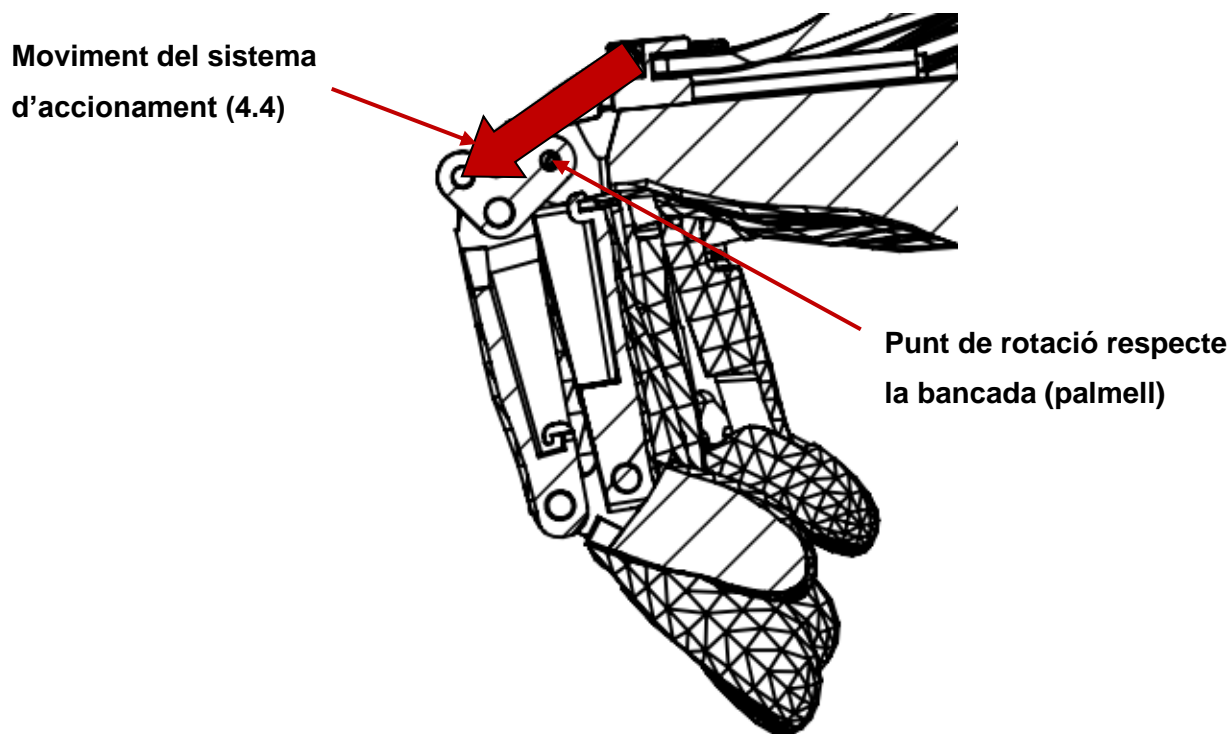


Figura 10: Representació posició màxima (mà tancada)

4.3 Disseny del mecanisme de retorn

Una vegada els servo-motors deixen d'actuar es produeix una zona morta en la posició inicial en la qual els dits no queden fixats i tenen cert joc (tal com es mostra a les figura 11).

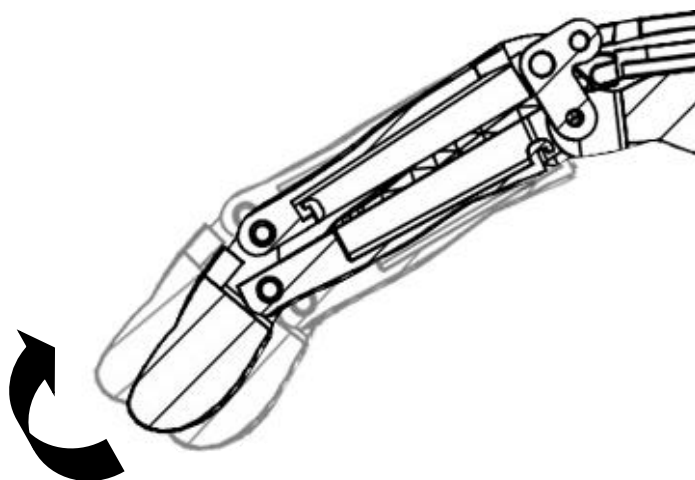


Figura 11: Representació del joc en posició mínima

Per tal d'aconseguir que els dits tornin a la seva posició inicial quan els servo-motors deixen d'actuar, i per mantenir una lleugera tensió que redueixi els efectes produïts per qualsevol joc, s'introdueixen elements elàstics a l'interior de cada dit, tal i com es mostra a la següent imatge (Figura 12).

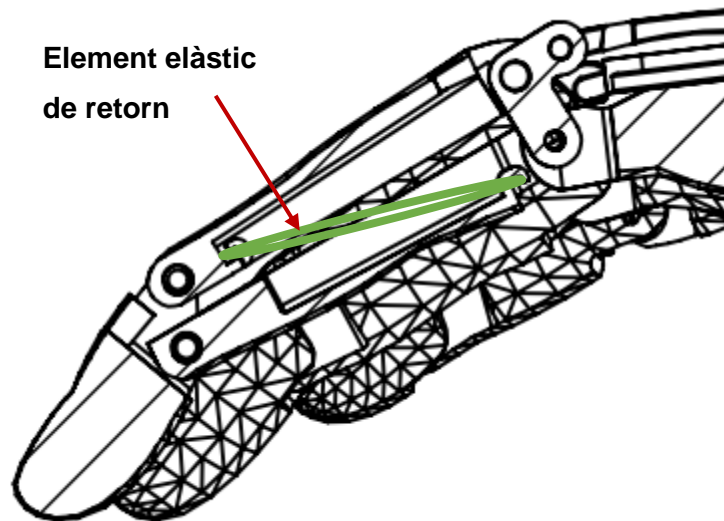


Figura 12: Representació element elàstic

4.4 Disseny del mecanisme d'accionament

Per l'accionament del sistema i per tal de donar moviment als dits es decideix utilitzar servo-motors, concretament el model SG90 degut a les seves reduïdes dimensions i a les seves característiques (explicades en profunditat a l'apartat 6.1. *Components principals* de l'electrònica), que el converteixen en una bona opció pel projecte.

Per tal d'aconseguir el moviment de pinça a cada dit i a la totalitat del conjunt de la pròtesi, és necessari convertir el moviment rotatori del servo-motor en un moviment rectilini que doni moviment al mecanisme dels dits. Per fer-ho, es basa el disseny del mecanisme d'accionament amb el principi del sistema biela-manovella (Figura 13).

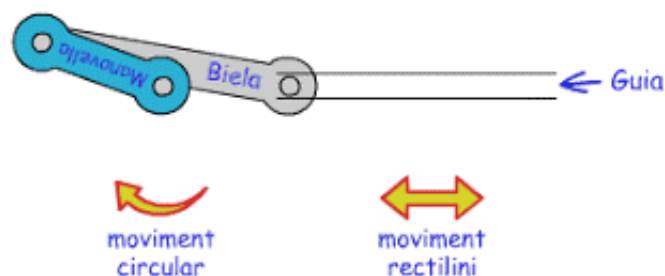
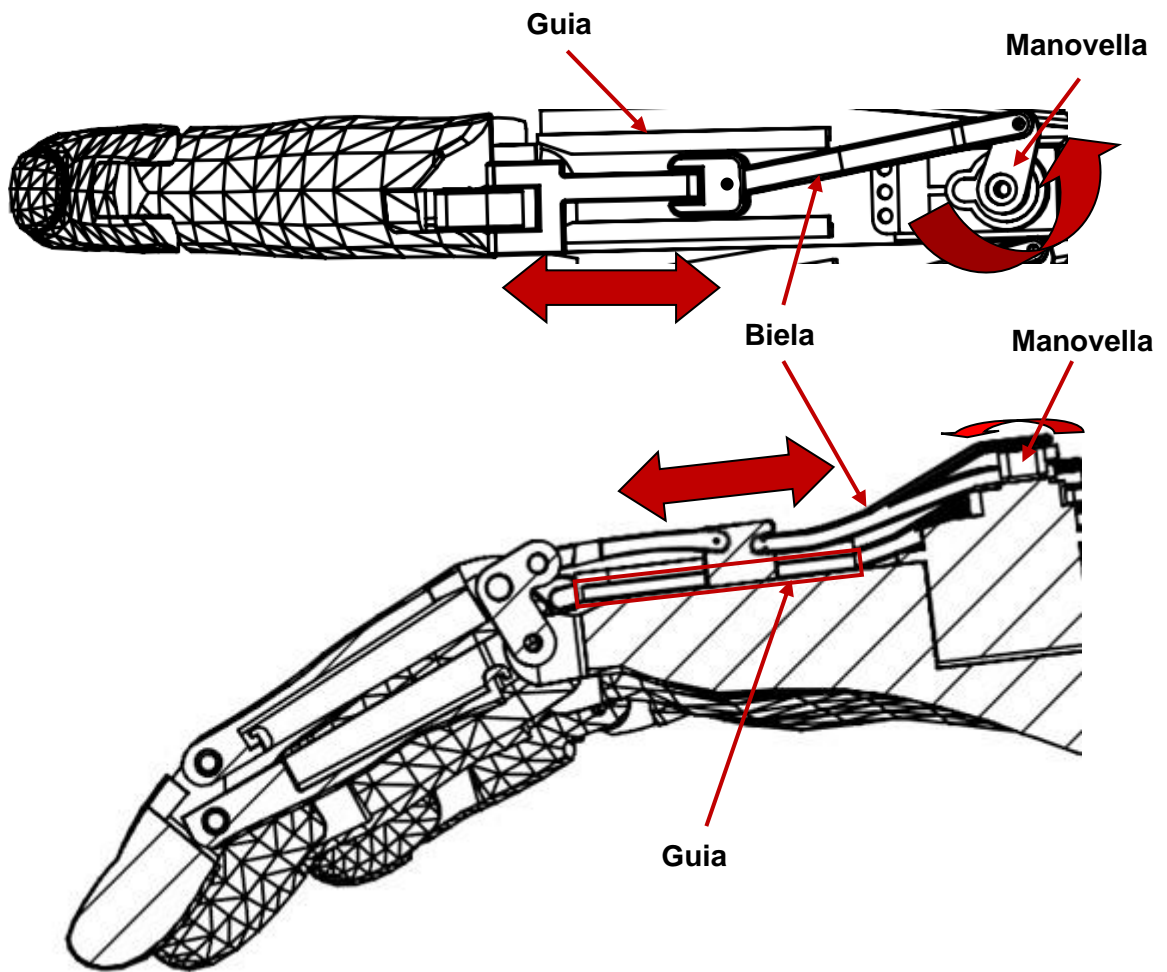


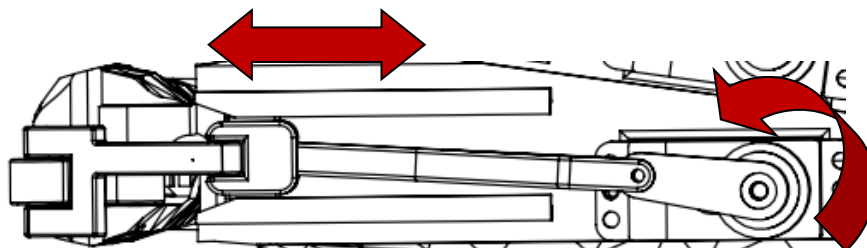
Figura 13: Sistema biela manovella

A continuació es mostra el sistema implementat a la geometria de la pròtesi, amb el mecanisme que uneix el servo-motor amb el dit:

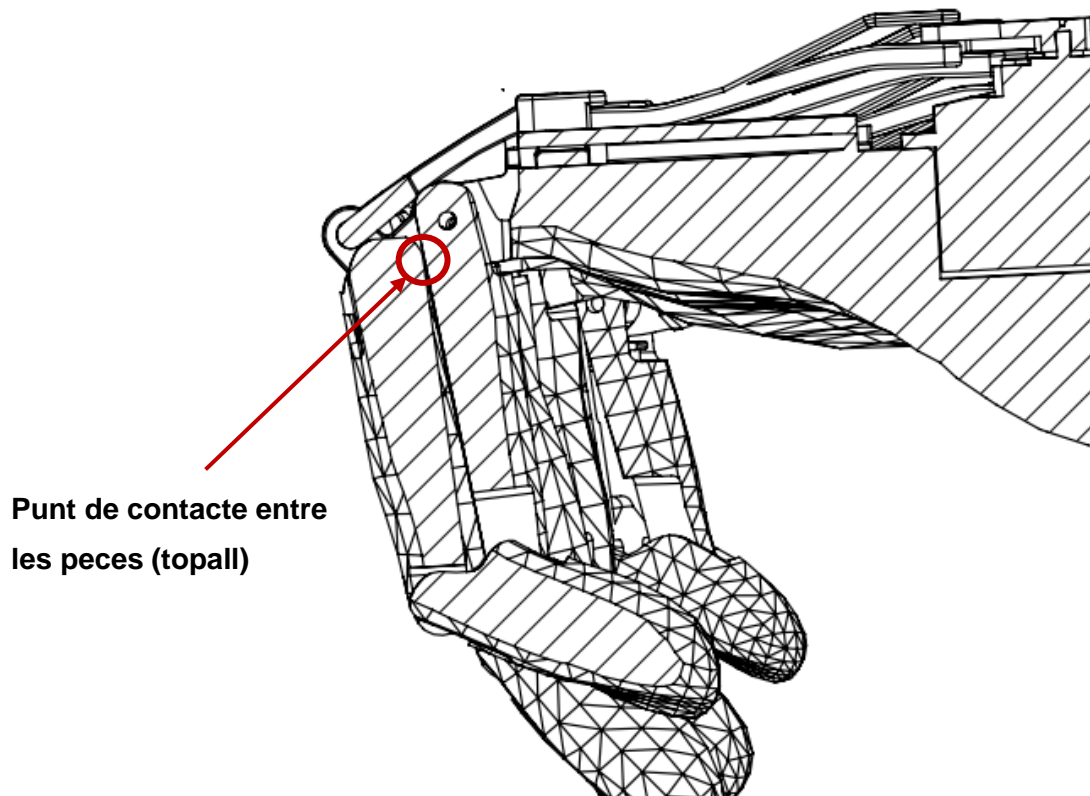


Figures 14 i 15: Representació mecanisme d'accionament

De la mateixa manera, es mostra el mateix mecanisme una vegada activat (posició de mà tancada):



En aquest cas també es pot veure de manera més clara el punt de contacte entre les dues peces, inferior i superior, de la falange del dit. Aquest apareix només en la posició tancada de la mà.



Així mateix i com es pot apreciar a l'Annex B: Càlculs mecànics, les forces normals de la guia esdevenen de signe negatiu, per tant cal tenir-ho en compte pel disseny de la geometria de la guia. Degut al baix coeficient de fregament, es decideix utilitzar el sistema que es mostra al tall representat a continuació.

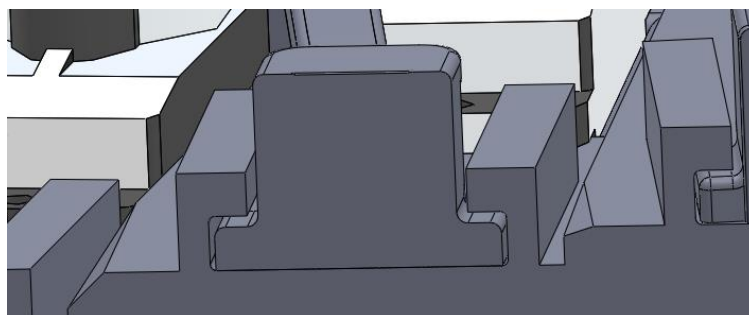


Figura 16: Secció geometria de la guia

4.5 Evolució del disseny

Inicialment es comença realitzant el disseny per tal de fer-lo funcional amb elements comercials, fent que cada peça s'imprimeixi de manera individual i muntant el conjunt a posteriori.

