

IMPLEMENTACIÓ I CALIBRATGE DE PRÒTESIS ROBÒTIQUES I BIÒNIQUES DE DIT



TREBALL DE RECERCA

Laia Marcos Cañal

Batxillerat 201

Tutora: Maite García

INS Puig Castellar

Gener 2020

*El que avui ha començat com a novel·la de ciència-ficció, demà serà terminat
com a reportatge.*

Arthur C. Clarke

ÍNDEX

1. INTRODUCCIÓ	3
2. HIPÒTESIS I OBJECTIUS	5
3. PART TEÒRICA.....	7
3.1. MARC TEÒRIC	7
3.1.1. ELS SISTEMES DE COORDINACIÓ	7
3.1.2. EL SISTEMA NERVIÓS	8
3.1.3. L'APARELL LOCOMOTOR.....	13
3.1.2. EL SISTEMA MUSCULAR	13
3.2. MARC TEÒRIC EXPERIMENTAL	20
3.2.1 IMPRESSIÓ 3D I IMPLEMENTACIÓ D'ACTUADORS BIOLÒGICS BASATS EN TEIXIT DE MÚSCUL ESQUELÈTIC	20
4. PART PRÀCTICA.....	38
4.1. DISSENY, IMPRESSIÓ I IMPLEMENTACIÓ DEL MODEL DE DIT ROBÒTIC.....	38
4.2. DISSENY, IMPRESSIÓ, ENTRENAMENT I ESTIMULACIÓ DEL MODEL DE DIT BIÒNIC.....	52
4.3. CALIBRATGE DELS MODELS AMB UN FLEX SENSOR CONTROLAT PER ARDUINO	70
5. CONCLUSIONS	83
6. AGRAÏMENTS.....	87
7. BIBLIOGRAFIA I WEBGRAFIA	88
8. APÈNDIXS	100
8.1. GLOSSARI D'ACRÒNIMS	100
8.2. DOCUMENT INICIAL DEL PROJECTE BATX2LAB.....	101
8.3. REGISTRE DE VISITES BATX2LAB.....	102

1. INTRODUCCIÓ

El tema que tracto en aquest treball, com el seu títol indica, és la creació, implementació i valoració de dos tipus diferents de pròtesis de dit; una robòtica, i una altra biònica (és a dir, amb elements artificials i biològics). El principal objectiu que em vaig plantejar quan el vaig començar a fer va ser la de l'estudi dels avantatges i desavantatges dels dos tipus de pròtesis, i escollir el que, a dia d'avui, seria el més indicat per utilitzar-lo, per exemple, amb finalitats mèdiques.

La realització d'aquest treball ha suposat una recerca bibliogràfica centrada en el sistema nerviós i muscular, per explicar com movem les extremitats (allò que les pròtesis han de substituir) i en la impressió 3D, la robòtica tova i els actuadors biològics, que són els mitjans pels quals vaig crear les pròtesis ja esmentades.

La part pràctica del treball va consistir en la construcció dels dos tipus de dispositius. Per fer-la vaig haver de familiaritzar-me amb programes de disseny, com l'AutoCAD, i amb diferents tipus d'impressores 3D. També vaig aprendre protocols de laboratori, així com observar el procés que pateixen les cèl·lules de les pròtesis biòniques abans de ser implementades.

La idea que vaig tenir en un principi pel meu treball de recerca era ben diferent: pretenia estudiar i, a ser possible, construir una interfície cervell-ordinador, és a dir, un sistema mitjançant el qual pot captar-se activitat cerebral i traduir-la a comandaments de control de dispositius artificials com, per exemple, pròtesis. Tanmateix, aconsellada per la meva tutora de l'institut, Maite García, vaig sol·licitar una plaça al programa Batx2Lab, que ofereix als estudiants de batxillerat la possibilitat de dur a terme el treball de recerca en laboratoris i amb un investigador com a tutor, i vaig ser seleccionada.

La meva tutora del programa, Maria Guix, em va dir que no era possible realitzar la part pràctica que jo havia pensat en un principi, però que podíem fer una pròtesi de dit impresa amb materials tous que es pogués per un o diversos anells de cèl·lules (pròtesi biònica). Jo ja havia començat a elaborar una pròtesi robòtica de mà, destinada en un principi a ser moguda per una interfície cervell ordinador, i vaig decidir convertir-la en una pròtesi de dit per poder efectuar una comparativa.

Un dels principals beneficis que he obtingut amb la realització d'aquest treball ha estat la gran quantitat de coneixements interdisciplinaris que he adquirit. Des de nocions de robòtica fins a l'estudi de l'estructura de cèl·lules musculars, he tractat amb codi informàtic, programes de disseny, materials químics, impressores 3D, materials biològics i circuits. Això m'ha permès no només ampliar les meves nocions en totes aquestes àrees, sinó també valorar la importància del treball conjunt de les diferents disciplines científiques per arribar a conclusions i obtenir resultats, el que ha estat de gran valor per a mi.

2. HIPÒTESIS I OBJECTIUS

HIPÒTESIS

Per al meu treball he elaborat diferents hipòtesis relacionades tant amb la implementació de les pròtesis com el seu calibratge.

- IMPLEMENTACIÓ DE LES PRÒTESIS

La pròtesi robòtica és més efectiva (és a dir, capaç de fer més força i amb més mobilitat) que la biònica.

- CALIBRATGE DE LA PRÒTESI ROBÒTICA

Un dit real és capaç de fer més força que la pròtesi robòtica.

- CALIBRATGE DE LES PRÒTESIS BIÒNIQUES

Els models impresos amb el material més flexible (PDMS) són més efectius (proporcionen un millor medi de creixement a les cèl·lules que mouran les pròtesis biòniques i es dobleguen amb més facilitat).

Els models amb menys separació entre els suports (al voltant dels quals se situaran anells de cèl·lules que es contrauran) es mouen amb més facilitat.

OBJECTIUS

Els principals objectius que em vaig plantejar amb aquest treball van ser:

- Construir, implementar i calibrar una pròtesi robòtica de dit.
- Construir, implementar i calibrar una pròtesi biònica de dit.
- Comparar ambdós models (examinar-ne avantatges, desavantatges i quin és més adient com a pròtesi).

Els objectius implícits del treball:

- Estudiar la impressió 3D (funcionament, tipus d'impressió 3D, materials utilitzables, aplicacions, beneficis i desavantatges) i manipular impressores 3D per elaborar les pròtesis.
- Aprendre la preparació dels materials d'impressió.
- Aprendre les extensions informàtiques adients per a imprimir en 3D.

- Editar els paràmetres d'impressió amb els programes slic3r i CURA.
- Familiaritzar-se amb l'AutoCAD com a programa de disseny i utilitzar-lo pel disseny dels diversos models.
- Implementar un flex sensor per calibrar els models (estudiar el funcionament, elaborar el circuit i programar-ho).
- Elaborar un circuit i un programa per posar en funcionament la pròtesi robòtica.
- Estudiar els mecanismes bàsics del sistema nerviós i muscular.
- Estudiar la robòtica tova.
- Estudiar les màquines biològiques.
- Aprendre les normes de seguretat i els material bàsics de laboratori.
- Aprendre els protocols de creixement, diferenciació i estimulació dels anells de cèl·lules.
- Observar el traspàs dels anells de cèl·lules als models de dit.
- Observar l'estructura microscòpica dels anells de cèl·lules.

3. PART TEÒRICA

La part teòrica del treball està dividida en dues categories:

D'una banda, el marc teòric del tema, en el qual tractaré conceptes referits al sistema nerviós i muscular, necessaris per entendre la dinàmica del moviment corporal i la contracció muscular. Aquestes nocions són importants, sobretot, per entendre què són les pròtesis (efectors) i com és el nostre cos capaç de moure les extremitats que aquests dispositius pretenen substituir. El marc teòric també està enfocat a aclarir a quins estímuls haurien de respondre aquestes pròtesis i quin tipus de moviment haurien de ser capaces de fer.

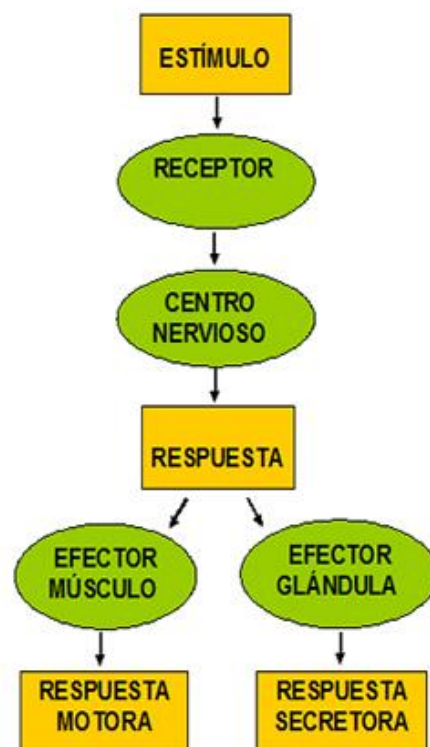
D'altra banda, el marc teòric experimental, en el qual explicaré diferents investigacions que s'han dut a terme en el camp de la robòtica tova, la impressió 3D i els actuadors biològics.

3.1. MARC TEÒRIC

3.1.1. ELS SISTEMES DE COORDINACIÓ

Com a éssers vius, els humans duem a terme les anomenades funcions vitals; nutrició, relació i reproducció. La funció de relació és aquella que ens permet rebre informació (és a dir, estímuls o canvis capaços de provocar una resposta en l'organisme, que poden ser tant externs com interns) i elaborar-ne respostes en conseqüència. En aquest procés intervenen els elements següents:

- El receptor: és l'estructura que rep els estímuls i els transmet als centres nerviosos.
- El centre nerviós: estructura capaç de rebre la informació percebuda, processar-la, elaborar respostes i transmetre-les als òrgans efectors.



Imatge 1: Processament d'estímuls i elaboració de respostes. Font:

<http://biologiaterceroiem.blogspot.com/2012/03/el-modelo-de-estimulo-procesamiento.html>

- L'efector: conjunt d'òrgans (que poden ser músculs o glàndules) que efectuen les respostes (tant motores com secretores). En el meu treball em centraré en les respostes motores.

Per tal de realitzar aquesta funció, disposem d'un sistema de coordinació que consta de dos sistemes: el sistema endocrí i el sistema nerviós, del qual parlaré a continuació.

3.1.2. EL SISTEMA NERVIÓS

El sistema nerviós és el conjunt d'òrgans i estructures encarregat de mantenir l'homeòstasi. Dit d'una altra manera, conté mecanismes que mantenen constant la composició i propietats del medi intern d'un organisme per mitjà de la transmissió d'informació en forma de senyals elèctrics.

Per tant, podria dir-se que el sistema nerviós relaciona l'organisme amb el seu entorn, tant coordinant la resposta a certs estímuls exteriors com actuant de forma espontània sobre aquest.

Convé destacar que l'altre sistema de coordinació, el sistema endocrí, es diferencia principalment del nerviós pel tipus de respostes que elabora. Mentre que les del sistema nerviós són ràpides i breus, les de l'endocrí, que actua mitjançant hormones, són lentes i duradores.

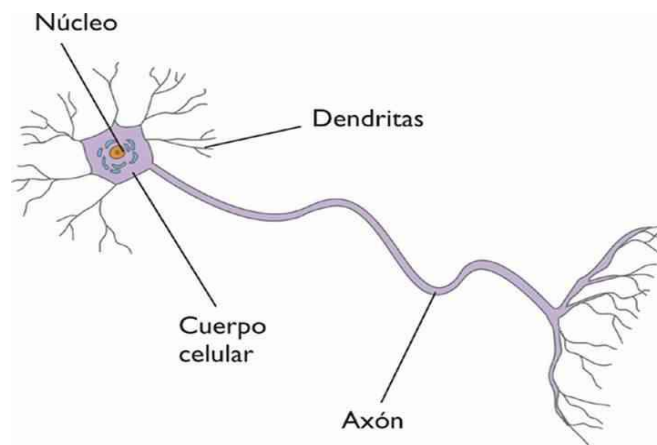
• TIPUS DE CÈL·LULES DEL SISTEMA NERVIÓS

El sistema nerviós està compost per dos tipus de cèl·lules especialitzades. D'una banda, les neurones i d'altra, les cèl·lules de la glia.

Les neurones o cèl·lules nervioses, unitats funcionals bàsiques del sistema nerviós, reben i transmeten senyals, i ho fan interactuant amb les cèl·lules de la glia. Totes les neurones tenen una estructura determinada, que consta de:

- Cos cel·lular o soma: on es troba el nucli (estructura que conté el material genètic en les cèl·lules eucariotes) i la major part dels orgànuls de la cèl·lula.
- Dendrites: prolongacions curtes i molt ramificades del cos cel·lular. Reben els senyals emesos pels axons i els transformen, o no, en impulsos nerviosos, que són transportats al cos cel·lular.

- Axó: prolongació llarga que surt del cos cel·lular i que pot ramificar-se en el seu extrem terminal. La seva funció principal és la de conduir l'impuls nerviós que rep des del cos cel·lular. En alguns casos estan recoberts per una substància anomenada mielina, que aïlla l'axó i facilita la transmissió de l'impuls. Els axons presenten ramificacions als seus extrems, denominades terminals axòniques. Aquestes tenen petites vesícules que contenen els neurotransmissors (substàncies químiques generades pel cos que tenen la funció de transmetre senyals d'una neurona a una altra).



Imatge 2: Parts de la neurona. Font:

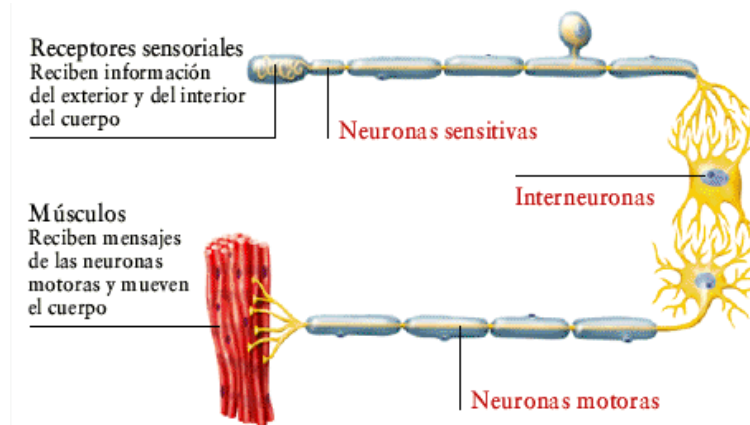
https://www.partesdel.com/partes_de_la_neurona.html

Les neurones estan separades entre elles per un espai anomenat esquadra sinàptica. La regió que comunica dues neurones és la sinapsi, que sol establir-se entre les branques terminals de l'axó d'una neurona i les dendrites o cos cel·lular d'una altra.

Els diferents tipus de neurones segons la seva funció són:

- Neurones sensibles o aferents: condueixen la informació dels receptors al sistema nerviós central. Les seves terminacions dendrítiques estan generalment associades a receptors especialitzats que s'activen davant canvis en les immediacions.
- Neurones motores o eferents: envien la informació als òrgans efectors. Provoquen la contracció de músculs o secreció de glàndules. Els seus somes estan situats al sistema nerviós central.

- Neurones d'associació o interneurons: connecten les neurones sensibles i les motores.

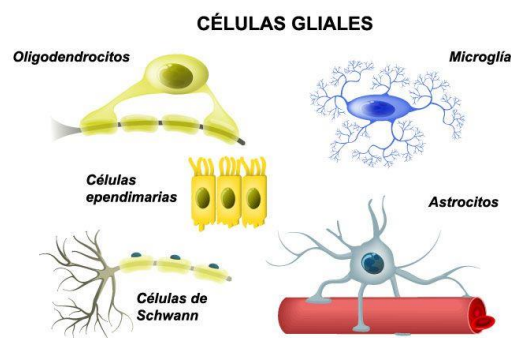


Imatge 3: Tipus de neurones. Font: <https://conceptodefinicion.de/neurona-asociativa-o-interneurona/>

Les neurones tenen dues propietats principals: l'excitabilitat, que és la capacitat de resposta a estímuls físics i químics generant un impuls i la conductivitat, la capacitat de transmetre aquest impuls.

L'altre tipus cel·lular del sistema nerviós són les cèl·lules de la glia, de les quals en tenim el doble que neurones. Intercalades entre les neurones, els donen suport, aïllament, protecció i alimentació i constitueixen el revestiment del sistema nerviós central.

Hi ha diversos tipus de cèl·lules de la glia. Al sistema nerviós central es troben els astròcits, les cèl·lules de la micròglia, les ependimàries i els oligodendrocits, i al sistema nerviós perifèric hi ha les cèl·lules satèl·lit i les cèl·lules de Schwann.



Imatge 4: Tipus de cèl·lules de la glia. Font: <https://www.psycoactiva.com/blog/las-celulas-gliales-tipos-funciones/>

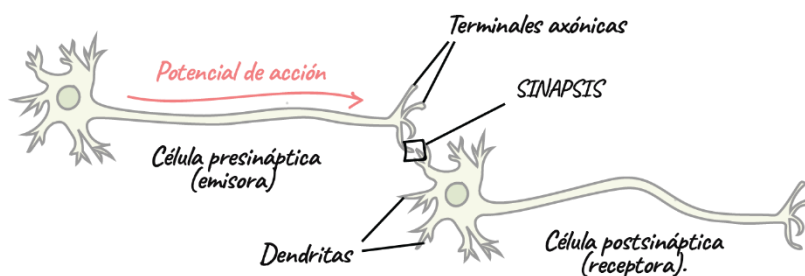
- L'IMPULS NERVIÓS

La transmissió de senyals en el sistema nerviós es fa a través de les neurones en forma d'impuls nerviós, que és un impuls elèctric.

Quan una neurona està en repòs, hi ha una diferència de potencial entre l'interior i exterior de la cèl·lula. A la part interna de la neurona hi ha menys ions positius, la majoria dels quals són de potassi (K^+), que a la part externa, on hi ha ions de sodi (Na^+). Per tant, la part interna està carregada negativament i l'externa positivament. Per això es diu que la neurona està polaritzada. La diferència de potencial entre l'interior i l'exterior s'anomena potencial de la membrana en repòs. Aquesta diferència de potencial es manté per un mecanisme de transport de substàncies a través de la membrana cel·lular denominat bomba de sodi-potassi. Aquest complex proteic, gràcies a una despesa energètica, permet l'entrada de dos K^+ per cada tres Na^+ que surten, pel que la càrrega exterior serà positiva.

Normalment, els ions de sodi no poden entrar en grans quantitats a la part interna de la cèl·lula a causa de la membrana que la recobreix. Tanmateix, quan les dendrites reben un estímul concret, uns canals situats a la membrana s'obren i permeten el pas dels ions de sodi a l'interior de la neurona.

Això provoca que la part interna es carregui positivament i l'externa negativament, fet anomenat despolarització. Si l'entrada d'ions de sodi és suficientment gran, afecta als canals de sodi contigus, que s'obren també, el que fa que la despolarització s'estengui per l'axó de la neurona i creï un senyal al que se l'anomena potencial d'acció.

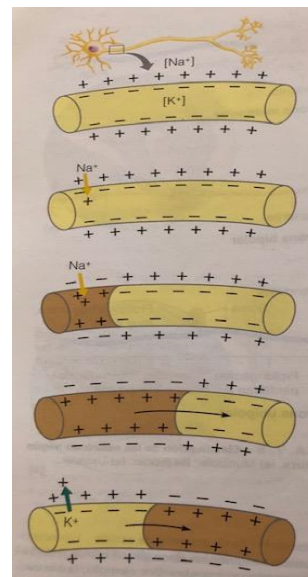


Imatge 5: Propagació del potencial d'acció. Font:

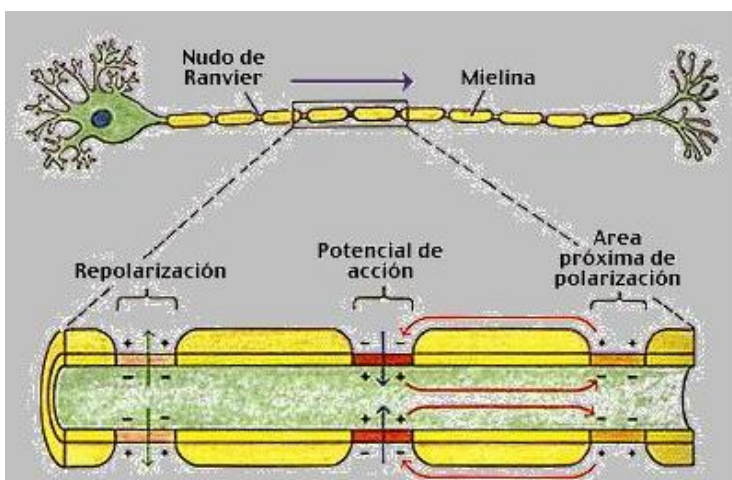
<https://es.khanacademy.org/science/biology/human-biology/neuron-nervous-system/a/the-synapse>

Quan ha passat el potencial d'acció, els canals de sodi es tornen a tancar i s'obren els de potassi. Els ions de potassi surten de l'interior, repolaritzant la neurona, és a dir, tornant l'interior negatiu i l'exterior positiu de nou.

En el cas que els axons estiguin recoberts per mielina, l'impuls es propaga més ràpidament, ja que no pot transmetre's en les zones on està l'aïllament de mielina, el que fa que salti per les zones on no n'hi ha. Aquest tipus de propagació s'anomena conducció saltatòria.



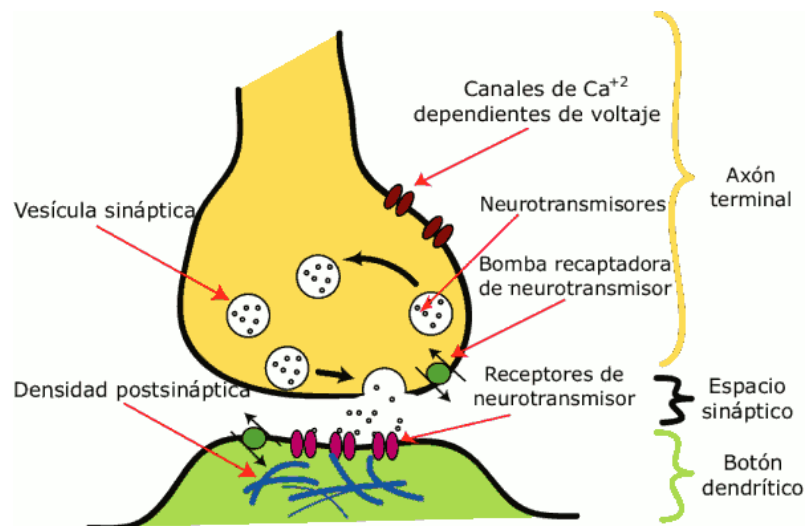
Imatge 6: Despolarització i repolarització. Font: Marieb, E.N. (2008). *Anatomía y Fisiología humana*. Espanya: Pearson.



Imatge 7: Conducció saltatòria. Font: <https://www.monografias.com/trabajos41/potencial-membrana/potencial-membrana2.shtml>

Els impulsos nerviosos són d'aproximadament 0,1 volts, duren entre una o dues mil·lèsimes de segon i viatgen per l'axó a velocitats de fins a 480 km/h.

Quan el potencial d'acció arriba a la sinapsi, desencadena l'alliberament d'unes substàncies químiques anomenades neurotransmissors. Els neurotransmissors s'uneixen a la membrana de la dendrita o cos cel·lular següent i s'inicia un nou impuls nerviós. Un cop han acomplert la seva funció, els productes químics tornen a la terminal axònica o són degradats per enzims.



Imatge 8: Sinapsi. Font: <https://es.wikipedia.org/wiki/Sinapsis>

La transmissió de l'impuls nerviós és, per tant, un procés electroquímic, ja que la propagació del potencial d'acció per la neurona és un procés elèctric, però la transmissió de l'impuls d'una neurona a una altra es fa per mitjà de substàncies químiques.

3.1.3. L'APARELL LOCOMOTOR

L'aparell locomotor és l'encarregat del moviment del nostre cos, ja sigui del desplaçament o d'unes parts del cos respecte d'altres. Està format pel sistema esquelètic (compost pels ossos), el sistema articular (les articulacions; que són els punts d'unió dels diferents ossos) i el sistema muscular, que explicaré amb més detall al següent apartat.

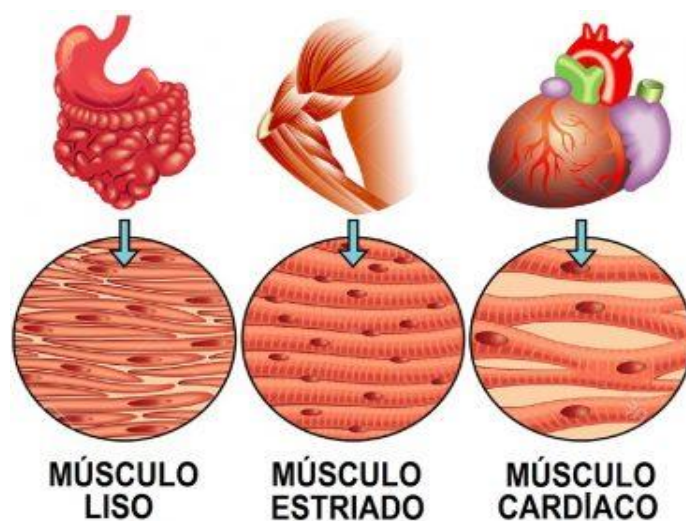
3.1.2. EL SISTEMA MUSCULAR

El sistema muscular està format per músculs, teixits amb la capacitat de contraure's i relaxar-se, que estan fixats als ossos i articulacions i fan possible el moviment corporal. En resum, les funcions del sistema muscular són permetre el moviment del cos i les seves parts, mantenir postures corporals, generar calor i estabilitzar les articulacions.

- TIPUS DE MÚSCUL

Els músculs, classificats histològicament (segons la seva composició, localització i estructura cel·lular), es divideixen en tres grups:

- Múscul esquelètic o estriat: aquest tipus de múscul s'adhereix als ossos i, en el cas d'alguns músculs facials, a la pell. És l'encarregat de la contracció voluntària (raó per la qual també se'ls anomena músculs voluntaris), controlada pel sistema nerviós. Tanmateix, també responen a estímuls involuntaris, com és el cas dels moviments reflexos. De la mateixa manera, la seva contracció, arrítmica, pot ser tant lenta com ràpida. El múscul esquelètic pot contraure's amb gran força, però com no pot mantenir molt de temps aquesta contracció, necessita períodes de descans. Com el múscul esquelètic està unit als ossos o la pell, la seva contracció provoca el moviment d'aquests òrgans també.
- Múscul llis o no estriat: com el seu nom indica, aquest tipus de múscul manca de les característiques estriacions del múscul esquelètic. El múscul llis es troba en les parets dels òrgans viscerals, com l'estómac. La seva funció és la de l'impuls de substàncies a través de diferents vies del cos. Té aquesta capacitat pel fet que, al contraure's, crea cavitats menors o majors, el que afavoreix o dificulta aquest pas de substàncies. La velocitat de contracció del múscul llis és lenta.
- Múscul cardíac: l'últim tipus de múscul es troba únicament al cor, i forma gran part de les parets de l'òrgan. Aquest tipus de múscul conté estriacions i les seves contraccions són involuntàries. El múscul cardíac està situat en forma d'espiral al cor, el que afavoreix la coordinació de les contraccions.



Imatge 9: Tipus de múscul. Font: <https://mundoentrenamiento.com/tipos-de-musculos-y-su-funcion/>

Convé destacar que, quan es tracta el sistema muscular, no se solen incloure ni el múscul llis ni l'esquelètic.

- TIPUS DE CÈL·LULES MUSCULARS

Hi ha tres tipus principals de cèl·lules musculars, també anomenades miòcits o fibres musculars.

Per un costat, estan les fibres musculars que constitueixen el múscul esquelètic. Per un altre, les que formen el llis. Finalment, les cèl·lules musculars cardíques componen el múscul cardíac. Totes aquestes cèl·lules tenen en comú les capacitats d'excitabilitat, que els permet rebre i respondre a estímuls, extensibilitat, capacitat d'estirar-se, i contractilitat, ja que són capaces d'escurçar-se. Com en la part pràctica del meu treball només empraré múscul esquelètic, em centraré més en les fibres musculars esquelètiques.

- Fibres musculars esquelètiques: són cèl·lules multinucleades, és a dir, que posseeixen més d'un nucli al seu citoplasma, i són les fibres musculars més grans. Tenen forma cilíndrica i allargada, i posseeixen la peculiaritat de tenir estriacions molt visibles. Tot i que, com gran part de les cèl·lules, les fibres musculars esquelètiques són toves, permeten al múscul esquelètic fer una gran força perquè s'uneixen al denominat "teixit connectiu", encarregat de servir com a suport i connectar entre si diverses parts del cos. En aquest tipus de fibres, el teixit connectiu està format per tres components principals, anomenats epimisi, perimisi i endomisi, que se situen tal i com es mostra a la imatge del costat. El teixit connectiu es troba adherit als tendons.



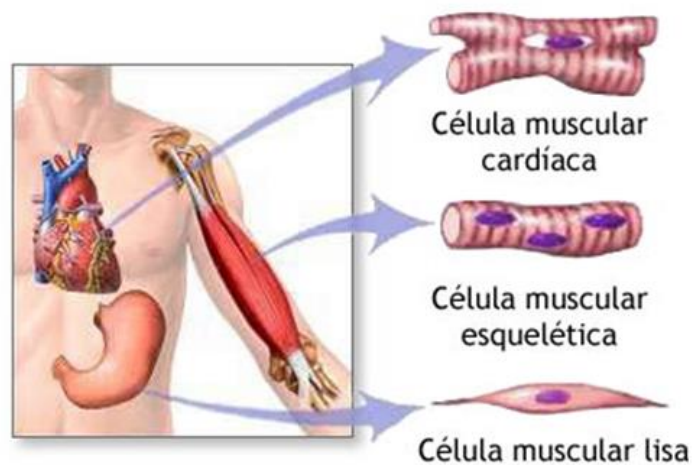
Imatge 10: Teixit connectiu a les fibres musculars esquelètiques.

Font: Marieb, E.N. (2008).

Anatomía y Fisiología humana.

Espanya: Pearson.

- Fibres musculars llises: no presenten estriacions.
- Cèl·lules musculars cardíques: són allargades, curtes i ramificades.

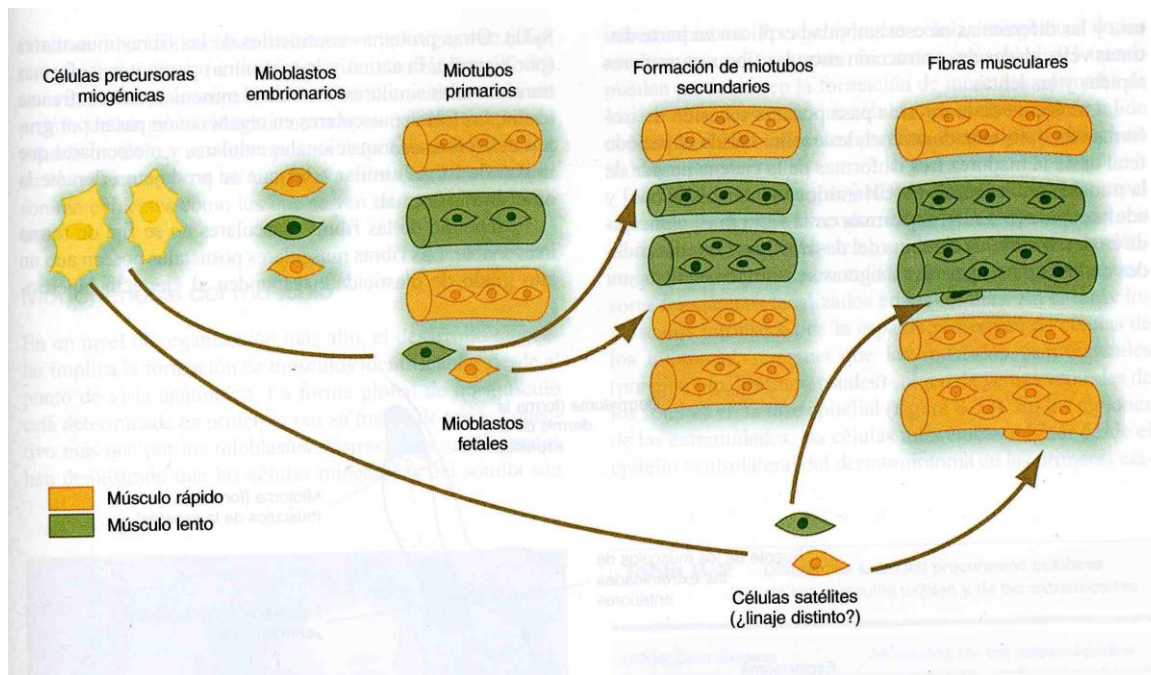


Imatge 11: Tipus de cèl·lules musculars. Font:

<https://www.pinterest.es/pin/408560997425169553/>

• DIFERENCIACIÓ DE LES CÈL·LULES MUSCULARS

La diferenciació cel·lular és el procés mitjançant el qual una cèl·lula adquireix característiques morfològiques i funcionals especialitzades. En el cas de les cèl·lules musculars, el procés pel qual les cèl·lules no diferenciades s'especialitzen en miòcits s'anomena miogènesi, que té lloc durant el desenvolupament embrionari als somites. Els somites són estructures que es formen a l'embrió, encarregades de l'origen de diversos tipus cel·lulars, tals com les cèl·lules de la columna vertebral, les de la dermis o les del múscul esquelètic. Després que les cèl·lules originades als somites migrin cap a la seva localització adient (allà on s'haurà de desenvolupar el teixit), comencen a proliferar i a diferenciar-se en els mioblasts, precursors de les cèl·lules musculars. Aquests mioblasts es fusionen i formen els miotubs primaris i secundaris. Els miotubs van adquirint la seva forma allargada característica i la seva contractilitat i esdevenen fibres musculars. Aquestes fibres musculars s'acaben de formar per la incorporació de miofibril·les i altres elements i, un cop es connecten al nervi, es denominen miòcits i ja són pròpiament cèl·lules musculars. Els miòcits joves continuen creixent fins que esdevenen miòcits adults.