Seguint aquesta metodologia s'obté un disseny sense joc entre les peces. Per contra partida, s'ha d'imprimir un total de 36 peces i comporta la utilització de més de 120 peces o elements comercials.

Aquest disseny contempla la utilització de coixinets de fricció Iglidur, cargols de fixació ISO 7379 i inserts de rosca (veure la Figura 17), molt utilitzats a la impressió 3D.

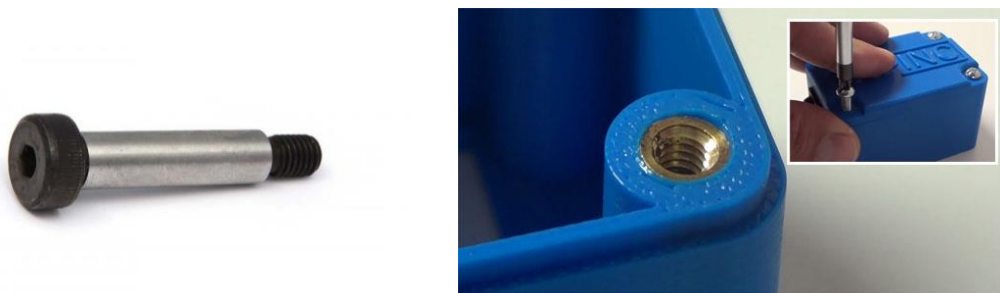


Figura 17: Cargol ISO 7379 i inserts de rosca

A continuació es pot veure una imatge de la prova impresa que es fa del primer disseny (Figura 18).



Figura 18: Prova d'impressió del primer disseny

El fet d'utilitzar tantes peces comercials esdevé en que pugui ser complicat trobar-les de dimensions tan reduïdes com les que es necessiten pel disseny, es necessita de certa destresa pel muntatge, i la utilització de passadors i eixos petits pot comportar un cert grau de perillositat a la pèrdua d'elements.

Això resulta amb un disseny amb dependència de l'estoc i preus de les marques comercials, moltes peces diferents que cal indicar de manera molt exacta per fer possible el muntatge i un sobre cost al conjunt total reflectit en forma de temps de muntatge i per l'elevat preu les peces de compra.

Per evitar això es redissenya cada peça per tal de fer un disseny integrat utilitzant un característica molt interessant que ens ofereix la impressió 3D.

Com s'ha mencionat a l'apartat 4.2. *Dimensions de disseny per a la impressió*, es poden imprimir peces conjuntes amb moviment. Així doncs, amb la finalitat d'eliminar al màxim la utilització d'elements comercials, reduir el nombre de peces a imprimir per separat i així també reduir el temps de muntatge, i a la vegada facilitar-ne el procés, es decideix imprimir cada dit sencer des de la peça de connexió amb el servo-motor fins a la punta del dit.

Optar per fer un disseny integrat en la impressió permet passar de les xifres anteriors a haver d'imprimir un total de 7 peces o subconjunts i comporta la utilització de només 5 peces comercials. Per contrapartida es perd capacitat de manteniment. En cas de ruptura d'una peça dels subconjunts caldria tornar a imprimir el subconjunt sencer.

Per fer el disseny integrat, es parteix d'un disseny de les unions en forma cònica i des de les peces interiors cap a les exteriors, aprofitant els forats que s'havien realitzat en el disseny previ a les peces.

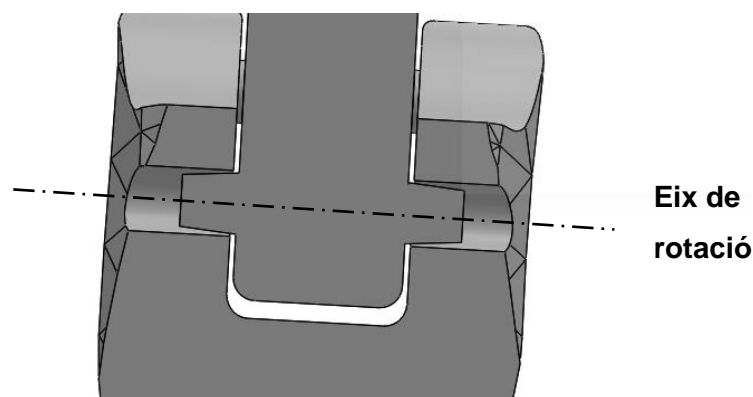


Figura 19: Primera geometria de les unions

Després de fer una prova d'impressió però, de seguida es veu que aquesta geometria no és la òptima ja que genera concentració de tensions i de seguida trenca.



Figura 20: Ruptura del primer disseny d'unions

Finalment, es decideix optar per un disseny en forma de semi-esfera, integrada als elements exteriors amb rotació sobre els forats de les peces interiors, ja que ofereix una resistència major i a la vegada permet eliminar els forats exteriors de les peces, la qual cosa ofereix un disseny més atractiu i integrat a l'estètica d'una superfície continua, més semblant a la superfície real de la mà.

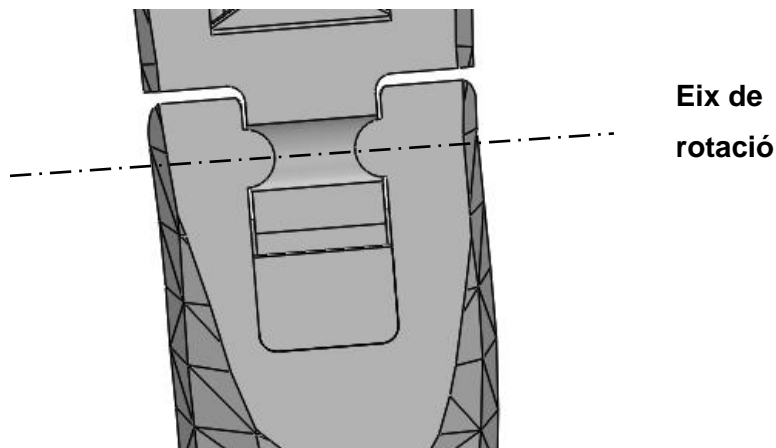


Figura 21: Segona geometria de les unions

A continuació es mostra, a tall d'exemple, una imatge de les peces que s'imprimeixen conjuntament de cada dit (Figura 22). Es pot veure detalladament al document *Plànols*.

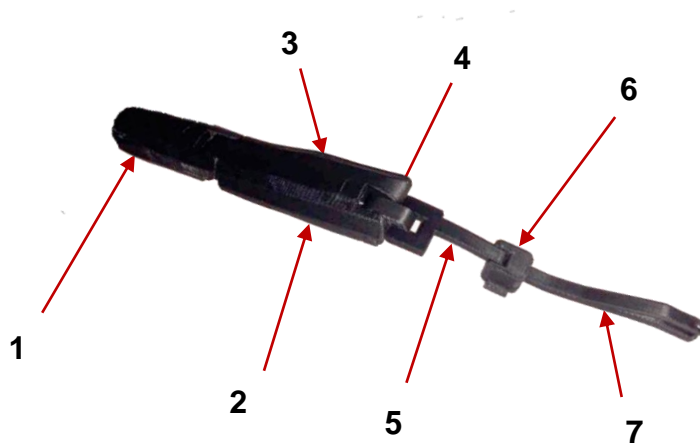


Figura 22: Nombre de peces que s'imprimeixen conjuntament

4.6 Dimensions de disseny per a la impressió

Un dels principals paràmetres a tenir en compte a l'hora de fer el disseny de la geometria i del mecanisme de moviment dels dits és el gruix de certes parts de les peces.

En la impressió 3D i utilitzant PLA, cal considerar els següents detalls per assegurar una bona impressió:

- Els detalls de relleu i gravats han de sobresortir com a mínim 1 mm en el pla horitzontal i 2 mm en el cas d'imprimir-se en parets verticals.
- Un element ha de tenir un gruix de paret de com a mínim 1 mm si està connectat per ambdós costats o 2 mm en el cas contrari.
- Les parts en moviment han de tenir una separació entre les peces de 0,2 mm (punt important per l'apartat 4.4. *Evolució del disseny*).
- Les capes s'han d'imprimir a sobre de l'anterior i per tal d'evitar l'ús de suports, mantenir un angle de 45 graus entre les diferents cares d'impressió.

5 MATERIAL

5.1 Tipus de material

El material utilitzat per a la fabricació del prototip de la *pròtesi* és l'àcid polilàctic (PLA), un termoplàstic que es fabrica a partir de recursos renovables com el midó de blat de moro, l'arrel de tapioca o la canya de sucre.

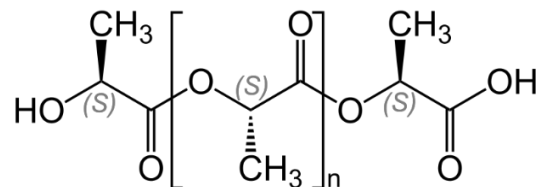


Figura 23: Estructura química del PLA

L'elecció del PLA es realitza segons les necessitats del projecte. En aquest cas interessa un material que permeti obtenir la geometria desitjada pel prototip mitjançant la impressió 3D amb una impressora de modelat per deposició fosa (FDM) convencional, que no es deformi, ofereixi un bon acabat, tingui una bona resistència (veure comparativa entre materials a l'Annex A.1), ni desprengui olor ni gasos o substàncies tòxiques a l'hora d'imprimir o a posteriori.

A continuació es mostren les característiques que ofereix el material:

Densitat (g/cm ³)	Resistència a tracció (MPa)	Mòdul de Young E (MPa)	Mòdul elàstic G (MPa)	Coefficient de Poisson
1,24	47 - 70	3.300 - 3.600	55 - 72	0,38 - 0,4

Així mateix, es coneix que el PLA ja és utilitzat a la indústria biomèdica en aplicacions com l'enginyeria de teixits, la medicina regenerativa, en implants cardiovasculars, intervencions ortopèdiques i equips mèdics, pel que s'estableix com la millor opció pel prototipatge.

5.2 Direcció d'impressió

Tot i que el PLA sigui o es consideri un material isotròpic no vol dir que les peces fabricades amb aquest material mantenen la pròpia qualitat. Per tant, cal tenir en compte certs aspectes per la fabricació que determinen la resistència mecànica de la pròtesi.

En el cas de la impressió 3D mitjançant la tecnologia FDM, com és el cas del prototip, cal tenir en compte la direcció d'impressió de les peces ja que la impressora genera les capes una sobre l'altra, adherides de manera mecànica (no química). Les capes no queden adherides completament entre si, per la qual cosa la peça resultant té una estructura anisotròpica.

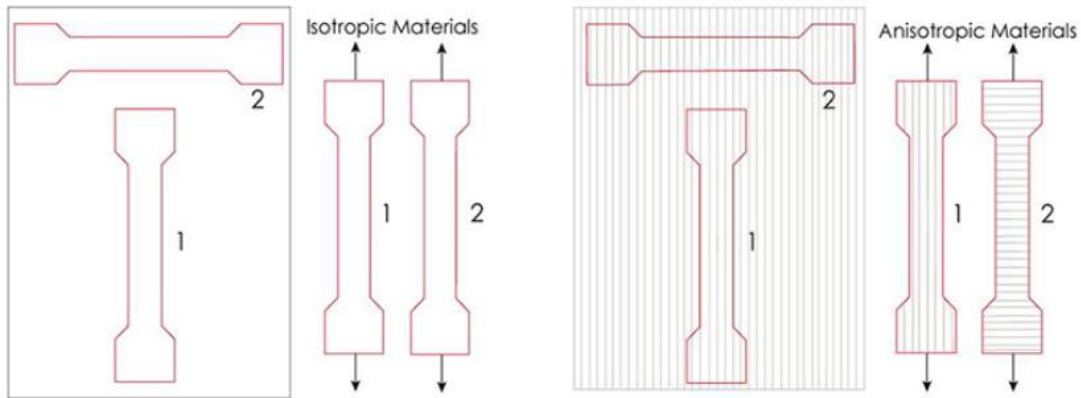


Figura 24: Direcció de les fibres segons la isotropia del material

Seguint la representació de la Figura 24, es pot veure que a l'hora d'imprimir cal ubicar les peces de tal manera que les parts que rebin més tensions estiguin en la direcció de la línia de deposició del material, ja que en aquesta direcció el material sí que mantindrà l'estructura isotròpica, a diferència dels dos eixos perpendiculars a la línia de deposició, on s'obindrà una menor resistència.

6 ELECTRÒNICA

6.1 Components principals

Per tal de donar el moviment desitjat a la mà, com ja s'ha mencionat anteriorment, s'utilitzen una sèrie d'elements i components electrònics.

Primerament, es decideix d'entrada que el moviment es donarà a partir dels servos SG-90.



Figura 25: Servomotor SG-90

L'elecció d'aquest model de servos es basa en:

- Les seves dimensions compactes: 23x28.5x12 mm
- El parell que ens dona: 1.7 kg/cm
- L'alta velocitat de rotació: 0.09s/60°
- El reduït pes: 10.5 g
- Un baix cost: 2.45 €

Durant la valoració del motor a utilitzar, s'han descartat altres opcions que no tenen unes característiques com les dels servomotors. Altres tipus de motors no ofereixen un parell constant independentment de la velocitat (veure Figura 26), la seva fàcil implementació electrònica de "plug and play" i una programació senzilla.

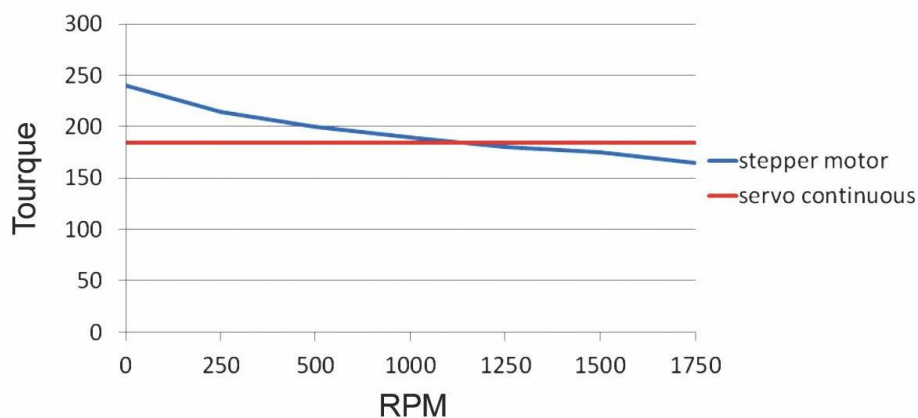


Figura 26: Comparació del comportament de diferents tipus de motors

Per tal de controlar els servo-motors, s'utilitza un PCA9685, un controlador PWM de 16 canals controlat per I2C. Tot i ser un controlador dissenyat inicialment per afegir connexions PWM a la placa per controlar un major nombre de LEDs, donant-li el voltatge necessari també es pot utilitzar per moure servo-motors.

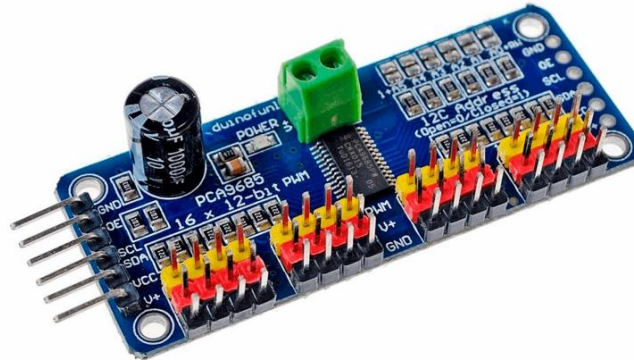


Figura 27: Controlador PCA9685

L'elecció d'aquest controlador es basa en que:

- Té unes dimensions ajustades: 25x62x9 mm
- El seu pes (9.07 g) contribueix a fer un disseny total lleuger.
- Facilita l'ús de connexions de servo-motors ja que les plaques no acostumen a permetre la connexió simultània de més de 3 elements PWM.
- Permet alimentar els servos directament pel controlador sense haver de dependre del voltatge de la placa, el que assegura que treballin correctament.
- Té un baix cost: 8.99 €

Per tal de donar funcionalitat a l'electrònica s'utilitza una placa Arduino Nano.

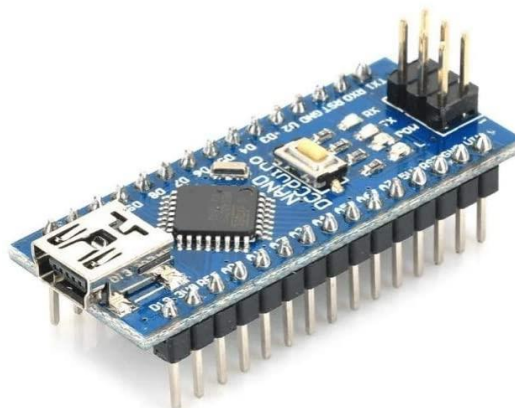


Figura 28: Placa Arduino Nano

L'elecció d'aquesta placa es basa en:

- Les seves dimensions compactes: 23x28.5x12 mm
- La incorporació del microcontrolador ATmega328
- Un voltatge recomanat que es pot aconseguir amb una pila comercial: 7 – 12 V
- Que disposa de 8 pins analògics i 14 digitals.
- El reduït pes: 7 g
- Un baix cost: 4.67 €

Durant l'elecció de la placa s'han desestimat altres opcions com l'Arduino UNO, degut a les seves dimensions que haguessin dificultat la col·locació en el prototip, o el model Pro Mini, ja que no disposa de connector USB integrat, una característica que facilita la programació. Així mateix, el preu dels dos models desestimats supera el del seleccionat, per la qual cosa l'Arduino Nano resulta el model més equilibrat.

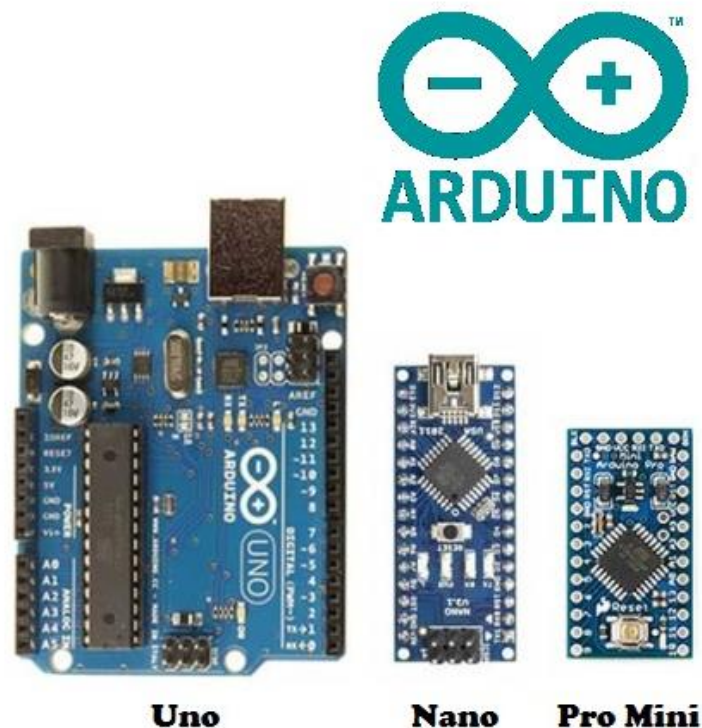


Figura 29: Comparació de les dimensions de les diverses plaques

I finalment, per tal de transmetre els impulsos dels músculs a la placa perquè els transformi en el moviment desitjat, s'opta per utilitzar la tecnologia EMG.

6.2 Tecnologia EMG

Per introduir aquest tipus de tecnologia primer es defineix el concepte d'electromiografia (EMG).

L'electromiografia consisteix en l'adquisició, el registre i anàlisi de l'activitat elèctrica dels nervis i músculs a través de la utilització d'elèctrodes, ja siguin superficials, d'agulla o implantats.

L'activitat elèctrica dels nervis i músculs reflexa les forces generades pels músculs i la temporització dels comandaments motors. L'amplitud i les propietats dels senyals que arriben del sensor depenen del temps i la intensitat de la contracció muscular, la distància entre els elèctrodes i la zona de l'activitat muscular, el tipus de pell o la qualitat del contacte entre elèctrode i pell.

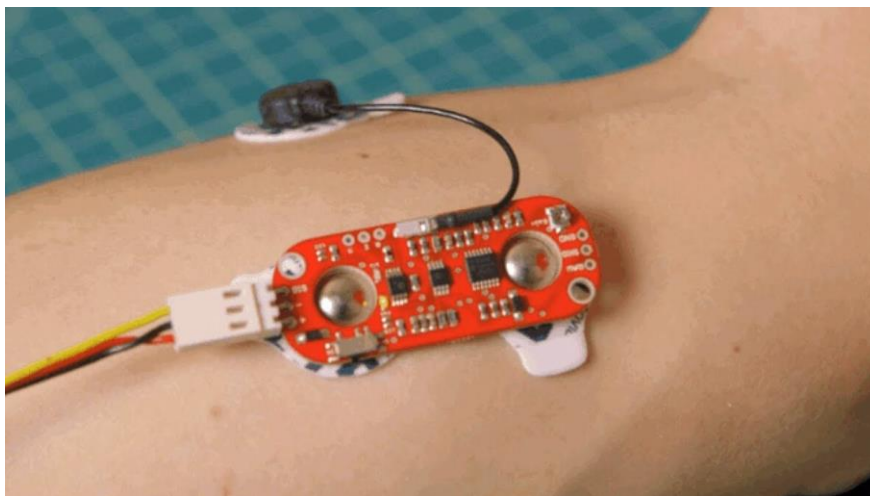


Figura 30: Sensor MyoWare

El sensor seleccionat per realitzar la mesura dels senyals és el MyoWare d'AdvancerTechnologies, que ofereix les següents característiques:

- No resulta un sensor de grans dimensions: 52.3x20.7x5.5 mm.
- Funciona amb un voltatge d'entrada recomanat d'entre 3.3 i 5V que es pot obtenir de l'alimentació de la placa, per tant no requereix d'alimentació externa.
- Té un guany ajustable a partir d'un potenciòmetre.
- La seva utilització és relativament senzilla (parlant en termes electrònics, deixant de banda les dificultats que pugui presentar el fet d'ubicar-lo a la posició òptima del múscul).

A l'Annex A.3. *ELECTRÒNICA I CONTROL* es detalla el diagrama de connexions utilitzat i el codi de programació de la placa Arduino.

7 FABRICACIÓ DEL PROTOTIP

7.1 Procés de fabricació

Per a la fabricació del prototip es parteix del disseny escollit amb els detalls explicats a l'apartat 4. *DETALLS MECÀNICS I GEOMETRIA*, amb impressió FDM i utilitzant PLA.

Totes les peces a imprimir es poden observar als plànols. Principalment es distribueixen en cinc dits amb els corresponents elements de transmissió de moviment des del servo-motor, el palmell de la mà i l'avantbraç. En aquest cas s'ha dividit el palmell i l'avantbraç degut al limitat volum d'impressió d'una impressora FDM convencional, tot i que d'un bon principi havia d'anar imprès de manera conjunta.

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

El resultat final del procés de fabricació del prototip es pot veure representat a la següents fotografies.



Figura 31: Conjunt acabat en perspectiva

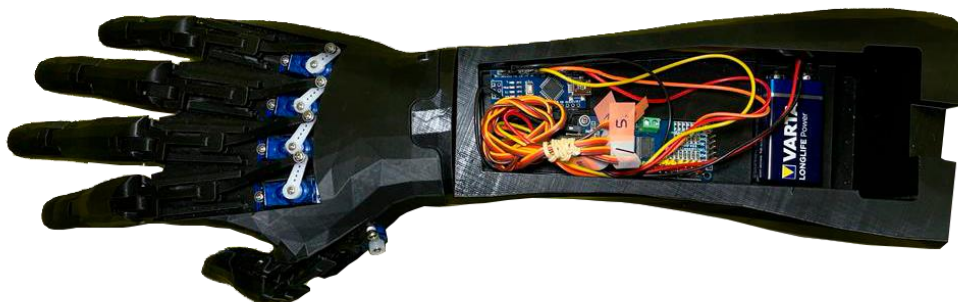


Figura 32: Vista superior conjunt acabat

I a continuació se'n representen també exemples reals d'aplicació.



Figura 33: Subjecció d'un telèfon mòbil mitjançant el prototip



Figura 34: Subjecció d'un telèfon mòbil mitjançant el prototip



Figura 35: Subjecció d'una calculadora mitjançant el prototip



Figura 36: Subjecció d'una bossa mitjançant el prototip

7.2 Anàlisi de la solució

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

		1a versió		2a versió (final)	
Aspecte valorat	PES 0-100	Puntuació			
Nombre de peces a imprimir	80	6 (36 peces)	480	9 (7 peces)	720
Tolerància dimensional	100	8	800	7	700
Nombre de peces comercials utilitzades	90	4 (120 peces)	360	10 (5 peces)	900
Facilitat de muntatge	75	5	375	8	600
Manteniment (possibilitat de reemplaçar una peça en cas de ruptura)	70	8	560	7	490
Joc entre peces	90	8	720	6	540
Valor màxim (suma x10)	5050		3295		3950

Després de fer una valoració de les dues versions proposades es pot veure com la solució final presenta una millor valoració mitjana dels aspectes observats més rellevants.

Tots els aspectes giren en torn a la diferencia d'implementar la impressió integrada que permet obtenir una solució amb menys peces a imprimir per separat, la utilització de moltes menys peces comercials i més facilitat de muntatge.

Per tant, es desestima la opció aplicada a la primera versió del prototip d'imprimir totes les peces per separat, ja que es millora en manteniment però presenta una gran dificultat de muntatge i un gran nombre de peces comercials a utilitzar.

7.3 Millors del disseny

Després d'haver analitzat la solució final es procedeix a definir els punts de millora que es poden aplicar al disseny per tal de millorar-lo i enfocar el procés a la fabricació en sèrie.

Tot i que l'ús d'impressores industrials permeten imprimir el model sencer no es creu adient imprimir-ho tot d'una sola peça. Imprimir per parts permet el canvi de només una part en cas de patir algun defecte, accident o ruptura. Si s'imprimís tota la pròtesis junta i hi hagués algun problema s'hauria de canviar tot directament, el que en multiplicaria el cost.

Un altre punt a millorar podria ser el de canviar el mecanisme d'accionament a un motor de cargol o un motor DC. La utilització d'aquest tipus de motors comportaria que en cas de falla electrònica el sistema quedés bloquejat. Sobretot seria interessant utilitzar aquest tipus de motor si permetés algun tipus de millora geomètrica significativa o reduís l'espai utilitzat pels servomotors. Com que la utilització dels servomotors dona uns bons resultats de resistència a l'hora d'aixecar una càrrega, no resulta un punt essencial a estudiar pel bon funcionament de la pròtesis.



Figura 37: Motor DC

Una altra millora seria la de canviar la geometria de rotació, explicat al punt 4.5 *Evolució del disseny*, per una que permetés la impressió simultània de les peces, però oferint menys joc i un funcionament més fi.

Un aspecte necessari de comprovar és el desgast del material. S'hauria d'estudiar quin seria el desgast del conjunt, i si aquest desgast i el petit joc de les peces suposaria algun problema a mig-llarg termini amb la utilització continuada al dia a dia.

A més, per tal d'oferir una millor experiència d'usuari amb la utilització de la pròtesis, es podria estudiar la implementació d'un material tipus goma que recobris el palmell per facilitar l'acció d'agafar objectes.

Finalment, per fer més completa la pròtesis, es podria estudiar la implementació de més motors per donar més graus de llibertat al conjunt, afegir sensor per donar moviments independents a cadascun dels dits, afegir mobilitat a l'altura del canell o implementar sensors de pressió als tous dels dits per regular la força del motor en funció de la pressió realitzada per cada dit.

8 FABRICACIÓ EN SÈRIE

Una vegada analitzat el prototip imprès i havent fet les propostes de millora pertinents es procedeix a estudiar la fabricació en sèrie d'una pròtesis d'aquestes característiques.

Per a dur a terme l'estudi s'utilitza la plataforma *Sculpteo*, una empresa dedicada a la impressió 3D que permet comparar i valorar diferents aspectes de disseny i costos en funció de la tecnologia i materials de fabricació desitjats. A l'estudi només es contemplen tipus de fabricació amb impressores industrials de tecnologies avançades, deixant enrere així la fabricació per FDM, utilitzada anteriorment al procés de prototipatge.



Figura 38: Logotip de l'empresa utilitzada per a dur a terme la comparativa

Per tal de poder-ho comparar amb cadascun dels casos, s'adjunta la gràfica de propietats del PLA, el material utilitzat per la fabricació del prototip.

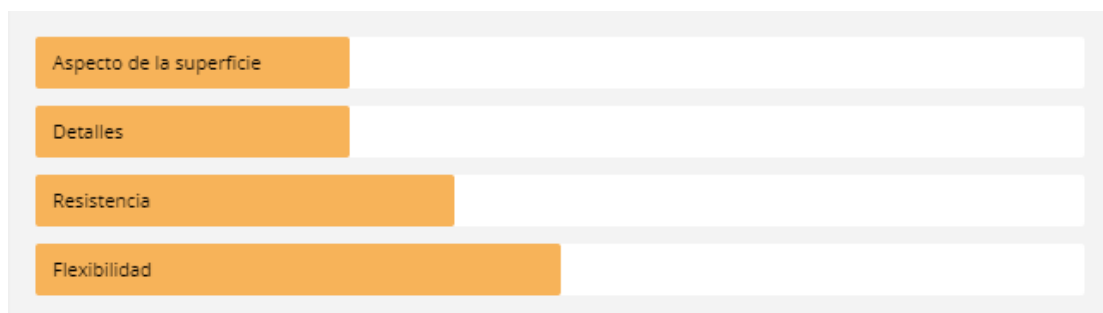


Figura 39: Característiques del PLA

En primer lloc, es valoren els avantatges i inconvenients de cada tipus de fabricació, per passar llavors a fer una valoració conjunta de preus i per acabar decidint quina esdevé la opció òptima per la fabricació en sèrie.

8.1 Fabricació per SLS (Plàstic)

La fabricació per sinteritzat selectiu per làser és una de les opcions més utilitzades en l'actualitat quan es vol aconseguir peces resistents i amb un bon acabat superficial a l'hora de fer peces funcionals.

Aquest tipus d'impressora utilitza un làser per sinteritzar petites partícules de polímer en pols i convertir-les en una estructura sòlida, seguint el procés indicat a la Figura 40.

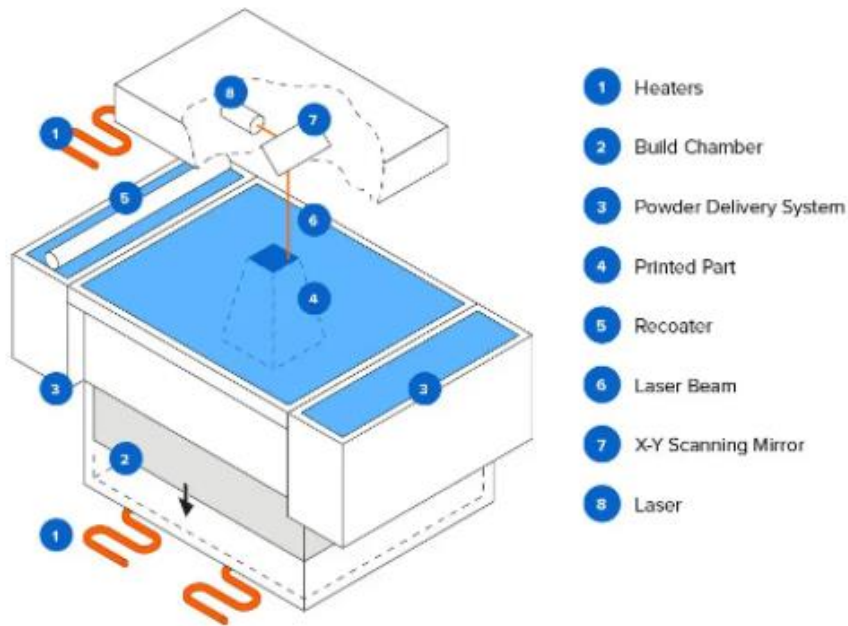


Figura 40: Impressió per SLS

En el cas que ocupa aquest projecte i per a la fabricació SLS s'ha consultat el cost de fabricació utilitzant com a material el Nylon PA12.