Imatge 12: Diferenciació de mioblasts en fibres musculars. Font:

<https://www.uaz.edu.mx/histo/MorfoEmbrio/Carlson/Cap08/Cap08.htm>

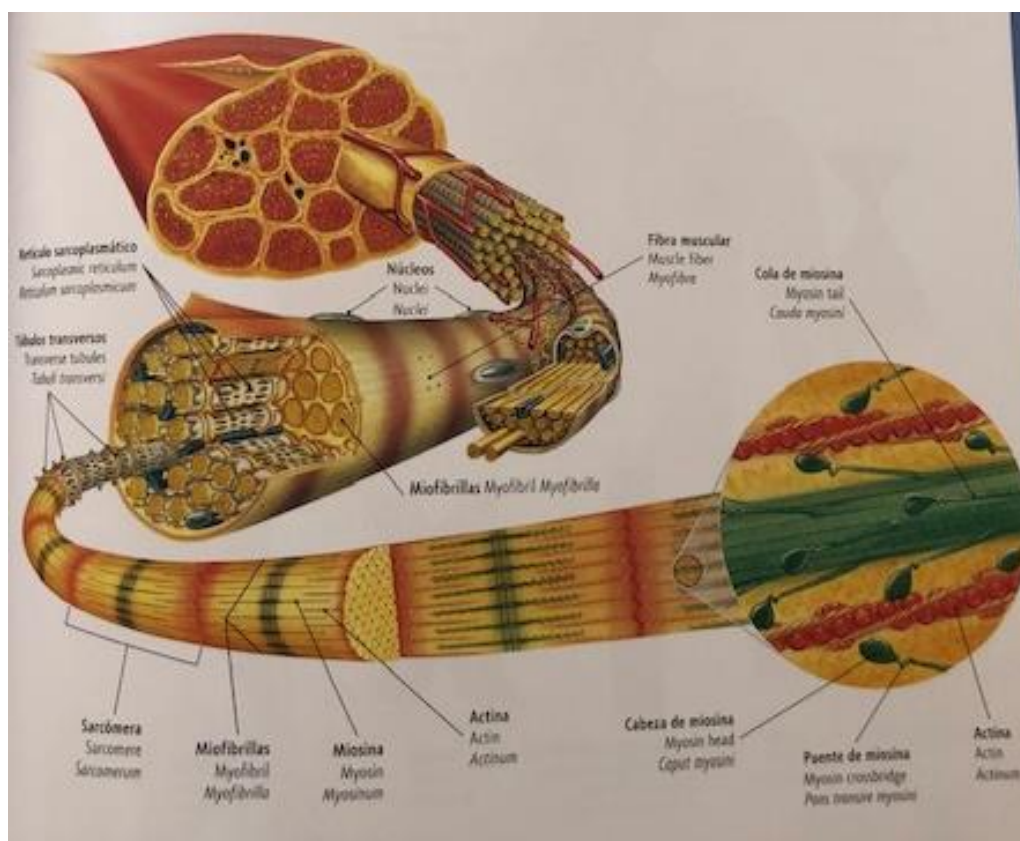
- ANATOMIA MICROSCÒPICA DEL MÚSCUL ESQUELÈTIC

A continuació em centraré en l'estructura microscòpica d'un dels tres tipus de múscul; el múscul esquelètic, per la seva rellevància en l'apartat experimental del meu treball i perquè és el que forma pròpiament el sistema muscular. Com ja he mencionat a l'apartat de les fibres musculars esquelètiques (el tipus de cèl·lula del múscul esquelètic), aquestes són multinucleades. Aquesta característica es deu a que aquestes cèl·lules pateixen repetides mitosis (divisions del nucli) sense citocinesi (divisió del citoplasma entre les cèl·lules filles). Les cèl·lules musculars estan envoltades per una membrana anomenada sarcolemma, i el seu citoplasma es denomina sarcoplasma. Les fibres musculars estan composades per miofibril·les, estructures contràctils que omplen el citoplasma. Les miofibril·les són cadenes de sarcòmers (unitats contràctils) situats un darrere de l'altre. Dins els sarcòmers es troben els filaments gruixuts, de miosina i els fins, d'actina, dues proteïnes molt rellevants en la contracció que contenen ATP (nucleòtid que proporciona energia a les cèl·lules). Els filaments de miosina estan situats al centre del sarcòmer, en el que s'anomena línia M, i els filaments d'actina estan localitzats als extrems del sarcòmer, en els discs Z. Un orgànul

rellevant en el procés de contracció muscular és el reticle sarcoplasmàtic, un reticle endoplasmàtic llis especialitzat, que envolta les miofibril·les i emmagatzema ions de calci.

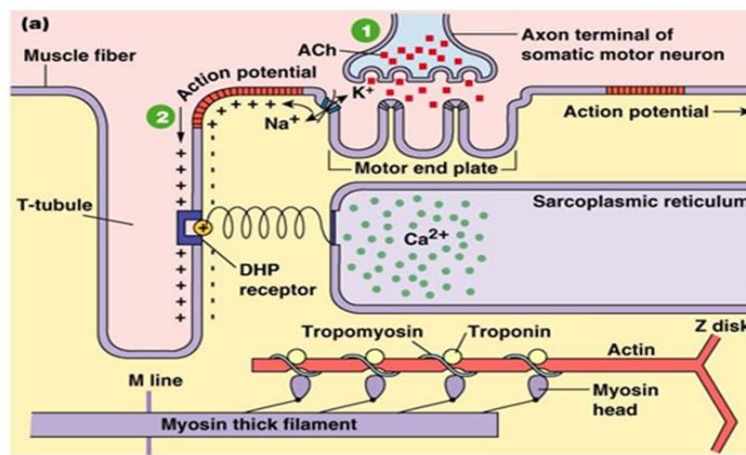
- CONTRACCIÓ DEL MÚSCUL ESQUELÈTIC

La contracció muscular és el procés fisiològic pel qual el múscul s'escurça o estira i gràcies al qual els músculs poden moure el cos. Els músculs esquelètics es contrauen per l'estimulació per impulsos nerviosos. Degut al fet que es ramifiquen, les neurones motores són capaces d'estimular grups de cèl·lules musculars, dels quals la seva grandària depèn del tipus de múscul i el treball que ha de fer. Cadascuna de les ramificacions d'una neurona motora, que s'anomena terminal d'axó, s'uneix al sarcolemma d'una fibra muscular sense arribar a tocar-lo mai. L'espai que hi ha entre ells s'anomena espai sinàptic, que està ple de fluid del teixit. A tot el conjunt se li diu unió neuromuscular.



Imatge 13: Estructura microscòpica del múscul esquelètic. Font: Ashwell, K. *El cuerpo humano. Manual de identificación*. Xina: Ilus Books, 2016.

Quan un impuls nerviós arriba a la unió neuromuscular s'allibera un neurotransmissor, tal i com està explicat a l'apartat de l'impuls nerviós. El neurotransmissor que inicia la contracció muscular s'anomena acetilcolina o ACh. Aquest provoca que el sarcolemma es torni temporalment permeable als ions de sodi (Na^+), que entren a la cèl·lula, a la vegada que surten, en menor quantitat, ions de potassi (K^+), pel que la cèl·lula queda carregada positivament. Tal i com succeïa amb les neurones, el potencial d'acció es propaga i provoca la despolarització de la membrana.



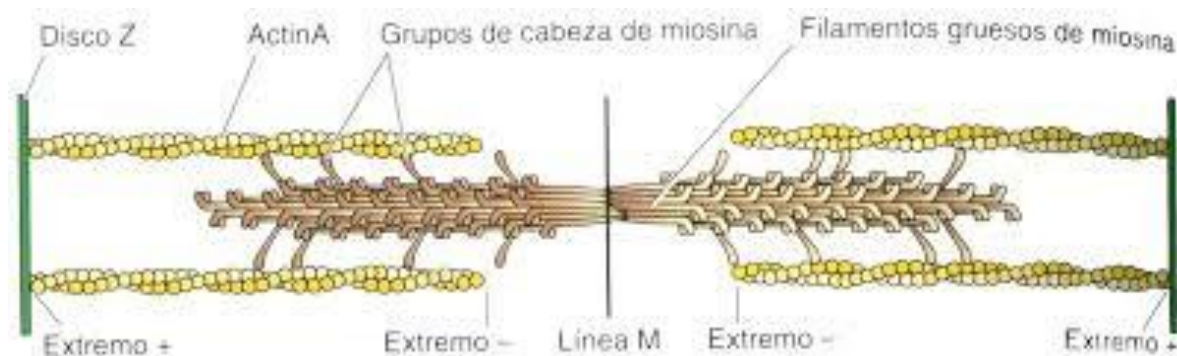
Imatge 14: Elements que intervenen en la contracció muscular.

Font: <https://slideplayer.es/slide/11621687/>

En les fibres musculars, la despolarització de la membrana també és la causa de l'alliberament de ions de calci (Ca^{2+}), que estimulen la cèl·lula per iniciar la contracció.

Per entendre el mecanisme de contracció és necessari comprendre l'estructura dels filaments de la cèl·lula. Tal i com es veu a la imatge següent, els filaments de miosina tenen uns caps que, a l'alliberar-se els ions de calci, s'adhereixen als filaments d'actina formant el que es diu pont creuat. Els caps de miosina "empenyen" els filaments d'actina cap a la ja mencionada línia M, el que provoca l'escurçament de la fibra muscular. El paper que té el Ca^{2+} en aquest procés és el de permetre la unió entre l'actina i la miosina canviant la configuració espacial

de les proteïnes reguladores que n'impedeixen la unió. Per tot aquest procés es requereix energia, proporcionada per la molècula d'ATP.



Imatge 15: Estructura dels filaments d'actina i miosina. Font:

<https://materianeurocienciasi.files.wordpress.com/2014/01/pdf-contraccion-muscular.pdf>

Les fibres musculars es relaxen quan la membrana es repolaritza i cada substància torna a la seva quantitat habitual, el que provoca que les proteïnes reguladores tornin a la seva conformació inicial i es desfacin els ponts creuats entre l'actina i la miosina.

La força que exerceix un múscul està determinada pel número de cèl·lules estimulades, el que regula la intensitat de l'acció que es durà a terme.

3.2. MARC TEÒRIC EXPERIMENTAL

La part experimental d'aquest treball està enfocada al disseny de dos tipus de pròtesis. La primera és purament robòtica i les segones, fetes de materials flexibles, són biòniques, ja que consten d'actuadors (dispositius capaços de transformar energia hidràulica, pneumàtica o elèctrica per tal de moure, o actuar, un altre dispositiu) biològics que haurien de ser capaços de contraure's.

Per aquest motiu, el marc teòric experimental tracta de la impressió 3D i la implementació d'actuadors biològics basats en teixit del múscul esquelètic, que formen part de les pròtesis biòniques i els confereixen avantatges que no tindrien de no estar compostades per sistemes biològics.

3.2.1 IMPRESSIÓ 3D I IMPLEMENTACIÓ D'ACTUADORS BIOLÒGICS BASATS EN TEIXIT DE MÚSCUL ESQUELÈTIC

- MÀQUINES BIOLÒGIQUES POTENCIADES PER MÚSCULS

La robòtica tova és la disciplina encarregada de la creació de robots tous, dispositius que, com el seu nom indica, són tous i tenen propietats elàstiques. En el terme robots tous s'inclouen els actuadors, músculs artificials, sensors tous, xarxes pneumàtiques, polímers electroactius i electrònica tova.

Els robots tous solen estar compostats per fluids, gels, polímers funcionals (macromolècules amb grups funcionals específics amb aplicacions com reactius, catalitzadors...) i materials fàcilment deformables. Aquests materials presenten propietats similars a les del teixit biològic i poden obtenir-se mitjançant la impressió 3D.

Hi ha dos tipus de robots tous: els *in vitro*, que funcionen fora del cos, i els *in vivo*, que operen dins un organisme viu.

En el camp de la robòtica tova, les màquines biològiques són dispositius constituïts per cèl·lules i biomaterials (substàncies adients per interactuar amb sistemes biològics perquè l'organisme les pot tolerar). En altres paraules, amb l'objectiu de millorar les capacitats dels dispositius robòtics s'hi integren sistemes biològics (com teixit muscular o cardíac, que són amb els que s'estan desenvolupant aquestes màquines actualment). No tots els robots tous tenen sistemes biològics integrats; de fet, l'única condició de la robòtica tova és la utilització de materials flexibles. Tanmateix, actualment s'està aprofitant la biocompatibilitat d'aquests materials per millorar els robots tous amb materials biològics.

Avantatges de les màquines biològiques respecte les convencionals són l'augment de la capacitat de captar, processar, respondre i adaptar-se a estímuls de l'entorn, tal com fan els éssers vius. Aquestes facultats els permeten organitzar-se, replicar-se i guarir-se de manera autònoma en resposta a canvis en el medi.

Quasi totes les màquines necessiten actuadors per tal de moure's, i el de les màquines biològiques en les que em centraré és el denominat "teixit esquelètic", que pot generar força i és capaç de respondre a estímuls elèctrics i imitar el que en éssers vius seria el complex múscul-tendó-os, a més d'adaptar-se a estructures en tres dimensions. Aquest teixit, que s'obtindria mitjançant la seva

impressió 3D (explicada als següents apartats), estaria suportat per un esquelet sintètic també imprès en 3D.

Tot i que hi ha diferents protocols a l'hora de treballar amb actuadors biològics, amb la finalitat d'explicar el procés d'impressió, diferenciació, creixement i estimulació d'una manera més clara i centrada en la part pràctica d'aquest treball, em basaré en dos experiments, un d'ells realitzat per investigadors de l'IBEC i publicat a la revista *Advanced Materials Technologies* i l'altre dut a terme per la *University of Illinois Urbana-Champaign* i publicat a *Nature protocols*.

Convé mencionar que vaig basar els procediments que vaig seguir a la part pràctica del meu treball en aquestes investigacions i els resultats obtinguts pels autors dels articles.

- IMPRESSIÓ 3D

La impressió 3D és una tecnologia de fabricació que utilitza el fabricat per addició. Aquest consisteix en la creació d'objectes en tres dimensions mitjançant l'addició de capes de diferents materials.

- TIPUS D'IMPRESSIÓ 3D EN ROBÒTICA TOVA

Tot i que en el meu treball també he utilitzat la impressió 3D per construir el dit purament robòtic, en aquest apartat em centraré en l'ús d'aquest tipus d'impressió en la robòtica tova.

Les principals raons per les que s'escull la impressió 3D com a mètode de fabricació en el camp de la robòtica tova són la possibilitat de crear figures complexes sense la necessitat del post-processat, la poca quantitat de residus generada, l'àmplia gamma de materials que poden utilitzar-se (incloent materials intel·ligents; que responen a estímuls) i la gran varietat de dissenys que poden fer-se a un preu reduït. A més, permet imprimir tant materials inorgànics (que en robòtica tova sempre seran tous) com biològics. Un desavantatge que, a causa de l'estat preliminar de les investigacions en aquesta àrea encara no és un gran inconvenient és la poca velocitat d'aquestes màquines (que seria un aspecte més important si es pretengués una fabricació en massa de robots tous), el que es tradueix en una falta de possibilitat de créixer a gran escala.

Hi ha diverses tècniques d'impressió 3D, però les més utilitzades en el camp de la robòtica tova són:

- Estereolitografia (SLA)

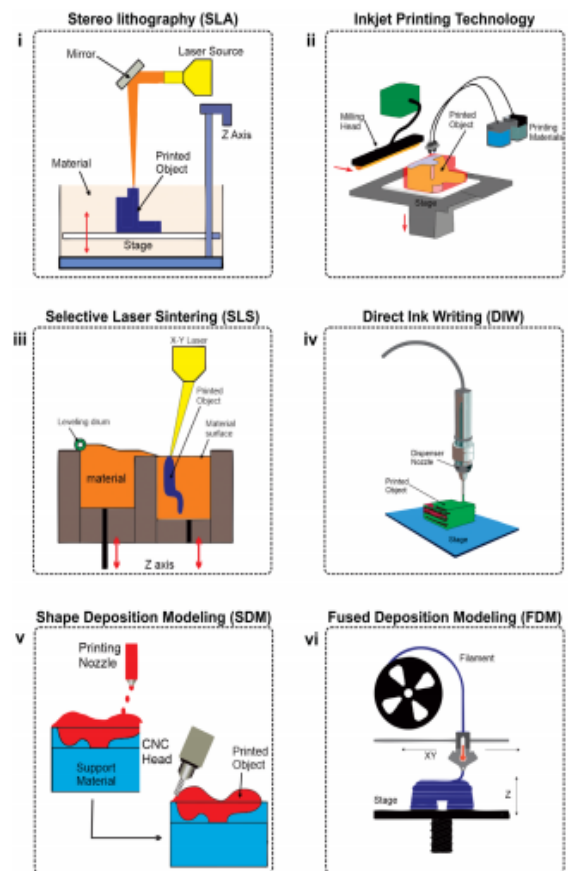
En aquesta tècnica s'utilitzen els fotopolímers, substàncies que reaccionen, és a dir, alteren les seves propietats, en presència de llum, normalment raigs UVA. En l'SLA una resina líquida (el fotopolímer) és endurida per un làser que dibuixa les formes desitjades capa a capa. Quan una capa esdevé sòlida, la safata on està situada el làser descendeix o puja (depenent de si el disseny es fabrica de dalt a baix o a la inversa) i dibuixa la capa següent.

L'SLA permet una fabricació ràpida i fàcil, i s'adequa a la creació de robots tous dissenyats per interactuar amb l'entorn i imitar els éssers vius.

- Photo-curable inkjet printing (o impressió d'injecció de tinta foto-curable)

Similar a l'estereolitografia, un capçal d'injecció de tinta s'empra per a dipositar el fotopolímer líquid a capes. El material s'imprimeix en motlles i per capes que s'activen per raigs UVA. La precisió en el disseny és menor que la de l'SLA i és difícil evitar l'obstrucció del broquet durant la injecció de tinta de materials complexos com tintes polimèriques molt concentrades, però la impressió d'injecció de tinta foto-curable té els avantatges de poder imprimir molts materials diferents i un avançat sistema d'agulles.

- Sinteritzat selectiu per làser (SLS)



Imatge 16: Esquema dels tipus

d'impressió 3D de robots tous. Font: Jahan Zeb Gul, Memoon Sajid, Muhammad Muqeet Rehman, Ghayas Uddin Siddiqui, Imran Shah, Kyung-Hwan Kim, Jae-Wook Lee & Kyung Hyun Choi. 3D printing for soft robotics – a review. (2018). *Science and Technology of Advanced Materials*, 19:1, 243-262.

Normalment s'utilitzen metalls en aquest tipus d'impressió 3D, així com polímers. També és semblant a l'SLA, però utilitza pols que és sinteritzada per un làser en comptes de resina líquida. Després de la seva construcció, la peça ha de ser refrigerada.

- Direct ink writing (DIW)

És un mètode de fabricació capa a capa en el qual, a temperatura ambient, la tinta passa a través d'una agulla i el material se solidifica quan es diposita. Permet imprimir materials elèctrics, biològics i estructurals, i les tintes més utilitzades són solucions col·loïdals i hidrogels, entre altres.

Avantatges que presenta són baixos costos, una àmplia varietat de materials a imprimir i ràpida elaboració de figures 3D complexes.

- Shape deposition modelling

S'utilitza en la construcció de figures geomètriques complexes amb materials heterogenis. La fabricació consisteix en un cicle de deposició de material (primer el material de suport i després el de construcció) i modelat per capes.

- Fused deposition modelling o modelat per diposició fosa (FDM)

En aquest tipus d'impressió 3D es fabrica capa a capa la figura mitjançant l'extrusió d'un filament del material. De vegades s'utilitzen estructures impreses amb material de suport que després es retira. El filament es diposita un broquet escalfat que el fon per tal que es fusioni amb la resta del material. El broquet d'extrusió es mou en els tres eixos.

Té els avantatges de ser econòmica, fàcil d'utilitzar i permet emprar molts materials. Tanmateix, la qualitat de la superfície i la resolució dels objectes creats són baixes.

- MATERIALS QUE S'IMPRIMEIXEN EN 3D EN ROBÒTICA TOVA

Els materials inorgànics que s'imprimeixen més freqüentment en la robòtica tova són:

- Elastòmers dielèctrics (DEAs)

Poden utilitzar-se com a músculs artificials per la seva similitud amb els músculs dels mamífers a causa de la seva tensió, densitat d'energia (energia per unitat de volum) i lleugeresa.

- Polímers amb memòria de forma (SMPs)

Són polímers que canvien de forma si es troben en contacte amb calor.

- Hidrogels

Els hidrogels són polímers hidròfils, elàstics i tous que, a causa de la seva biocompatibilitat, s'utilitzen com a biomaterials (substàncies dissenyades per interactuar amb medis biològics). Hi ha molts tipus d'hidrogels, i cadascun respon a un estímul concret (calor, pH...).

- Aliatges amb memòria de forma (SMAs)

Són aliatges que canvien de forma en presència de calor.

- Elastòmers fluids (FEAs)

Aquests polímers amb propietats elàstiques són extensibles i adaptables. Quan se'ls aplica pressió mantenen la seva forma sense un gran consum d'energia.

- Compostos tous intel·ligents (SSCs)

Consten d'actuadors intel·ligents, materials anisotròpics (que varien les seves característiques en funció a la direcció en que s'examinen) i un polímer. Són capaços de deformar-se.

- ACTUADORS BIOLÒGICS

- IMPRESSIÓ 3D D'ACTUADORS BIOLÒGICS

Els actuadors biològics poden obtenir-se mitjançant cultius habituals i també poden imprimir-se en 3D. Tot seguit explicaré la impressió 3D d'actuadors biològics, no perquè sigui estrictament necessària per aconseguir-los, sinó perquè és el mètode d'obtenció de sistemes biològics que han seguit els autors dels protocols que estic tractant, i un dels més habituals.

Tal i com està explicat a l'apartat teòric del treball, el múscul esquelètic està format per fibres musculars, estructures contràctils encarregades de la

contracció i relaxació muscular. Aquestes s'originen per la diferenciació dels mio blasts en miotubs i posteriorment dels miotubs en les pròpies fibres musculars.

El medi on els mio blasts creixen i es diferencien en miotubs està format per un hidrogel basat en fibrina.

Les impressions realitzades en aquests experiments són adequades cadascuna a la funció que se li donarà al teixit. Els dos primers protocols van desenvolupar-se pels investigadors de l'IBEC i el darrer pels de la *University of Illinois Urbana-Champaign*.

El primer protocol, que està destinat a estudiar la direcció de creixement dels miotubs i la resposta a estimulació elèctrica, consisteix en actuadors biològics amb dissenys senzills com triangles o quadrats.

Per al segon, elaborat amb l'objectiu d'estudiar la direcció del creixement, la resposta a estímuls elèctrics i la força del teixit, també s'imprimeixen suports fets de polidimetilsiloxà o PDMS, un tipus de silicona. Les cèl·lules en hidrogel s'imprimeixen al voltant d'aquests suports, que serveixen per mantenir-les fixes i facilitar-ne el seu estudi, especialment quan comencen a contraure's. Ambdós materials (el PDMS i les cèl·lules en hidrogel) s'imprimeixen sobre una placa de Petri.

A causa de la deformació que pateixen els materials tous impresos en 3D pel seu propi pes sol necessitar-se un material de suport, pel que s'han desenvolupat mètodes com la impressió d'hidrogels viscoelàstics amb estructures que els fan de suport (com els suports de PDMS en el segon protocol i un esquelet en el tercer que explico a l'apartat següent). Una altra via és la impressió de materials molt tous que mantenen la seva forma gràcies a una polimerització (creació d'una molècula pesant a partir de monòmers, que són molècules més lleugeres).



Imatge 17: *Mioblasts impresos al voltant de suports de PDMS.* Font: <https://3dprintingindustry.com/news/catalonian-researchers-3d-bioprint-muscle-for-soft-robotics-146321/>

El material amb el que s'imprimeixen aquestes cèl·lules ha de complir amb una sèrie de característiques que en garanteixi la supervivència. La barreja està formada per àcid hialurònic, gelatina i fibrinogen, una proteïna de la sang precursora de la fibrina, que és l'encarregada de la coagulació. La mescla encapsula els mioblasts C2C12, una línia cel·lular de mioblasts de ratolí.

El tercer protocol, no tant destinat a l'estudi de les cèl·lules com a l'aplicació de la bioimpresió, és aquell que va pròpiament adherit a un esquelet sintètic i, per tant, el teixit imprès serveix com a actuator biològic. En aquest cas, l'objectiu de la implementació de l'actuator biològic és el d'aconseguir moviment en l'estructura. Per donar forma a aquest teixit s'utilitzen motlles també impresos en 3D fets d'un tipus d'hidrogel sintetitzat mitjançant una substància anomenada polietilèglicol.

En aquest darrer cas, el material utilitzat per a la impressió està compost per mioblasts C2C12, fibrinogen, trombina (un enzim de la sang que catalitza la transformació de fibrinogen en fibrina) i Matrigel, una proteïna gelatinosa. Com pot veure's, els dos equips d'investigadors utilitzen "tintes" similars.

Convé destacar que la bioimpresora 3D utilitzada és d'extrusió.

○ IMPRESSIÓ 3D DE L'ESQUELET

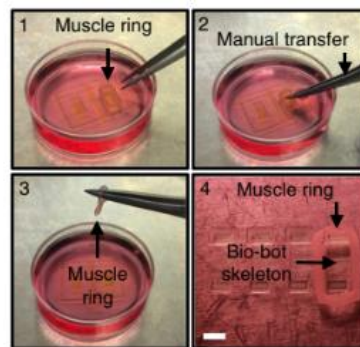
Els dos primers protocols d'impressió explicats a l'apartat anterior estan destinats a servir com a model de prova de diferents capacitats dels biomaterials, com la força o la resposta a estímuls elèctrics. Per tant, no s'incorporen a un esquelet

3D més enllà dels suports de PDMS del segon protocol. El tercer tipus, en canvi, sí. Per aquesta raó, en aquest apartat es tracta la impressió 3D de l'esquelet al qual anirà adherit el teixit imprès.

L'esquelet sintètic està compost per un suport flexible amb dos pilars a cada extrem, que serveixen per ancorar el teixit biològic. Les cèl·lules situades a l'estructura esquelètica estan impreses amb la forma de tires.

El procés per imprimir l'esquelet és l'estereolitografia, explicada a l'apartat de tipus d'impressió 3D en robòtica tova.

Aquest esquelet se situa en un motlle on estan les cèl·lules impreses per tal que aquestes s'adhereixin a l'estructura.



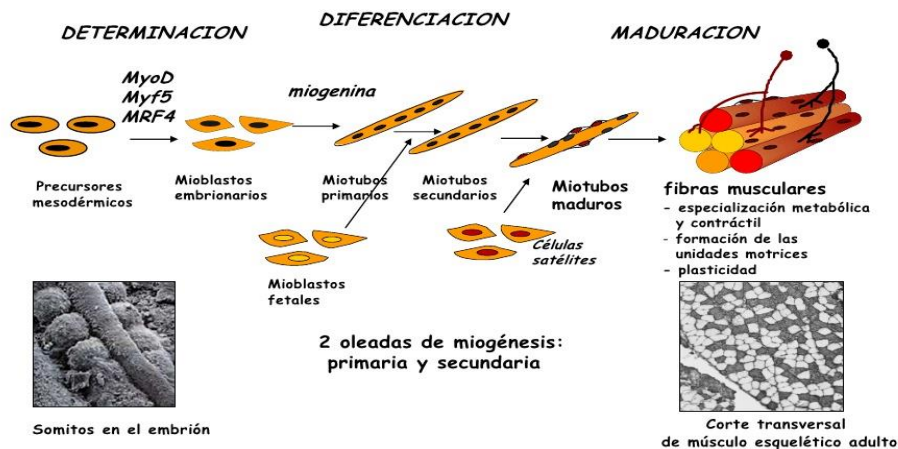
Imatge 18: Múscul esquelètic i esquelet del tercer protocol. Font: Raman, R., Cvetkovic, C. I Bashir, R. A modular approach to the design, fabrication, and characterization of muscle-powered biological machines. (2017). *Nature Protocols*. Vol. 12. Num. 3.

○ CREIXEMENT I DIFERENCIACIÓ DE LES CÈL·LULES

Totes les cèl·lules impreses, sigui amb qualsevol dels tres protocols explicats, han de passar per un procés de creixement i diferenciació per arribar a ser teixit funcional. Per tal que les cèl·lules es diferenciïn i creixin correctament, aquest procés es divideix en diferents etapes, en les quals el medi en el que es troben les mostres es va canviant. Primer, els mioblasts es troben en un medi de creixement, on proliferen, i després es traslladen al medi de diferenciació.



Etapas de la miogénesis esquelética



Imatge 19: Diferenciació i maduració de teixit muscular esquelètic. Font:

<https://es.slideshare.net/Pauli.olivares/miogenesis-y-diversidad-muscular>

Per analitzar la viabilitat dels mioblasts després de la seva diferenciació, poden utilitzar-se diverses tècniques de tinció. Un exemple és el “Live/Set Cell Double Staining Kit”, que conté dues solucions, calceïna-AM i iodur de propidi. La primera, al ser lipòfila (soluble en contacte amb lípids), pot travessar la membrana cel·lular i reaccionar amb un enzim que contenen les cèl·lules vives, amb el que es torna d'un color verd fluorescent. El iodur de propidi, en canvi, no pot passar a través de la membrana d'una cèl·lula viva, pel que només tenyeix les cèl·lules mortes d'un vermell fluorescent. Després de la tinció s'observen les mostres amb un microscopi de fluorescència.

El grau de diferenciació cel·lular, que s'estudia posteriorment en els dos primers protocols, es basa en el reconeixement de factors genètics específics relacionats amb aquest procés, com la proteïna MyoD, i característiques concretes dels miotubs.

Un altre factor que s'ha de tenir en consideració per la seva importància en relació amb la força que el múscul serà capaç de generar és l'alineació dels miotubs. Aquesta alineació és menor si els miotubs estan en contacte amb una superfície de vidre (com en una placa de Petri, que és on es troben les mostres)

en comparació amb aquells situats a la part superior del teixit, que presenten una rigidesa més similar a la dels teixits biològics.

A més, perquè el teixit mantingui la mateixa estructura amb què va ser imprès, és necessari que aquest es cobreixi amb fibrinogen. En els dos mètodes d'impressió en què va estudiar-se aquesta peculiaritat, els miotubs tendeixen a alinear-se en la direcció en que van ser impresos. Aquest fet ha portat als científics que van realitzar l'experiment a deduir que l'extrusió provoca una tensió en les fibres de l'hidrogel que causa una alineació especialment rellevant en la impressió 3D de dissenys senzills ja que, sense necessitat de cap motlle, mantenen la seva forma inicial.

- PROTOCOLS D'ENTRENAMENT DEL MÚSCUL ESQUELÈTIC

La força del teixit del múscul esquelètic pot estudiar-se i millorar-se aplicant-hi diferents protocols d'entrenament basats en impulsos elèctrics, que és l'entrenament dut a terme pels investigadors de l'IBEC. Altres mètodes de calibrar la força del teixit són l'afegiment de certes substàncies en el medi de creixement o l'estimulació mitjançant l'estirament del teixit en la fase de diferenciació.

- Resposta a estímuls elèctrics

En els casos concrets que estic tractant, s'apliquen impulsos elèctrics que simulen els efectes dels potencials d'acció de les neurones per mitjà d'estimulació elèctrica per polsos (EPS), que és un mètode utilitzat en els cultius *in vitro* capaç d'induir contraccions en les fibres del teixit esquelètic com ho faria una neurona motora. Per tal de fer-ho s'introdueix calci a les cèl·lules, ja que aquest causa contraccions davant l'estimulació elèctrica, el que millora la contractilitat del teixit.

A més, s'hi afegeix Fluo-4, un colorant de ions de calci, que tenyeix els Ca^{2+} que s'alliberen durant la contracció. Quan, en resposta a l'estímul elèctric, hi ha un augment del número d'aquests ions, que és quan el múscul es contrau (tal com està explicat a l'apartat del sistema muscular de la part teòrica del treball), aquest és detectable amb un microscopi de lapse de temps, que permet veure fotogrames a gran velocitat gràcies al colorant.

Abans d'aplicar l'EPS, els miotubs presenten activitat espontània. Tanmateix, després de l'estimulació elèctrica, les contraccions dels miotubs responen a la freqüència aplicada i estan sincronitzades entre elles.

Les contraccions es mesuren amb un microscopi de camp lluminós, un tipus de microscopi òptic, i una sèrie d'algoritmes que indiquen la intensitat de les mateixes i el moviment que provoquen en el teixit.

- Mesura de la força

Per mesurar la força dels actuadors biològics s'utilitza el segon protocol, el que consta dels suports de PDMS envoltats per l'hidrogel i les cèl·lules. Després de passar pel medi de creixement i diferenciació, aquests models s'estimulen amb EPS mitjançant elèctrodes de carboni situats a la placa de Petri.

Per mesurar la força del teixit es fa servir la teoria de bigues d'Euler-Bernoulli, que relaciona el desplaçament dels suports amb aquesta variable.

Els resultats mostren que, en els primers minuts, el desplaçament dels suports equival a la freqüència aplicada. Tanmateix, al llarg d'una hora la força augmenta.

També s'analitza la força a llarg termini per mitjà de l'aplicació de corrents elèctrics una hora diària durant quatre dies a partir del sisè dia de diferenciació, que és quan el teixit comença a experimentar contraccions suficientment potents com per moure els suports. Les proves es fan a diferents freqüències i amb dos tipus de suport: rígids i tous.

Els resultats mostren que pels posts rígids les freqüències que augmenten significativament la força són les més baixes (0,1 Hz) i pels tous les mitjanes (entre 0,1 i 1 Hz).

Amb l'objectiu de saber si el protocol d'entrenament és útil, es comparen els valors de la força de les mostres entrenades durant quatre dies amb una que només ha estat entrenada durant una hora i una altra que no ha estat entrenada. En el cas dels suports rígids, hi ha una milloria de la força en comparació amb la mostra no estimulada però no amb la que ha estat estimulada només una hora. En el dels suports tous hi ha una diferència de força encara major entre les mostres estimulades quatre dies i la no estimulada i, a més, també és

significativa la diferència entre les mostres a les que s'havia aplicat l'EPS els quatre dies i a la que només se l'havia aplicat una hora.

Per tant, pot concloure's que l'entrenament és més efectiu en els suports tous, però que en ambdós casos és útil, perquè les mostres estimulades tenen una força major que les que no ho han estat.

- Expressió genètica després de l'entrenament a llarg termini

No hi ha cap expressió significativa de gens després de l'estimulació, excepte una lleugera disminució de l'expressió d'una proteïna anomenada MyHCII.

- IMPLEMENTACIÓ DEL TEIXIT COM A ACTUADOR BIOLÒGIC

A l'hora de provar si el teixit és apte com a actuator biològic, se segueix el tercer protocol, en el qual, després d'aplicar estimulació elèctrica, el múscul esquelètic és capaç de moure's en una direcció.

Tanmateix, hi ha dos problemes principals: d'una banda, el teixit està adherit a l'esquelet de tal manera que no és fàcil adaptar-ho a altres dissenys i, d'altra, com l'estimulació elèctrica provoca la contracció de tot el teixit, aquest només pot moure's en una direcció.

Per solucionar la primera limitació s'imprimeixen anells en comptes de tires de múscul, el que, a més, millora la viabilitat de les cèl·lules sense afectar a la seva força. En quant a la segona, es dissenya un teixit sensible a la llum mitjançant l'optogenètica, que combina tècniques òptiques i genètiques, per controlar-lo mitjançant impulsos lluminosos.

- APLICACIONS DELS ACTUADORS BIOLÒGICS

Actualment, els actuadors biològics estan utilitzant-se especialment en el camp de la robòtica tova que, com ja he explicat, és un camp de la robòtica que simula els sistemes i teixits dels éssers vius (s'utilitzin materials biològics o no), pels avantatges ja esmentats que poden aportar si s'afegeixen a les màquines convencionals.

A més, el disseny al laboratori de miotubs pot servir per estudiar el desenvolupament i adaptabilitat del teixit muscular, així com per fer proves farmacològiques sobre teixit viu.

Una altra aplicació que veig als actuadors biològics, tot i que encara no s'ha explorat gaire, és la de la construcció de pròtesis que simulin amb més precisió el membre biològic i en facilitin el maneig, així com que permetin una major amplitud i naturalitat als moviments del membre. Els experiments anteriors han demostrat que el teixit imprès és capaç de generar força i respondre a estimulació elèctrica i que és possible acoblar-lo a estructures sintètiques que simulin l'esquelet humà.

- PROBLEMES GENERALS DE LES MÀQUINES POTENCIADES PER ACTUADORS BIOLÒGICS

- Contracció espontània

A causa de l'estat preliminar de les investigacions en les màquines biològiques, hi ha diversos problemes en quant a la seva capacitat de resposta i a la força que poden fer. Tanmateix, principal problema de les màquines biològiques és que els actuadors biològics que les impulsen (en el meu cas, el múscul esquelètic) no poden fer-se massa grans o duradors a causa de la contracció espontània dels teixits durant el seu cultiu, provocada per les diverses forces de tracció ja existents al teixit.

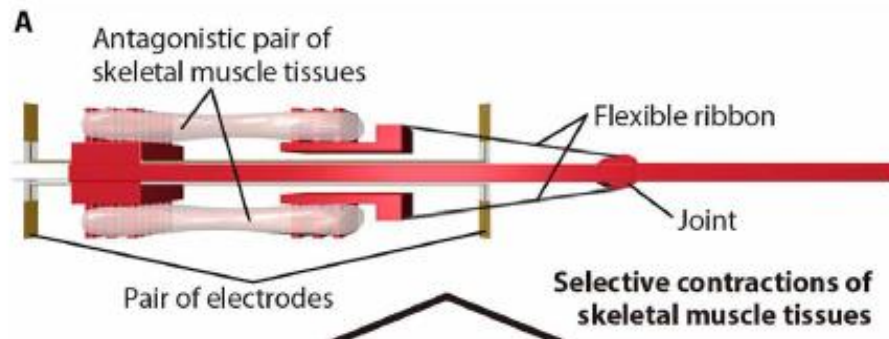
Una possible solució a aquest problema és plantejada per l'article "Biohybrid robot powered by an antagonistic pair of skeletal muscle tissues", publicat a la revista *Science Robotics*, que a continuació explicaré. Aquest article té un interès afegit pel meu treball perquè el robot biohíbrid que és construït fa un moviment similar al de la pròtesi de dit de la meua part experimental.

- Possible solució

Aquestes forces de tracció poden estabilitzar-se mitjançant la implementació de músculs antagonistes (en posicions oposades, com podrien ser el bíceps i el tríceps), el que evitaria la contracció del teixit que acaba inutilitzant els actuadors. En l'article mencionat prèviament, els investigadors van desenvolupar un robot biohíbrid controlat per actuadors units a un esquelet robòtic.

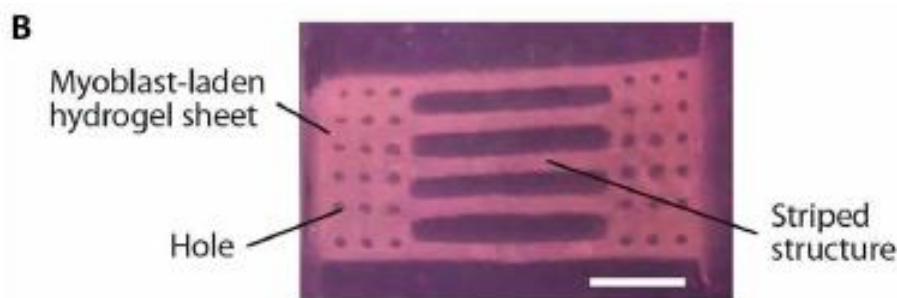
- Construcció del robot biohíbrid

El primer pas en la construcció d'aquest robot és l'elaboració de l'esquelet, que està format per una junta, dos parells d'elèctrodes per aplicar impulsos als músculs antagonistes, suports i dues cintes, com pot veure's a la imatge següent.



Imatge 20: Estructura del robot biohíbrid. Font: Morimoto, Y., Hiroaki, O. i Takeuchi, S. Biohybrid robot powered by an antagonistic pair of skeletal muscle tissues. (2018). *Science Robotics*.

A continuació es cultiva el teixit esquelètic amb la forma adient per poder moure l'esquelet (una làmina amb forats i tires) sobre suports de PDMS (tal i com es feia al segon tipus d'impressió en els apartats anteriors) i després aquest teixit se situa a l'esquelet. Mentre que els forats que poden veure's en la fotografia de sota es fan per tal que el teixit s'adhereixi a l'esquelet, les tires tenen la funció de millorar l'alineament de mioblasts.



Imatge 21: Estructura del teixit esquelètic. Font: Morimoto, Y., Hiroaki, O. i Takeuchi, S. Biohybrid robot powered by an antagonistic pair of skeletal muscle tissues. (2018). *Science Robotics*.

Un cop a una banda i a l'altra de l'esquelet sintètic, s'apilen diverses làmines del teixit cultivat, que es fusionen i formen els músculs esquelètics antagonistes.

Tot i que les tensions estan balancejades un cop el múscul ha madurat, el teixit esquelètic tendeix a créixer de forma irregular, possiblement per un desequilibri de tensions durant el creixement o petits errors en les peces de l'esquelet.

- Resultats

Diverses proves mostren els avantatges de cultivar teixits amb les tires, com valors més alts de força respecte els que no les tenien. Una altra dada és que els teixits amb tires més primes són capaços de generar més força per unitat d'àrea, probablement per una millor orientació dels miotubs durant el creixement.

Després de realitzar proves d'imatge es demostra que el cultiu del teixit es diferencia correctament. La força de contracció del múscul depèn de l'estimulació elèctrica (s'aconsegueixen valors més alts amb una estimulació de 50 Hz que d'1 Hz), i són els teixits cultivats durant deu dies els que aconsegueixen la màxima força pic a pic (és a dir, la diferència entre els valors màxims positius i negatius).

Les mesures de força del múscul originat del teixit amb tires són altes i, de fet, més altes que les del sorgit a partir de teixit sense aquestes estructures. En quant als valors de força de contracció pic a pic en relació amb la llargària del múscul, els màxims són aquells en els que el teixit no s'ha elongat ni escurçat respecte a la seva mida durant el cultiu. Els valors de força passiva (força contràctil que es troba intrínsecament al teixit), en canvi, augmenten a mesura que s'elonga el teixit. Aquests resultats coincideixen amb els del teixit cultivat *in vivo*.

El robot biohíbrid és controlat mitjançant estímuls elèctrics aplicats al teixit pels elèctrodes situats a l'estructura. El funcionament és el següent: quan un dels músculs antagonistes s'estira a causa de l'estimulació elèctrica, l'altre es flexiona, el que fa rotar la junta. Els resultats mostren que les mesures d'estirament del múscul es corresponen a l'angle de flexió de la junta, el que simula el sistema múscul-esquelet del cos.

La duració dels teixits del robot biohíbrid va ser considerablement major que la d'aquells sense la configuració de músculs antagonistes (que van durar com a màxim uns pocs dies abans de patir la contracció espontània), ja que van mantenir la seva força durant la setmana que van ser testats.

El robot biohíbrid és capaç de realitzar moviments similars als de, per exemple, un dit humà. Com pot veure's a la imatge següent, va agafar una anella.

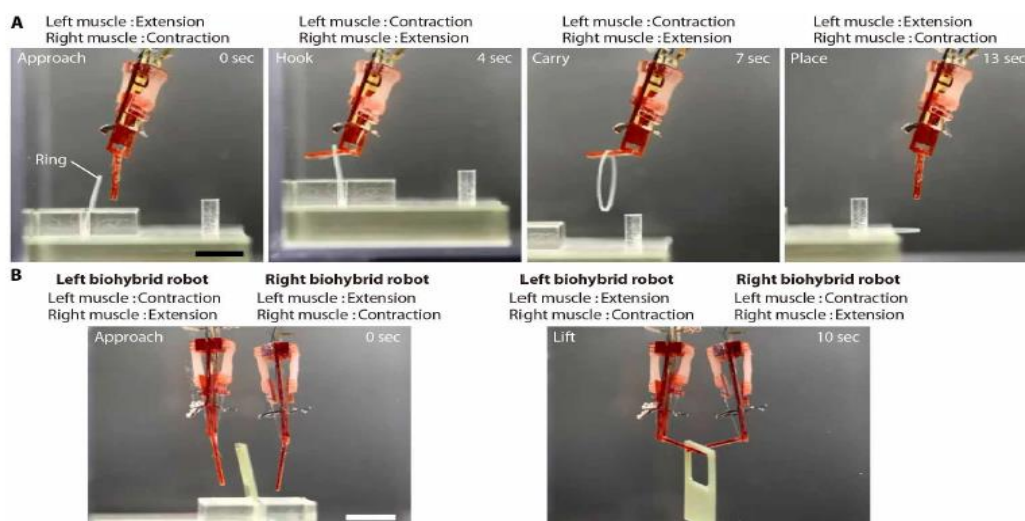


Fig. 4. Object manipulations performed by our biohybrid robots. (A) Sequential images of a pick-and-place operation of the biohybrid robot by selective contractions of the skeletal muscle tissues generated with electrical pulses (electrical field, 1.5 V/mm; frequency, 50 Hz; duration, 2 ms). (B) Sequential images of picking up a square frame by the operation of two biohybrid robots. Skeletal muscle tissues were contracted selectively by applying electrical pulses (electrical field, 1.5 V/mm; frequency, 50 Hz; duration, 2 ms). Scale bars, 1 cm.

Imatge 22: Estructura del teixit esquelètic. Font: Morimoto, Y., Hiroaki, O. i Takeuchi, S. Biohybrid robot powered by an antagonistic pair of skeletal muscle tissues. (2018). *Science Robotics*.

En conclusió, i tot i que els resultats són prometedors, encara cal millorar l'eficiència del robot en quant a convertir les contraccions en moviment. A més, petits errors durant el muntatge de l'esquelet provoquen diferències de llargària en els teixits. Un desavantatge de l'estimulació elèctrica és que causa la degradació del teixit i dels elèctrodes, pel que una altra línia d'investigació seria la d'utilitzar teixits modificats genèticament de manera que fossin sensibles a estímuls òptics o teixits cultivats amb neurones motores sensibles a estímuls neuronals.

Explico aquest experiment perquè, tot i que en la meva part pràctica no vaig construir estructures tan grans ni amb la possibilitat de ser tan fortes (les pròtesis de dit tenien dissenys més senzills, pel que vaig utilitzar actuadors biològics més petits, el que reduïa el risc de contraccions espontànies), una futura línia d'investigació podria ser la de fer estructures majors que poguessin moure pròtesis més grans.

- Manca de nutrients

Un altre motiu pel qual els actuadors biològics no poden fer-se massa grans és perquè els nutrients no arriben a totes les cèl·lules durant el creixement. Una

solució a aquest problema és fer créixer una gran quantitat d'actuadors petits independents que després s'annexionen entre ells per augmentar la seva força.

- Condicions ambientals

Les cèl·lules utilitzades en les màquines biològiques necessiten unes condicions molt específiques de temperatura, nutrients... el que redueix la seva vida útil i les situacions on poden utilitzar-se. Una solució és situar-los a un espai tancat que els aportí les condicions que necessiten i els permeti llibertat de moviment.

Una altra opció és utilitzar cèl·lules més resistents, com les de la bavora *Aplysia californica*, possibilitat estudiada per la Universitat Case de la Reserva Occidental.

- Dany al teixit per l'estimulació elèctrica

Com ja s'ha mencionat, crear robots fotosensibles és una opció.

4. PART PRÀCTICA

La part experimental del meu treball consisteix en la impressió 3D de diversos models de dit constituïts per una part flexible i un constructe cel·lular de cèl·lules musculars (dits biònics), al qual s'aplicaran protocols d'entrenament mitjançant estímuls elèctrics. Aquests models estaran dissenyats amb el programa AutoCAD.

Per tal que la pròtesi sigui capaç de contraure's, moure's i fer força, aquesta ha de respondre a estímuls elèctrics, raó per la qual s'aplicaran aquests protocols d'entrenament.

A més, dissenyaré amb AutoCAD també un model de dit fet únicament de plàstic no flexible que s'imprimirà amb una impressora 3D i que funcionarà mitjançant Arduino i servomotors (dit robòtic).

Per últim, implementaré un flex sensor (mesurador de flexió) per avaluar l'adequació dels diferents models flexibles a l'anell de cèl·lules, així com per comparar la força que és capaç de fer el dit robòtic amb un dit real. El flex sensor no està destinat a comparar la força que pot fer el dit biònic perquè aquest ha d'estar en un medi aquós quan és estimulat elèctricament, i el flex sensor no pot suportar aquestes condicions.

4.1. DISSENY, IMPRESSIÓ I IMPLEMENTACIÓ DEL MODEL DE DIT ROBÒTIC

- DISSENY I IMPRESSIÓ

Tal i com vaig fer amb el model de dit amb el constructe cel·lular, vaig dissenyar el model de dit amb AutoCAD. AutoCAD és un *software* de disseny assistit per ordinador (tal i com les sigles CAD, *Computer Aid Design*, indiquen) desenvolupat per la companyia Autodesk. Aquest programa permet la creació de plànols i figures en 2D i 3D. La seva àmplia gamma de possibilitats, així com la qualitat del programa i les diverses aplicacions que té (planificació arquitectònica, disseny gràfic, impressió 3D...) fan que sigui un dels *softwares* de disseny més

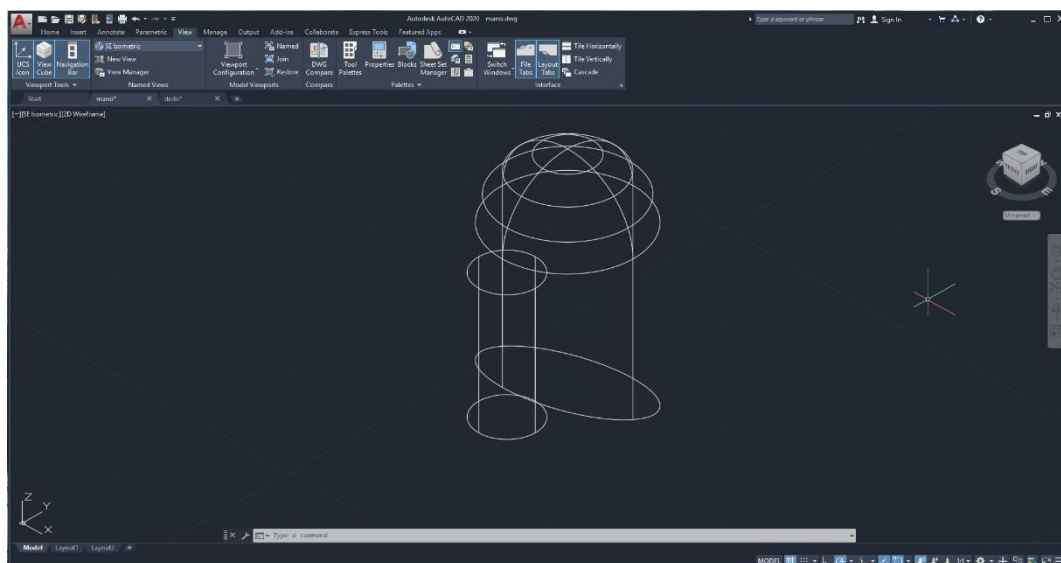


Imatge 23: Logo AutoCAD. Font: <http://www.wacomvalencia.com/es/software-autocad/>

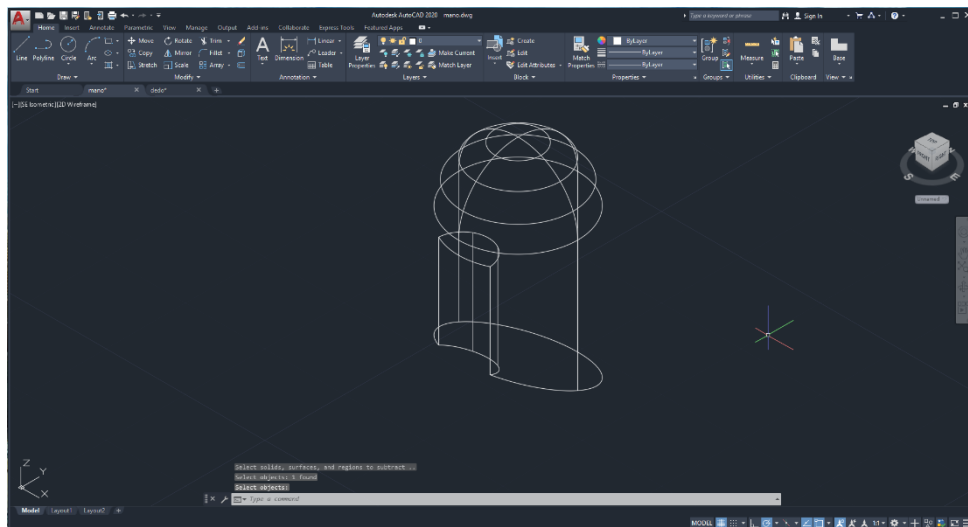
utilitzats pels professionals del sector actualment. Tot seguit explicaré el procés i adjuntaré captures del disseny del model del dit de plàstic en AutoCAD.

El primer que vaig fer va ser configurar el programa en un plànol horitzontal (tal i com pot veure's al cantó inferior esquerre de la imatge següent). Això vol dir que els dissenys en 2D es realitzen sobre l'eix X de coordenades (el programa té els eixos X, Y i Z), el que és important a l'hora d'extrusionar el model. L'extrusió és un dels comandaments de l'AutoCAD, i consisteix a crear una figura 3D a partir d'un disseny en dues dimensions. En altres paraules, crea un disseny sòlid (omplert per dins) de qualsevol dimensió a partir d'una forma.

Un cop vaig haver configurat l'eix, vaig començar a dissenyar la falange distal del dit. Per començar, vaig crear un cilindre i una esfera i vaig unir-los. Aquest és un altre dels comandaments de l'AutoCAD que, tal i com el seu nom indica, serveix per fusionar dues figures realitzades de manera independent. A continuació vaig dissenyar un altre cilindre més petit que el primer i vaig fer una diferència. Un altre comandament rellevant en la construcció del model del dit és la diferència o sostracció, en el qual s'extreu a una figura el volum i forma d'una altra. En aquest cas vaig extreure el volum del cilindre menor al gran. Com pot veure's, el model té la base inclinada (feta mitjançant la construcció i diferència d'un plànol inclinat al cilindre principal) per tal de limitar el moviment del dit i que no es pugui doblegar cap endarrere.

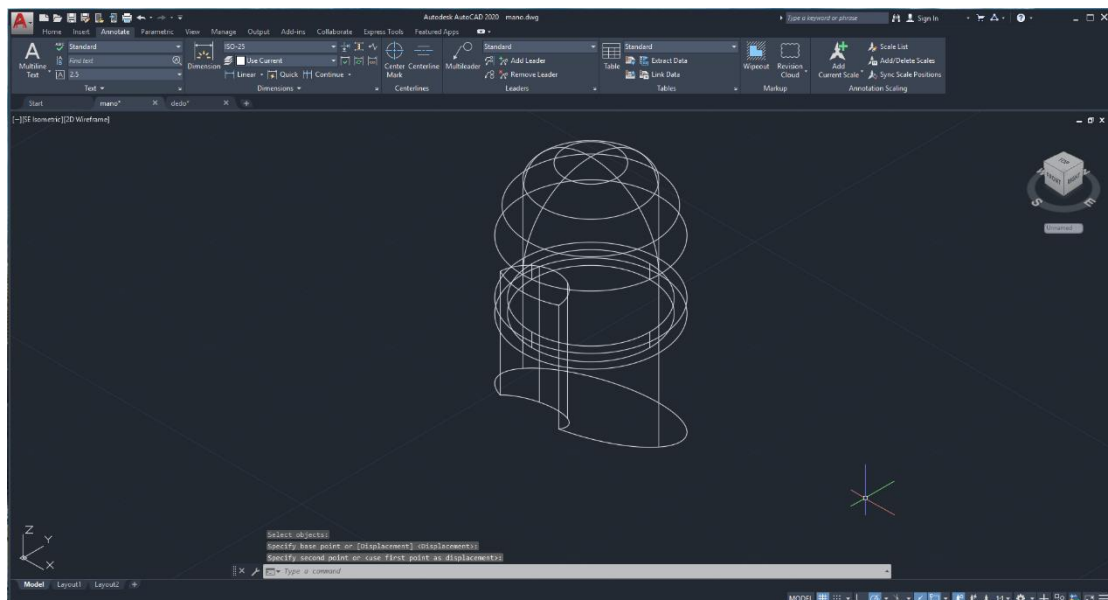


Imatge 24: Captura del cilindre gran unit amb l'esfera i del cilindre petit. Font: pròpia.

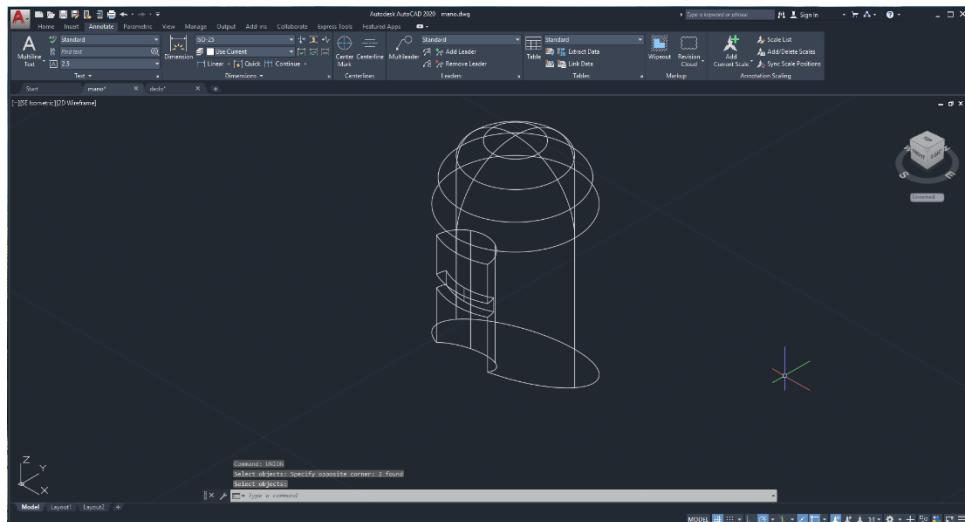


Imatge 25: Captura de la falange distal un cop feta la diferència entre els cilindres. Font: pròpia.

El següent pas va ser crear la ranura pel qual passar el fil que mouria el model de dit. Per fer-ho vaig crear dos cilindres més i vaig fer una diferència entre ells de forma que quedessin dues tires fines que vaig unir a la falange.



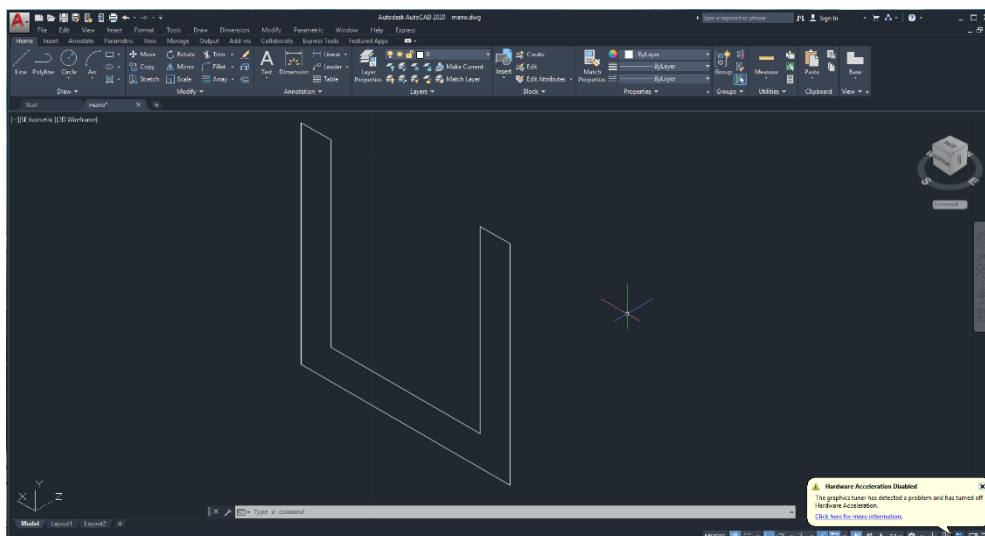
Imatge 26: Captura de la falange amb els dos cilindres que conformaran l'enganxament. Font: pròpia.



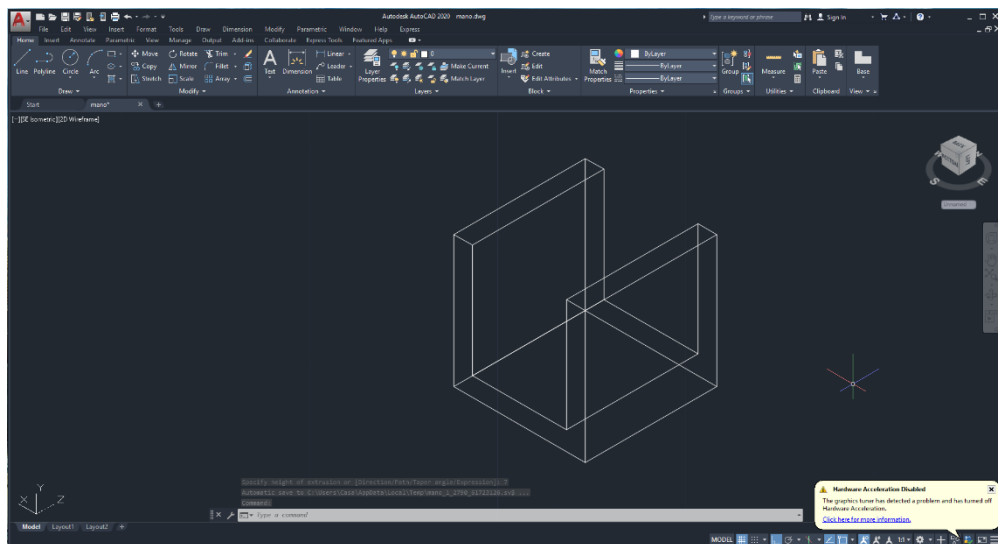
Imatge 27: Captura de l'enganxament un cop fetes la diferència i la unió.

Font: pròpia.

Per fer la unió entre els dits vaig haver de canviar la configuració del programa a plànol vertical. Vaig dibuixar una U i vaig extrusionar el disseny.

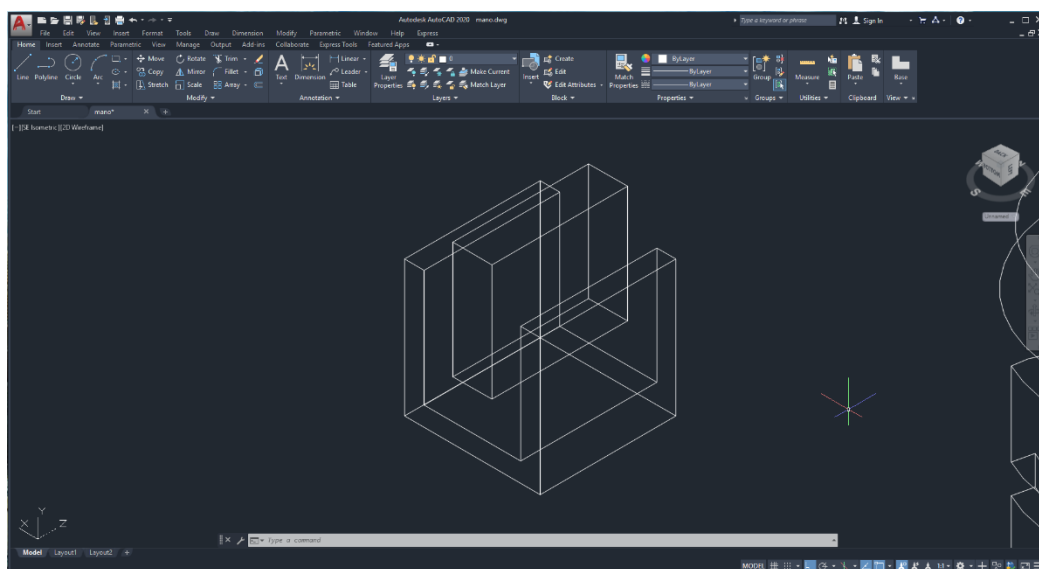


Imatge 28: Captura de l'enganxament. Font: pròpia.