Figura 41: Característiques del Nylon PA12

Aquest tipus de material ofereix una bona resistència, és resistent a diversos tipus de productes químics (olis, grasses, gasolina...) i s'obté un acabat superficial molt fi.

Es tracta d'un material molt polivalent que garanteix un bon producte tan per resistència com per acabat superficial.

8.2 Fabricació per Multijet Fusion (Plàstic)

La Multijet Fusion és una tecnologia utilitzada principalment en la producció de petits volums de peces complexes amb acabat per ús final, prototips o peces que pretenen competir en propietats mecàniques contra les de fabricació per injecció i components petits.

Aquesta tecnologia utilitza la tècnica de fondre pols però a diferència de la SLS no utilitza làser. En el seu lloc es polvoritza un agent fusor en els punts on les partícules s'han de fondre de manera selectiva. Ofereix una menor porositat que la SLS.

En el cas que ocupa aquest projecte i per a la fabricació Multijet Fusion, igual que en el cas anterior, s'ha consultat el cost de fabricació utilitzant com a material el Nylon PA12, les característiques del qual es poden veure a la Figura 41.

8.3 Fabricació per LCD/DLP (Resina)

Els processos de fabricació de processament de llum digital (DLP) i pantalla de cristall líquid (LCD) s'utilitzen a l'hora de fabricar objectes a gran escala i producció en massa. Ofereixen la possibilitat de crear conjunts funcionals i un acabat superficial molt bo.

Ambdues tecnologies utilitzen una font de llum per curar la resina que es troba dins una tina. A mida que la resina es cura contra la plataforma de construcció, aquesta s'eleva lentament fora del tanc per tal de donar forma a la peça capa per capa.

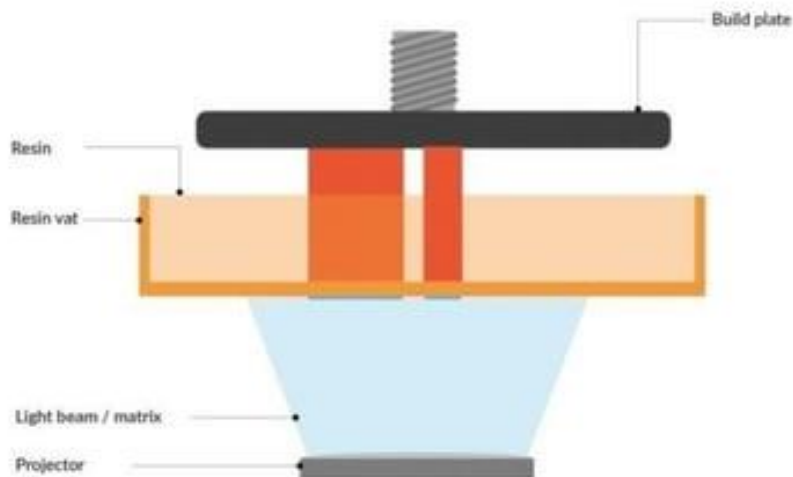


Figura 42: Impressió per LCD/DLP

En el cas que ocupa aquest projecte i per a la fabricació LCD i DLP s'ha consultat el cost de fabricació utilitzant com a material el EPD 1006.

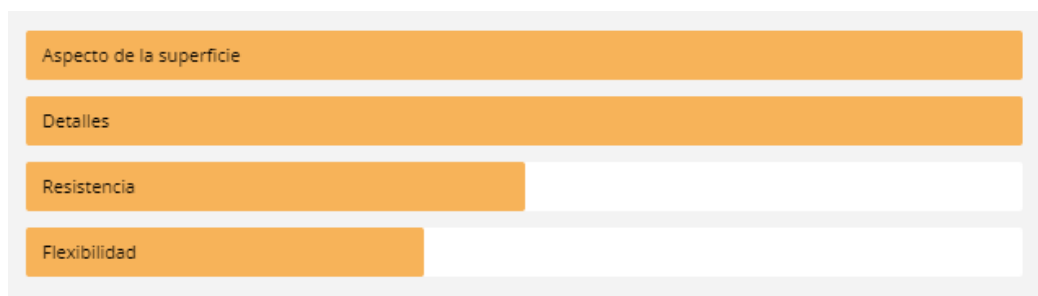


Figura 43: Característiques del EPD 1006

Aquest tipus de material ofereix una resistència major que la del PLA, amb una precisió de 100 µm segons el fabricant, la qual cosa esdevé en un molt bon aspecte de la superfície i dels detalls.

8.4 Polyjet (Resina)

La Polyjet és una tecnologia d'impressió utilitzada principalment per a la fabricació de prototips o peces amb un acabat suau i amb gran precisió.

El funcionament és molt similar al de una impressora de tinta convencional, amb la diferència que injecta capes de fotopolímer líquid en una safata, que posteriorment s'endureix.

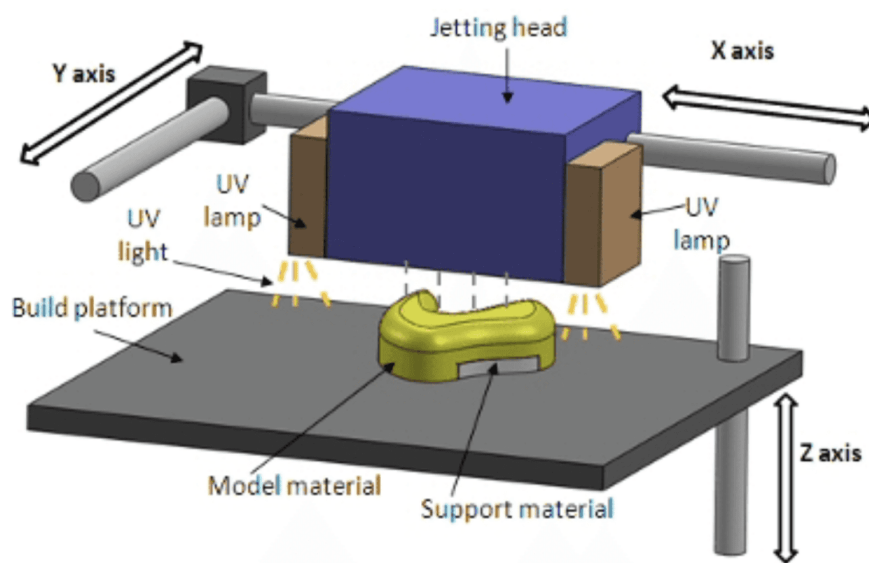


Figura 44: Impressió per Polyjet

En el cas que ocupa aquest projecte i per a la fabricació Polyjet s'ha consultat el cost de fabricació utilitzant com a material la resina VeroWhite.

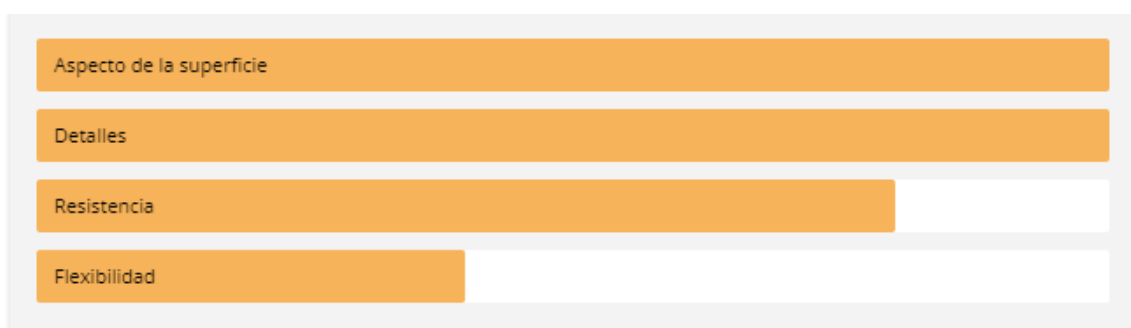


Figura 45: Característiques del VeroWhite

Aquesta resina ofereix menys resistència i flexibilitat que els materials mencionats per a les diverses tecnologies, tot i que és el que ens ofereix un acabat superficial més fi amb un major nivell de detalls. En tot cas, veiem que ens ofereix una major resistència que el PLA.

8.5 Comparativa de costos

Després d'haver analitzat les possibles tecnologies de fabricació ofertades i el material utilitzat per cadascuna d'elles es mostra una taula comparativa amb el cost d'impressió per a cada tipus:

Tipus	SLS	Multijet	LCD/DLP	Polyjet
Cost (€)*	488.57	597.91	865.98	1492.56

*El cost de fabricació de la taula anterior s'ha calculat tenint en compte la impressió de només una unitat de pròtesi.

Com podem veure, la tecnologia SLS és la que ofereix un cost de fabricació més baix. Així mateix i tenint en compte els aspectes que ofereixen els materials utilitzats en cada una d'elles, es pot determinar que la impressió per SLS utilitzant Nylon PA12 és la millor opció per a la fabricació en sèrie de la pròtesi.

Per concloure aquest apartat, es pot indicar que el cost material de construcció de la pròtesis subcontractant la fabricació a una empresa especialitzada, i tenint en compte els elements electrònics necessaris és de 562,13 €, una xifra molt inferior als preus de les pròtesis comercialitzades a dia d'avui.

9 RESUM DEL PRESSUPOST

L'import total de la fabricació i assemblatge del prototip puja un total de 127,05 €.

10 CONCLUSIONS

Després de la realització tan de la part teòrica com de la part pràctica del projecte es poden extreure una sèrie de conclusions sobre la fabricació d'una pròtesis biònica amb tecnologies d'escaneig 3D i fabricació additiva.

A mode de resum, s'han assolit els següents objectius:

- 1- S'ha dissenyat i materialitzat una mà biònica a nivell prototip.
- 2- S'ha proposat un redisseny per reduir el nombre de peces tan d'impressió com comercials, millorant-ne la facilitat de muntatge i la dependència i variació d'estocs i preus externs.
- 3- S'ha integrat correctament el concepte d'electromiografia i els elements d'actuació amb la impressió 3D amb bons resultats.
- 4- S'han proposat possibles millores a fer després de l'anàlisi del prototip.

Aconseguint així completar els requeriments marcats a l'inici del projecte:

Tema	O/D	Descripció	% assolit
Pes pròtesi	O	Que no superi la mitjana de pes d'un braç humà: 2,3 kg.	100
Funció	O	Aixecar objectes de 10 kg de pes en posició tancada	100
Dimensions	D	Adaptades a cada usuari	95
Material	D	Que permeti implementar tècniques d'impressió 3D tant pel procés de prototipatge com la fabricació en sèrie	100
Disseny	D	Integrat amb l'antropometria	100
Disseny electrònic	O	Dissenyar i implementar l'electrònica que doni moviment i funcionalitat a la pròtesi	100
Cost	O	Cost de construcció màxim de 1.000 euros.	100

S'ha demostrat que es pot utilitzar aquest tipus de tecnologies per a la fabricació de pròtesis de mà per tal de fer-les funcionals, aconseguint a la vegada un cost de fabricació molt baix.

Tot i que el material i tipus de fabricació utilitzat pel prototip no siguin els idonis, cal remarcar que les altres opcions estudiades i mencionades en aquest projecte, com podria ser la utilització de la fabricació SLS i Nylon PA12, permetrien obtenir resultats més òptims, millorant sobretot l'acabat de fabricació i la resistència. Tot i així, el prototip permet aixecar un pes de 10 kg.

Com ja s'ha comentat, en el cas de la impressió per FDM, la peça obtinguda té una estructura anisotròpica, per la qual cosa els càlculs poden diferir de la realitat.

Cal recordar que tots els càlculs són teòrics, que les proves o assajos que s'han pogut realitzar de manera física no justifiquen els resultats obtinguts i que caldria fer-li assajos més exhaustius.

Així mateix, un dels principals problemes que presenta l'elecció d'aquests materials es troba en la rigidesa i la resistència, que no és tan elevada com la de materials compòsits o metalls. Si es fes un estudi molt acurat amb un anàlisi d'elements finits i es busqués el límit real de les tensions admissibles es podria reforçar els punts més desfavorables per tal d'aconseguir uns resultats semblants als dels altres materials.

De totes formes, la solució obtinguda ofereix uns bons resultats per al seu ús i sobretot tenint en compte la diferència en el preu final.

El principal avantatge de la solució adoptada ve donada per l'alt grau de personalització del producte a mida de cada usuari, tot i acabi patint petites variacions en les dimensions en aplicar-hi els mecanismes de rotació dels dits i el sistema d'accionament, i la facilitat de fabricació i muntatge, el que acaba esdevenint en l'obtenció d'una solució amb un cost molt ajustat, assequible per pràcticament tots els usuaris.

Per altra banda, l'impacte ambiental produït en comparació amb la fabricació d'altres materials plàstics o compòsits és molt menor si s'utilitzen materials d'impressió 3D biodegradables com el PLA o el Nylon PA12 procedents de vegetals.

L'aparició al mercat d'aquest nou sector en el món de la prostètica podria tenir un impacte considerable degut a que és innovador i cridaria l'atenció dels consumidors. Per això, caldria realitzar un bon programa de màrqueting per tal de conscienciar que aquests tipus de pròtesis poden ser igual o més bona solució que les pròtesis comercialitzades a dia d'avui, sobretot remarcant un cop més, la personalització que ofereix i el baix cost a la que es podria oferir als usuaris.

Finalment, com a idees de futur del projecte i que ocuparien un paper important en la següent fase de industrialització, seria necessari analitzar l'afectació de la duració de la pròtesis degut al joc existent entre les peces, i el desgast del material degut a l'ús quotidià. S'haurien de dur a terme assajos més exhaustius i realitzar un anàlisi per elements finits per veure, mitjançant la simulació, quins son els punts que es podrien reforçar o millorar del disseny.

11 RELACIÓ DE DOCUMENTS

Document 1. Memòria i Annexos

Annex A: Disseny

Annex B: Càlculs mecànics

Annex C: Fabricació i muntatge

Annex D: 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

12 BIBLIOGRAFIA

- 3DPRINT.PE. *Las reglas de diseño cuando se imprime en 3d con tecnología FDM.* (<https://3dprint.pe/reglas-de-diseno-cuando-se-imprime-con-impresoras-3d-fff-fdm/>)
- DAVIS, J.R. *Handbook of materials for Medical Devices* (9780871707901: ASM International)
- Dr. ARCE GONZALEZ, CARLOS. *Niveles de amputación* (<http://www.arcesw.com/niveles.htm>)
- DYNAPRO3D. *Las ventajas del PLA para su utilización en impresión 3D.* (<https://dynapro3d.com/impresion-3d/impresion-3d-pla/>)
- ESPINOZA, MARÍA JOSÉ; GARCÍA, DANIELA. *Niveles de amputación en extremidades inferiores: repercusión en el futuro del paciente* (<https://www.elsevier.es/es-revista-revista-medica-clinica-las-condes-202-articulo-niveles-amputacion-extremidades-inferiores-repercusion-S0716864014700380>)
- FILAMENT2PRINT. *Escáneres 3D.* (https://filament2print.com/es/blog/118_escaneres-3d.html)
- FILAMENT2PRINT. *The importance of isotropy in 3D Printing.* (https://filament2print.com/gb/blog/91_isotropy-3d-printing.html)
- FORMLABS. *Validating Isotropy in SLA 3D Printing.* (<https://formlabs.com/blog/isotropy-in-SLA-3D-printing/>)
- IDEAL.ES. *¿Cuánto pesa cada parte de tu cuerpo?* (<https://www.ideal.es/sociedad/201604/08/cuanto-pesa-cada-parte-20160408101423.html?ref=https%3A%2F%2Fwww.google.com%2F>)
- KUTZ, MYER. *Biomedical Engineering and Design Handbook* (9780071498388: McGraw-Hill Education)

- NORTON, KIM. *Un breve recorrido por la historia de la protésica.* (<https://www.amputee-coalition.org/resources/spanish-history-prosthetics/>)
- SAM, HIREN. *Mercado global de extremidades artificiales, perspectivas de futuro 2027.* (<https://tecnoalimenportal.com/mercado-global-de-extremidades-artificiales-perspectivas-de-futuro-2027-ossur-hanger-inc-ohio-willow-wood-company-ottobock-rsl-steeper-group-ltd-proteor/>)
- SHAKIBA, MOHAMADREZA; REZVANI GHOMI, ERFAN; KHOSRAVI, FATEMEH; JOUYBAR, SHIRZAD; BIGHAM, ASHKAN; ZARE, MINA; ABDOUSS, MAJID; MOAREF, ROXANA; RAMAKRISHNA, SEERAM. *Nylon-A material introduction and overview for biomedical Applications* (https://www.researchgate.net/publication/351496068_Nylon-A_material_introduction_and_overview_for_biomedical_applications)
- ULTIMAKER. *Ficha de datos técnicos PLA.* (<https://docs.rs-online.com/7ade/0900766b81698006.pdf>)

ANNEX A: DISSENY

A.1. Materials proposats i les seves propietats

A l'hora de seleccionar el material per a dur a terme la fabricació del prototip es tenen en compte diferents opcions d'entre les més utilitzades per a fabricació FDM, valorant-ne la millor opció a partir de certs aspectes de cada un d'ells.