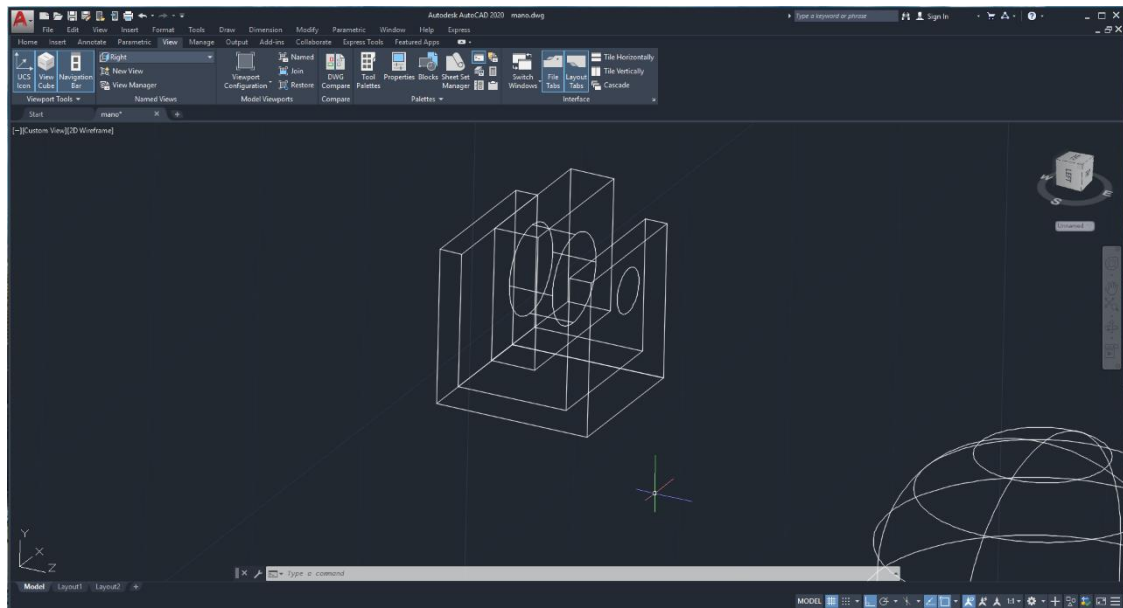


Imatge 29: Captura de l'enganxament extrusionat. Font: pròpia.

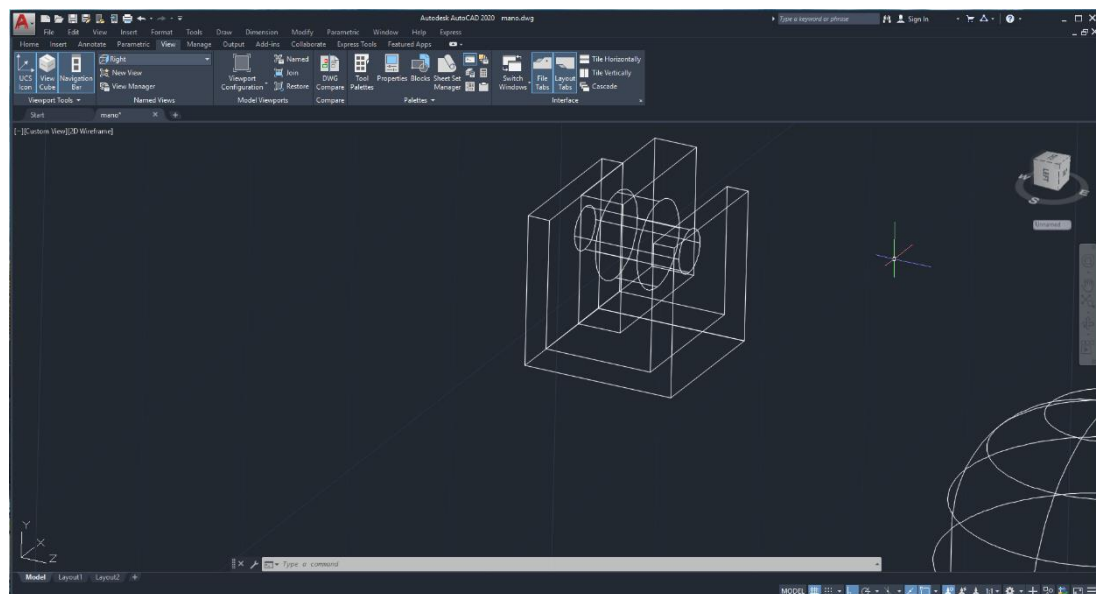
A continuació vaig crear un rectangle (que seria l'enganxament) i el vaig extrusionar. Després el vaig fusionar a la unió. Vaig tornar a canviar el plànol a horitzontal i vaig dissenyar dos cilindres, un més gran i un altre més petit. Vaig fer la diferència del cilindre gran al rectangle que havia creat per fer-hi un forat i vaig introduir el cilindre petit a aquell forat, el que seria el passador de la unió.



Imatge 30: Captura del rectangle extrusionat. Font: pròpia.



Imatge 31: Captura del forat a l'enganxament extrusionat. Font: pròpia.

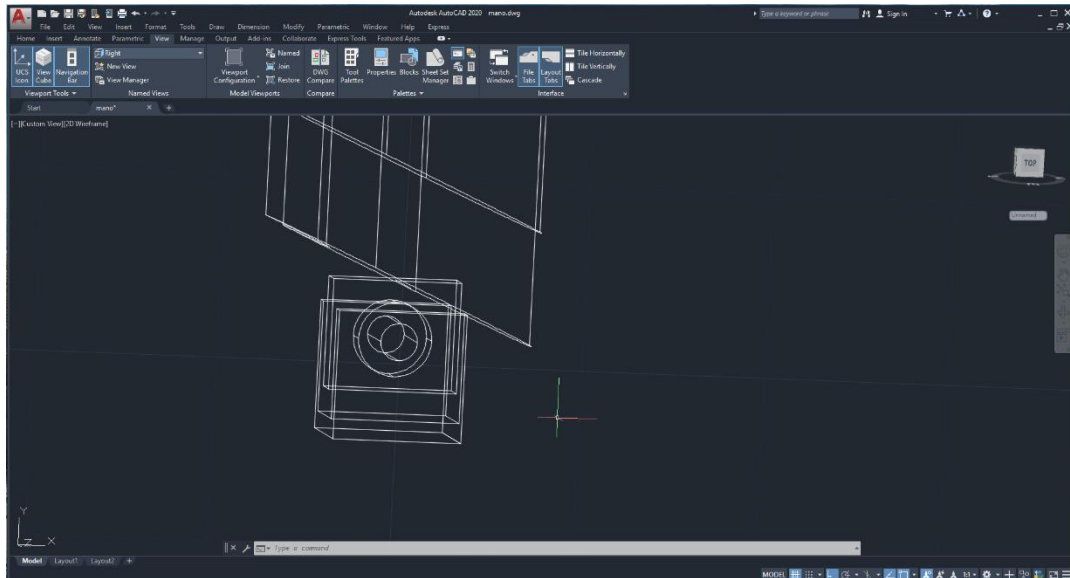


Imatge 32: Captura de la unió amb l'enganxament. Font: pròpia.

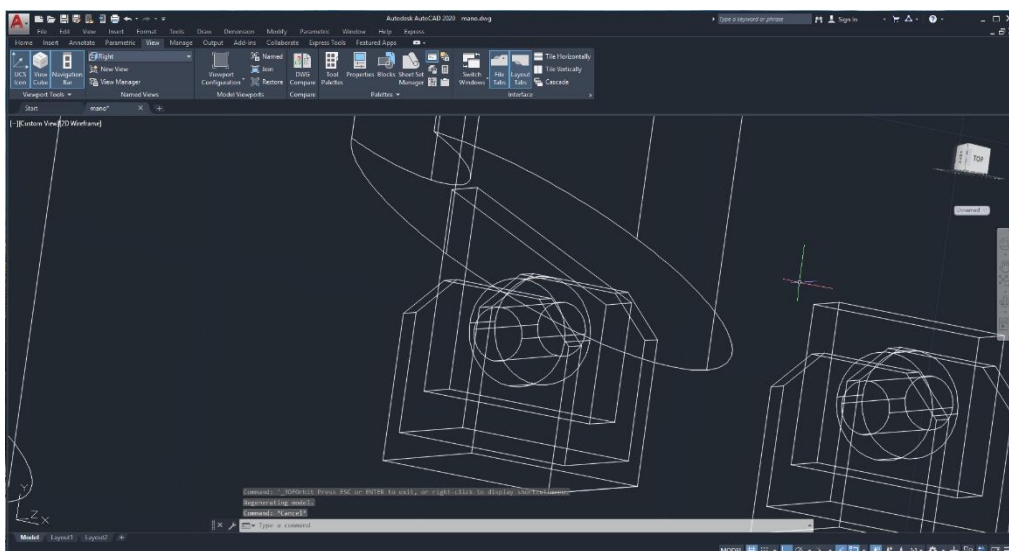
És interessant destacar que aquest tipus d'unió només pot fer-se amb una impressora 3D, que la fa a capes. Això permet que el model del dit surti de la impressora amb totes les peces unides i amb un disseny que es pugui doblegar (d'altra manera haurien de fabricar-se els components de la unió per separat, fer el forat de l'enganxament a mà i unir-los posteriorment).

Tot seguit vaig apropar la unió a la falange distal. Com la unió era plana i la base de la falange inclinada vaig haver de canviar la forma de la unió tallant els

cantons. Així quan el dit es doblegués les dues peces no es tocarien. Endemés, vaig copiar la unió per quan fes les altres falanges.



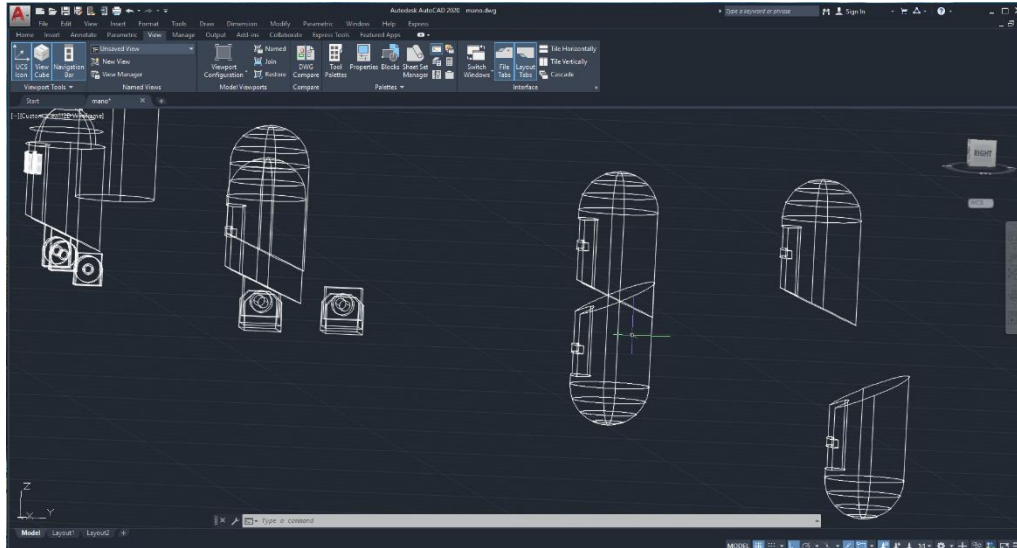
Imatge 33: Captura de la unió apropant-se a la falange distal. Font: pròpia.



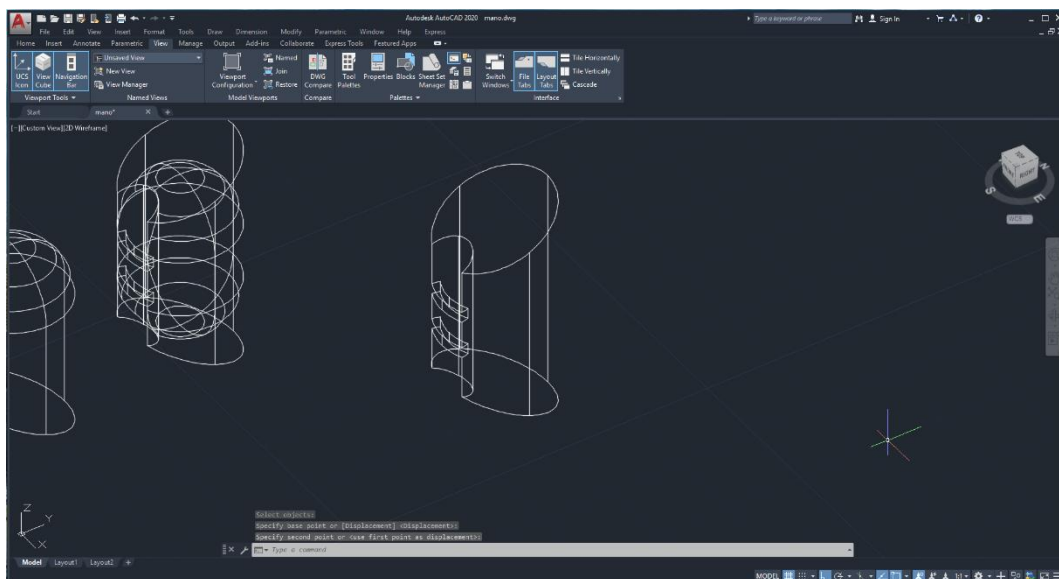
Imatge 34: Captura de la unió tallada unint-se a la falange distal. Font: pròpia.

Per fer la falange medial vaig copiar la falange distal dues vegades, vaig girar una de les còpies i vaig apropar-les situant una sobre l'altra. Al fer la següent falange a partir d'una peça anterior vaig aconseguir el mateix angle de tall. Llavors vaig unir les dues falanges mitjançant la unió que havia creat prèviament. Vaig repetir el procés per la falange proximal, però vaig fer tres còpies de la

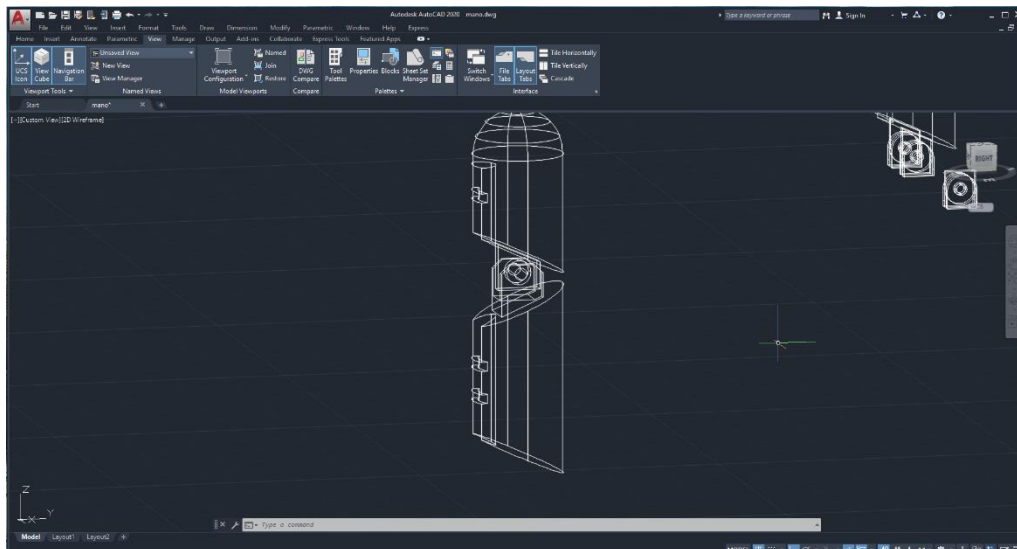
falange distal per que la peça tingués la distància adequada. A més a més, vaig tallar la base per que quedés plana.



Imatge 35: Captura de les còpies de la falange distal situades l'una sobre l'altra. Font: pròpia.

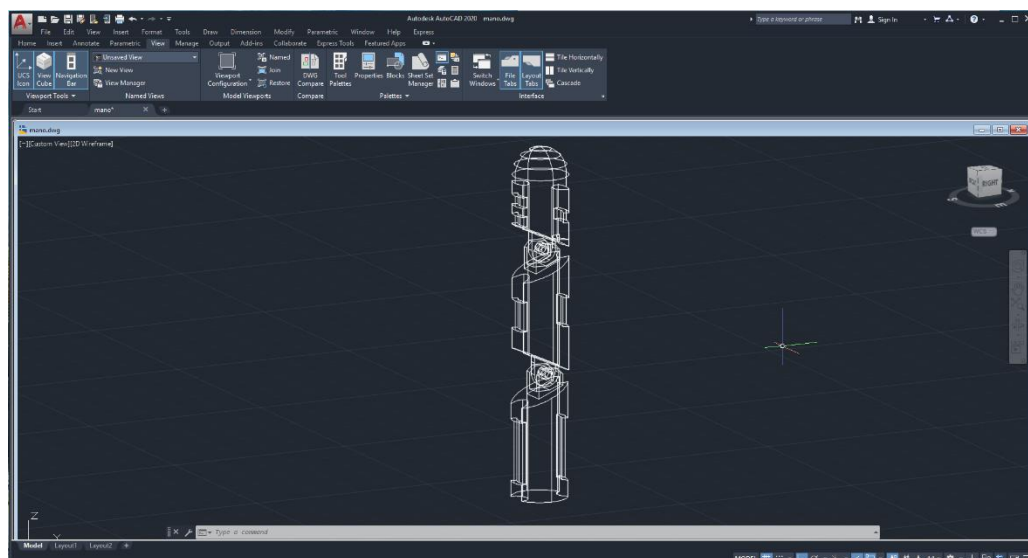


Imatge 36: Captura de la unió de les dues còpies de la falange distal per crear la falange medial. Font: pròpia.



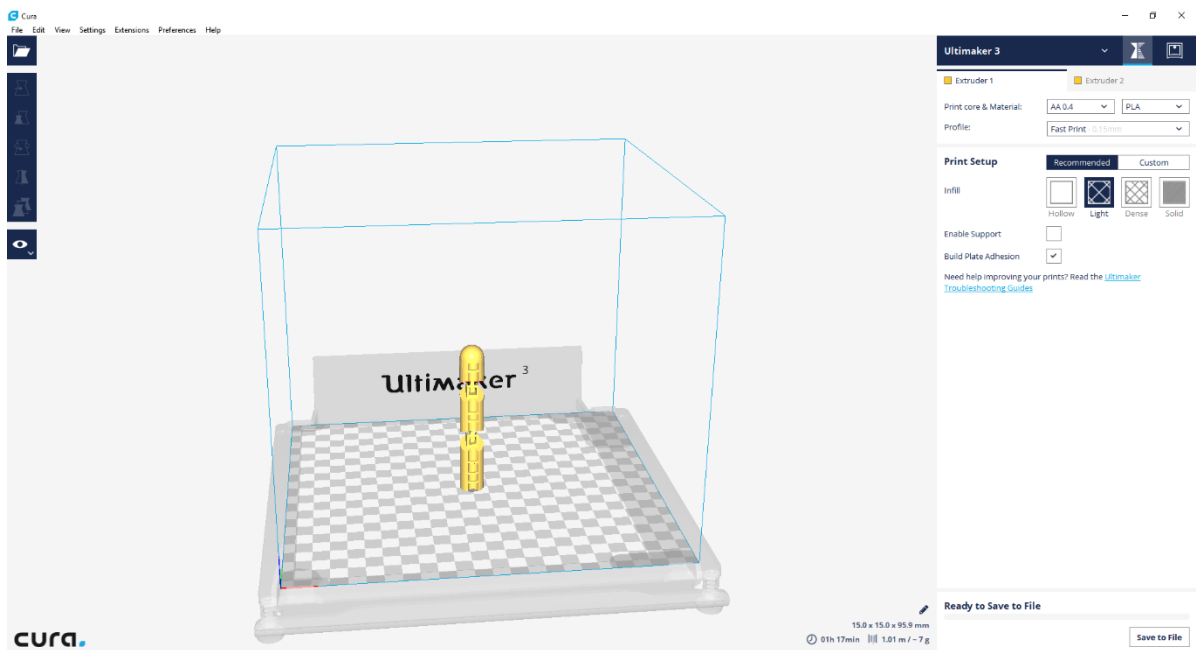
Imatge 37: Captura de la unió de dues falanges. Font: pròpia.

Després de fer simulacions, vaig adonar-me que si col·locava ranures només a la part davantera del dit, aquest no podia fer els moviments de flexió i extensió correctament. Per aquest motiu vaig canviar lleugerament el disseny i vaig afegir ranures a la part posterior. Aquest és el resultat:

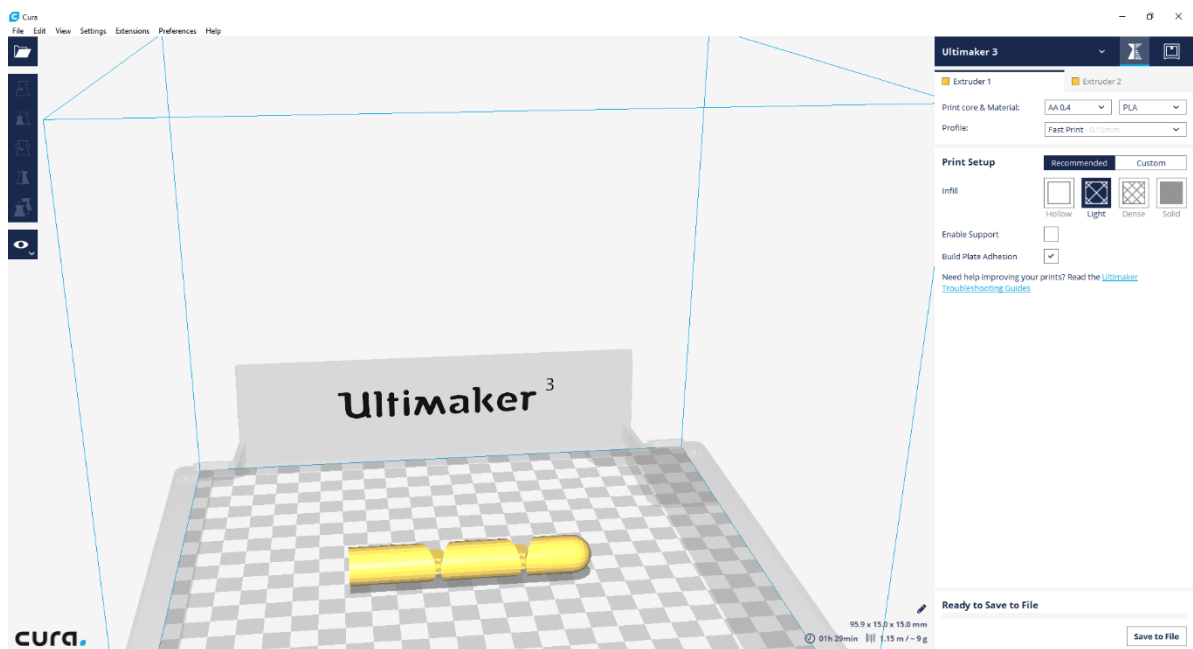


Imatge 38: Captura del disseny del dit acabat. Font: pròpia.

Els dibuixos fets en AutoCAD es guarden en una extensió .dwg. Per acabar, vaig exportar aquest arxiu a .stl i vaig obrir-lo amb el programa CURA, que és el que serveix per configurar la impressora 3D i el que permet que el disseny es pugui imprimir. A les imatges següents es veu un cub, que representa el marge d'impressió, dintre del qual està el model del dit.

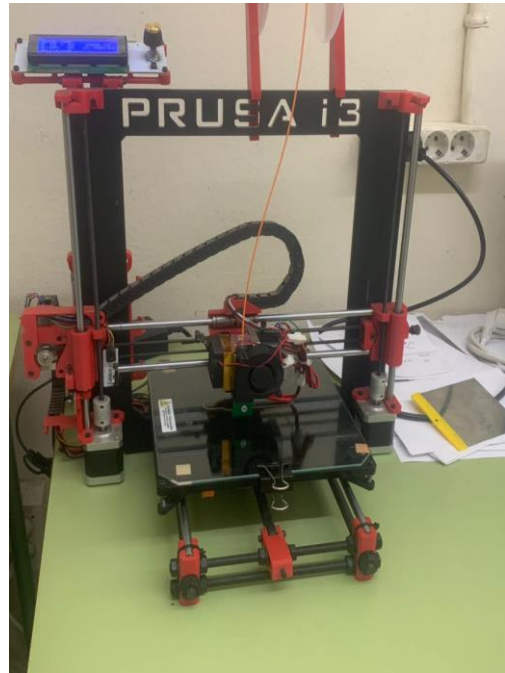


Imatge 39: Captura del model de dit orientat verticalment al programa CURA. Font: pròpia.

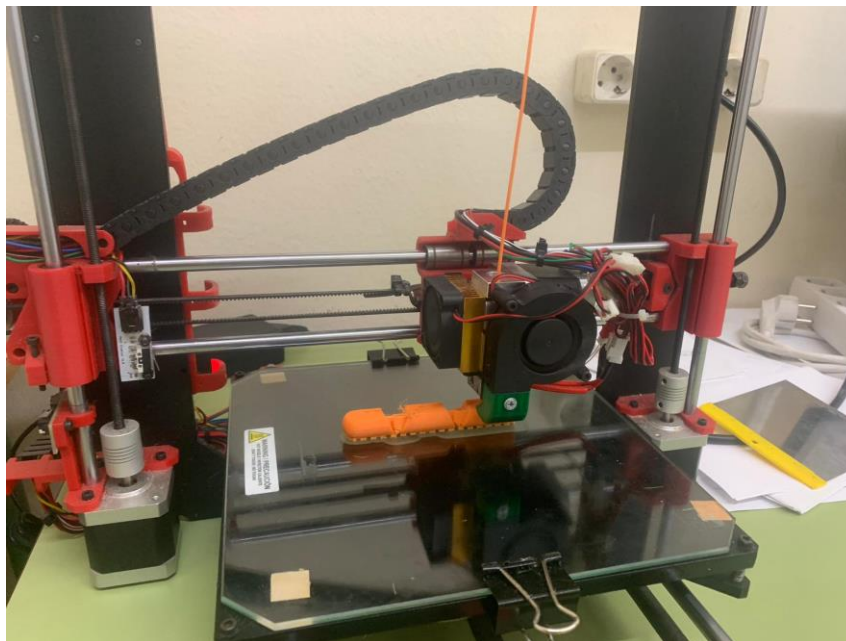


Imatge 40: Captura del model de dit orientat horitzontalment al programa CURA. Font: pròpia.

El programa CURA permet seleccionar el tipus d'impressora amb la qual es crearà el disseny (en el meu cas era una impressora Prusa i3, una impressora de codi obert que imprimeix per deposició de filament fos, és a dir, mitjançant una tira de termoplàstic fos) i com sortirà la impressió (se seleccionen paràmetres com la densitat de les capes, el tipus de plàstic...). Finalment vaig guardar el document amb tota aquesta informació a un arxiu amb una extensió .gcode, que és el que entén la impressora, i el vaig guardar en un pendrive. Com la Prusa i3 no llegeix pendrives, vaig traspasar el document a la seva targeta de memòria i la vaig inserir. La impressió va completar-se a les dues hores i mitja.



Imatge 41: *Prusa i3.* Font: pròpia.



Imatge 42: *Impressió del model del dit de plàstic.* Font: pròpia.

- CONSTRUCCIÓ DEL CIRCUIT

El circuit que vaig construir per moure el dit consta dels elements següents:

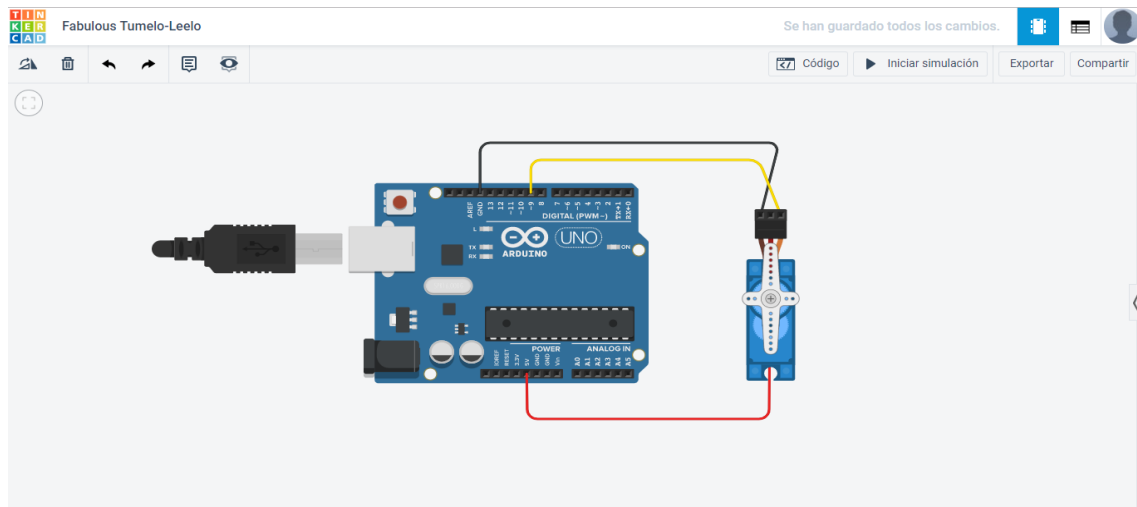
- Cables mascle-masclle. Conductors revestits d'un material aïllant amb pins a ambdós costats.
- Placa *Arduino UNO*. Arduino és una plataforma de desenvolupament de *hardware* de codi obert basat en una placa electrònica que consta d'un microcontrolador i una sèrie de pins que permeten establir connexions entre el microcontrolador i els components del circuit. El microcontrolador que utilitza Arduino és de la marca ATMEL. Aquests dispositius són circuits integrats (és a dir, circuits electrònics en els que els seus components estan situats sobre una làmina de material semiconductor) que consten d'una unitat central de processament (CPU), unitats de memòria (RAM i ROM) i interfícies d'entrada i sortida, que es connecten a perifèrics (dispositius com ordinadors, sensors...) d'entrada i sortida respectivament. Aquests microcontroladors poden emmagatzemar, llegir i executar programes (instruccions) escrits en el llenguatge de programació Arduino.

Hi ha diverses plaques Arduino, cadascuna adaptada a diferents funcions i amb diferents graus de complexitat, i la que utilitzaré en el meu treball és la placa *Arduino UNO*. Aquesta és la placa més utilitzada de totes les d'Arduino per la seva simplicitat. El seu microcontrolador és "ATmega328P", té 14 pins d'entrada i sortida digitals, 5 analògics i proporciona una potència de 5 Volts. Perquè funcioni és necessari connectar-la a un port USB o a un adaptador de corrent. Consta d'una memòria de 32 Kb.

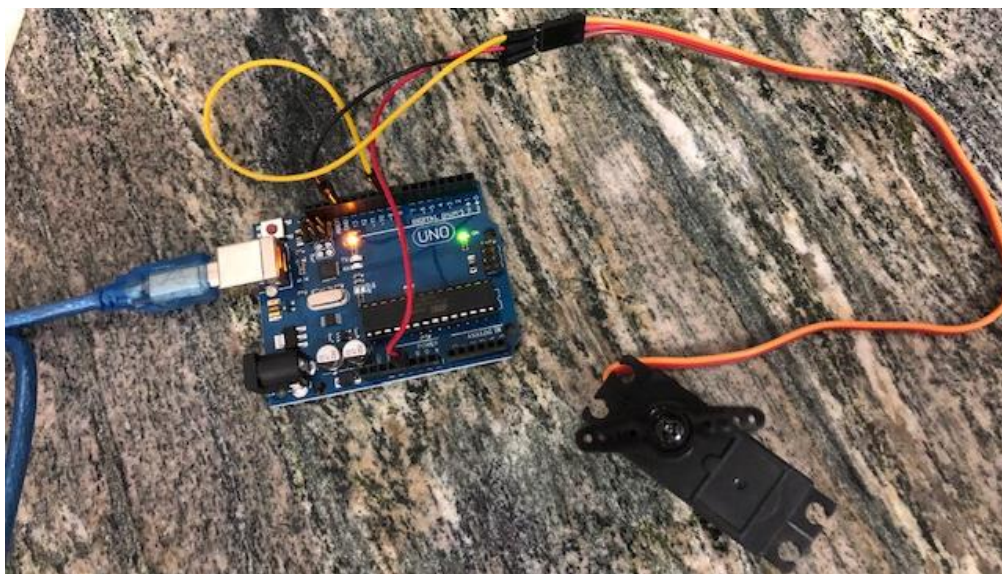
- Servomotor. És un tipus de motor que permet canviar i mantenir la posició del seu eix a cada moment.

Aquests components van permetre que el dit, que es trobava unit al servomotor mitjançant un fil, es doblegués o estirés en funció del moviment del propi servomotor, controlat pel programa gravat en la placa Arduino, que explicaré a l'apartat següent.

Tot seguit adjunto una captura de pantalla de l'esquema del circuit fet amb el programa Tinkercad i una fotografia del circuit muntat a la vida real.



Imatge 43: Captura de l'esquema del circuit que controla el model del dit de plàstic Font: pròpia.



Imatge 44: Circuit que controla el model del dit de plàstic. Font: pròpia.

- IMPLEMENTACIÓ DEL MODEL DE DIT

Per tal que el circuit funcioni, ha d'haver un programa que indiqui al servomotor que ha de girar 180°. A continuació adjunto una captura del codi fet amb el programa Arduino, que posteriorment es grava a la placa.



```

Programa_flex_sensor Arduino 1.8.7
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda

Programa_flex_sensor
#include <Servo.h>

Servo myservo; // crea el objeto servo

int pos = 0;    // posicion del servo

void setup() {
  myservo.attach(9); // vincula el servo al pin digital 9
}

void loop() {
  //varia la posicion de 0 a 180, con esperas de 15ms
  for (pos = 0; pos <= 180; pos += 1)
  {
    myservo.write(pos);
    delay(15);
  }

  //varia la posicion de 0 a 180, con esperas de 15ms
  for (pos = 180; pos >= 0; pos -= 1)
  {
    myservo.write(pos);
    delay(15);
  }
}
  
```

Imatge 45: Captura del codi utilitzat en la implementació del servomotor. Font: pròpia.

La captura mostra que el primer que vaig fer va ser crear l'objecte "myservo", que és el servomotor. Llavors vaig indicar la seva posició a 0. A continuació vaig indicar que el servo es trobava al pin 9 de la placa Arduino. Finalment, vaig escriure el que faria el programa, que és variar de la posició 0 a la 180 (que és un gir de 180°), amb una espera de 15 milisegons entre cada gir.

El dit, per tant, va moure's a causa del gir del servomotor, que estava unit a la pròtesi per mitjà de fil. Vaig situar el model de dit, el servomotor i la placa Arduino a una capsula feta d'acer inoxidable. Aquesta és la maqueta:



Imatge 46: Maqueta del model del dit de plàstic. Font: pròpia.

4.2. DISSENY, IMPRESSIÓ, ENTRENAMENT I ESTIMULACIÓ DEL MODEL DE DIT BIÒNIC

Per tal de fer aquesta part experimental, vaig estar com a visitant una setmana al centre d'investigació IBEC (Institut de Bioenginyeria de Catalunya) on, amb l'ajuda d'investigadors, vaig imprimir diversos models de dit (on situar l'anell de cèl·lules) amb diferents materials flexibles i vaig fer les proves amb el constructe cel·lular.

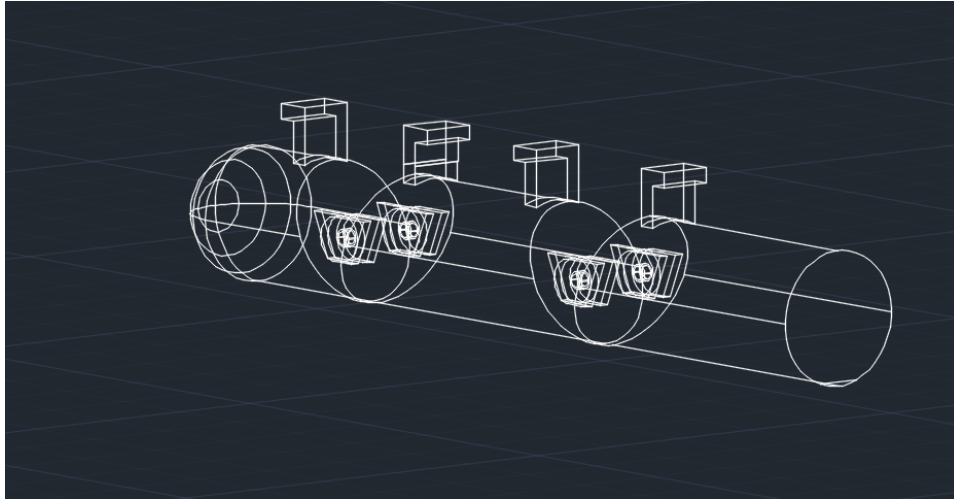
Abans de començar a realitzar la part pràctica del meu treball vaig fer uns cursos introductoris sobre seguretat al laboratori, on també vaig aprendre els diferents materials de laboratori i les seves funcions. A l'IBEC vaig treballar principalment a tres laboratoris: el primer constava d'una impressora per estereolitografia, el segon d'una per direct ink writing i el tercer, denominat biospace, era un espai amb diferents cultius, entre ells les cèl·lules que vaig utilitzar al meu treball.

- DISSENY

Jo havia dissenyat diferents models de dit amb AutoCAD, tots pensats per imprimir-se amb material flexible i amb uns suports ideats per situar l'anell de cèl·lules al voltant. A l'IBEC vam estudiar els avantatges i desavantatges de cadascun a l'hora d'implementar-los com a pròtesis amb cèl·lules. Els diferents dissenys que vaig fer són:

- Dit articulat

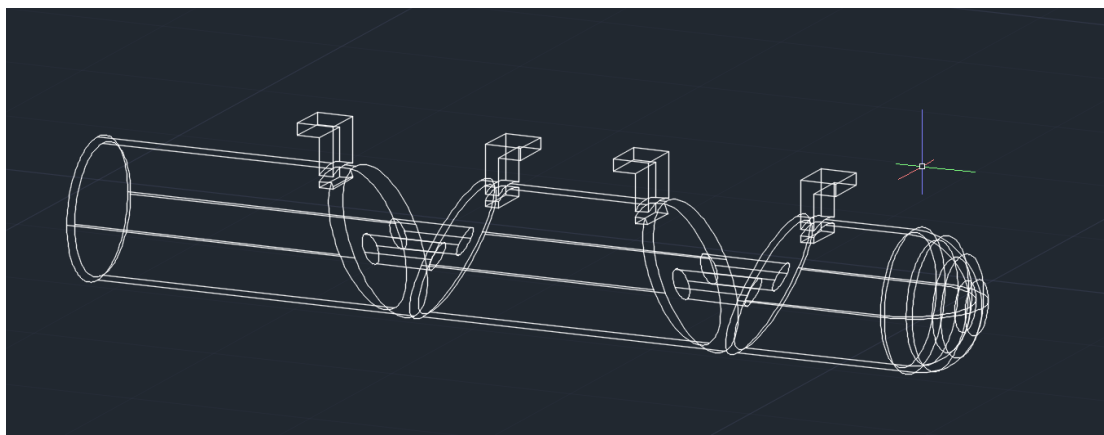
Aquest dit és molt similar al disseny del dit robòtic, però difereix en les unions (en té dos a cada falange) i en els suports. A més, no té les ranures destinades a subjectar el fil que mouria la pròtesi, perquè aquesta no la mourien uns fils subjectats a uns servomotors, sinó un anell de cèl·lules musculars.



Imatge 47: Captura del disseny del dit articulat acabat. Font: pròpia.

- Dit articulat v2

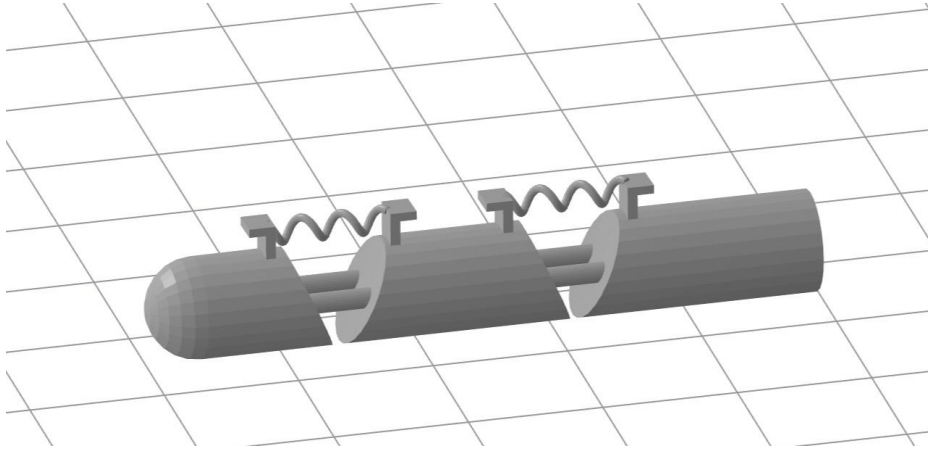
Aquest dit és una versió de l'anterior. Al ser tota l'estructura més petita, la distància entre els suports és d'1 cm en comptes de de 2 cm i les unions entre les falanges no són una junta, sinó una columna vertical a cada banda. Primer vam fer-lo foradat, però després de la impressió per estereolitografia vam veure que el líquid no polimeritzat quedava a dins, pel que el vam omplir de nou. És igual al disseny del dit articulat en els altres aspectes.



Imatge 48: Captura del disseny del dit articulat v2 acabat. Font: pròpia.

- Dit articulat v3

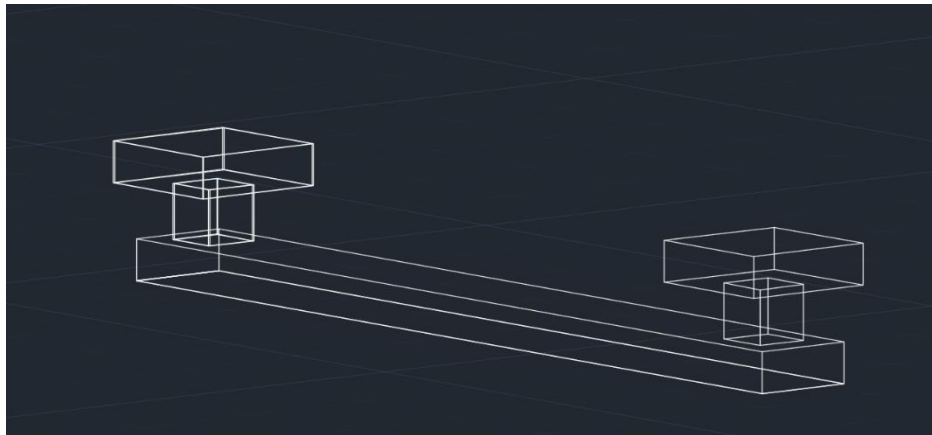
Aquest model és igual que l'anterior amb l'excepció que li vam afegir dues molles per poder mesurar la força que hauria de fer l'anell al contraure's.



Imatge 49: Captura del disseny del dit articulat v3 acabat. Font: pròpia.

- Dit pla

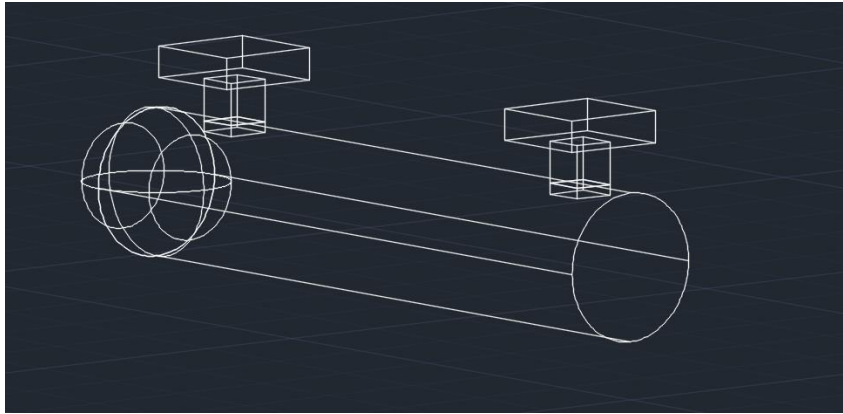
Aquest disseny va estar pensat per ser lleuger i fàcil de doblegar, ja que, en principi, l'anell de cèl·lules tindria poca força i era molt possible que no fos capaç de moure els altres models. És un prisma quadrangular amb dos suports a cada banda.



Imatge 50: Captura del disseny del dit pla acabat. Font: pròpia.

- Dit arrodonit

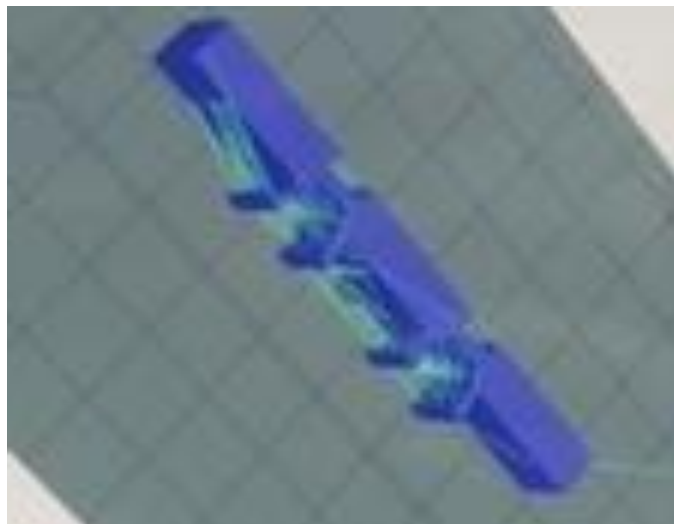
Aquest disseny sense articular és com el dit pla però en comptes de tenir un prisma com a base aquesta és un cilindre amb la punta arrodonida; més similar a una pròtesi de dit.



Imatge 51: Captura del disseny del dit arrodonit acabat. Font: pròpia.

- Dit pla articular

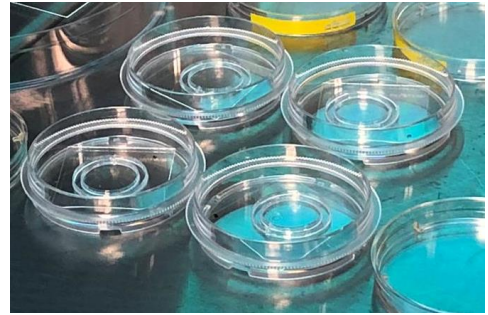
Aquest disseny el vam fer a l'IBEC, amb la finalitat que s'ajustés més a l'anell de cèl·lules i el poguessin contraure amb més facilitat per la seva grandària i la separació entre els suports, d'uns 7 mm.



Imatge 52: Captura del disseny del dit pla articular acabat. Font: pròpia.

- Motlles petits

Els motlles també els vam dissenyar a l'IBEC, després de decidir quins models utilitzaríem per la implementació dels actuadors biològics. Tenen forma circular perquè s'han obtingut millors resultats amb figures més similars als sistemes biològics (s'ha vist que en motlles rectangulars les cèl·lules no creixen a les cantonades). Mesuren 1,7 cm de diàmetre exterior. Vam fer 4 motlles.



Imatge 53: Motlles petits impresos.

Font: pròpia.

- Motlle gran

Aquest motlle no és ben bé circular, però té les puntes arrodonides. Mesura 3,5 cm de diàmetre exterior.



Imatge 54: Motlle gran imprès. Font: pròpia.

- IMPRESSIÓ

Com ja he mencionat, a l'IBEC hi havia dos tipus d'impressora 3D que utilitzaven diferents mètodes d'impressió.

A continuació els explicaré amb més detall i després explicaré model per model quina va ser l'opció de fabricació que vam triar i per què.

Convé aclarir que cap de les dues impressores les vaig utilitzar per imprimir material biològic (encara que podria fer-se), ja que jo vaig emprar uns motlles que sí vaig imprimir en 3D per donar forma a l'anell de cèl·lules.

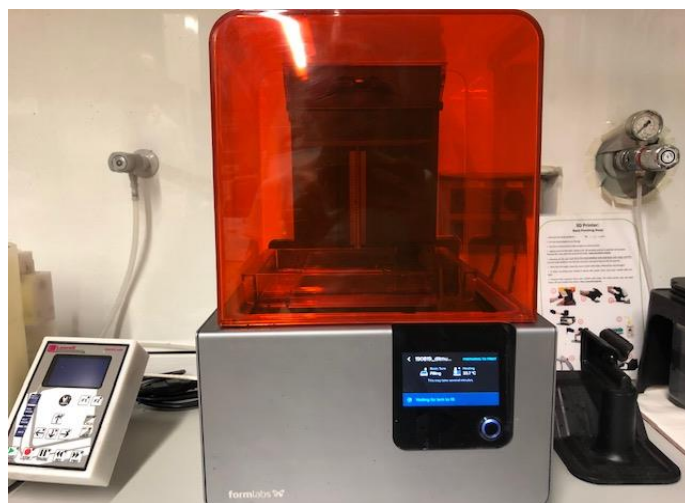
També és important mencionar que la utilització de materials flexibles en la implementació d'actuadors biològics dona molts millors resultats que emprar materials rígids. Tot i que encara no se sap exactament per què, diverses teories apunten a la major similitud d'aquests materials amb els sistemes biològics, el que fa que les cèl·lules es desenvolupin correctament.

- Impressora per estereolitografia (Form 3 de Formlabs)

L'estereolitografia ja l'he explicat, així que em limitaré a remarcar el procés d'impressió de la impressora de l'IBEC concretament.

Després d'editar els paràmetres d'impressió amb el programa PreForm, vam haver de col·locar el cartutx amb la resina flexible (de la qual no sabíem les seves propietats exactes al no ser encara un material comercialitzat) a la impressora. Un cop ho vam haver fet, vam obrir un tap situat a la part posterior de la màquina perquè passés l'aire durant la impressió, el que impediria que es fes el buit i afavoriria la caiguda del polímer.

Aquesta impressora imprimia els dissenys al revés i, a més, generava un motlle amb uns suports que permetien imprimir les estructures inclinades. Això beneficiava el curat (o assecat) del polímer. Reprenent el procés d'estereolitografia, aquest consisteix a assecar el polímer mitjançant raigs UVA. Inclinar el disseny disminuïa la superfície d'impressió, el que assegurava que, abans de passar a la següent capa, l'anterior s'havia assecat correctament i podia servir de base.



Imatge 55: Impressora per estereolitografia de l'IBEC. Font: pròpia.

Les peces impreses amb aquest aparell requerien un acabat que assegurés que el model s'havia assecat correctament. Primer vam separar el disseny de la safata amb una espàtula i vam netejar els estris amb isopropanol. També vam fer dos banys a la peça amb isopropanol, cadascun de deu minuts. L'isopropanol elimina el polímer, pel que els banys van ajudar a que en els dissenys no

quedessin residus d'impressió. Després vam assecar les peces amb una pistola de nitrogen a pressió i vam ficar-lo a un forn de raigs UVA per fer el curat final.



Imatge 56: Bany d'isopropanol.

Font: pròpia.

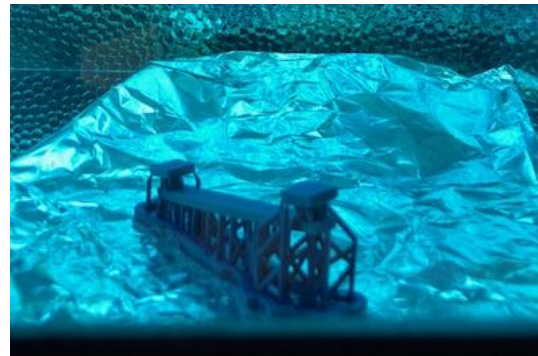


Imatge 57: Pistola de nitrogen a pressió. Font: pròpia.



Imatge 58: Forn de raigs UVA.

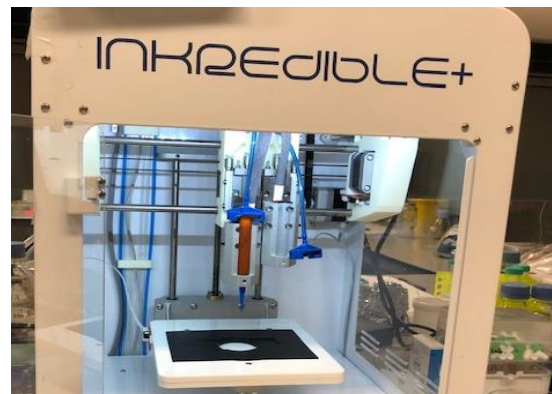
Font: pròpia.



Imatge 59: Peça al forn de raigs UVA. Font: pròpia.

- Impressora per direct ink writing (INKREDIBLE + de CELLINK)

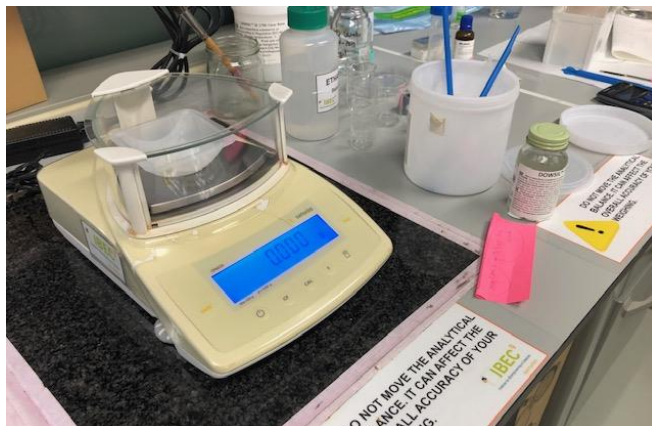
Abans d'utilitzar Inkredible + vam haver d'obrir els dissenys d'AutoCAD (en format .stl) amb el programa slic3r per editar els paràmetres d'impressió. També vam haver de canviar manualment la velocitat d'impressió modificant el .gcode (extensió d'un llenguatge de programació) amb el



Imatge 60: Impressora per direct ink writing amb la xeringa i PDMS. Font: pròpia.

programa Repetier-Host. Quan vam imprimir amb aquesta impressora vam utilitzar un material anomenat PDMS (ja mencionat en l'apartat teòric experimental), que requeria un preparat.

Vam pesar 10 grams de la silicona i 0,5 grams d'un líquid que el polimeritza (o asseca) i els vam barrejar amb l'ajuda d'una punta d'agulla. A continuació vam ficar la barreja a una xeringa que vam introduir a la impressora.



Imatge 61: Preparació del PDMS. Font: pròpia.

Un cop fet això, vam haver de connectar la màquina a l'ordinador (que tenia els dissenys) i de calibrar la impressora. Els passos eren els següents:

- Es provava l'agulla (TURN ON PH1) per veure que extrudia correctament.
- Es calibraven els eixos (HOME AXES).
- Es calibrava l'altura (MOVE Z i CALIBRATE Z).

Per últim s'iniciava la impressió.

Cal dir que el mètode d'impressió de la Inkredible + és el de dissenyar un perímetre i després omplir-lo. No és capaç de generar estructures de suport, al contrari que la que utilitza estereolitografia. Això no va permetre imprimir alguns dels dissenys realitzats perquè l'aparell no pot fabricar estructures sense base (com alguns dels suports per l'anell de cèl·lules).

El PDMS també requereix un assecat després de la impressió, que vam fer a un forn a uns 65°C.



Imatge 62: Forn. Font: pròpia.

Com ja he explicat els dos tipus d'impressió i els processos que se segueixen per imprimir amb els aparells concrets que tenia l'IBEC, passaré a explicar quins

dels dissenys exposats anteriorment vam imprimir, amb quina impressora i per què.

- Dit articulat

Aquest dit era el més gran de tots els dissenys anteriors (quasi 11 cm de punta a punta) pel que, encara que no sabem si l'anell de cèl·lules tindria força suficient per moure'l, vam decidir imprimir-lo. Vam escollir l'estereolitografia com a mètode perquè, com ja he explicat, la impressora per direct ink writing no pot fer dissenys sense base al no generar estructures de suport, pel que vam pensar que no podria imprimir els suports per l'anell de cèl·lules correctament.

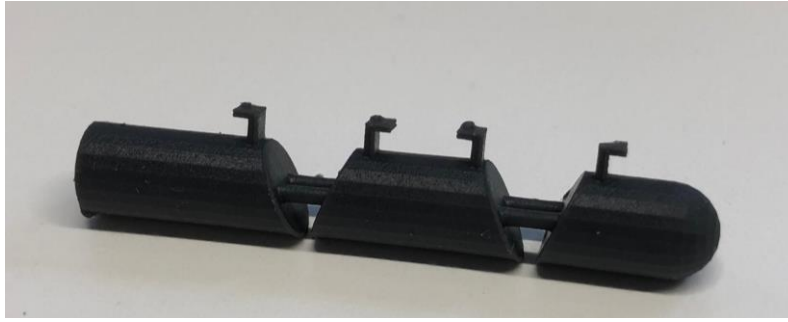
La impressió va realitzar-se correctament, però quan vam treure les estructures de suport la unió entre falanges es va trencar. Això ens va fer pensar que el tipus d'unió d'aquest model no era adequada pel material flexible amb el qual estàvem imprimint, pel que vam modificar el disseny original i vam fer el dit articulat v2.



Imatge 63: Model de dit articulat imprès per estereolitografia amb les estructures de suport. Font: pròpia.

- Dit articulat v2

Com ja he mencionat, aquest model és una versió de l'anterior. Vam fer-lo més petit (5 cm de llargària) per disminuir la distància entre els suports i que l'anell de cèl·lules pogués fer-lo contraure amb més facilitat. Vam fer-lo foradat amb la mateixa finalitat, ja que foradar-lo en disminuiria el pes. Tanmateix, això ho vam tornar a canviar pel problema que vam tenir. Finalment, vam canviar els enganxaments simplificant-los a una columna a cada banda per evitar el trencament. Vam decidir imprimir-lo per estereolitografia també.

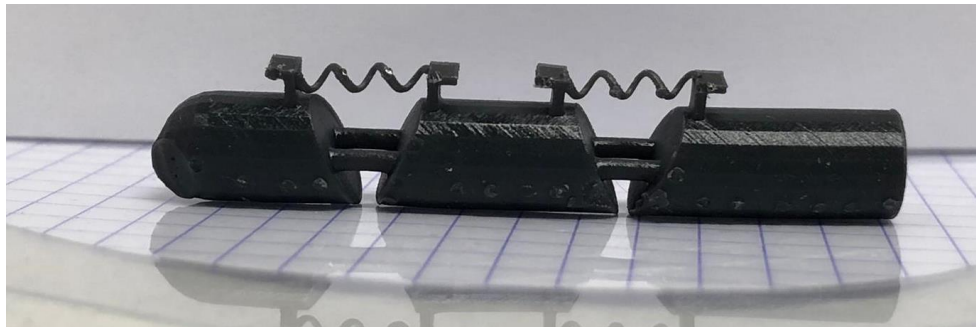


Imatge 64: Model de dit articulat v2 imprès per estereolitografia.

Font: pròpia.

- Dit articulat v3

Aquest model el vam fer quan vam veure que l'anterior s'imprimia sense problemes. És el mateix que el dit articulat v2, imprès per estereolitografia també, però amb molles.



Imatge 65: Model de dit articulat v3 imprès per estereolitografia.

Font: pròpia.

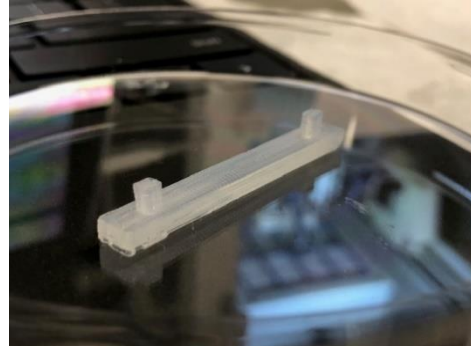
- Dit pla

Aquest model el vam imprimir amb les dues impressores perquè, al ser el disseny més lleuger i petit, vam pensar que seria el que es mouria amb més facilitat pel constructe cel·lular. Tanmateix, al model que vam imprimir per direct ink writing vam modificar-li els suports (per les limitacions ja al·ludides) i vam reduir-li la mida en un 50%. Això ho vam fer perquè els suports del dit estaven molt allunyats, el que podria ser un problema si fèiem créixer un anell de cèl·lules tan gran. Estudis han demostrat que, en l'estat preliminar en el que estan les

investigacions en aquest camp, la creació d'un anell cel·lular massa gran podria suposar problemes en el creixement del constructe, perquè, entre altres motius, no a totes les cèl·lules els arribarien els nutrients o la ja explicada contracció.



Imatge 66: Model de dit pla imprès per estereolitografia. Font: pròpia.



Imatge 67: Model de dit pla imprès per direct ink writing. Font: pròpia.

- Dit arrodonit

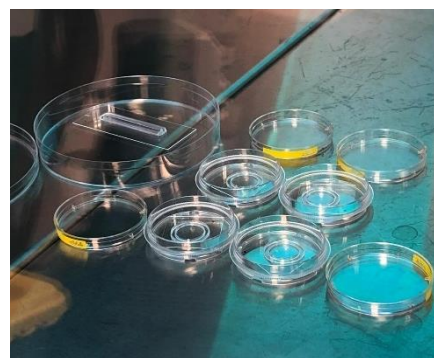
Com aquest model de dit era similar al dit pla però més pesant i, a més, mancava d'articulacions, vam decidir no imprimir-lo, ja que vam suposar que l'anell de cèl·lules no seria capaç de moure'l.

- Dit pla articulat

Aquest disseny, una barreja entre el dit pla i l'articulat, pretén tenir la lleugeresa del pla i la separació entre articulacions de l'articulat, tot destinat a facilitar que l'anell de cèl·lules el pogués. Vam imprimir-lo per direct ink writing perquè el PDMS és més flexible que el material de l'altra impressora i també seria més fàcil fer-lo contraure's. Vam fer-ne dues amplades: un de 3 mm i un altre de 5 mm.

- Motlles

Aquests motlles eren necessaris per donar forma a l'anell de cèl·lules durant el seu creixement. Vam imprimir-los per direct ink writing perquè el PDMS és més flexible que el material que utilitzava la impressora per estereolitografia i això afavoreix el desenvolupament de les cèl·lules.



Imatge 68: Motlles impresos per direct ink writing. Font: pròpia.

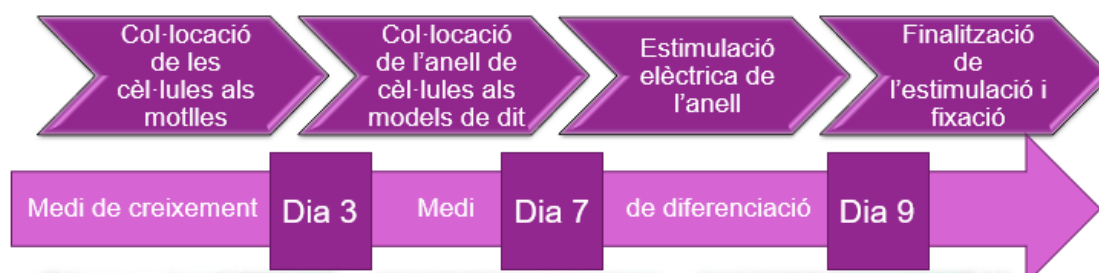
Finalment vam decidir quins dels models impresos serien més adients per situar-hi l'anell de cèl·lules. Per fer-ho, bàsicament vam mirar la distància que hi havia entre els suports i quin es doblegava amb més facilitat. En quant al primer paràmetre, com ja he mencionat amb anterioritat, eren ideals els suports més pròxims entre sí per experiments fets amb anterioritat. Respecte a la flexibilitat del disseny, vam fer unes mesures amb el flex sensor explicades a l'apartat "calibratge dels models amb un flex sensor controlat per Arduino".

Els models triats finalment van ser quatre. Els impresos per direct ink writing i amb PDMS: el dit pla 50% i el dit pla articulat a dues altures. Els impresos per estereolitografia: dit articulat v3.

- CONSTRUCTE CEL·LULAR

Per la creació del constructe cel·lular vam seguir un protocol similar al de l'article dels investigadors de l'IBEC que està explicat a la secció teòrica experimental del treball. Tanmateix, hi ha unes quantes diferències, pel que descriuré el procés que vam seguir.

Vam utilitzar mioblasts de ratolí (C2C12) situats a un hidrogel que proporciona un entorn adequat a les cèl·lules per la seva supervivència. Aquest hidrogel ha de ser compacte per que els arribin els nutrients a totes les cèl·lules. És interessant mencionar que és preferible utilitzar cèl·lules joves que velles, perquè les primeres creixen, es diferencien i responen als estímuls elèctrics amb més taxa d'èxit. Els mioblasts es compren, i venen congelats. Un cop s'han descongelat, s'han de situar a un medi que es diu medi de creixement (també se l'anomena GM o growth medium) perquè proliferin. S'han de deixar en aquest medi i en el motlle adequat (depenent de la forma que volem donar-los) durant tres dies. És important que no creixin massa poc, perquè llavors no tenen força suficient per moure les pròtesis, però tampoc poden créixer massa, perquè els nutrients no arriben a totes les cèl·lules. Quan hagin passat els tres dies, el ja format anell de cèl·lules ha de situar-se a "l'esquelet" i ha d'afegir-se-li el medi de diferenciació (DM o differentiation medium). Al tercer dia d'estar en aquest medi (el setè des del traspàs als motlles) comença l'estimulació elèctrica i al quart és l'estimulació definitiva.



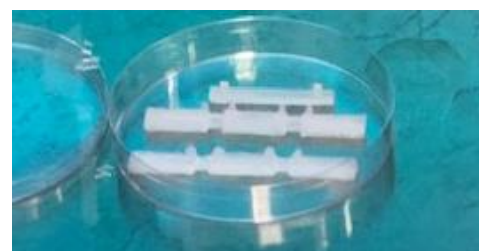
Imatge 69: Esquema del procés d'implementació dels anells. Font: pròpia.

Nosaltres vam situar els mioblasts als motlles amb el medi de creixement un divendres. Durant el cap de setmana van proliferar i el dilluns vam fer el traspàs als motlles, que explicaré a continuació.

Abans de posar els anells als esquelets els vam acabar de curar ficant-los deu minuts a la campana biològica (espai de treball amb materials biològics, que consta d'un flux laminar cap a l'exterior per evitar la contaminació de les mostres de l'interior) sota un llum ultraviolat. Això ho vam fer perquè és de gran importància que els esquelets estiguin totalment secs per no danyar les cèl·lules.



Imatge 70: Col·locació de les cèl·lules als motlles. Font: pròpia.