PLA:

L'àcid polilàctic és un tipus de plàstic biodegradable d'origen natural. És un filament molt versàtil i ecològic per l'origen dels seus components. Majoritàriament s'utilitza per fabricar objectes que no tinguin molt de desgast, malgrat ofereix cert grau de rigidesa, i pel seu comportament davant la ruptura, en la qual el material no genera estelles que puguin esdevenir perilloses per la seguretat.

- Avantatges: ofereix facilitat d'impressió, fet de material ecològic, creat pràcticament per treballar amb impressió 3D i no genera perillositat en trencar.
- Desavantatges: la seva textura final no és tan suau ni és un material tan resistent com altres com per exemple l'ABS.

ABS:

L'acrilonitril butadiè estirè és el material més utilitzat després del PLA en les impressions 3D. És un material difícil d'extruir però ofereix molta resistència i durabilitat.

- Avantatges: la seva resistència, la durabilitat i la polivalència. Ofereix un acabat amb una textura suau.
- Desavantatges: és complicat de treballar i necessita unes condicions de temperatura molt estables. Així mateix, emet fums tòxics i no és un material ecològic.

TPU:

El poliuretà termoplàstic és un elastòmer termoplàstic caracteritzat per la seva elasticitat i flexibilitat.

- Avantatges: la seva flexibilitat el fa idoni per objectes que s'han de doblegar o apretar (no aplicable en el cas del projecte).
- Desavantatges: és un material difícil d'imprimir ja que necessita boquilles estretes i un procés lent d'impressió.

PETG:

El polietilè tereftalat glicol és un derivat del polietilè (PET) i és un dels materials més utilitzats en la impressió 3D. Aquest tipus de filament és més flexible i durador que el PLA, i a la vegada és més fàcil d'imprimir que l'ABS, per la qual cosa esdevé una opció que es situa entremig de les altres.

- Avantatges: és un material fàcil d'imprimir, té una baixa rigidesa i ofereix una bona resistència. És resistent també a certs químics.

- Desavantatges: tot i que es tracta d'un material amb poques avantatges, se'n podria destacar la rugositat de les superfícies amb suports i que no ofereix un acabat tan llis com altres materials.

TAULA COMPARATIVA DE CARACTERÍSTIQUES D'IMPRESSIÓ I PREUS:

Material	T ^a impressió (°C)	T ^a plataforma (°C)	Tolerància (mm)	Preu/kg bobina (€)
PLA	180 – 215	0 – 60	±0.02	12.21
ABS	210 – 230	90 – 120	±0.02	13.85
TPU	180 – 230	50 – 70	±0.05	15.53
PETG	220 – 250	50 – 70	±0.02	15.06

Degut a les característiques de la impressora utilitzada, les propietats que ens aporta i el preu es decideix utilitzar PLA.

En cas de necessitar un prototip més resistent per estudiar més enllà de la seva funcionalitat es pot utilitzar PETG, tot i que en aquest cas no és compatible amb la impressora utilitzada i el PLA ofereix més versatilitat i un bon acabat.

A.2. Geometria i disseny mecànic: Escaneig 3D

Un dels grans avenços que ha viscut l'enginyeria industrial i de disseny en els últims anys ha sigut el desenvolupament de processos d'enginyeria inversa.

L'enginyeria inversa i en concret l'escaneig 3D consisteix en extreure informació d'una superfície física i convertir-la a un model digital. Això aporta una multitud d'avantatges a l'hora de modelar productes ja que permet obtenir models de gran qualitat i exactitud amb els seus símilis físics, i agilitza els temps de modelat.

Els escàners 3D extreuen la posició relativa de múltiples punts de la superfície física i interpolen digitalment les superfícies que els contenen. Es poden dividir en dos grans categories, escàners amb contacte i escàners sense contacte.

Escàners 3D amb contacte:

Son els escàners menys utilitzats tot i ser els més precisos. Un operari recorre tota la superfície mitjançant un braç articulat amb un palpador a l'extrem que grava la posició dels diferents punts de la superfície. Per contra, es tracta d'un procés lent i la fricció del palpador pot malmetre la superfície de l'objecte escanejat.



Figura 46: Escaneig 3D amb contacte

Escàners 3D sense contacte:

Aquest tipus d'escàners es basen en tecnologies òptiques i es classifiquen en sistemes passius i sistemes actius.

- Sistemes passius: es basen en extreure la informació geomètrica de la superfície mitjançant fotografies de diferents punts de vista. Es tracta d'un sistema que permet reproduir grans superfícies, però ho fa amb poca resolució i precisió. El sistema passiu més conegut és la fotogrametria, molt utilitzada en obra civil i topografia.



Figura 47: Sistema passiu d'escaneig 3D sense contacte

- Sistemes actius: es tracta dels sistemes més utilitzats en la indústria, l'art o la medicina, i es basen en la medició d'una senyal emesa sobre la superfície. Els sistemes habituals son els òptics. Tot i que existeixen múltiples opcions, les més utilitzades son els escàners de temps de vol, que medeixen el temps que tarda en anar i tornar un pols de llum làser, els escàners de triangulació que medeixen l'angle del reflex làser, i ofereix molta precisió tot i que requereix de distàncies d'escaneig molt pròximes a l'objecte, els escàners de diferència de fase, que determina la distància a l'objecte en funció de la llum làser emesa i la rebuda, i els escàners de llum estructurada, que son els més comuns i la opció més polivalent. Ofereixen una bona resolució, molta precisió, alta velocitat d'adquisició i un baix cost. Consten d'una càmera amb una lent calibrada i un projector que projecte patrons de llum a la superfície, la càmera capta les deformacions de la llum sobre la superfície i en genera els punts de la superfície digitalitzada.



Figura 48: Sistema actiu d'escaneig 3D sense contacte

A.3. Electrònica i control

A.3.1. Diagrama de connexions

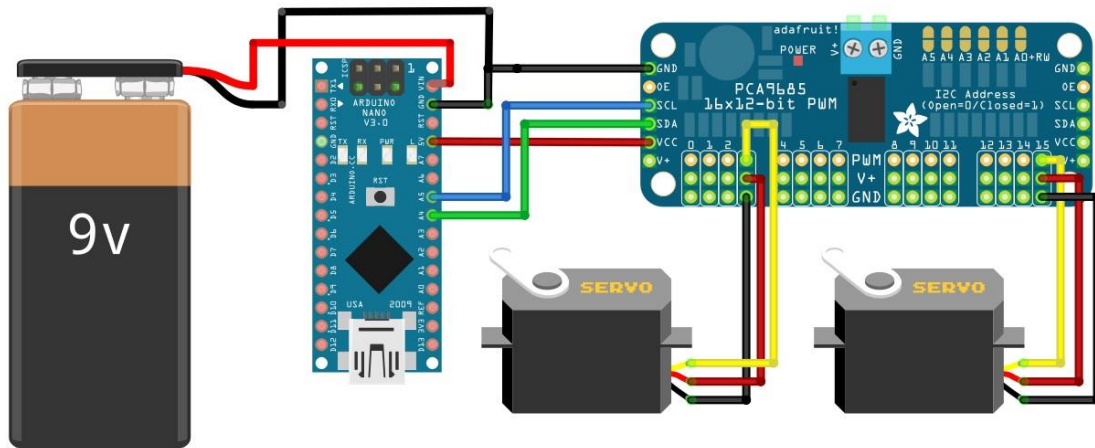


Figura 49: Diagrama de connexions de la part electrònica

* Per a la representació dels servos només s'ha utilitzat dos servomotors, s'hauria d'aplicar a les 5 unitats del conjunt.

A.3.2. Codi programació Arduino

```
#include <Wire.h>
```

```
#include <Adafruit_PWMServoDriver.h>
```

```
#include <Servo.h>
```

```
Adafruit_PWMServoDriver pwm = Adafruit_PWMServoDriver();
```

```
#define MIN_PULSE_WIDTH 650
```

```
#define MAX_PULSE_WIDTH 2350
```

```
#define DEFAULT_PULSE_WIDTH 1500
```

```
#define FREQUENCY 50
```

```
#define THRESHOLD 180
```

```
#define EMG_PIN 0
```

```
uint8_t servonum1 = 0;
```

```
uint8_t servonum2 = 1;
```

```
uint8_t servonum3 = 2;
```



```
uint8_t servonum4 = 3;
uint8_t servonum5 = 4;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  pwm.begin();
  pwm.setPWMFreq(FREQUENCY);
}

int pulseWidth(int angle)
{

  int pulse_wide, analog_value;
  pulse_wide = map(angle, 0, 180, MIN_PULSE_WIDTH, MAX_PULSE_WIDTH);
  analog_value = int(float(pulse_wide) / 1000000 * FREQUENCY * 4096);
  Serial.println(analog_value);
  return analog_value;
}

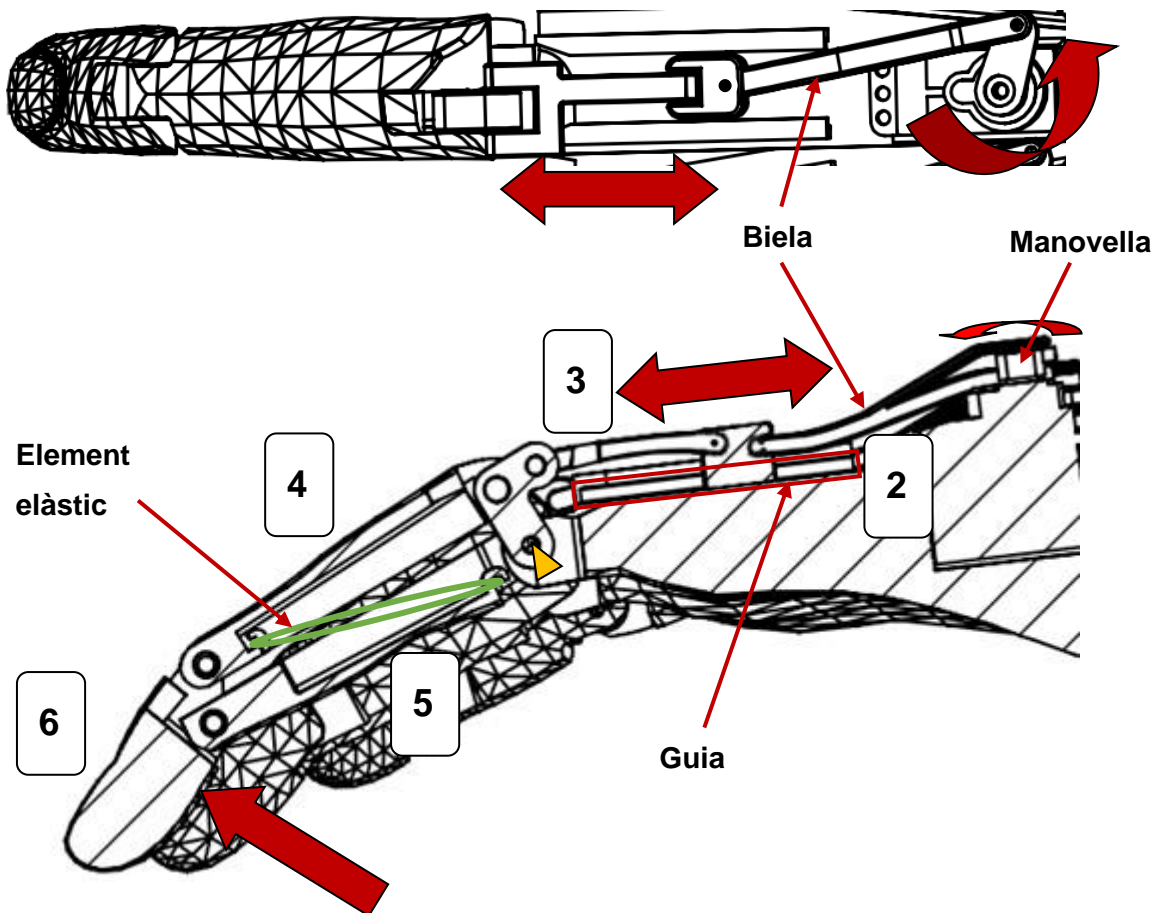
void loop() {
  int value = analogRead(EMG_PIN);

  if (value > THRESHOLD){
    pwm.setPWM(0, 0, pulseWidth(150));
    pwm.setPWM(1, 0, pulseWidth(150));
    pwm.setPWM(2, 0, pulseWidth(150));
    pwm.setPWM(3, 0, pulseWidth(150));
    pwm.setPWM(4, 0, pulseWidth(150));
    delay(50);
  }
  else {
    pwm.setPWM(0, 0, pulseWidth(0));
    pwm.setPWM(1, 0, pulseWidth(0));
    pwm.setPWM(2, 0, pulseWidth(0));
    pwm.setPWM(3, 0, pulseWidth(0));
    pwm.setPWM(4, 0, pulseWidth(0));
    delay(50);
  }
}
```

ANNEX B: CÀLCULS MECÀNICS

B.1. Càlculs de forces i reaccions

Per tal de procedir al càlcul de forces i reaccions, es parteix dels dibuixos utilitzats per descriure el sistema d'accionament (Figures 50 i 51). Amb números s'indiquen el nombre i distribució dels esquemes que es mostren més endavant a l'hora de buscar les reaccions.



Figures 50 i 51: Representació mecanisme d'accionament

De la mateixa manera, es mostra el mateix mecanisme una vegada activat (posició de mà tancada), aplicant el tall desplaçat cap a l'exterior per poder visualitzar el punt de contacte que deixa el mecanisme bloquejat:

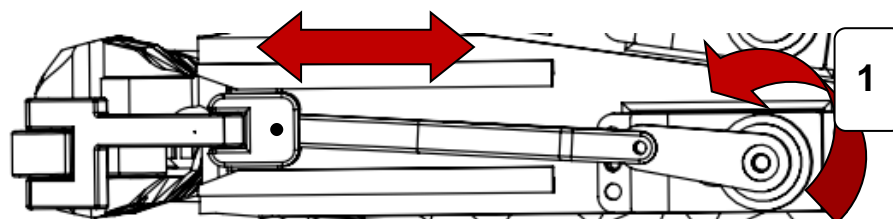


Figura 52: Representació mecanisme accionat

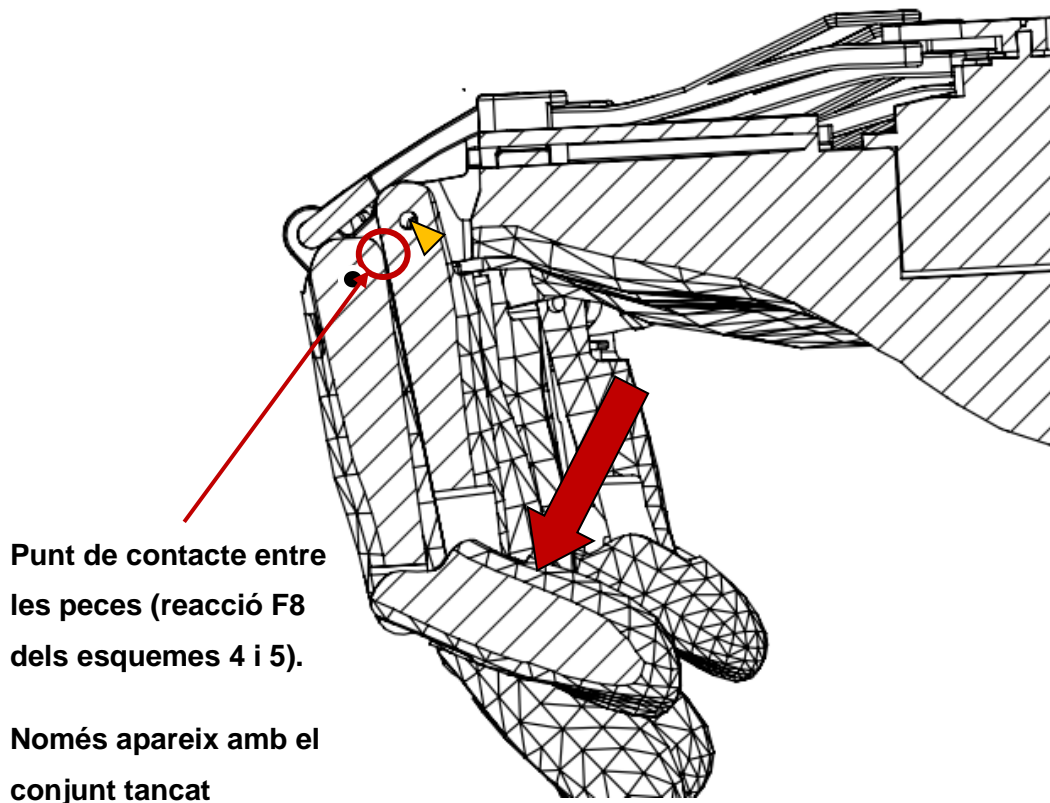


Figura 53: Representació mecanisme accionat

A continuació es representen les dues posicions de forma esquemàtica mitjançant una forma simplificada (sense força de l'element elàstic) dels esquemes que s'utilitzen per trobar les reaccions (Figures 54 i 55).

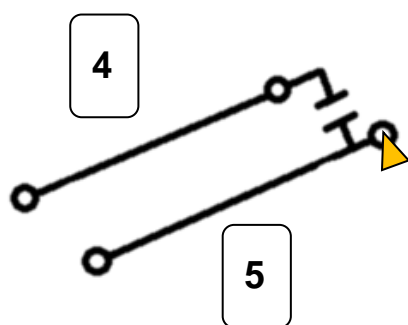


Figura 54: Representació conjunt obert, no existeix contacte

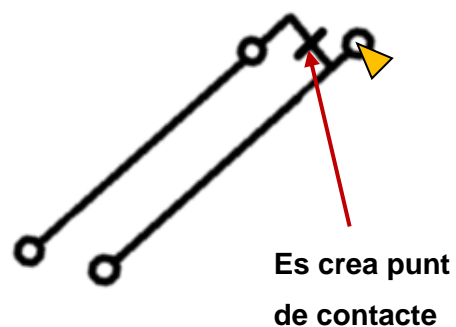
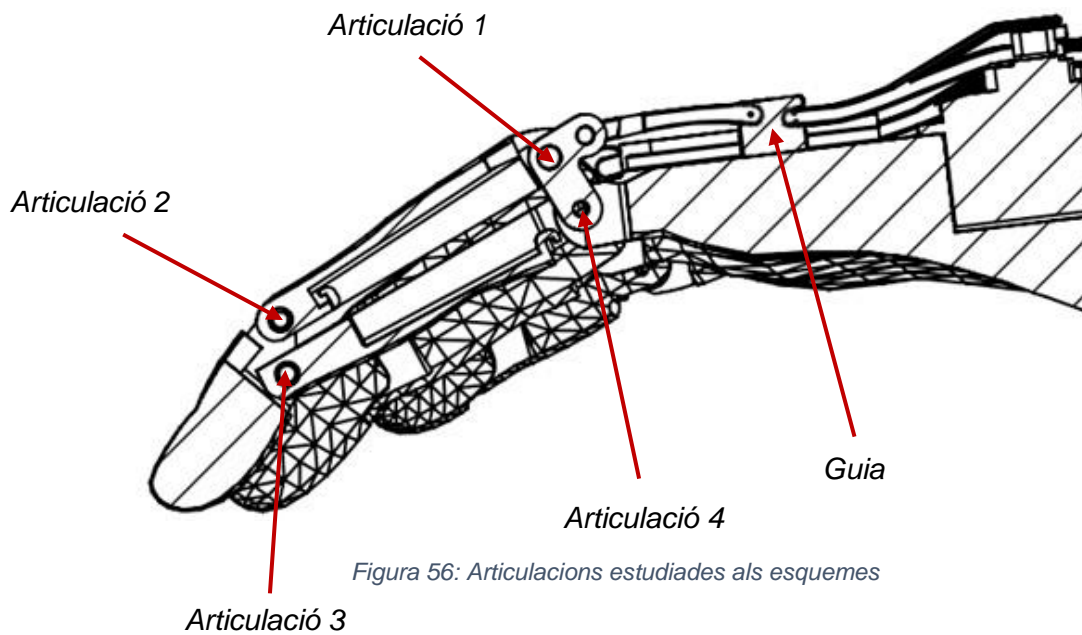


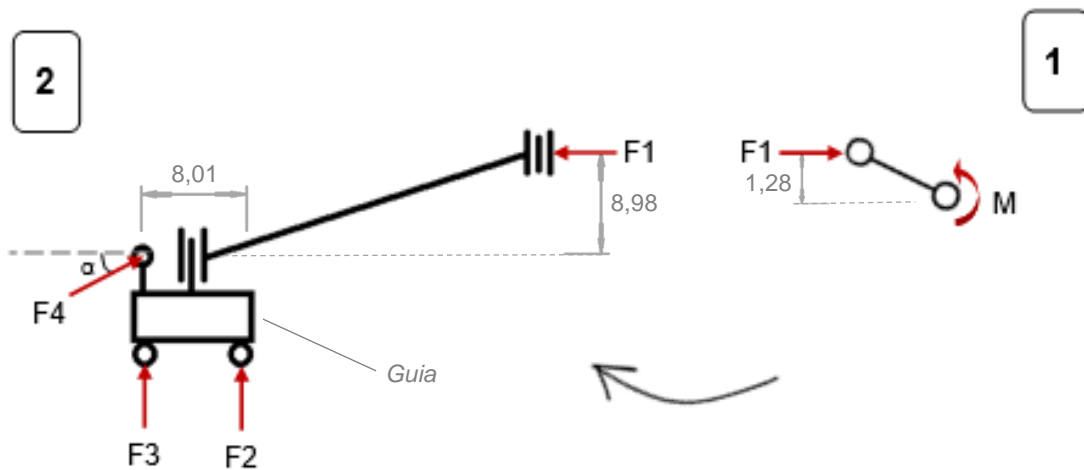
Figura 55: Representació conjunt tancat, existeix contacte

El càlcul de forces s'estudia amb la segona situació, tenint en compte que en agafar l'objecte es crea el punt de contacte.

A continuació s'enumeren les articulacions per tal d'identificar-les a posteriori en els esquemes.



Descomposant les diferents parts que s'inclouen al conjunt i representant les forces i reaccions que hi intervenen (fletxes vermelles), s'obté els següents esquemes (enumerats segons l'ordre que s'ha indicat a les Figures 51 i 52).



On:

* M representa el parell del servo-motor.

** F4 està situada a un angle $\alpha = 13,5^\circ$ respecte la horitzontal.

*** Degut al baix coeficient de fricció del material no s'han tingut en compte les forces de fregament de la guia

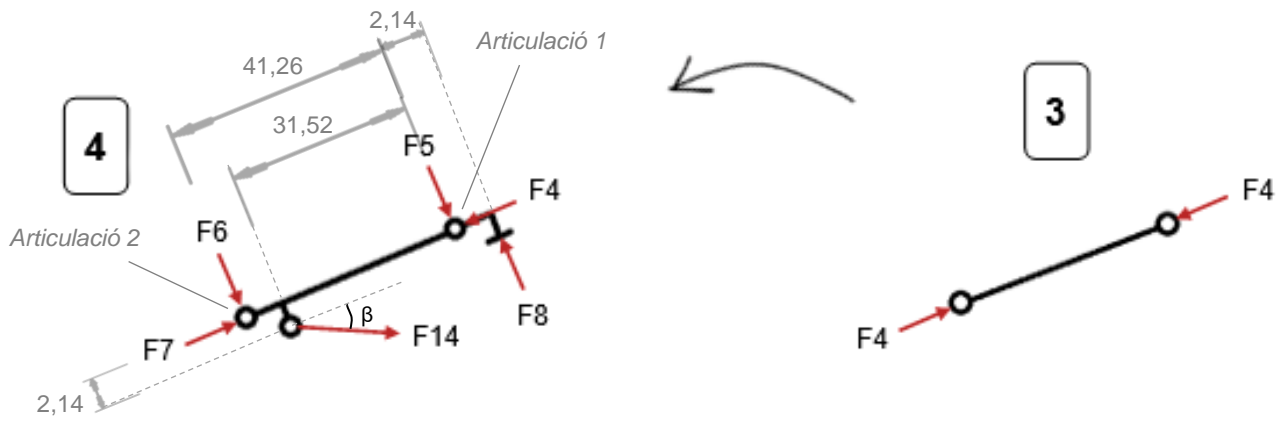


Figura 58: Esquemes 3 i 4 de forces i reaccions

On:

* F8 representa la força de contacte entre les dues peces (dels esquemes 4 i 5), indicada a la Figura 53.

** F14 representa la força del ressort col·locat tal com es mostra a la Figura 51, i té un angle $\beta = 17^\circ$ respecte l'eix x.

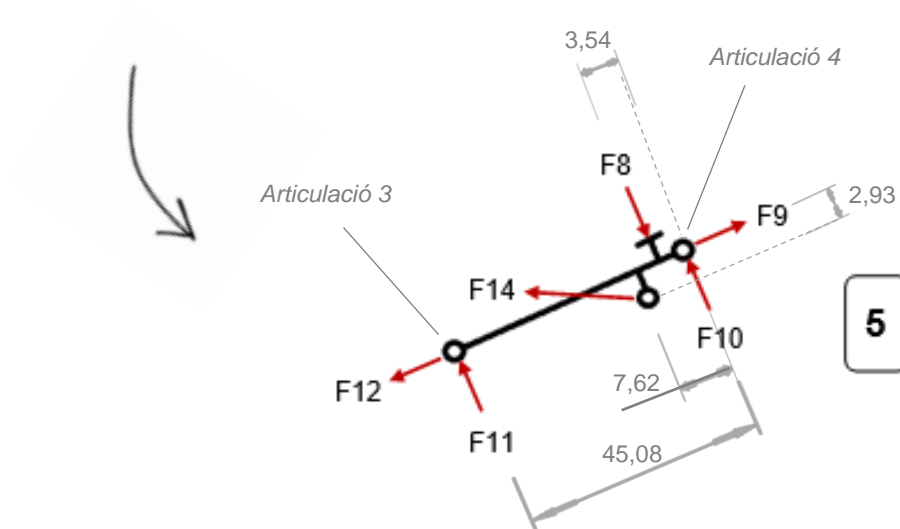


Figura 59: Esquema 5 de forces i reaccions

On:

* F8 representa la força de contacte entre les dues peces, indicada a la Figura 53.

** F14 representa la força del ressort col·locat tal com es mostra a la Figura 51, i té un angle $\beta = 17^\circ$ respecte l'eix x.

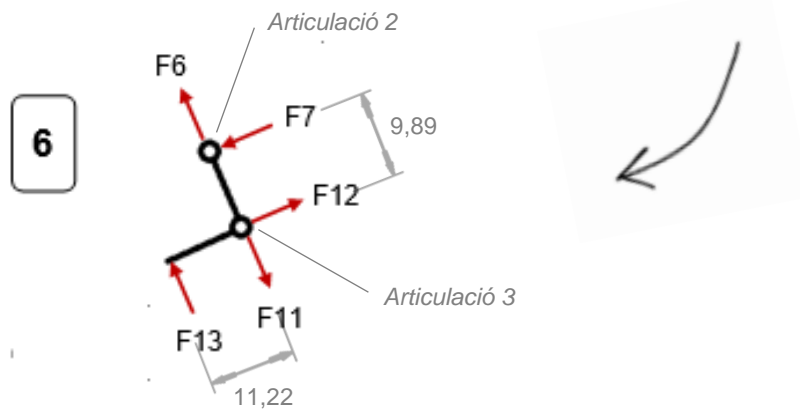


Figura 60: Esquema 6 de forces i reaccions

* F13 representa el pes que podrà aixecar cada dit en funció del parell del servo.

A partir d'aquí es procedeix a donar valor al moment M i a trobar la resta de forces i reaccions mitjançant sumatori de Forces i Moments. Aquest càlcul serveix per veure quan es pot aixecar amb cada dit segons el parell que pot realitzar el servo-motor. Donant valors s'obté que:

1. **$M = 1,6 \text{ kg}\cdot\text{cm} = 160 \text{ Nmm}$**
 $F1 = 125 \text{ N}$

2. **$F4 = 128,5 \text{ N}$**
 $F2 = -140 \text{ N}$
 $F3 = -170 \text{ N}$

4. **$F14 = k \cdot x = 0,065 \text{ N/mm} \cdot (31,16 - 20 \text{ mm}) = 0,53 \text{ N}$**
 $F7 = 128 \text{ N}$
 $F8 = 703,54 \text{ N}$
 $F5 = 740,18 \text{ N}$

5. **$F9 = 128,5 \text{ N}$**
 $F6 = -36,8 \text{ N}$
 $F10 = 611,75 \text{ N}$

6. **$F12 = 128 \text{ N}$**
 $F13 = 112,82 \text{ N}$
 $F11 = 91,63 \text{ N}$

Com es pot veure, cada dit podrà aixecar **112,82 N ($\approx 11,3$ kg)** de pes sense que es produeixi una falla per falta de parell en el motor.

B.2. Càlculs de tensions

Una vegada calculat el que podrà aixecar cada dit en funció del parell del motor, cal comprovar els punts crítics del disseny i veure si aguanten o no.

En el cas que no aguanten es repetirà el càlcul amb el pes màxim que s'ha imposat com a requeriment (10 kg en total). Contant els 4 dits que principalment s'enduran els efectes de la càrrega, suposa que a cada dit se li atribueixi un valor de 2,5 kg (≈ 25 N).

Pel que fa al límit elàstic, en el cas que la tensió es comprovi en el sentit longitudinal de les fibres es considerarà el valor corresponent a les seves propietats, indicades a l'apartat 5. *Material* de la memòria ($S_y = 55$ MPa).

En el cas que la tensió es comprovi en un dels dos sentits transversals o no se'n conegui la direcció exacta, s'agafarà un valor experimental aproximat ($S_y = 37$ MPa).

Cal tenir en compte que això ens donarà un resultat aproximat, però caldria analitzar-ho més detalladament i fer proves més exhaustives per tal de comprovar-ne la veracitat.

B.2.1. Càlcul de tensions de la guia

La primera comprovació es duu a terme a les ales de l'element guia. Totes les forces van distribuïdes sobre aquestes pel que es genera un tallant que pot fer trencar la peça.

Segons els càlculs de forces i reaccions realitzats a l'apartat anterior, a la guia apareixen unes reaccions F_2 i F_3 de 140 i 170 N respectivament. En distribuir-se aquesta reacció en les dues ales veiem que el seu valor es divideix entre 2 pel cas que ocupa, tal com es mostra a continuació.

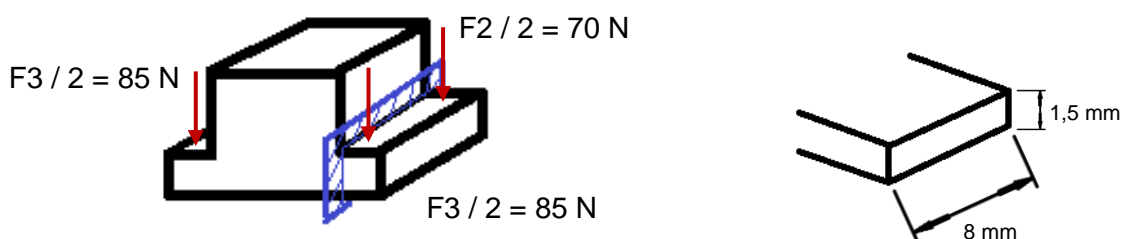


Figura 61: Reaccions de la guia i dimensions de la secció estudiada

Observant la secció marcada de color blau, s'obtenen les següents càrregues:

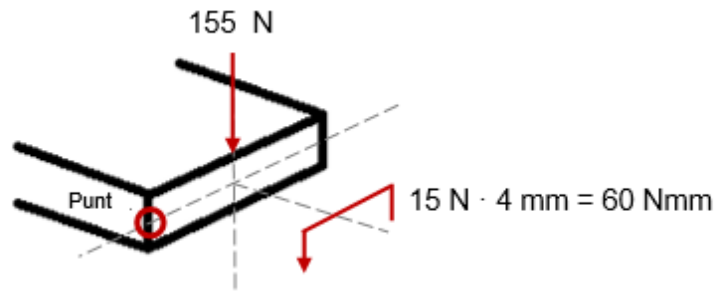


Figura 62: Càrregues de la secció estudiada

$$I_z = \frac{b \cdot h^3}{12} = \frac{8 \cdot 1,5^3}{12} = 2,25 \text{ mm}^4$$

$$M_e = (8 \cdot 0,75) \cdot 0,375 = 2,25 \text{ mm}^4$$

$$V = (F_2 + F_3) / 2 = 155 \text{ N} ; T = (85 - 70) \cdot 4 = 60 \text{ Nmm}$$

$$\tau (V)_a = \frac{V \cdot M_e}{e \cdot I_z} = \frac{155 \cdot 2,25}{8 \cdot 2,25} = 19,375 \text{ MPa}$$

$$\tau (T)_a = \eta \cdot \frac{T}{\mu \cdot c \cdot e^2} = 0,743 \cdot \frac{60}{0,298 \cdot 8 \cdot 1,5^2} = 8,31 \text{ MPa}$$

$$\tau (\text{total})_a = 19,375 + 8,31 = 27,685 \text{ MPa}$$

$$\sigma' = \sqrt{\sigma^2 + 3 \cdot \tau^2} = \sqrt{3 \cdot 27,685^2} = 47,95 \text{ MPa}$$

Com que la guia en aquest sentit no està impresa en la direcció longitudinal de les fibres, per a fer la comprovació s'agafa un valor $S_y = 37 \text{ MPa}$.

$$n = \frac{S_y}{\sigma'} = \frac{37}{47,95} = 0,77$$

Com que no compleix i trencaria, es repeteix el procés agafant les càrregues corresponents a la consideració de 2,5 kg / dit. $\rightarrow V = 34,2 \text{ N} ; T = 13,2 \text{ Nmm}$

$$\tau (V)_a = \frac{V \cdot M_e}{e \cdot I_z} = \frac{34,2 \cdot 2,25}{8 \cdot 2,25} = 4,275 \text{ MPa}$$

$$\tau (T)_a = \eta \cdot \frac{T}{\mu \cdot c \cdot e^2} = 0,743 \cdot \frac{13,2}{0,298 \cdot 8 \cdot 1,5^2} = 1,83 \text{ MPa}$$

$$\tau (\text{total})_a = 4,275 + 1,83 = 6,1 \text{ MPa}$$

$$\sigma' = \sqrt{\sigma^2 + 3 \cdot \tau^2} = \sqrt{3 \cdot 6,1^2} = 10,56 \text{ MPa}$$

$$n = \frac{S_y}{\sigma'} = \frac{37}{10,56} = 3,5$$

B.2.2. Càlcul de tensions passador més desfavorable

Seguidament es realitza la comprovació pel passador amb la càrrega a tallant més desfavorable.

Segons els càlculs de forces i reaccions realitzats a l'apartat anterior, al passador apareix una reacció $F_5 = 740,18 \text{ N}$. En distribuir-se aquesta reacció en dos punts de contacte el seu valor es divideix entre 2, tal com es mostra a continuació.

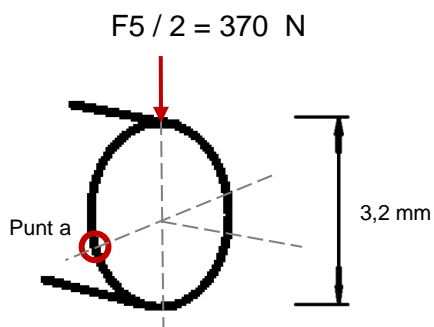


Figura 63: Càrregues de la secció estudiada

$$I_z = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot r^4 = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot 1,8^4 = 8,24 \text{ mm}^4$$

$$M_e = A \cdot y = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot r^2 \cdot y = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot 1,8^2 \cdot \frac{2 \cdot 1,8}{\pi} = 5,832 \text{ mm}^3$$

$$V = F_5 / 2 = 740,18 / 2 = 370 \text{ N}$$

$$\tau (V)_a = \frac{V \cdot M_e}{e \cdot I_z} = \frac{370 \cdot 5,832}{3,6 \cdot 8,24} = 72,74 \text{ MPa}$$

$$\sigma' = \sqrt{\sigma^2 + 3 \cdot \tau^2} = \sqrt{3 \cdot 72,74^2} = 126 \text{ MPa}$$

Com que el passador en aquest sentit no està imprès en la direcció longitudinal de les fibres, per a fer la comprovació s'agafa un valor $Sy = 37 \text{ MPa}$.

$$n = \frac{Sy}{\sigma'} = \frac{37}{126} = 0,29$$

Com que no compleix i trencaria, es repeteix el procés agafant les càrregues corresponents a la consideració de $2,5 \text{ kg / dit} \rightarrow V = 81,86 \text{ N}$

$$\tau (V)_a = \frac{V \cdot Me}{e \cdot Iz} = \frac{81,86 \cdot 5,832}{3,6 \cdot 8,24} = 16,1 \text{ MPa}$$

$$\sigma' = \sqrt{\sigma^2 + 3 \cdot \tau^2} = \sqrt{3 \cdot 16,1^2} = 27,89 \text{ MPa}$$

$$n = \frac{Sy}{\sigma'} = \frac{37}{27,89} = 1,33$$

B.2.3. Càlcul de tensions peça unió servo - guia

Finalment es comprova la peça d'unió entre la guia i el servomotor.

Segons els càlculs de forces i reaccions realitzats a l'apartat anterior, al passador apareix una reacció $F1 = 125 \text{ N}$, tal i com es mostra a continuació.



Figura 64: Reaccions de la peça

Observant la secció marcada de color blau, s'obtenen les següents càrregues:

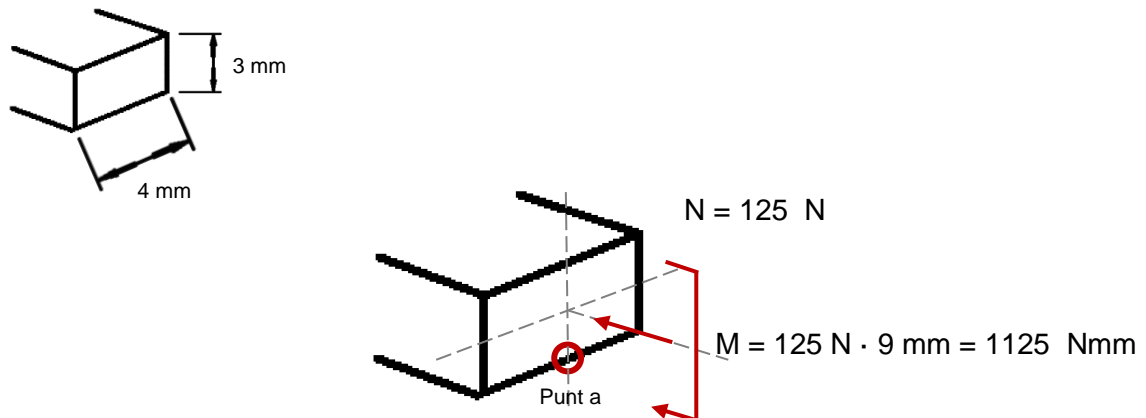


Figura 65: Dimensions i càrregues de la secció estudiada

$$I_z = \frac{b \cdot h^3}{12} = \frac{4 \cdot 3^3}{12} = 9 \text{ mm}^4$$

$$A = 12 \text{ mm}^2$$

$$N = F_1 = 125 \text{ N} ; M = 125 \cdot 9 = 1125 \text{ Nmm}$$

$$\sigma (N+M)_a = \frac{N}{A} + \frac{M \cdot y}{I_z} = \frac{125}{12} + \frac{1125 \cdot 1.5}{9} = 197,92 \text{ MPa}$$

Com que la peça en aquest sentit està impresa en la direcció longitudinal de les fibres, per a fer la comprovació s'agafa un valor $S_y = 55 \text{ MPa}$.

$$n = \frac{S_y}{\sigma'} = \frac{55}{197,92} = 0,28$$

Com que no compleix i trencaria, es repeteix el procés agafant les càrregues corresponents a la consideració de 2,5 kg / dit. $\rightarrow N = 27,6 \text{ N} ; M = 248,4 \text{ Nmm}$

$$\sigma (N+M) = \frac{N}{A} + \frac{M \cdot y}{I_z} = \frac{27,6}{12} + \frac{248,4 \cdot 1.5}{9} = 43,7 \text{ MPa}$$

$$n = \frac{S_y}{\sigma'} = \frac{55}{43,7} = 1,26$$

Després de fer els càlculs de comprovació es pot veure com les peces trencaran si s'agafa de referència la càrrega màxima que pot aguantar el servo-motor.

Per contra partida, realitzant els càlculs per la càrrega màxima imposada als requeriments es pot observar que les peces si que aguanten.

ANNEX C: FABRICACIÓ I MUNTATGE

PROCÉS DE FABRICACIÓ I MUNTATGE

A continuació s'indica pas a pas el procés seguit per dur a terme la fabricació del prototip, partint de l'obtenció de la geometria escanejada fins a l'assemblatge.

Pas 1. Partint del fitxer original d'escaneig 3D, fer les modificacions geomètriques indicades als plànols per tal d'aconseguir el conjunt corresponent amb moviment.



Figura 66: Superfície 3D original



Figura 67: Sòlid 3D modificat

Pas 2. Separar tots els subconjunts per dits, palmell i avantbraç tal i com s'indica als plànols. Cada subconjunt serà imprès de manera conjunta amb totes les peces que conté.

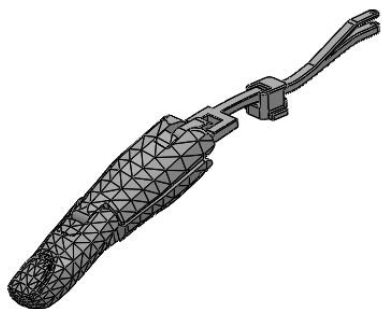


Figura 68: Exemple subconjunt dit

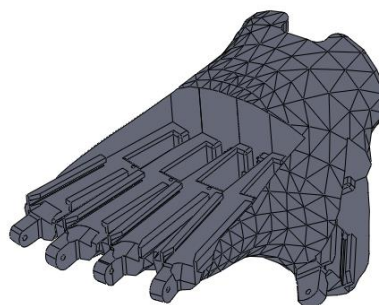


Figura 69: Palmell

Pas 3. Exportar tots els subconjunts a format STL per tal de passar a tractar-los amb un programa específic per a impressió 3D.

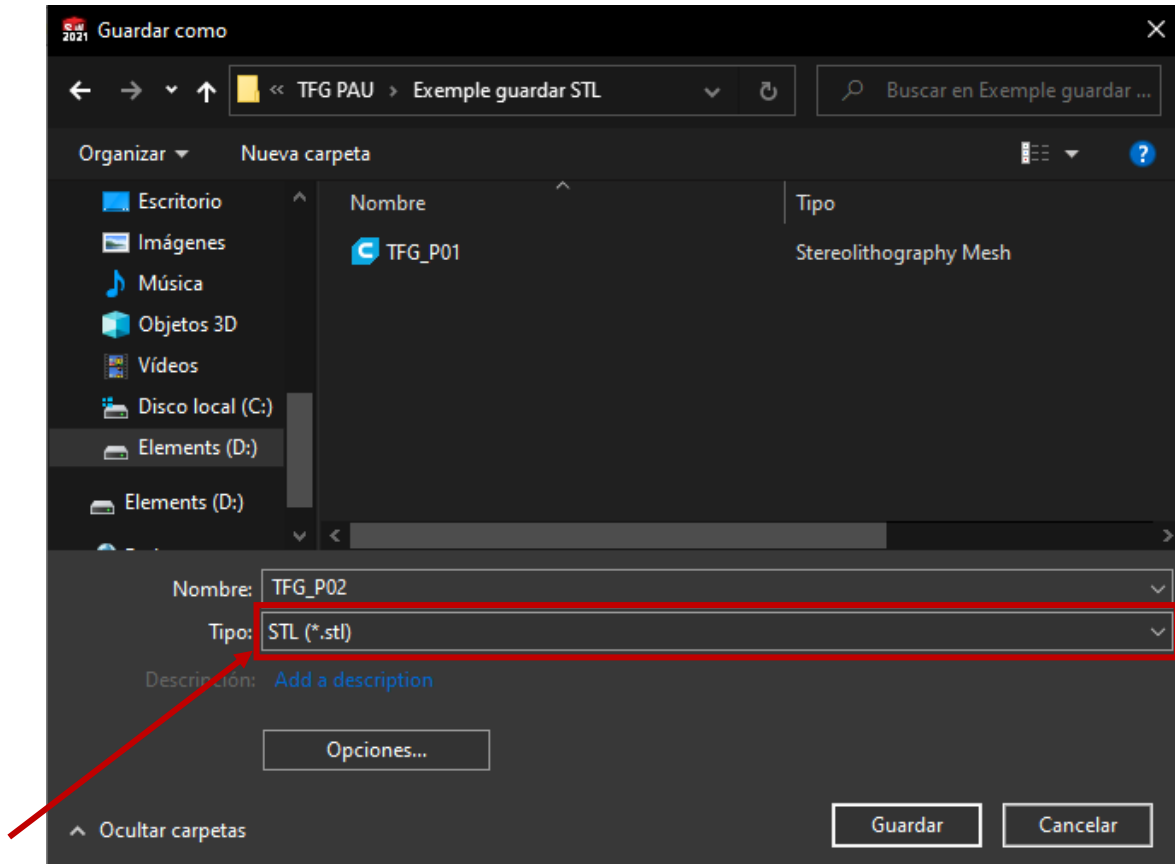
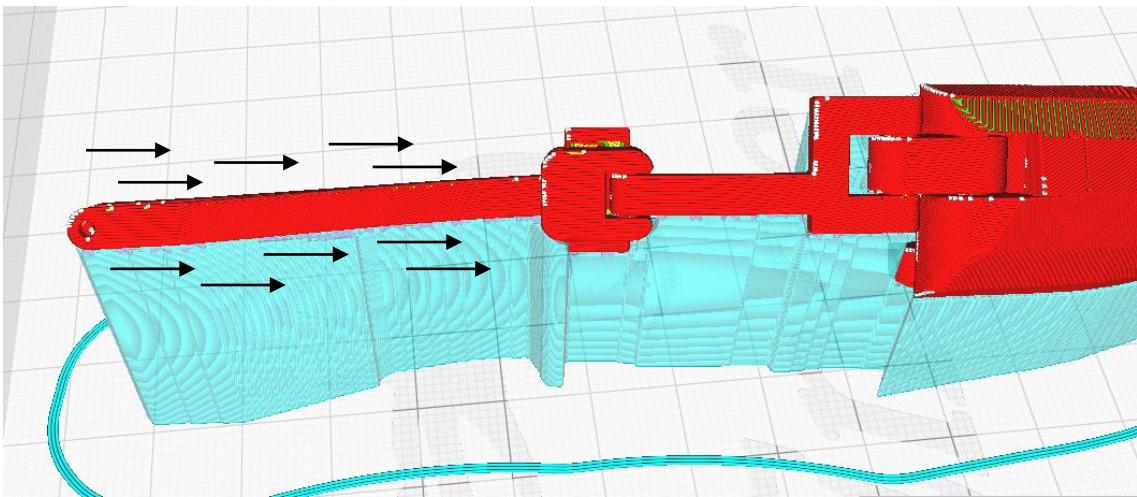
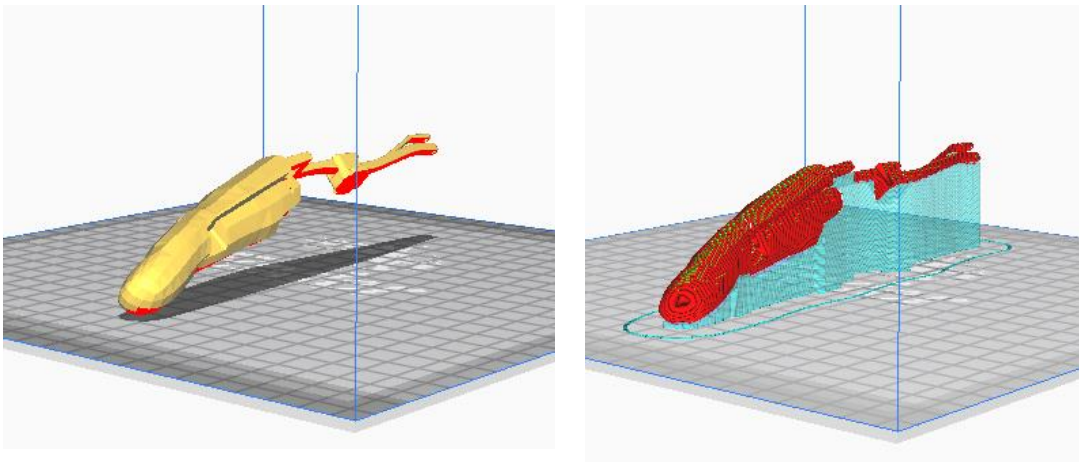


Figura 70: Exportar fitxers a STL

Pas 4. Obrir cadascun dels subconjunts amb el programa d'impressió 3D i col·locar-los de manera que s'obtingui la millor impressió possible. Per tal d'aconseguir-ho caldrà minimitzar el temps d'impressió i el malbaratament de material en forma de suports, ja que es veu repercutit al preu d'impressió. Els suports s'habiliten només pel contacte amb el llit de l'impressora i en cap cas per als forats interns, ja que han sigut dissenyats amb els angles corresponents per tal de poder-se imprimir sense suports.

Un altre aspecte important a tenir en compte és la direcció d'impressió. En el cas de les peces més vulnerables (calculades a l'Annex B: Càlculs mecànics), cal vigilar que la direcció d'impressió faci que les tensions més grans vagin en el sentit longitudinal de les fibres. El sentit d'impressió es mostra a continuació (Figura 73).



Figures 71, 72 i 73: Col·locació de peces al programa d'impressió 3D

Pas 5. Una vegada s'hagi preparat cada subconjunt de manera addient, cal exportar-los a format G-code per poder dur a terme la impressió.

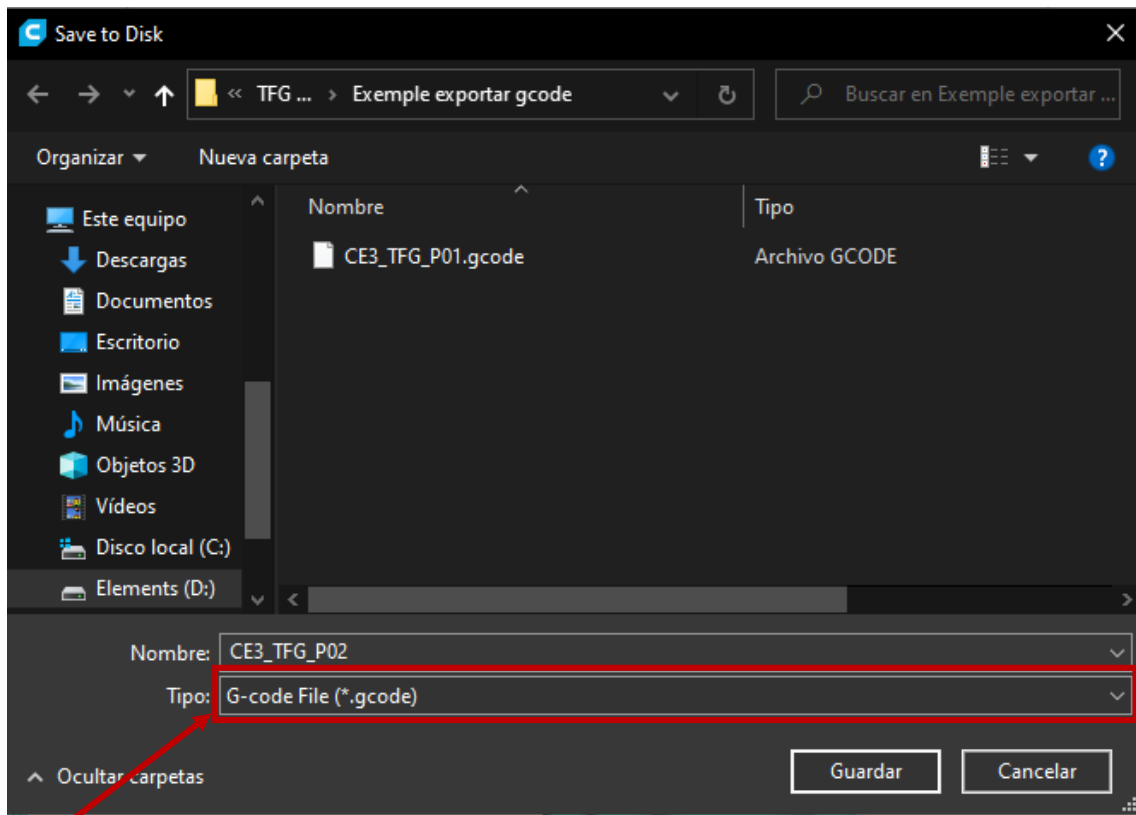


Figura 74: Exportar fitxers a G-code

Pas 6. Es procedeix a imprimir cadascun dels subconjunts corresponents. En el cas que alguna peça o subconjunt no s'imprimeixi de manera correcta repetir el procés, modificant-ne la col·locació del pas 4 si és necessari.



Figura 75: Procés d'impressió 3D

Pas 7. Separar cuidadosament cada subconjunt del suport.

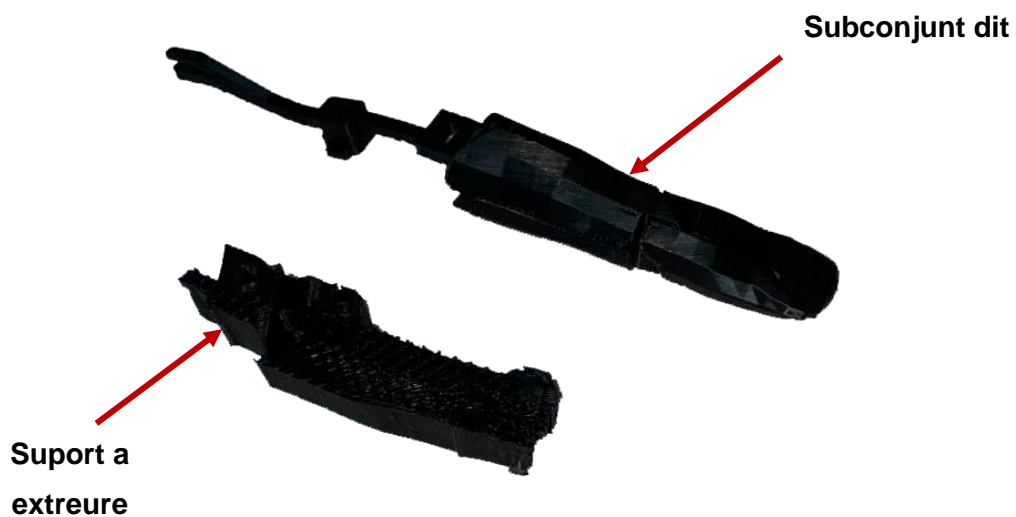


Figura 76: Separació dels subconjunts i els suports

Pas 8. Col·locar l'element elàstic a dins de cada dit.



Figura 77: Col·locació de l'element elàstic

Pas 9. Una vegada imprès el palmell, col·locar cadascun dels servo-motors a la seva ranura tal i com s'indica als plànols. Al fer-ho, passar els cables pels forats habilitats per tal de portar-los cap a l'avantbraç per l'interior del palmell.

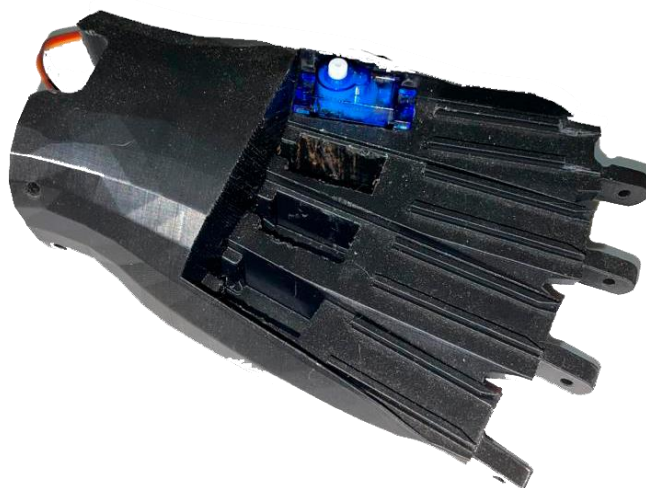


Figura 78: Col·locació dels servos al palmell

Pas 10. Realitzar l'assemblatge de cadascun dels subconjunts a la posició que li pertoca segons s'indica als plànols, connectant els mecanismes d'accionament de cada dit amb els servo-motors instal·lats al pas anterior.



Figura 79: Assemblar totes les peces dels dits

Pas 11. Unir el palmell amb l'avantbraç passant tots els cables dels servo-motors per la ranura corresponent.



Figura 80: Unir el palmell i l'avantbraç

Pas 12. Muntar tots els components electrònics restants (Arduino Nano, PCA9685, Pila...) a la seva posició de l'avantbraç segons s'indica als plànols.

Connectar tot el cablejat de cada element electrònic segons s'indica al diagrama de connexions de l'Annex A.3.1. *Diagrama de connexions.*



Figura 81: Elements electrònics a l'avantbraç

Pas 13. Col·locar el sensor MyoWare de manera correcta al braç, connectar l'electrònica a les fonts d'alimentació corresponents i comprovar que tot funcioni de manera correcta.

En cas contrari, comprovar que s'ha seguit cadascun dels passos per trobar qualsevol possible error en el procés realitzat.

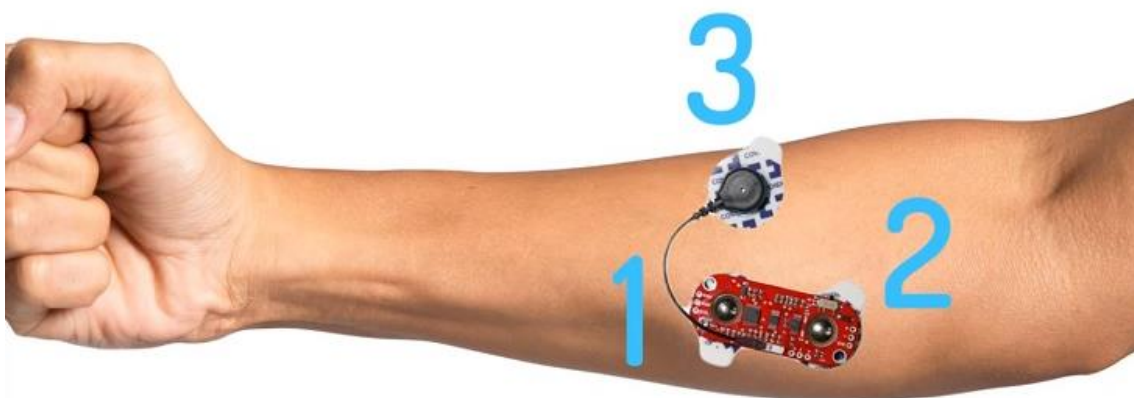


Figura 82: Col·locació del sensor muscular

ANNEX D: MANUAL D'USUARI I MANTENIMENT

D.1. Descripció general

El prototip dissenyat en aquest projecte té com a finalitat estudiar la viabilitat de fabricació i funcionament d'una pròtesis de mà funcional mitjançant la impressió 3D.

El conjunt està dissenyat per poder ser accionat amb un sensor que detecta els impulsos nerviosos generats pel moviment dels músculs per donar una millor experiència d'usuari.

El mecanisme dissenyat des de la recepció de la senyal muscular fins al moviment dels dits consta de tres parts: l'electrònica per llegir i processar la senyal, el sistema de transmissió del moviment des dels servo motors fins als dits, i finalment el mecanisme de gir dels dits.

Pel mecanisme d'acció, la funció, les indicacions i les precaucions d'ús s'han seguit els aspectes descriptius dictats pel *Ministerio de Sanidad y Consumo* al document *Guía Descriptiva de Ortopròtesis Tomo III*.

D.2. Manipulació i funcionament del prototip

A grans trets, el mecanisme s'acciona segons les necessitats de l'usuari.

En el moment que l'usuari es disposa a tancar la mà, només ha d'accionar el mecanisme seguint els següents passos:

1. A través del sensor col·locat de manera correcta a l'avantbraç, el controlador rep la senyal del múscul que es genera en fer força de la mateixa manera que es faria per accionar la mà real.
2. En arribar els impulsos a la placa, aquesta acciona els motors i així tot el mecanisme dels dits, la qual cosa farà que els dits de la mà es tanquin. Sempre i quant no es deixi de fer força i no es produeixi cap falla electrònica els dits romandran en aquesta posició.
3. Finalment, quan l'usuari vulgui tornar a la posició inicial amb la mà oberta, només ha de deixar de fer força per tal de deixar de generar inputs cap a la placa.

D.3. Precaucions

Tot i que el funcionament del prototip no té cap punt crític a l'hora de ser fabricat, muntat o utilitzat, cal tenir en compte certes precaucions per tal que el procés finalitzi en la seva totalitat de manera correcta i satisfactòria.

Per això, cal tenir en compte els següents punts:

- A l'hora de fabricar, les condicions de fabricació imposades en el setup de la impressora han de ser les adequades al material utilitzat. En cas contrari, les

peces no s'imprimeixen de manera correcta la qual cosa pot provocar un mal funcionament del mecanisme o falles d'altres tipus.

- A l'hora de muntar, cal comprovar que l'element elàstic quedi col·locat de manera correcta per tal d'assegurar-ne el bon funcionament.
- El sensor del braç s'ha de situar de manera correcta per assegurar la bona lectura de les senyals dels músculs. En cas contrari es podria obtenir un mal o un nul funcionament.
- S'ha d'evitar el contacte de la pròtesis amb líquids, ambients amb pols o amb molta humitat per evitar que aquesta es deteriori.

D.4. Manteniment

Tot i que el manteniment del mecanisme del prototip és mínim, si es vol obtenir un temps de vida màxim cal fer revisions acurades de les peces per tal de detectar possibles anomalies.

Per altra banda, cal repassar que les unions no tinguin un joc excessiu, més enllà del que es considera acceptable de fabricació. També és necessari comprovar els elements elàstics de retorn per evitar cap ruptura o mal funcionament.

Així mateix, s'ha de fer una revisió periòdica al cablejat de tota l'electrònica per evitar funcionaments indeguts per culpa de qualsevol element mal connectat o en mal estat. El no compliment d'aquest punt podria esdevenir en el mal funcionament o inclús en danys en el sistema electrònic.