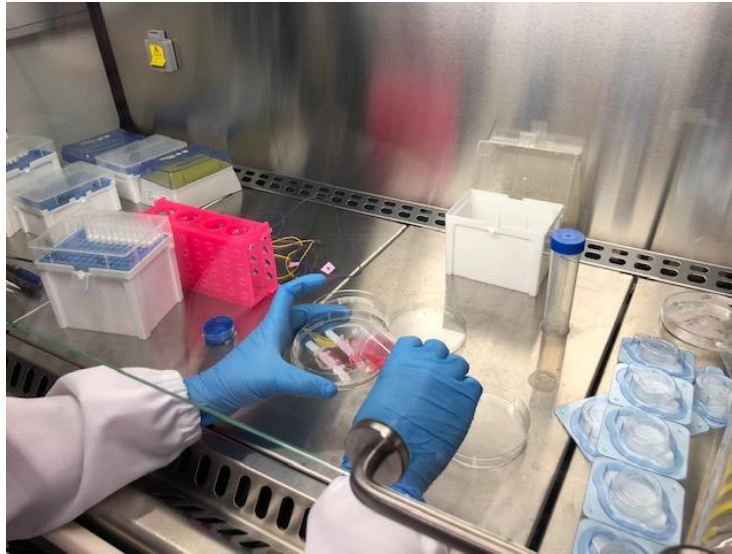


Imatge 71: Models de dit sota raigs UVA. Font: pròpia.

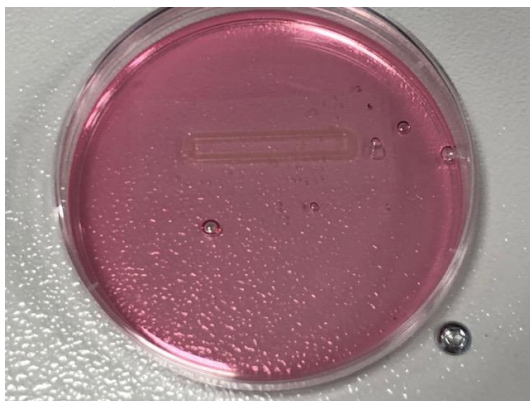
A més, a tot el que ficàvem a la campana biològica l'havíem d'aplicar etanol al 70% que, per les seves propietats antisèptiques, evita la contaminació de les mostres.

Treballant sempre a la campana biològica vam posar el medi de diferenciació a la placa on estaven els models de dit escollits i vam observar que flotaven una mica. Això seria un problema si, un cop situats els anells, aquests quedessin per sobre del medi, el que evitaria que es diferenciessin correctament. A continuació vam treure les cèl·lules de la càmera de temperatura on estaven (a 36 °C/37 °C). Amb dues pinces i amb molta cura vam traspasar els cinc anells de cèl·lules als models corresponents. Vam situar dos anells a cada model excepte al dit pla, al qual vam situar només un. Com pot veure's a les imatges següents, al principi

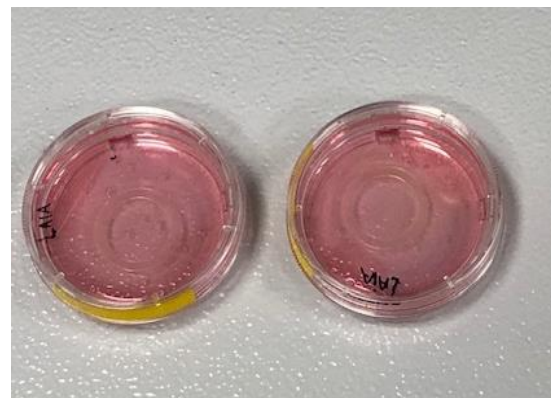
els anells no quedaven tensats als suports, però unes hores més tard pot observar-se que s'havien contret al voltant de les estructures.



Imatge 72: Col·locació del medi de diferenciació a la placa on estaven els anells. Font: pròpia.



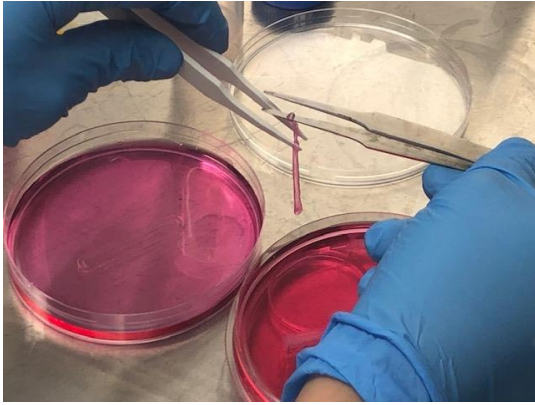
Imatge 73: Cèl·lules musculars als motlles (I) Font: pròpia.



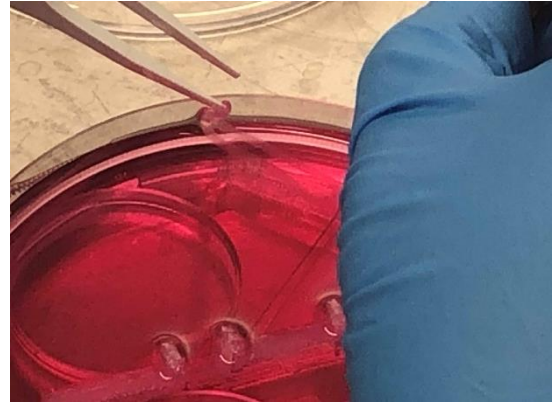
Imatge 74: Cèl·lules musculars als motlles (II) Font: pròpia.



Imatge 75: Extracció dels anells de cèl·lules dels motlles. Font: pròpia.



Imatge 76: *Traspàs de l'anell al medi de diferenciació.* Font: pròpia.



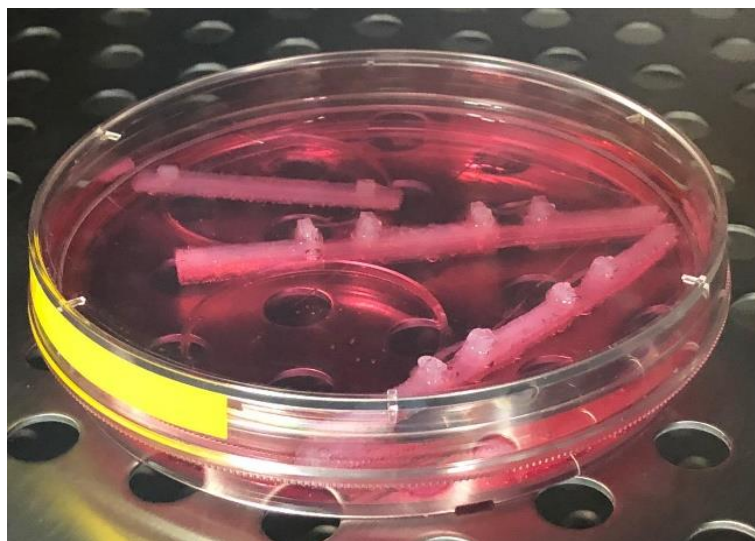
Imatge 77: *Traspàs de l'anell al model del dit.* Font: pròpia.



Imatge 78: *Anells recentment traspassats als models (I).* Font: pròpia.



Imatge 79: *Anells recentment traspassats als models (II).* Font: pròpia.

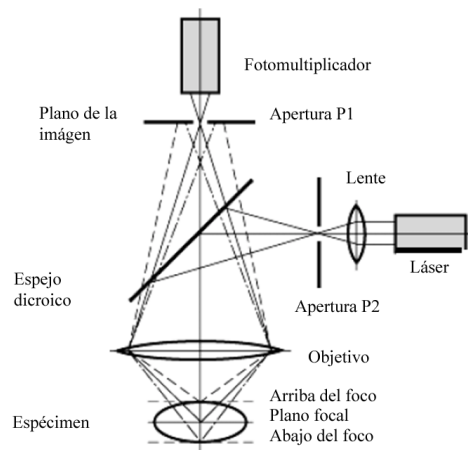


Imatge 80: *Anells traspassats als models unes hores després (més tensats).* Font: pròpia.

Tot i que els anells van estimular-se fins el 4 de setembre (el dia quatre en el meu eix cronològic equival al 30 d'agost, pel que els anells van estimular-se durant nou dies), no vam observar cap contracció. Això no vol dir que no les hagués, però sí que, d'haver-les, no eren suficientment fortes com per veure-les a ull nu.

Per analitzar l'estructura microscòpica dels anells de cèl·lules vam escollir els anells situats al model de dit pla articulat d'altura 3 mm i els dels dit articulat amb molles, encara que podríem haver triat qualsevol dels models.

El microscopi que vam utilitzar s'anomena confocal. És un tipus de microscopi òptic que emprava un làser com a font de llum, el que permet veure amb més intensitat els colorants fluorescents. Un dels elements característics del microscopi òptic és el "pinhole", un diafragma que només permet el pas de la llum provinent del pla de la mostra que s'estigui observant. Això n'augmenta el contrast i la qualitat de la imatge, ja que elimina altres fonts de fluorescència. El microscopi pren imatges per capes. En el nostre cas prenia una imatge cada deu micròmetres fins als 200 micròmetres de la mostra.

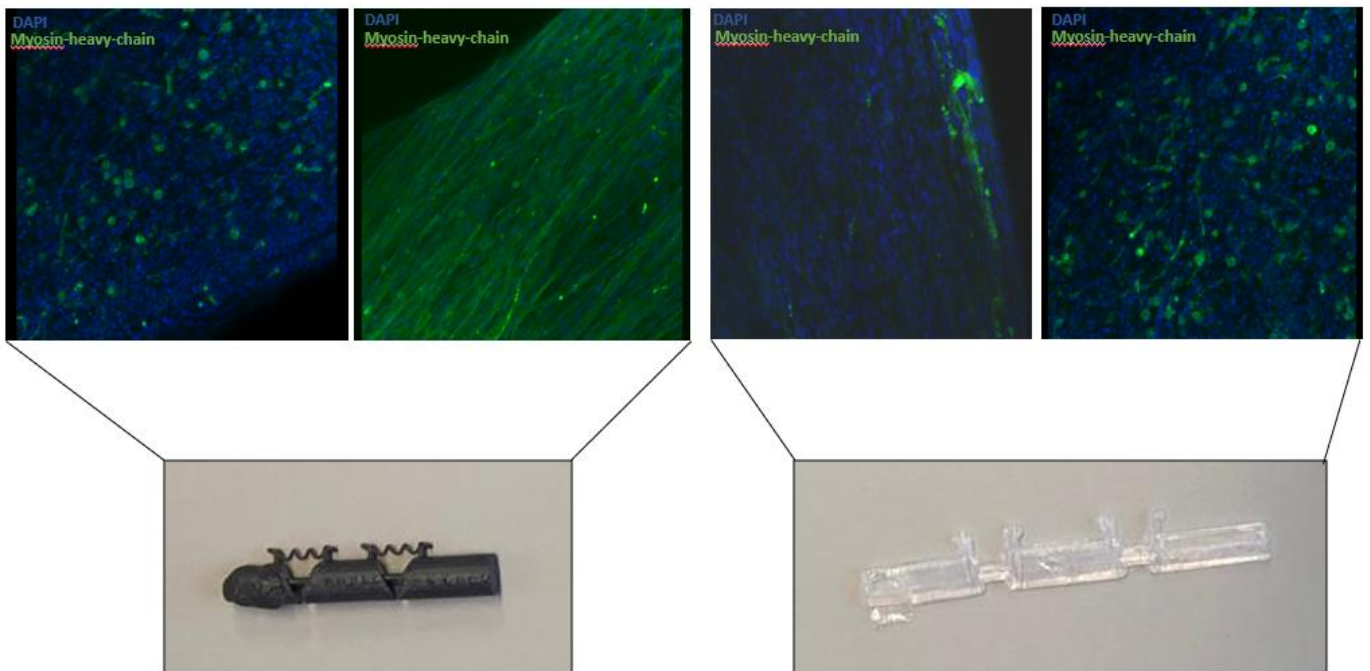


Imatge 83: Estructura del microscopi confocal. Font: https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Esquema-de-funcionamiento-de-un-Microscopio-Confocal-laser-Tomado-de-Baccallao_fig4_314113398

La tècnica que vam emprar és la immunofluorescència, i l'objectiu que teníem era veure si els miotubs estaven alineats. Això ens interessava perquè l'alineació dels miotubs i la força amb la qual els anells són capaços de contraure's són directament proporcionals. Les imatges que vam prendre d'ambdós anells van mostrar que els miotubs tenien una alineació correcta, el que ens va portar a suposar que potser els anells sí que responien a la estimulació elèctrica, però es contreien amb tan poca força que el moviment no era visible a l'ull humà.

La immunofluorescència és una tècnica en la qual s'empren anticossos units a substàncies fluorescents. El primer que vam haver de fer va ser "fixar" les mostres, al dia onze en el medi de diferenciació. Per fer-ho vam utilitzar

paraformaldehid diluït al 4%, que bloqueja les proteïnes de tal forma que evita que es reproduïxin, el que mata les cèl·lules. L'avantatge de la fixació és que també manté les mostres en el mateix estat, n'evita tant el creixement com el deteriorament. Després de fixar els anells vam dur a terme la “permeabilització” de les cèl·lules, el que permetria que els anticossos travessessin les membranes fixades. Aquest procés vam fer-lo amb una substància anomenada Tritó X-100, que crea orificis en la membrana. Per últim, vam introduir els anticossos. Hi havia dues parts de les cèl·lules que volíem marcar: els nuclis i els miotubs. Pels miotubs vam utilitzar l'anticòs *Anti-Myosin Heavy Chain II* unit al colorant verd fluorescent *Alexa Fluor 488*, i pels nuclis vam emprar no un anticòs, sinó un compost orgànic capaç d'intercalar-se en regions de l'ADN de color blau fluorescent. El seu nom és *Hoechst 33342*. El que es veu en blau en la imatge següent són els nuclis i en verd els miotubs.



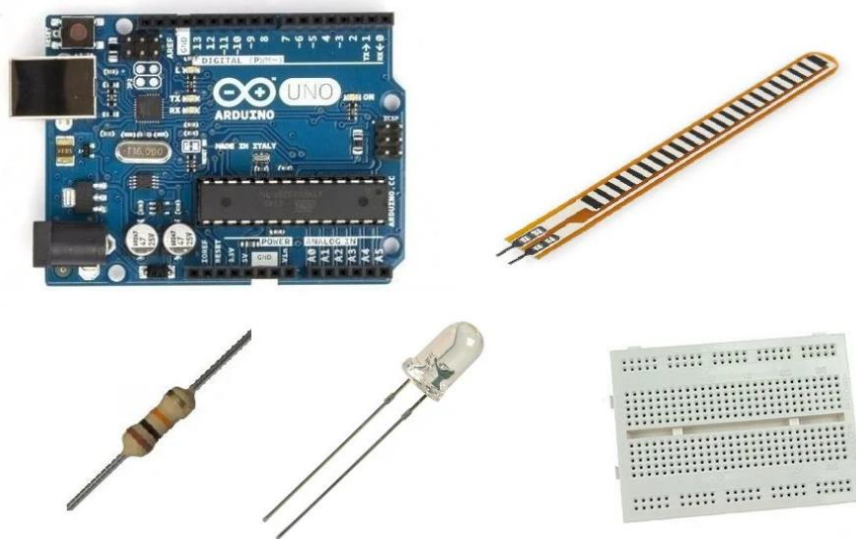
Imatge 84: Imatges al microscopi i els corresponents models de dit. Font: pròpia.

4.3. CALIBRATGE DELS MODELS AMB UN FLEX SENSOR CONTROLAT PER ARDUINO

- CONSTRUCCIÓ DEL CIRCUIT

Per tal de mesurar la força amb la que el model robòtic de dit era capaç de doblegar-se en comparació amb un dit real, així com per testar els diferents models possibles per implementar l'anell de cèl·lules, vam construir un circuit amb un flex sensor integrat.

- Flex sensor. Els flex sensor són un tipus de sensor amb la capacitat de mesurar la flexió o desviació respecte el seu punt inicial. Estan fets de plàstic o algun material flexible que sigui aïllant, al qual s'adhereix un material conductor (com el grafit, fet de carboni), que varia la seva resistència en funció de la flexió (flexió i resistència són valors directament proporcionals).
- Dos resistors, un amb valor de 10 K Ω i l'altre amb valor de 220 Ω . Els resistors són components electrònics que tenen la funció de presentar resistència elèctrica (oposició al pas del corrent) en un circuit elèctric. Normalment s'introdueixen en un circuit per evitar que hi hagi una sobrecàrrega de tensió (sobretot quan hi ha altres elements al circuit que es volen protegir, com un Led), que és la funció que li donaré jo.
- Protoboard. Són unes plaques amb circuits interns que serveixen per realitzar muntatges fàcilment modificables de forma ràpida. S'utilitzen per fer simulacions i proves de circuits elèctrics.
- Led (o díode emissor de llum) verd. Com el seu nom indica, un Led és un díode (dispositiu electrònic que consta de dos elèctrodes pel qual només passa corrent en un sentit) que genera llum quan s'hi aplica tensió a una de les seves terminals.
- Cables mascle-mascle.
- Placa *Arduino UNO*.



Imatge 85: Materials que he utilitzat en la construcció del circuit. Font: <https://www.instructables.com/id/How-to-use-a-Flex-Sensor-Arduino-Tutorial/>

Per comprendre el funcionament del circuit elèctric és necessari entendre la llei d'Ohm. Aquesta llei expressa la relació entre tres variables en els circuits elèctrics que definiré a continuació amb la fórmula següent:

$$V = I \cdot R$$

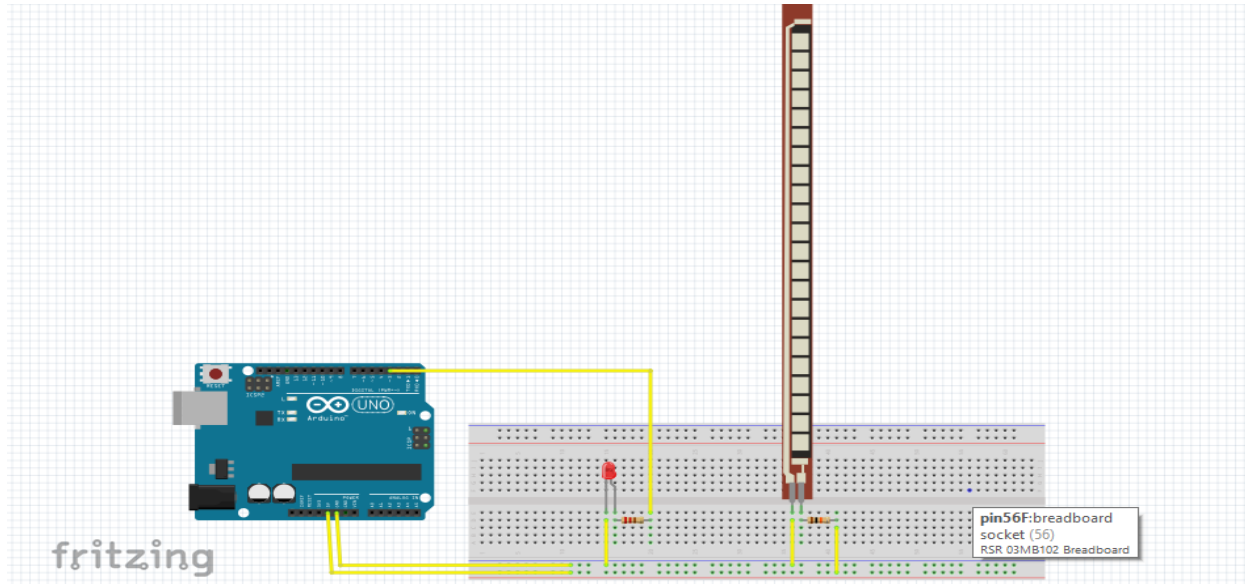
Les tres variables de la fórmula són:

- Intensitat del corrent (I): quantitat de càrrega elèctrica que passa per un conductor per unitat de temps. Aquest flux de càrrega és ocasionat pel moviment d'electrons. Es mesura en Ampers (A).
- Voltatge o tensió (V): diferència de potencial entre dos punts, o pressió que exerceix una font d'energia elèctrica sobre càrregues elèctriques. Mesurat en Volts (V).
- Resistència (R): oposició que presenta un material al pas del corrent, mesurat en Ohms (Ω).

El circuit construït funciona de la següent manera: el flex sensor actua com a divisor de tensió variable. Això és degut a que la seva resistència varia en funció del seu grau de flexió. A més flexió, menys carboni que condueixi el corrent i, per tant, major resistència. Segons la llei d'Ohm, a major resistència major voltatge

(són magnituds directament proporcionals) i, com que el Led genera llum quan se li aplica tensió, a major voltatge més llum. En resum, quan més es doblega el flex sensor més s'il·lumina el Led.

Després d'aconseguir el material, vaig fer un esquema del circuit amb el programa Fritzing. Aquest és el resultat:



Imatge 86: Esquema del circuit. Font: pròpia.

Convé destacar que les resistències i el flex sensor estan connectats en sèrie. Això vol dir que la intensitat del corrent es divideix entre ells, però no la tensió.

- IMPLEMENTACIÓ DEL FLEX SENSOR

Un cop vaig haver muntat el circuit, vaig haver d'escriure el codi al programa Arduino per després gravar-lo a la placa. Adjunto una captura del codi utilitzat, que explicaré a continuació.



```
Programa_flex_sensor Arduino 1.8.7
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda

Programa_flex_sensor

//Constants:
const int ledPin = 3;    //pin 3 has PWM funtion
const int flexPin = A0;  //pin A0 to read analog input

//Variables:
int value; //save analog value

void setup(){

  pinMode(ledPin, OUTPUT); //Set pin 3 as 'output'
  Serial.begin(9600);      //Begin serial communication
}

void loop(){

  value = analogRead(flexPin);          //Read and save analog value from potentiometer
  Serial.println(value);                //Print value
  value = map(value, 700, 900, 0, 255); //Map value 0-1023 to 0-255 (PWM)
  analogWrite(ledPin, value);           //Send PWM value to led
  delay(100);                          //Small delay
}
|
```

Imatge 87: Captura del codi utilitzat en la implementació del flex sensor. Font: pròpia.

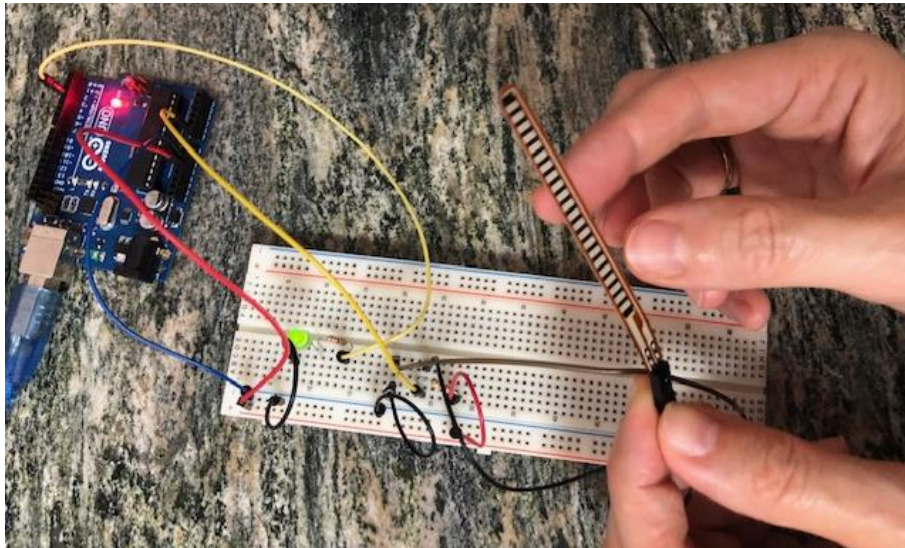
Com pot veure's a la imatge, el primer que vaig fer va ser declarar les constants, que són dues. D'una banda tenim "ledPin" (que és el Led que ha d'encendre's i apagar-se i està al pin 3) i d'una altra el "flexPin", que va a l'entrada anàloga (de la placa Arduino UNO) A0. Després vaig declarar la variable "value", que permet llegir els valors que prengui el flex sensor.

Tot seguit vaig indicar que el ledPin és la sortida i l'inici de la comunicació en sèrie per poder veure els valors que prengué el flex sensor.

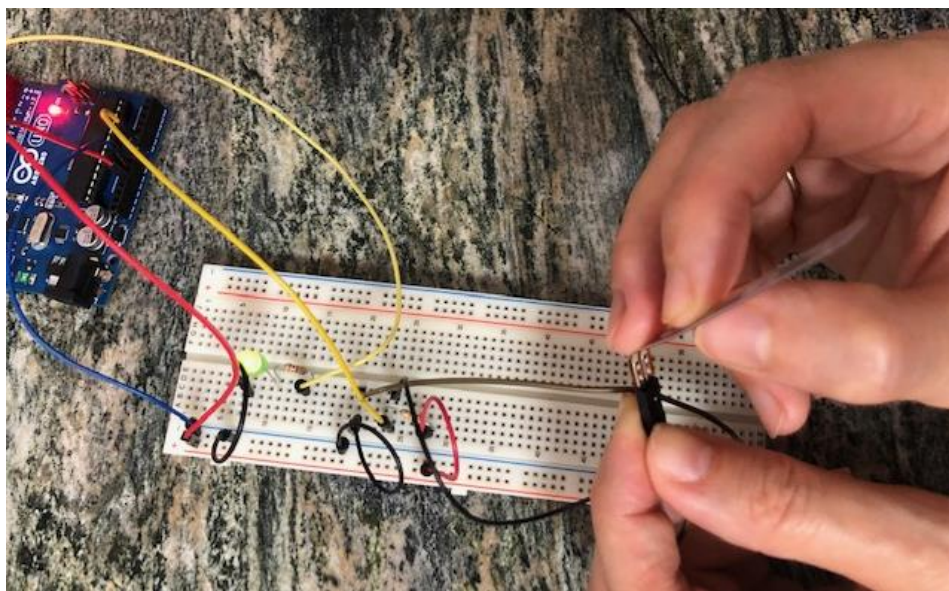
A partir de la secció "void loop" que pot llegir-se a la captura s'inicia el programa. El primer que fa és llegir la informació que rep del flex sensor i a continuació el mostra en pantalla. En principi, els valors que pot prendre van de 0 (que representa 0 Volts) a 1023 (que són els 5 Volts), però el flex sensor no té tanta capacitat de dividir el voltatge com per arribar a aquests valors, pel que teòricament aquests haurien d'estar compresos entre els 700 i 900. Hem de passar aquests valors a modulació per ample de polsos (PWM), que permet

enviar informació o controlar la quantitat d'energia enviada. Els valors en PWM són entre 0 i 255. Finalment, aquests valors s'envien al Led i s'introdueix un petit temps d'espera abans de tornar a començar el cicle.

Les imatges adjuntades més avall mostren el funcionament del circuit amb el programa muntat en la vida real.



Imatge 88: *Circuit muntat amb el flex sensor estirat.* Font: pròpia.



Imatge 89: *Circuit muntat amb el flex sensor doblegat.* Font: pròpia.

Com pot veure's a les imatges prèvies, quan el flex sensor està estirat, és a dir, a la seva posició inicial, el Led està poc il·luminat (en la primera de les dues imatges). En la segona, en canvi, el flex sensor està doblegat, pel que el Led

està molt més il·luminat. Això indica que, quan el flex sensor està doblegat, el voltatge, i per tant la resistència, són majors que quan està estirat.

- VALORACIÓ DELS MODELS

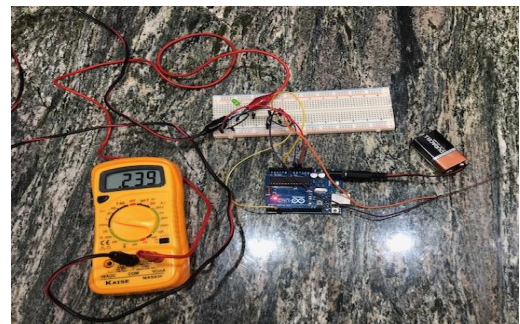
Tal i com he mencionat, vaig utilitzar el flex sensor per dos propòsits principals: el primer, comparar la força del dit robòtic amb la del meu dit. El segon, testar els diferents models impresos a l'IBEC per saber quin era més fàcil de doblegar i, per tant, quin seria més possible que pogués moure l'anell de cèl·lules.

Com el flex sensor és un divisor de tensió, els valors estan en volts, mesurats amb un voltímetre connectat en paral·lel al circuit del flex sensor.

- COMPARACIÓ DE LA FORÇA DEL DIT ROBÒTIC AMB EL REAL

En aquesta comparació de forces vaig anotar les màximes realitzades pel dit robòtic i el real, així com un control en el que el flex sensor no està unit a cap element.

- Sense flexió (sol): el valor del voltatge sense aplicar-hi cap força al flex sensor (és a dir, amb aquest totalment estirat) va ser d'uns 0,24 V. Aquest valor serveix com a control per comparar les forces fetes per la pròtesi i el dit real.

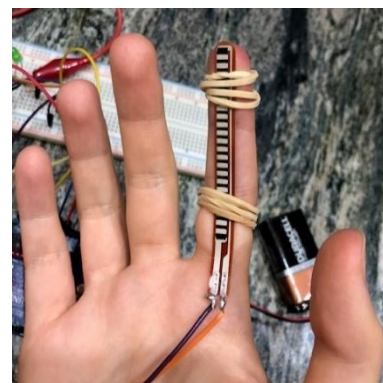


Imatge 90: Valor del voltatge amb el flex sensor estirat. Font: pròpia.

- Dit real: el valor màxim aconseguit va ser de 1,94 V.

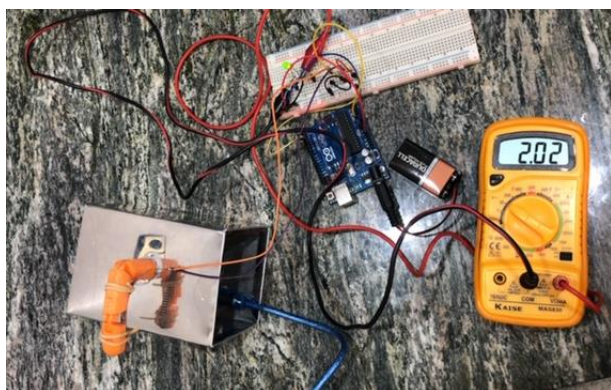


Imatge 91: Valor del voltatge amb el flex sensor unit al meu dit. Font: pròpia.



Imatge 92: Flex sensor unit al meu dit. Font: pròpia.

- Model de dit robòtic: 2,02 V.



Imatge 93: Valor del voltatge amb el flex sensor unit al model del dit de plàstic. Font: pròpia.



Imatge 94: Flex sensor unit al model del dit de plàstic. Font: pròpia.

Model de mesura	Valor màxim (Volts)
Sol	0,24
Dit real	1,94
Dit robòtic	2,02

Taula 1: Valors del calibratge del model de dit robòtic. Font: pròpia.

Com pot veure's, al realitzar el mateix moviment el dit real i el model de dit robòtic van aconseguir bàsicament el mateix valor, tot i que el dit robòtic va obtenir un valor una mica major.

○ CALIBRATGE DELS MODELS IMPRESOS A L'IBEC

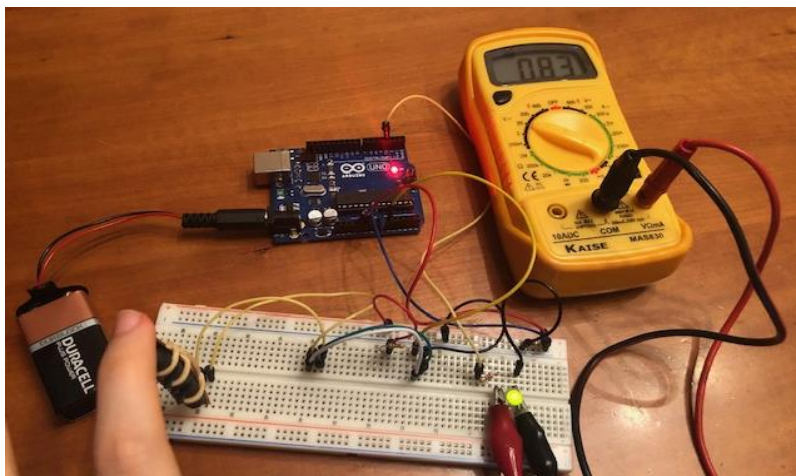
En aquest cas, vaig unir les pròtesis que vaig imprimir a l'IBEC al flex sensor i vaig realitzar la mesura. Aquelles pròtesis que van aconseguir el valor més baix de voltatge van ser les que es van doblegar completament amb menys esforç; les que l'anell tindria més possibilitats de moure. Per aquest motiu el flex sensor em va servir principalment per valorar l'efectivitat de la distància entre els suports dels models. A menor distància entre els suports menys es doblegaria el flex sensor i menys valor de voltatge mostraria el voltímetre. No em va servir per comparar la rigidesa entre els dos materials utilitzats perquè el que variaria al doblegar-los completament seria la força que jo fes, que no la podia mesurar. Per exemple, si doblegués un material molt rígid però amb la mateixa distància entre els seus suports que un molt tou, el valor que em mostraria el flex sensor

seria el mateix, però requeriria més força doblegar el rígid. En canvi, si comparo dos models fets del mateix material però amb diferent distància entre els suports, segons la meua hipòtesi, aquell amb major separació entre els suports es doblegarà més, pel que requereix més força doblegar-lo completament. El valor de voltatge serà més alt.

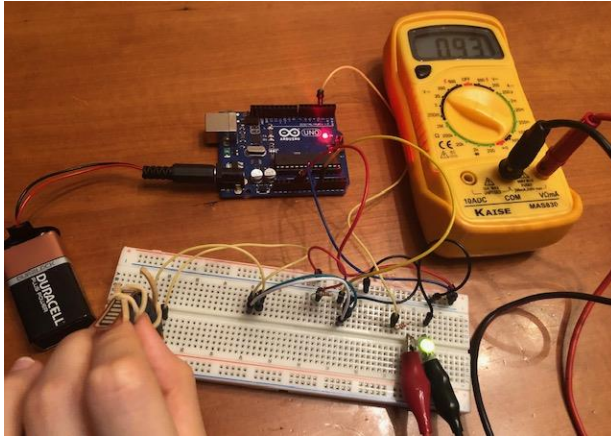
També vaig fer la diferència entre el valor de voltatge estirat i flexionat, ja que vaig tenir en compte que, a causa de factors com el pes dels models, el valor de voltatge quan el model no estava flexionat era una mica diferent entre ells. En el cas dels models que tenien més d'un parell de suports vaig enregistrar el valor màxim aconseguit al flexionar cada parell.

Convé remarcar que a l'hora d'escollir quines pròtesis utilitzaríem a l'experiment, apart de tenir en compte la distància entre els suports que vaig mesurar amb el flex sensor, també vam centrar-nos en aspectes com el disseny, la mida, el material o avantatges afegits que poguessin tenir (com les molles del dit articulat v3 o el fet que el dit pla articulat 5 mm fos més gruixut i, per tant, més estable en qualsevol posició).

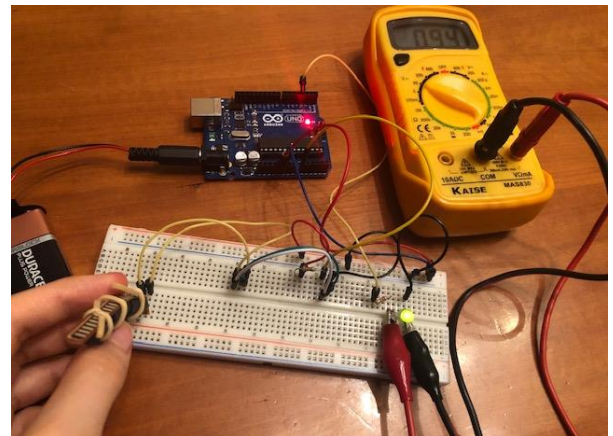
- Dit articulat: aquest no el vam mesurar perquè, com ja he explicat, va trencar-se al treure-li el suport que havia fet la impressora.
- Dit articulat v2: el valor estirat era de 0,83 V. El valor màxim pel primer parell de suports va ser de 0,93 V (diferència 0,1 V) i el del segon de 0,94 V (diferència 0,11 V).



Imatge 95: Valor del voltatge inicial amb el flex sensor unit al dit articulat v2. Font: pròpia.

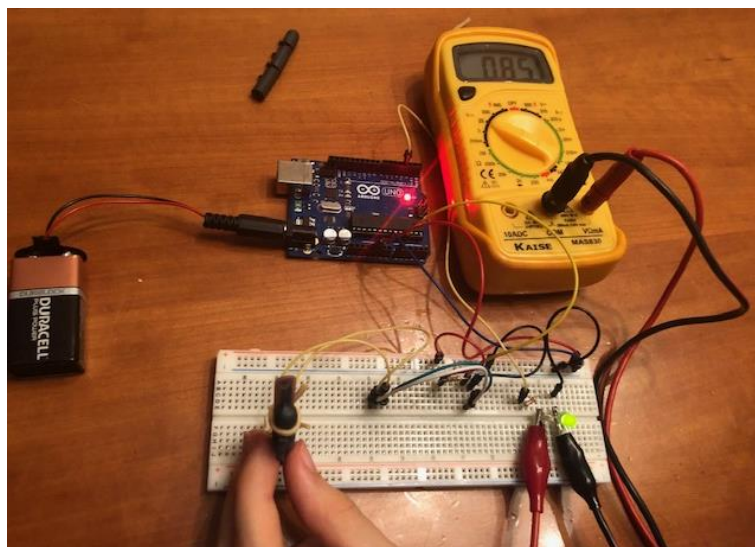


Imatge 96: Valor del voltatge doblegant el primer parell de suports amb el flex sensor unit al dit articulat v2. Font: pròpia.

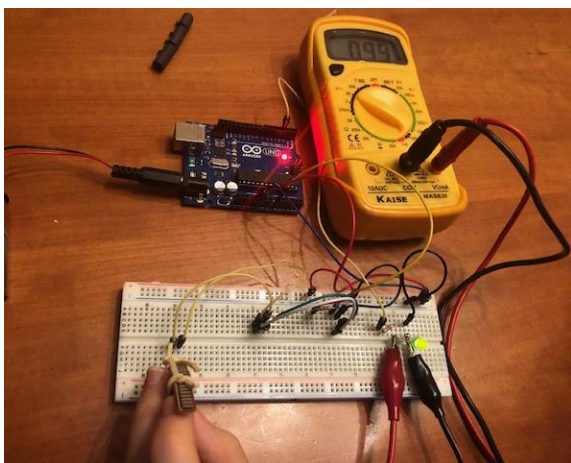


Imatge 97: Valor del voltatge doblegant el segon parell de suports amb el flex sensor unit al dit articulat v2. Font: pròpia.

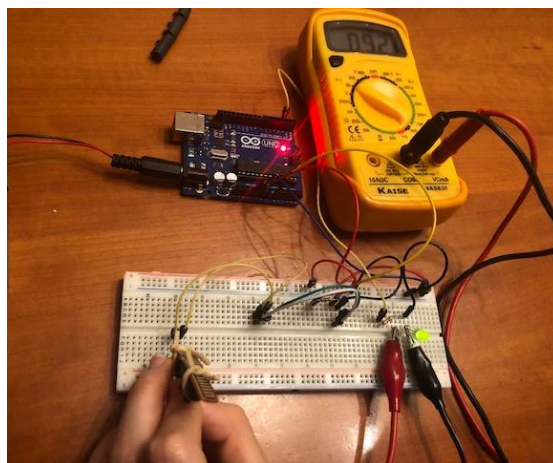
- Dit articulat v3: el valor estirat va ser de 0,85 V. El valor màxim del primer parell de suports va ser 0,99 V (diferència 0,14 V) i el del segon de 0,94 V (diferència 0,09 V).



Imatge 98: Valor del voltatge inicial amb el flex sensor unit al dit articulat v3. Font: pròpia.

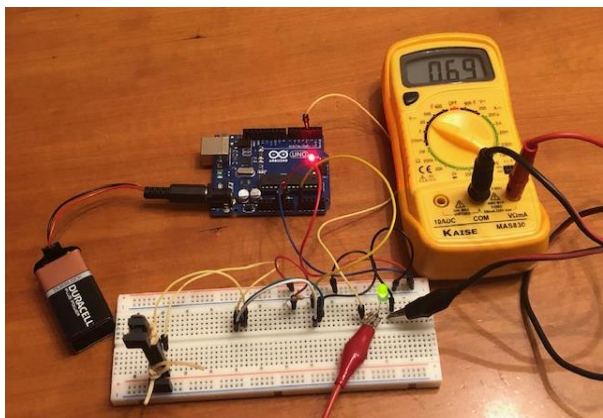


Imatge 99: Valor del voltatge doblegant el primer parell de suports amb el flex sensor unit al dit articulat v3. Font: pròpia.

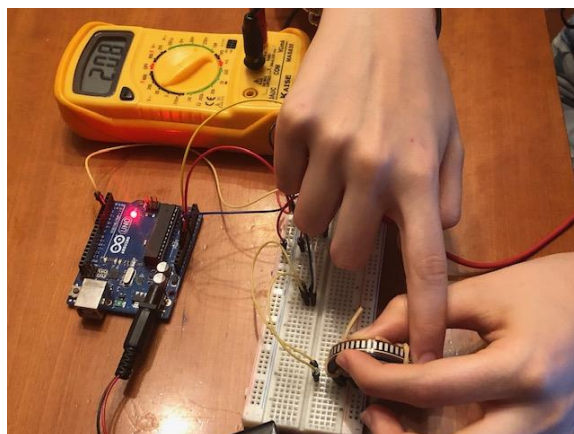


Imatge 100: Valor del voltatge doblegant el segon parell de suports amb el flex sensor unit al dit articulat v3. Font: pròpia.

- Dit pla: el valor estirat va ser de 0,69 V. El valor màxim doblegat va ser de 2,08 V (diferència 1,39 V).

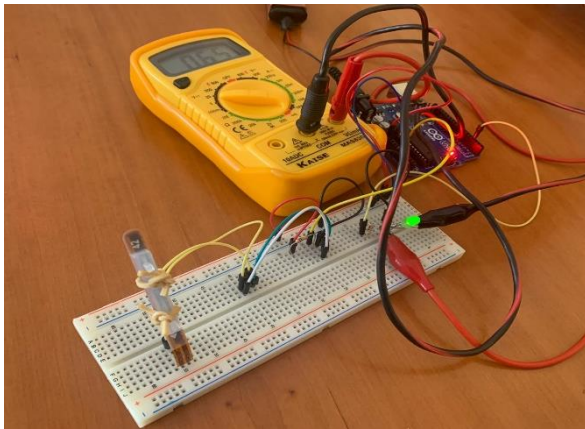


Imatge 101: Valor del voltatge inicial amb el flex sensor unit al dit pla. Font: pròpia.



Imatge 102: Valor del voltatge doblegant el model amb el flex sensor unit al dit pla. Font: pròpia.

- Dit pla 50%: el valor estirat va ser de 0,65 V. El valor màxim doblegat va ser d'1,89 V (diferència 1,24 V).

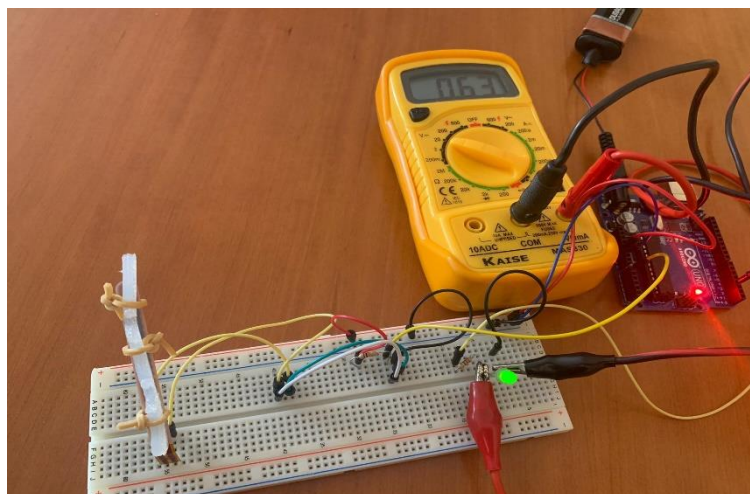


Imatge 103: Valor del voltatge inicial amb el flex sensor unit al dit pla 50%. Font: pròpia.

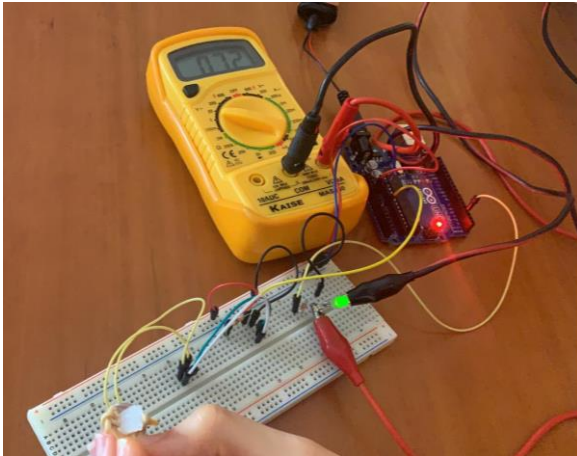


Imatge 104: Valor del voltatge doblegant el model amb el flex sensor unit al dit pla 50%. Font: pròpia.

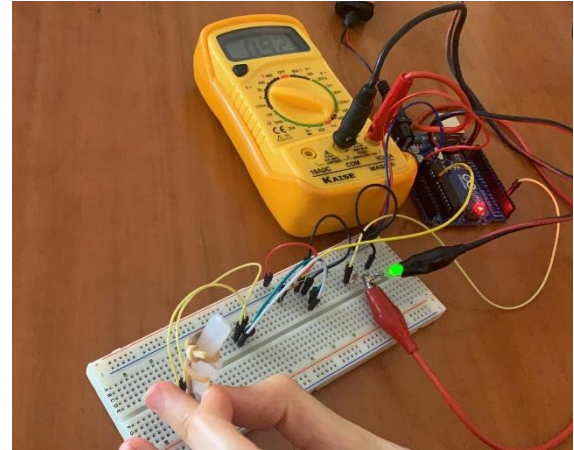
- Dit arrodonit: vam descartar aquest model al ser massa gruixut, pel que no el vam imprimir ni calibrar.
- Dit pla articulad amplada 3 mm: el valor estirat va ser de 0,63 V. El valor màxim doblegant el primer parell de suports va ser de 0,72 V (diferència 0,09 V). El valor màxim doblegant el segon parell de suports va ser de 0,92 V (diferència 0,29 V).



Imatge 105: Valor del voltatge inicial amb el flex sensor unit al dit pla articulad 3 mm. Font: pròpia.

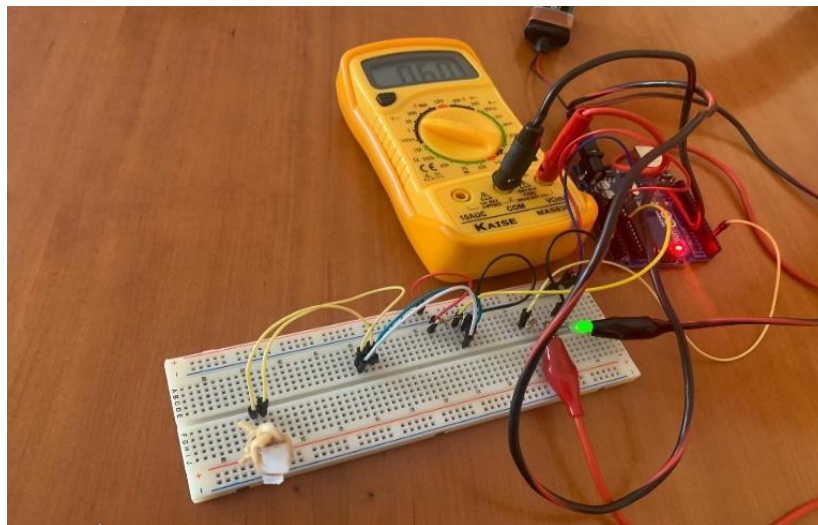


Imatge 106: Valor del voltatge doblgant el primer parell de suports amb el flex sensor unit al dit pla articulat 3 mm. Font: pròpia.

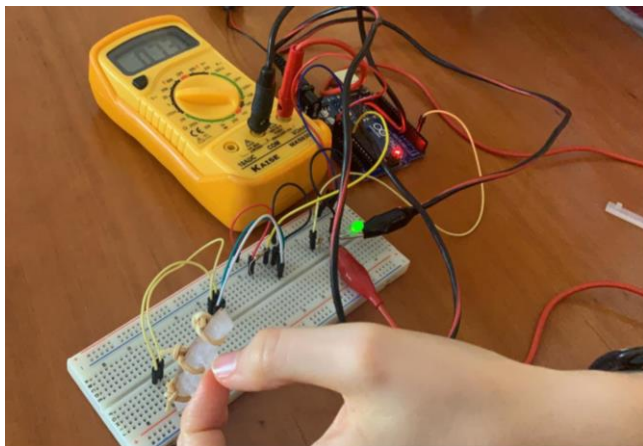


Imatge 107: Valor del voltatge doblgant el segon parell de suports amb el flex sensor unit al dit pla articulat 3 mm. Font: pròpia.

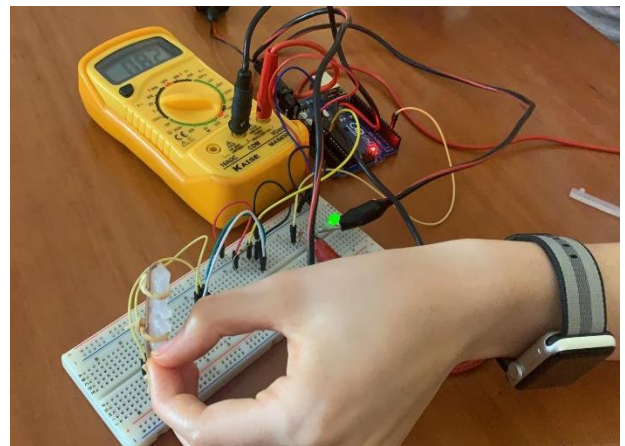
- Dit pla articulat amplada 5 mm: el valor estirat va ser de 0,60 V. El valor màxim doblgant el primer parell de suports va ser de 0,73 V (diferència 0,13 V). El valor màxim doblgant el segon parell de suports va ser de 0,82 V (diferència 0,22 V).



Imatge 108: Valor del voltatge inicial amb el flex sensor unit al dit pla articulat 5 mm. Font: pròpia.



Imatge 109: Valor del voltatge dobllegant el primer parell de suports amb el flex sensor unit al dit pla articulat 5 mm. Font: pròpia.



Imatge 110: Valor del voltatge dobllegant el segon parell de suports amb el flex sensor unit al dit pla articulat 5 mm. Font: pròpia.

Model de dit flexible	Valor estirat (Volts)	Valor màxim dobllegat (Volts)		Diferència (Volts)	
Dit articulat v2	0,83	0,93	0,94	0,10	0,11
Dit articulat v3	0,85	0,99	0,94	0,14	0,09
Dit pla	0,69	2,08		1,39	
Dit pla 50 %	0,65	1,89		1,24	
Dit pla articulat amplada 3 mm	0,63	0,72	0,92	0,09	0,29
Dit pla articulat amplada 5 mm	0,60	0,73	0,82	0,13	0,22

Taula 2: Valors del calibratge dels models de dit flexible. Font: pròpia.

5. CONCLUSIONS

En base als resultats obtinguts puc elaborar una sèrie de conclusions que confirmaran o desmentiran les meves hipòtesis inicials.

D'una banda, en quant a la implementació dels dos tipus de pròtesis, la meua hipòtesi inicial va ser que actualment la robòtica seria més efectiva per utilitzar-la que les biòniques. Els experiments fets avalen aquesta afirmació, ja que vaig aconseguir que la pròtesi robòtica realitzés moviments que, encara que senzills, responien al codi que jo l'havia indicat (flexionar i estirar el dit). Si es pensés implementar una pròtesi robòtica de dit o de qualsevol extremitat a un pacient s'haurien de fer alguns canvis a la meua pròtesi, com reduir la mida del servomotor per fer-la més lleugera i menys aparatosa, però aquests són aspectes que, amb els recursos i l'experiència adequats, poden aconseguir-se sense grans dificultats. Confirmo que la pròtesi robòtica és més efectiva que les biòniques perquè no vam aconseguir cap resposta dels anells de cèl·lules, pel que les pròtesis fetes a l'IBEC no van moure's. Tot i així, com altres investigadors (com els autors dels articles que vaig explicar a l'apartat teòric experimental) sí que han aconseguit resposta en els anells de cèl·lules, i com els meus anells van tensar-se al voltant dels suports (el que va revelar capacitat de contracció i adaptació a les superfícies), obtenir actuadors biològics funcionals avui dia és una realitat. Tanmateix, aquests actuadors pateixen la sèrie de limitacions ja esmentades al treball, el que de moment impedeix incrementar-ne la seva grandària o la seva força. Això fa que, en l'estat en que es troben les investigacions, una pròtesi biònica de dit no pugui implementar-se. Amb tot, els avantatges de les màquines biològiques respecte les convencionals (les ja mencionades adaptabilitat, autocuració...) a més de no necessitar bateries i ser, per tant, més lleugeres, fan que, en un futur en que s'hagin solucionat els problemes que presenten, siguin una excel·lent opció com a pròtesis funcionals i realistes.

Possibles línies d'investigació que plantegen els resultats són:

Utilitzar cèl·lules més noves per fer els anells de cèl·lules i repetir el procés de creació de les pròtesis biòniques per comprovar si aquestes responen a estímuls elèctrics de forma visible.

En base als resultats en el microscopi, que mostrava que els miofibrils d'almenys un dels models estaven ben alineats, repetir l'estimulació elèctrica a un microscopi per comprovar si hi ha contraccions molt lleugeres.

Com està explicat a l'apartat teòric del treball, el procés de la contracció muscular (en altres paraules, del moviment del cos) és electroquímic. Les pròtesis elaborades havien de tenir la capacitat de respondre a estímuls elèctrics (encara que també podrien implementar-se pròtesis fotosensibles o que responguessin davant canvis químics) per poder moure's i simular amb més precisió el sistema locomotor humà. Ara bé, perquè fossin pròtesis totalment funcionals haurien de respondre a estímuls (ja fossin elèctrics o d'altre tipus) provinents del cervell. Això podria aconseguir-se amb una interfície cervell-ordinador, un dispositiu que, després de captar l'activitat cerebral, la selecciona, classifica i tradueix a un comandament de control d'algun dispositiu artificial, com una pròtesi. Les investigacions en aquest camp encara no són molt avançades, però les últimes dècades s'han fet avenços importants i fins i tot s'han implantat interfícies cervell-ordinador (o brain-computer interface, BCI, en anglès) en pacients humans. Per tant, una altra línia d'investigació podria enfocar-se al control d'aquestes pròtesis mitjançant aquest sistema.

D'altra banda, en relació amb el calibratge de les pròtesis vaig fer tres hipòtesis:

La primera va ser que un dit real era capaç de fer més força que el dit robòtic, i ha resultat ser falsa, ja que el dit robòtic va aconseguir un valor lleugerament més alt que el dit real quan els vaig comparar amb el flex sensor. Això també ressalta un dels avantatges de les pròtesis robòtiques: la gran força que poden fer en comparació amb els sistemes biològics.

La segona i tercera hipòtesis tenien a veure amb la comparació dels models flexibles de dit impresos a l'IBEC. Com ja he explicat, vam treballar amb dues variables principals: el material (un de més flexible, el PDMS, i l'altre de menys) i la distància entre els suports. Com el dit biònic no va moure's, no vaig poder arribar a descartar o refutar completament cap de les dues hipòtesis, però les mesures amb el flex sensor i la recerca bibliogràfica em van servir per arribar a certes conclusions.

Les mesures amb el flex sensor em van servir per saber si més distància entre suports equivalia a més flexió. Això voldria dir que es necessitaria més força per doblegar els models amb més distància entre suports completament, el que seria un desavantatge. Les mesures van ser purament estructurals. Amb això vull dir que no vaig tenir en compte que, per un model amb una separació major entre suports, hauria de fer un anell de cèl·lules més gran, el que podria afectar a la força de l'anell en qüestió. Aquest aspecte el tracto més endavant.

Cal aclarir que el flex sensor no és un element de mesura d'alta precisió, pel que vaig comparar valors bastant diferents entre ells. També destaco que vaig treballar amb els valors extrems de la diferència entre el voltatge del model estirat i doblegat.

Per començar, els valors que van aconseguir els dits plans articulats van variar entre uns 0,1 i 0,2 V. Val la pena ressaltar que en els dos casos el valor de la flexió del segon parell de suports va ser lleugerament major que la del primer. Això no és perquè fos més treballós doblegar el segon parell de suports (ja que hi ha la mateixa distància entre ells que entre els primers), sinó que, a l'estar en la zona inferior del flex sensor, aquest és més sensible a la flexió que vaig fer.

Els valors obtinguts amb els dits articulats també van ser d'entre 0,1 i 0,2 V. El del dit pla 1,39 V i el del dit pla 50% 1,24 V.

A continuació cal valorar la distància entre els suports. Aquest aspecte és un dels que es veuen més clars, ja que la diferència de valors amb el flex sensor és molt evident. Per seguir el rigor, sempre he de comparar models fets del mateix material. Per tant, compararé els dits articulats amb el dit pla (material menys flexible) i els dits plans articulats amb el dit pla 50% (material més flexible).

- Material menys flexible

Els valors dels articulats (menys separació entre suports) eren de 0,1-0,2 V. El del dit pla, amb molta més separació entre els suports, era d'1,39 V.

- Material més flexible (PDMS)

Els dels dits plans articulats (menys separació entre suports) també eren de 0,1-0,2 V. El del dit pla 50% (major separació) d'1,24 V.

Això mostra clarament que, a més separació entre suports, més flexió és necessària i, per tant, més força, pel que els models amb menys separació entre els suports són més fàcils de doblegar. Tanmateix, no puc dir que la hipòtesi “Els models amb menys separació entre els suports es mouen amb més facilitat” sigui correcta, perquè, com ja he explicat, s’ha de tenir en compte que augmentar la grandària entre els suports equivaldria a augmentar la grandària entre els anells, el que podria alterar la força de l’anell. Aquesta qüestió la puc tractar basant-me en la meua bibliografia i en l’experiència dels investigadors amb els que vaig treballar. Com ja he explicat en l’apartat teòric experimental, un dels problemes dels actuadors biològics és que no poden fer-se massa grans per la contracció espontània que pateixen i perquè no els nutrients no arriben a totes les cèl·lules. Com a resultat, els anells més grans no són funcionals o ho són menys que els de mida més petita. Per tant, com he demostrat amb el flex sensor, doblegar models amb els suports més separats requereix més flexió i més força, i els anells grans que haurien de ser capaços de fer-ho tenen encara menys força o queden inutilitzats, pel que puc dir, encara que estaria pendent de confirmació experimental, que els models amb menys separació entre suports són més efectius, pel que la hipòtesi era correcta.

Respecte a l’altra hipòtesi, que deia “Els models impresos amb el material més flexible (PDMS) són més efectius”, ja he explicat que amb el flex sensor no vaig poder valorar la rigidesa dels materials. A més, un dels materials podria resultar no ser biocompatible (innocu pels anells), i això només ho podria saber si els anells s’haguessin contret. Tant la facilitat per doblegar-lo com el fet de ser biocompatible farien més efectiu un material o altre. Per tant, la meua hipòtesi que el material més flexible era més efectiu no la puc provar.

6. AGRAÏMENTS

La realització d'aquest treball ha estat un procés llarg i una gran feina, que no hauria estat possible sense l'ajuda de les persones que esmentaré a continuació.

Primer, agraeixo a la meva tutora del treball Maite García la seva dedicació, consells i correccions, ja que ha jugat un paper fonamental en el plantejament i realització del treball. També l'estic molt agraïda per haver-me plantejat la possibilitat de fer la part experimental (que és un dels aspectes més difícils d'aconseguir) en el programa Batx2Lab. Sense ella no hauria pogut presentar-me i m'hauria perdut l'oportunitat de treballar en un laboratori així com de realitzar una recerca experimental que m'ha semblat enriquidora i interessant.

Agraeixo al programa Batx2Lab haver-me ofert la possibilitat d'apropar-me al món de la recerca, així com d'haver-me ajudat a realitzar els experiments que requeria el treball. Endemés, dono les gràcies a la meva tutora del programa, la doctora Maria Guix Noguera, per haver-me dedicat tant de temps i haver-me aconsellat i ajudat en la part pràctica, a més d'haver-me passat articles que m'han estat indispensables per entendre el camp de la robòtica tova i els actuadors biològics. També estic agraïda a tot l'equip Samuel Sánchez, especialment als investigadors Giulia Zarpellon, Àngel Blanco Blanes i Paul Soto Rodriguez, que en el seu moment també van dedicar temps al meu treball i em van ser de gran ajut.

Finalment, m'agradaria agrair a tota la meva família (els meus pares, la meva germana Mireia, els meus avis...) el seu suport i consells durant la realització del meu treball de recerca, així com a tots els amics que han estat al meu costat. Particularment agraeixo a la meva mare Dori Cañal tot el que ha fet, des de les seves orientacions en la construcció del dit robòtic i els dissenys amb AutoCAD fins a escoltar-me, aconsellar-me i donar-me suport en tots els dubtes que vaig tenir quan no tenia clar el tema del treball o estava preocupada per la part pràctica. Aquest treball no seria el que és sense la seva ajuda. També agraeixo moltíssim al professor de tecnologia Jaime Morcillo haver-me ajudat en la impressió del dit i haver-li dedicat tant de temps sense ser jo la seva alumna.

Totes aquestes persones han contribuït a que desenvolupés i acabés el treball, així que, un cop més, els agraeixo a tots la seva ajuda.

7. BIBLIOGRAFIA I WEBGRAFIA

BIBLIOGRAFIA

- MARIEB, Elaine N. *Anatomía y Fisiología humana*. 9a edició. Espanya: Pearson Educació, 2008.
- KAHLE, Werner. *Atlas de Anatomía. Sistema nervioso y órganos de los sentidos* (tom 3). 7a edició. Barcelona: Ediciones Omega, 2003.
- SETH, Anil. *50 temas fascinantes de la neurociencia para entender nuestro cerebro*. 1a edició. Xina: Blume, 2015.
- REDAL, Enric Juan i CASAMIQUELA, M. Àngels Andrés. *Biología i Geología 3 ESO*. Barcelona: Grup Promotor Santillana, 2007.
- ASHWELL, Ken. *El cuerpo humano. Manual de identificación*. Xina: Ilus Books, 2016.
- BRUNAT, Eva i GIMÉNEZ, Judit. *Anatomofisiología y Patología Básica*. Espanya: Marcombo, 2018.
- Mestre, Rafael, Patiño, Tania, Barceló, Xavier, Anand, Shivesh, Pérez-Jiménez, Ariadna i Sánchez, Samuel. (2019). Force Modulation and Adaptability of 3D-Bioprinted Biological Actuators Based on Skeletal Muscle Tissue. *Advanced Material Technologies*, 4, 1-13.
- Raman, R., Cvetkovic, C. I Bashir, R. A modular approach to the design, fabrication, and characterization of muscle-powered biological machines. (2017). *Nature Protocols*. Vol. 12. Num. 3.
- Morimoto, Y., Hiroaki, O. i Takeuchi, S. Biohybrid robot powered by an antagonistic pair of skeletal muscle tissues. (2018). *Science Robotics*.
- Jahan Zeb Gul, Memoon Sajid, Muhammad Muqeet Rehman, Ghayas Uddin Siddiqui, Imran Shah, Kyung-Hwan Kim, Jae-Wook Lee & Kyung Hyun Choi. 3D printing for soft robotics – a review. (2018). *Science and Technology of Advanced Materials*, 19:1, 243-262.
- Wallin, T.J., Pikul, J. i Shepherd, R.F. 3D printing of soft robotic systems. (2018). *Nature Reviews Materials*, 3, 84-100.

WEBGRAFIA

- Biología-geología.com. *Función de relación*. <https://biologia-geologia.com/BG1/652_relacion.html>. Pàgina consultada el 28 de març del 2019.
- E-ducative. (2016). *Demo E-ducative catedu: La función de relación*. <http://e-ducative.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/500/527/html/Unidad_05/index.html>. Pàgina consultada el 28 de març del 2019.
- Real Academia Española. (2019). *Diccionario de la lengua española*. <<https://dle.rae.es/?id=KauluQX>>. Pàgina consultada el 28 de març del 2019.
- Facultad de medicina UNAM. (2019). *Homeostasis*. <<http://www.facmed.unam.mx/Libro-NeuroFisio/FuncionesGenerales/Homeostasis/Homeostasis.html>>. Pàgina consultada el 28 de març del 2019.
- Zimmerman, Kim Ann. Live Science. (2018). *Nervous System: Facts, Function & Diseases*. <<https://www.livescience.com/22665-nervous-system.html>>. Pàgina consultada el 31 de març del 2019.
- Sanitas. (2019). *El sistema nervioso*. <<https://www.sanitas.es/sanitas/seguros/es/particulares/biblioteca-de-salud/cardiologia/salud-deporte/sin012196wr.html>>. Pàgina consultada el 31 de març del 2019.
- Khan Academy. (2019). *Función y estructura de la neurona*. <<https://es.khanacademy.org/science/biology/human-biology/neuron-nervous-system/a/overview-of-neuron-structure-and-function>>. Pàgina consultada el 31 de març del 2019.
- Triglia, Adrian. Psicología y mente. (2019). *¿Qué son las dendritas de las neuronas?* <<https://psicologiaymente.com/neurociencias/dendritas>>. Pàgina consultada el 31 de març del 2019.
- The University of Queensland. (2018). *What is a neuron?* <<https://qbi.uq.edu.au/brain/brain-anatomy/what-neuron>>. Pàgina consultada el 31 de març del 2019.
- Krebs, C., Hüttmann, K., i Steinhäuser, C. (2005). *Células de la glía. Investigación y ciencia*, 11. <<https://www.investigacionyciencia.es/revistas/mente-y-cerebro/>>

- [creatividad-394/clulas-de-la-gla-4269](#)>. Article consultat el 13 d'abril del 2019.
- Psicoactiva. (2019). *Las células gliales del sistema nervioso: tipos y funciones*. <<https://www.psicoactiva.com/blog/las-celulas-gliales-tipos-funciones/>>. Pàgina consultada el 13 d'abril del 2019.
 - Eunice Kennedy Shriver National Institute of Child Health and Human Development. (2019). *¿Cuáles son las partes del sistema nervioso?* <<https://www1.nichd.nih.gov/espanol/salud/temas/neuro/informacion/Pag/es/partes.aspx>>. Pàgina consultada el 13 d'abril del 2019.
 - EcuRed. (2019). *Sistema nervioso central*. <https://www.ecured.cu/Sistema_nervioso_central>. Pàgina consultada el 13 d'abril del 2019.
 - García, R., Hernández, E., Concha, A., Pérez, C.A., García, L.I., Hernández, M.E. i Manzo, J. *El cerebelo y sus funciones*. (2009). Universidad veracruzana. <https://www.uv.mx/rm/num_anteriores/revmedica_vol9_num1/articulos/el_cerebelo.pdf>. Article consultat el 13 d'abril del 2019.
 - Romero, S. i Delgado, D. *Datos y curiosidades del cerebelo*. (2019). *Muy Interesante*. <<https://www.muyinteresante.es/salud/fotos/datos-y-curiosidades-del-cerebelo/ataxia>>. Article consultat el 13 d'abril del 2019.
 - Instituto nacional del cáncer. (2019). *Diccionario de cáncer*. <<https://www.cancer.gov/espanol/publicaciones/diccionario/def/medula-espinal>>. Pàgina consultada el 13 d'abril del 2019.
 - Pérez Porto, Julián i Gardey, Ana. *Definición.de. Definición de nervios*. <<https://definicion.de/nervios/>>. Pàgina consultada el 13 d'abril del 2019.
 - Clínica Universidad de Navarra. (2019). *Diccionario medico: nervio*. <<https://www.cun.es/diccionario-medico/terminos/nervio>>. Pàgina consultada el 13 d'abril del 2019.
 - Universidad de Alcalá. (2018). *Transmisión nerviosa*. <http://www3.uah.es/bioquimica/Tejedor/bioquimica_ambiental/tema12/tema%2012-impulso.nervioso.htm>. Pàgina consultada el 18 d'abril del 2019.

- Universidad de Almería. (2019). *Neuroanatomía*. <<https://w3.ual.es/personal/pnieto/Neurona%20y%20glia/neuroanatomia1.htm>>. Pàgina consultada el 18 d'abril del 2019.
- Aularagón. (2019). *La sinapsis*. <http://aula.educa.aragon.es/datos/AGS/Psicologia/Unidad_02/pagina_30.html>. Pàgina consultada el 18 d'abril del 2019.
- Concepto definición. (2019). *Neurona asociativa o interneurona*. <<https://conceptodefinicion.de/neurona-asociativa-o-interneurona/>>. Pàgina consultada el 3 d'abril del 2019.
- Mataró, Garcel. Lifer. (2019). *Lóbulo temporal: Estructura y funciones (con imágenes)*. <<https://www.lifer.com/lobulo-temporal/>>. Pàgina consultada el 3 d'abril del 2019.
- Mundo mayor. (2017). *Hemisferios y lóbulos cerebrales*. <<https://mundomayor.com/RedMM/Blogs/TabId/126/ArtMID/756/userid/5613/ArticleID/1089/L243bulos-cerebrales.aspx>>. Pàgina consultada el 3 d'abril del 2019.
- Sabater, Valeria. La mente es maravillosa. (2018). *Lóbulos cerebrales: características y funciones*. <<https://lamenteesmaravillosa.com/lobulos-cerebrales-caracteristicas-y-funciones/>>. Pàgina consultada el 3 d'abril del 2019.
- Velasco, Elsa. Crean músculos para robots más potentes que los de los animales. (2018). *La Vanguardia*. <<https://www.lavanguardia.com/ciencia/20180104/434059616161/musculos-artificiales-robots-mas-potentes-que-animales.html>>. Notícia consultada el 3 d'abril del 2019.
- Asociación de la industria eléctrica. (2013). *Actuadores*. <<http://www.aie.cl/files/file/comites/ca/abc/actuadores.pdf>>. Pàgina consultada el 12 de juny del 2019.
- EFISALUD. (2018). *¿Cómo se forman las fibras musculares?* <<https://efisaludarcas.wordpress.com/tag/miotubos/>>. Pàgina consultada el 12 de juny del 2019.
- Universidad Autónoma de Zacatecas. (2019). *Músculo*. <<https://www.uaz.edu.mx/histo/gartext/137.htm>>. Pàgina consultada el 12 de juny del 2019.

- Centro de Instrumentación Científica. (2019). C2C12. <<https://cic.ugr.es/servicios-y-unidades/ficha-Lineas-Celulares.php?codigo=97>>. Pàgina consultada el 12 de juny del 2019.
- Catalonia researchers 3D Bioprint Muscle for soft Robotics. (2019). 3D Printing Industry. <<https://3dprintingindustry.com/news/catalonian-researchers-3d-bioprint-muscle-for-soft-robotics-146321/>>. Notícia consultada el 12 de juny del 2019.
- Ostrovidov, S., Hosseini, V., Ahadian, S., Fujie, T., Prakash, S., Ramalingam, M, Bae, H. i Khademhosseini, A. Skeletal Muscle Tissue Engineering: Methods to Form Skeletal Myotubes and Their Applications. (2014). NCBI. <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4193686/>>. Article consultat el 12 de juny del 2019.
- Sigma-Aldrich. (2019). Live/Dead Cell Double Staining Kit. <https://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/sigma/04511?lang=es®ion=ES&qclid=EAlaIqObChMlx8-N84D14qIV2pTVCh2OfQOUEAA_YASAAEql9E_D_BwE>. Pàgina consultada el 12 de juny del 2019.
- Investigadores del Ibec 'bioimprimen' en 3D tejido muscular vivo para robots. (2019). Interempresas.net. <<http://www.interempresas.net/Fabricacion-aditiva/Articulos/231701-Investigadores-del-Ibec-bioimprimen-en-3D-tejido-muscular-vivo-para-robots.html>>. Notícia consultada el 13 de juny del 2019.
- Interempresas.net. (2019). Extrusión. <<http://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/138574-Extrusion.html>>. Pàgina consultada el 13 de juny del 2019.
- NCBI. (2019). Electrical Pulse Stimulation of Primary Human Skeletal Muscle Cells. <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/30367406>>. Pàgina consultada el 13 de juny del 2019.
- Microscope Master. (2019). Time-lapse microscopy. <<https://www.microscopemaster.com/time-lapse-microscopy.html>>. Pàgina consultada el 14 de juny del 2019.
- Agencia EFE. (2018). Llega la era de la robòtica blanda. <<https://www.efe.com/efe/espana/efefuturo/llega-la-era-de-robotica-blanda/50000905-3769481>>. Pàgina consultada el 14 de juny del 2019.

- Optogenética, la gran revolución del estudio del cerebro. (2015). *Open Mind*. <<https://www.bbvaopenmind.com/ciencia/biociencias/optogenetica-la-gran-revolucion-del-estudio-del-cerebro/>>. Notícia consultada el 14 de juny del 2019.
- Real Academia de Ingeniería. (2019). *Electrocorticografía*. <<http://diccionario.raing.es/es/lema/electrocorticograf%C3%ADa>>. Pàgina consultada el 24 de juny del 2019.
- Psicología y mente. (2019). *Duramadre (cerebro): Anatomía y funciones*. <<https://psicologiaymente.com/neurociencias/duramadre-cerebro>>. Pàgina consultada el 24 de juny del 2019.
- Schalk, G. i Leuthardt, E.C. Brain-Computer Interfaces Using Electrographic Signals. (2012). *Schalk Lab*. <http://www.schalklab.org/sites/default/files/misc/Brain-Computer%20Interfaces%20Using%20Electrographic%20Signals_0.pdf>. Article consultat el 24 de juny del 2019.
- Fisiquiweb. (2019). *Campo magnético creado por una corriente eléctrica. Experiencia de Oersted*. <<https://fisiquiweb.es/Videos/Electromagnetismo/Oersted.htm>>. Pàgina consultada el 24 de juny del 2019.
- WhatIs.com. (2019). *Superconducting Quantum Interference Device*. <<https://whatIs.techtarget.com/definition/superconducting-quantum-interference-device>>. Pàgina consultada el 25 de juny del 2019.
- Ramos-Argüelles, F., Morales, G., Egozcue, S., Pabón, R.M. i Alonso, M.T. Técnicas básicas de electroencefalografía: principios y aplicaciones clínicas. (2009). *SciELO*. <<http://scielo.isciii.es/pdf/asisna/v32s3/original6.pdf>>. Article consultat el 26 de juny del 2019.
- Neurotechedu. (2019). *Intro to Brain Computer Interface*. <<http://learn.neurotechedu.com/introtobci/>>. Pàgina consultada el 26 de juny del 2019.
- Monkeys consciously control a robot arm using only brain. (2003). *Duke Today*. <<https://today.duke.edu/2003/10/20031013.html>>. Notícia consultada el 27 de juny del 2019.
- Biología Médica. (2010). *Contracción del Músculo Cardíaco: Las uniones GAP*. <<http://biologiamedica.blogspot.com/2010/09/contraccion-del->>

- [musculo-cardiaco-las_22.html](#)>. Pàgina consultada el 27 de juny del 2019.
- Docsity. (2007). *Miogénesis*. <<https://www.doccity.com/es/histologia-tema-5-miogenesis/2756214/>>. Pàgina consultada el 27 de juny del 2019.
 - BC Open Textbooks. (2019). *Muscle Fiber Contraction and Relaxation*. <<https://opentextbc.ca/anatomyandphysiology/chapter/10-3-muscle-fiber-contraction-and-relaxation/>>. Pàgina consultada el 27 de juny del 2019.
 - Raphael Vallat. (2018). *Compute the average bandpower of an EEG signal*. <<https://raphaelvallat.com/bandpower.html>>. Pàgina consultada l'1 de juliol de 2019.
 - Quora. (2019). *How do current brain-computer interfaces work?* <<https://www.quora.com/How-do-current-brain-computer-interfaces-work>>. Pàgina consultada l'1 de juny de 2019.
 - Al-ani, Tarik i Trad, Dalia. *Signal Processing and Classification Approaches for Brain-Computer Interface*. (2010). *Intech Open*. <<https://www.intechopen.com/books/intelligent-and-biosensors/signal-processing-and-classification-approaches-for-brain-computer-interface>>. Article consultat el 2 de juliol de 2019.
 - Gonzalez Roman, Avid. *EEG Signal Processing for BCI Applications*. (2012). *HAL*. <<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00742211/document>>. Article consultat el 2 de juliol de 2019.
 - Hornero, R., Corralejo, R. i Álvarez, D. *Brain-Computer Interface (BCI) aplicado al entrenamiento cognitivo y control domótico para prevenir los efectos del envejecimiento. Cuadernos de la Fundación General CSIC nº 8*. <<http://envejecimiento.csic.es/documentos/documentos/lychnos08-hornero-braincomputer-01.pdf>>. Article consultat el 3 de juliol de 2019.
 - ResearchGate. (2018). *Prospects and Problems of Brain Computer Interface in Healthcare*. <https://www.researchgate.net/publication/328461488_Prospects_and_Problems_of_Brain_Computer_Interface_in_Healthcare>. Pàgina consultada el 3 de juliol de 2019.
 - Sparkfun (2019). *Flex sensor*. <<https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Flex/FlexSensor.pdf>>. Pàgina consultada el 4 d'agost de 2019.

- Inscrutable circuits. (2019). *How to use a flex sensor-Arduino tutorial*. <<https://www.instructables.com/id/How-to-use-a-Flex-Sensor-Arduino-Tutorial/>>. Pàgina consultada el 4 d'agost de 2019.
- Definición de. (2019). *LED*. <<https://definicion.de/led/>>. Pàgina consultada el 4 d'agost de 2019.
- Electrónica estudio.com. (2019). *Qué es un microcontrolador?*. <<https://www.electronicaestudio.com/que-es-un-microcontrolador/>>. Pàgina consultada el 4 d'agost de 2019.
- Arduino.cl. (2019). *¿Qué es Arduino?* <<http://arduino.cl/que-es-arduino/>>. Pàgina consultada el 5 d'agost de 2019.
- Xataka. (2018). *Qué es Arduino, cómo funciona y qué puedes hacer con uno*. <<https://www.xataka.com/basics/que-arduino-como-functiona-que-puedes-hacer-uno>>. Pàgina consultada el 5 d'agost de 2019.
- Xataka. (2018). *Empezar con Arduino: qué placa y kits de iniciación comprar*. <<https://www.xataka.com/makers/empezar-arduino-que-placa-kits-iniciacion-comprar>>. Pàgina consultada el 5 d'agost de 2019.
- Arduino.cl. (2019). *Arduino UNO*. <<http://arduino.cl/arduino-uno/>>. Pàgina consultada el 5 d'agost de 2019.
- Inscrutable circuits. (2019). *Arduino flex sensor glove*. <<https://www.instructables.com/id/Arduino-Flex-Sensor-Glove/>>. Pàgina consultada el 5 d'agost de 2019.
- Arduino.cl. (2019). *Modulación por ancho de pulso (PWM)*. <<http://www.arduino.ut fsm.cl/modulacion-por-ancho-de-pulso-pwm/>>. Pàgina consultada el 6 d'agost de 2019.
- Fotolitografía. (2018). *Bibling.us.es*. <<http://bibling.us.es/proyectos/abreproy/20018/fichero/proyecto%252Fcap%C3%ADtulos%252FCap%C3%ADtulo+3.pdf>>. Article consultat el 6 d'Agost de 2019.
- 3D natives. (2017). *¡Impresión 3D por estereolitografía, te lo explicamos todo!* <<https://www.3dnatives.com/es/impresion-3d-por-estereolitografia-les-explicamos-todo/>>. Pàgina consultada el 6 d'agost de 2019.

- Materialise. (2019). *Estereolitografía*. <<https://www.materialise.com/es/manufacturing/tecnologia-de-impresion-3d/estereolitografia>>. Pàgina consultada el 6 d'agost de 2019.
- Blog de HXX. (2014). *Tecnologías de impresión 3D (I): Fotopolimerización*. <<http://hxx.es/2014/12/06/tecnologias-de-impresion-3d-fotopolimerizacion/>>. Pàgina consultada el 6 d'agost de 2019.
- 3D natives. (2017). *¡FDM o modelado por deposición fundida, te explicamos todo!* <<https://www.3dnatives.com/es/modelado-por-deposicion-fundida29072015/>>. Pàgina consultada el 6 d'agost de 2019.
- Sculpteo. (2019). *Materiales de impresión 3D de plástico y polímero usando tecnología de sinterizado selectivo láser (SLS)*. <<https://www.sculpteo.com/es/materiales/sls-materiales/>>. Pàgina consultada el 6 d'agost de 2019.
- ALL3DP. (2019). *Aprende a diferenciar entre los 9 tipos de impresoras 3D que hay en el mercado en este momento: FDM, SLA, DLP, SLS, SLM, EBM, LOM, BJ y MJ*. <<https://all3dp.com/es/1/tipos-de-impresoras-3d-tecnologia-de-impresion-3d/>>. Pàgina consultada el 6 d'agost de 2019.
- Horchler, Andrew. Biohybrid robots built from living tissue start to take shape. (2016). *The conversation*. <<https://theconversation.com/biohybrid-robots-built-from-living-tissue-start-to-take-shape-62759>>. Notícia consultada el 5 de setembre de 2019.
- Universidad de Vigo. (2019). *Fijador paraformaldehído tamponado*. <<https://mmegias.webs.uvigo.es/6-tecnicas/protocolos/s-fijador-pf-4.php>>. Pàgina consultada el 5 de setembre de 2019.
- Esteban Cantos, Andrés i Alonso Martí, Covadonga. Preparación de muestras para microscopía confocal. (2019). *INIA*. <<http://labviruscelula.agripa.org/download-file/413ff5ae-b68d-468c-97c7-7e0450dff4ff/>>. Article consultat el 5 de setembre de 2019.
- Sigma-Aldrich. (2019). *bisBenzimide H 33342 trihydrochloride*. <<https://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/sigma/14533?lang=es®ion=ES>>. Pàgina consultada el 5 de setembre de 2019.

- CSIC. (2019). *Microscopía confocal*. <http://wwwuser.cnb.csic.es/~fotonica/Photonic_en/Review/confocal.htm>. Pàgina consultada el 5 de setembre de 2019.
- Resino, Salvador. Epidemiología Molecular de Enfermedades Infecciosas. (2011). *Microscopio confocal*. <<https://epidemiologia molecular.com/microscopio-confocal/>>. Pàgina consultada el 5 de setembre de 2019.

RECURSOS PICTÒRICS

- Biología 3º Secundaria. (2012). *El modelo de estímulo-procesamiento-respuesta*. <<http://biologiaterceroiem.blogspot.com/2012/03/el-modelo-de-estimulo-procesamiento.html>>. Pàgina consultada el 29 d'abril del 2019.
- Partes.del. (2019). *Partes de la neurona*. <https://www.partesdel.com/partes_de_la_neurona.html>. Pàgina consultada el 19 d'abril del 2019.
- Concepto definición. (2019). *Neurona asociativa o interneurona*. <<https://conceptodefinicion.de/neurona-asociativa-o-interneurona/>>. Pàgina consultada el 3 d'abril del 2019.
- Psicoactiva. (2019). *Las células gliales del sistema nervioso: tipos y funciones*. <<https://www.psicoactiva.com/blog/las-celulas-gliales-tipos-funciones/>>. Pàgina consultada el 13 d'abril del 2019.
- Pictoeduca (2019). *La función de relación: el sistema nervioso*. <<https://www.pictoeduca.com/leccion/194/el-sistema-nervioso/pag/1388>>. Pàgina consultada el 19 d'abril del 2019.
- Psicología y mente. (2019). *Los lóbulos del cerebro y sus distintas funciones*. <<https://psicologiaymente.com/neurociencias/lobulos-del-cerebro-funciones>>. Pàgina consultada el 5 de maig del 2019.
- Bea, Manuel. Info lesión medul·lar. (2017). *El sistema nervioso*. <<https://infolesionmedular.com/lesion-medular-primeros-conocimientos/sistema-nervioso/>>. Pàgina consultada el 19 d'abril del 2019.
- Wikipedia. (2019). *Nervio*. <<https://es.wikipedia.org/wiki/Nervio>>. Pàgina consultada el 19 d'abril del 2019.

- Khan Academy. (2019). *La sinapsis*. <<https://es.khanacademy.org/science/biology/human-biology/neuron-nervous-system/a/the-synapse>>. Pàgina consultada el 19 d'abril del 2019.
- MARIEB, E.N. (2008). *Anatomía y Fisiología humana*. Espanya: Pearson.
- Monografias.com. (2019). *Potencial de membrana y potencial de acción - Fisiología humana*. <<https://www.monografias.com/trabajos41/potencial-membrana/potencial-membrana2.shtml>>. Pàgina consultada el 13 de juny del 2019.
- Wikipedia. (2019). *Sinapsis*. <<https://es.wikipedia.org/wiki/Sinapsis>>. Pàgina consultada el 13 de juny del 2019.
- Pinterest. (2019). *Tejido nervioso*. <<https://www.pinterest.es/pin/408560997425169553/>>. Pàgina consultada el 15 de juny del 2019.
- Universidad Autónoma de Zaragoza. (2019). *Sistemas tegumentario, esquelético y muscular*. <<https://www.uaz.edu.mx/histo/MorfoEmbrio/Carlson/Cap08/Cap08.htm>>. Pàgina consultada el 15 de juny del 2019.
- ASHWELL, K. *El cuerpo humano. Manual de identificación*. Xina: Ilus Books, 2016.
- Slideplayer. (2019). *Mecanismo general de la contracción muscular*. <<https://slideplayer.es/slide/11621687/>>. Pàgina consultada el 22 de juny del 2019.
- Wordpress. (2019). *Actina, miosina y movimiento celular*. <<https://materianeurocienciasi.files.wordpress.com/2014/01/pdf-contraccion-muscular.pdf>>. Pàgina consultada el 22 de juny del 2019.
- Jahan Zeb Gul, Memoon Sajid, Muhammad Muqeet Rehman, Ghayas Uddin Siddiqui, Imran Shah, Kyung-Hwan Kim, Jae-Wook Lee & Kyung Hyun Choi. 3D printing for soft robotics – a review. (2018). *Science and Technology of Advanced Materials*, 19:1, 243-262.
- Raman, R., Cvetkovic, C. I Bashir, R. A modular approach to the design, fabrication, and characterization of muscle-powered biological machines. (2017). *Nature Protocols*. Vol. 12. Num. 3.
- Slideshare. (2009). *Miogénesis y diversidad muscular*. <<https://es.slideshare.net/Pauli.olivares/miogenesis-y-diversidad-muscular>>. Pàgina consultada el 12 de juliol del 2019.

- Morimoto, Y., Hiroaki, O. i Takeuchi, S. Biohybrid robot powered by an antagonistic pair of skeletal muscle tissues. (2018). *Science Robotics*.
- Wacom Experience Center VALENCIA. (2019). *Autodesk AutoCAD*. <<http://www.wacomvalencia.com/es/software-autocad/>>. Pàgina consultada el 16 de juliol del 2019.
- Inscrutable circuits. (2019). *How to use a flex sensor-Arduino tutorial*. <<https://www.instructables.com/id/How-to-use-a-Flex-Sensor-Arduino-Tutorial/>>. Pàgina consultada el 4 d'agost de 2019.
- García, Guarneros, Moreno, Ocaña, [...] de Vicente y Oliva, Jesús. Uso del microscopio confocal para la caracterización dimensional en micromecanizados (step height). (2012). *Research gate*. <https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Eschema-de-funcionamiento-de-un-Microscopio-Confocal-laser-Tomado-de-Baccallao_fig4_314113398>. Article consultat el 15 de setembre de 2019.

8. APÈNDIXS

8.1. GLOSSARI D'ACRÒNIMS

SNC: sistema nerviós central.

SNP: sistema nerviós perifèric.

ATP: adenosina trifosfat.

ACh: acetilcolina.

SLA: estereolitografia.

SLS: sinteritzat selectiu per làser.

DIW: direct ink writing.

FDM: fused deposition modelling.

DEA: elastòmer dielèctric.

SMP: polímer amb memòria de forma.

SMA: aliatge amb memòria de forma.

FEA: elastòmer fluid.

SSC: compost tou intel·ligent.

EPS: estimulació elèctrica per polsos.

PWM: modulació per ample de polsos.

BCI: brain-computer interface.

8.2. DOCUMENT INICIAL DEL PROJECTE BATX2LAB

20 ANYS D'INNOVACIÓ  **Parc Científic de Barcelona**
UNIVERSITAT DE BARCELONA

PROJECTE BATX2LAB 2019-2020
Fitxa projecte

Tutor PCB: MARIA GUIX NOGUERA Laboratori: SMART NANO-BIO-DEVICES Institut / empresa: INSTITUTE FOR BIOENGINEERING OF CATALUNYA (IBEL) Telèfon: 659768160 E-mail: mguix@ibelbarcelona.eu
Nom del centre: INSTITUT D'EL CASTELLÓ Tutor/a del centre: MARIA TERESA GARCIA CANALS Tel. Tutor: 660 666 163 E-mail Tutor: mgarcia78@xtec.cat Nom alumne: Laia Marcos Canal E-mail alumne: laia.marcos.canal@gmail.com Data presentació TR: Gener 2020

Proposta del treball experimental:

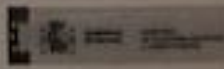
IMPRESSIÓ 3D D'UN MODEL DE DIT BASAT EN UNA PART FLEXIBLE (I.E. PDMS, SUBSTRAT POLIÈRIC) I UN CONSTRUCTE CEL·LULAR DE CÈL·LULES NISULARS.
S'APLICARAN PROTOCOLS D'ENTRENAMENT MITJANÇANT ESTÍMULS ELÈCTRIQUES.

Calendari i horari previst:

19, 20, 21	+	28, 29	AUGOST 2019
Training, disseny i impressió del dit	pladuració	Estimulació valoració de resultats	

Àrea de Difusió de la Ciència
Parc Científic de Barcelona
Baldri Reixac, 4
08028 Barcelona
Tel: 93 403 11 34

Amb el suport:

 **FECYT** 

8.3. REGISTRE DE VISITES BATX2LAB

20 ANYS D'INNOVACIÓ  **Parc Científic de Barcelona**
UNIVERSITAT DE BARCELONA

COM-IMP-025

PROJECTE BATX2LAB 2019-2020
Registre de visites

Tutor PCB: MARIA GUIX NOGUERA

Nom alumne/a: LAIA MARCOS CANAL

Dia de visita: 19-08-19

Hores: 8h

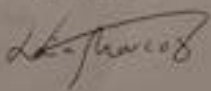
Objectiu:

- EFECTUAR ELS CORRESPONDENTS CURSOS DE SEGURETAT DEL LABORATORI.
- CONÈIXER ELS DIFERENTS MÈTODES DE FABRICACIÓ EN 3D I PLANIFICAR ELS EXPERIMENTS (PREPARACIÓ NOTULES I CÈL·LULES) I (II) IMPRESSIÓ ESQUELET.
- FAMILIARITZAR-SE AMB ELS MÈTODES D'ESTIMULACIÓ PER IMPULSOS ELÈCTRICS.

Resultats:

- DISENYIS DEL DITS ("ARTICULAT", NORMAL I PLATEJALWAT).
- IMPRESSIÓ DEL DIT ARTICULAT PER ESTEREOLITOGRAFIA.
- CURS DE MANIPULACIÓ DE LA IMPRESSORA 3D SUPERAT (TREBALLAR AUTÒNOMAMENT).
- OBSERVACIÓ DELS EFECTES DE L'ESTIMULACIÓ ELÈCTRICA EN NOTULES BASALS EN CÈL·LULES MUSCULARS.

Tutor PCB 

Alumne/a 

Comunicació, Màrqueting i Promoció
Difusió Ciència
c/ Baldori Reixac, 4-12.
08028 Barcelona
T: +34 93 403 11 34
M: +34 609 766 963
difusio-ciencia@pcb.upb.cat

Amb el suport de:

PROJECTE BATX2LAB 2019-2020 Registre de visites

Tutor PCB: MARIA GUIX NOGUERA

Nom alumne/a: LAIA CARLOS CAÑABAL

Dia de visita: 20-08-19

Hores: 8h

Objectiu:

- APRENDRE A PREPARAR EL PDNS I A IMPRIMIR AMB EL MÈTODE D'EXTRUSIÓ (DWL) → MANIPULACIÓ I CALIBRATGE DE LA INCREDIBLET (3D PRINTER).
- TRATAMENT DELS ARXIS STL ORIGINALS PER GENERAR UN G-CODE EDITABLE (AMB Slicer - DIVIDIR EN CAPES EL DISSENY).
- TEST DEL DIT ARTICULAT EL DIA ANTERIOR.

Resultats:

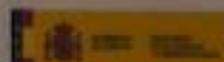
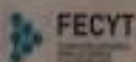
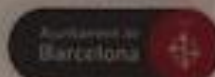
- EL DIT ARTICULAT OBTINGUT ÉS FLEXIBLE, DE LES MIDER DESITJADES I S'HA IMPRÉS CORRECTAMENT TOT I AIXÍ, AL FLEXIONAR-LO S'HA TRENCAT. LA LAIA DISSENYARÀ UN NOU DIT ARTICULAT MÉS LLAT, RUIT I AMB UNIÓ D'UNA SOLA TRA.
- S'HA IMPRÉS AMB ÈXIT EL "DIT PLA" TANT PER STEREO LITOGRAFIA COM PER DWL.
- S'HA OBTINGUT UNA ESTRUCTURA IMPRESA PER DIRECT WRITING AMB MÉS D'UN MATERIAL (MULTIPRINTING).

Tutor PCB

Alumne/a

Comunicació, Màrqueting i Promoció
Difusió Ciència
c/ Baldri Reixac, 4-12.
08028 Barcelona
T: +34 93 403 11 34
M: +34 609 766 963
difusio-ciencia@pcb.upb.cat

Amb el suport de:



PROJECTE BATX2LAB 2019-2020
Registre de visites

Tutor PCB: MARIA GUIX NOGUERA

Nom alumne/a: LAIA MARLOS CAÑAL

Dia de visita: 29-08-2019

Hores: 7h

Objectiu:

- POSAR A PUNT EL MONTATGE PER LA MEDICIÓ DE FORÇA AMB EL DIT (REAL vs. 3D PRINTED FLEXONAT MANUAMENT) DEL SISTEMA D'ARDUINO.
- EVALUACIÓ DEL NOU DISENY DE DIT ARTICULAT (STL i QUIT), I PREPARACIÓ DE NOU DISENY PER DIRECT WRITING (DIT PLA I LATERAL).
- PREPARACIÓ DEL SENSOR AMB FLEXO PER TREBALLAR EN CONDICIONS HUMIDES.

Resultats:

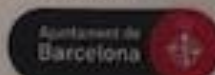
- S'HA ACONSEGUIT MESURAR LA FORÇA RELATIVA DEPENDENT DE L'ANGLE DE DEFORMACIÓ DEL DIT REAL vs. EL DIT IMPRÉS (PLA)
- NO S'HA POGUT IMPRIMIR EL NOU DISENY "STL i QUIT" PERQUÈ L'APARELL DE 3D PRINTING PER ESTEREOLITOGRAFIA ESTAVA ESPATLLAT, PERÒ EL DISENY DE DIT PLA I LATERAL S'HA IMPRÉS EN DUES ALTURES DIFERENTS
- LA CONNEXIÓ DEL FLEXO A L'ARDUINO S'HA AILLAT AMB PDAS I ETTA A PUNT PER LES MEDICIONS AMB EL DIT BIONIC.

Tutor PCB

Alumne/a

Comunicació, Màrqueting i Promoció
Difusió Ciència
c/ Baldri Reixac, 4-12.
08028 Barcelona
T: +34 93 403 11 34
M: +34 609 766 963
difusio-ciencia@pcb.upb.cat

Amb el suport de:



PROJECTE BATX2LAB 2019-2020

Registre de visites

Tutor PCB: MARIA GUIX NOGUERA

Nom alumne/a: LAIA MARIOS CAÑAL

Dia de visita: 26-08-2019

Hores: 7h

Objectiu:

- EVALUAR LA FORÇA AMB EL SENSOR FLEX DE LES ESTRUCTURES (2: "DIT RA" i "DIT ARTICULAT") FABRICADES AMB DIRECT WRITING.
- IMPRESSIÓ DEL DIT ARTICULAT PLE (MÉS PETIT) AMB BTEREOLITOGRAFIA.
- TRASPÀS DELS ANELLS D'HIDROGEL AMB CÈL·LULES A LES ESTRUCTURES IMPRESSES AMB DIRECT WRITING.

Resultats:

- LES ESTRUCTURES PER DIRECT WRITING NO S'HAN POGUT CARACTERITZAR PERQUE EL SENSOR FLEX S'HA DANYAT (connexió de pedal?). S'HA INTENTAT ARREGLAR PINTANT UNIR DE PLATA, PERÒ NO S'HA ACONSEGUIT. ES COMPARAN SENSORS NOUS.
- LA IMPRESSIÓ DEL DIT PLE HA ESTAT CORRECTE.
- TOTS ELS ANELLS S'HAN TRASPASSAT SATISFACTORIAMENT I S'HAN POGUT EN PEDI DE DIFFERENCIACIÓ PER TAL D'ARTICULAR-SE EL DÍGITS (D4).

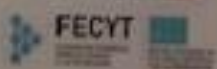
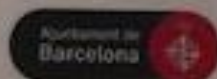


Tutor PCB

Alumne/a

Comunicació, Màrqueting i Promoció
Difusió Ciència
c/ Baldori Reixac, 4-12.
08028 Barcelona
T: +34 93 403 11 34
M: +34 609 766 963
difusio-ciencia@pcb.upb.cat

Amb el suport de:



PROJECTE BATX2LAB 2019-2020

Registre de visites

Tutor PCB: MARIA GUIX NOGUERA

Nom alumne/a: LAIA CARLOS CANA

Dia de visita: 30/08/2019

Hores: 4h

Objectiu:

- ESTIMULAR ELS DITS PREPARATS (TOTS AMB DW: DIT PLA, DIT PLA ARTICULAT - 2 ALTURES DIFERENTS) I OBSERVAR SI HI HA MOVIMENT (CICLE DE CONTRACCIÓ) DESPRÉS D'UNA HORA D'ESTIMULACIÓ.
- ENSAMBLAR ELS ANELLS AMB L'EL·LULEL A L'ESTRUCTURA DEL DIT TAU AMB MOTIL·LES (FABRICAT PER ESTEREOLITOGRAFIA).

Resultats:

- S'HA PREPARAT UN NOU ELETRODE QUE HA ESTIMULAT SATISFACTORIAMENT ELS TRES ESQUELETS I QUE PERMETIA LA VISUALITZACIÓ DEL SISTEMA (TAPA AMB FORATS).
- ELS DITS NO HAN MOSTRAT CAP MOVIMENT, POT SER DEUT: 1) FALTA DE MADURESA / ESTIMULACIÓ (EL LULEL) O (2) QUE LES CEL·LULES SIVIN MASSA VELL.
- ELS ANELLS S'HAN ENSAMBLAT CORRECTAMENT, I ELS DINDRETS SEGÜENT S'ESTIMULARA TOTA L'ESTRUCTURA.

Tutor PCB

Alumne/a

Comunicació, Màrqueting i Promoció
Difusió Ciència
c/ Baldri Reixac, 4-12.
08028 Barcelona
T: +34 93 403 11 34
M: +34 609 766 963
difusio-ciencia@pcb.upb.cat

Amb el suport de:

