

**CONFECCIÓ D'UNA PRÒTESI DE  
MÀ IMPRESA EN 3D I QUE  
FUNCIONA AMB TECNOLOGIA  
EMG (ELECTROMIOGRAMA)**

**Victor Stone**

## RESUM

Partint de que provinc d'una família que està plenament involucrada en el món laboral de la medicina i de la meva afició a la biònica i al món de la ficció futurista, s'ha plantejat construir una pròtesis que substitueixi una mà amb una impressora 3D i que pugui ser controlada amb tecnologia EMG (electromiograma), de tal manera que es captin els impulsos nerviosos de l'avantbraç i s'utilitzin per donar-li mobilitat a la pròtesi; a més de fer una base teòrica sòlida pel meu treball sobre la anatomia muscular i el sistema nerviós, i la prostètica i biònica. S'ha dut a terme el muntatge a partir de diversos components electrònics basats en programació Arduino i s'ha imprès la base material amb tecnologia d'impressió 3D. Tot i això, no he pogut assolir al cent per cent el meu objectiu principal i he hagut d'adaptar el resultat final per a que la pròtesi fos funcional d'una manera diferent a la plantejada originalment.

## ABSTRACT

Starting from the fact that I come from a family that is fully involved in the world of medicine and my hobby of bionics and the world of futuristic fiction, it has been proposed to build a prosthesis that replaces a hand with a 3D printer and that it is controlled with EMG (electromyogram) technology, in such a way that the nerve impulses of the forearm are captured and used to give mobility to the prosthesis; in addition to making a solid theoretical basis for my work on muscular anatomy and the nervous system, and prosthetics plus bionics. The assembly was made from various electronic components based on Arduino programming and the material of the base was printed with 3D printing technology. However, I was not able to achieve my main goal completely and I had to adapt the final result so that the prosthesis was functional in a different way than originally intended.

# TAULA DE CONTINGUTS

<b>AGRAÏMENTS .....</b>	<b>3</b>
<b>INTRODUCCIÓ .....</b>	<b>4</b>
<b>1. ELECTROFISIOLOGIA NEUROMUSCULAR .....</b>	<b>5</b>
1.1. EL SISTEMA NERVIÓS .....	5
1.2. LA NEURONA.....	8
1.2.1. Estructura de la neurona .....	8
1.2.2. Tipus de neurones .....	10
1.3. L'IMPULS NERVIÓS I EL POTENCIAL D'ACCIÓ .....	11
1.3.1. Potencial d'acció .....	11
1.4. EL SISTEMA MUSCULAR .....	13
1.4.1. Tipus de músculs .....	14
1.4.2. Unions neuromusculars .....	17
1.4.3. Transmissió neuromuscular .....	18
1.4.4. Contracció muscular .....	19
1.5. ELECTROMIOGRAFIA .....	20
<b>2. BIÒNICA I PROTÈTICA .....</b>	<b>23</b>
2.1. PRÒTESIS I BIOMATERIALS .....	24
2.1.1. Pròtesis .....	24
2.1.2. Biomaterials .....	26
2.2. BREU HISTÒRIA I EVOLUCIÓ .....	28
2.3. DIAGNÒSTIC I IMPLANTACIÓ .....	31
2.3.1. Criteris d'implantació d'una pròtesi .....	31
2.3.2. Preoperatori per a la implantació .....	32
2.3.3. Operació d'implantació .....	33
2.3.4. Procés de rehabilitació .....	34
<b>3. CONFECCIÓ DE LA PRÒTESI .....</b>	<b>34</b>
3.1. MATERIALS I COMPONENTS .....	35
3.2. PROCEDIMENT PRÀCTIC .....	39
3.3. RESULTAT FINAL .....	44
<b>CONCLUSIONS .....</b>	<b>45</b>
<b>FONTS DOCUMENTALS .....</b>	<b>47</b>
<b>ANNEX I - CODIS FONT UTILITZATS .....</b>	<b>51</b>
<b>ANNEX II - IMATGES DE MUNTATGE I PROVES .....</b>	<b>57</b>

## **AGRAÏMENTS**

En primer lloc, agrair a la XXX, tutora del meu treball i professora de biologia de l'XXX, el seu suport i la seva ajuda envers als problemes que m'han sorgit durant aquests mesos de treball. Agrair també els consells que m'ha aportat des del primer moment i el fet de que apostés per desenvolupar la meva idea.

Agraeixo també la col·laboració del Gerard Gascón i dels membres de l'Instagram de 3DEspann en l'elaboració de la pròtesi.

A més, agraeixo al meu professor de tecnologia de l'Institut XXX de la ESO que m'hagi obert les portes al món del qual em voldria dedicar en un futur no molt llunyà i per impulsar-me a fer recerca sobre temes relacionats amb l'enginyeria.

Per acabar m'agradaria agrair també el suport que m'han aportat la meva família i els meus amics en quant al desenvolupament del treball i per haver estimulat el meu entusiasme envers al tema.

## INTRODUCCIÓ

Aquest treball de recerca està directament relacionat amb els entorns de la biònica i la enginyeria biomèdica, i consisteix en la fabricació d'una pròtesi de mà funcional que mitjançant la tecnologia EMG o electromiogràfica, la qual capta els impulsos elèctrics musculars i els transforma en senyals mesurables, dugui a terme els moviments de prensió de la mà gràcies als impulsos elèctrics de l'avantbraç. D'aquesta manera, s'intenta imitar com la podria fer servir una persona que li manca aquesta extremitat degut a una amputació o degut a una malaltia congènita o adquirida.

A més, recull els principis de la protètica i de la electrofisiologia que serveixen com a base que sustenta el producte final del treball. D'aquesta manera, el procediment i la metodologia queden molt més clars i els conceptes més complexes poden fer-se més comprensibles.

Una de les majors motivacions que he tingut ha estat el fet de que tota la família materna es troba treballant en el món de la medicina i sovint, he tingut constància de gent que o bé ha perdut alguna extremitat degut a algun accident o alguna enfermetat o bé han nascut sense aquesta. Això ha fet que em plantegés quina vida portaria una persona amb aquesta situació, i la veritat es que estic segur que és molt difícil conviure amb aquesta discapacitat. La millor manera d'intentar que aquesta persona torni a tenir una vida el més normal possible és mitjançant una pròtesis, per la qual cosa m'he interessat pel tema i he decidit intentar ajudar en la mesura del possible, fent la meva pròpia. A més, el món de la protètica està constantment evolucionant i cada vegada es veuen pròtesis amb millors materials, més precises, amb més funcions i més semblants a una part humana com a tal.

Un altra motivació que he tingut, ha sigut la meva afició des de petit a la ciència ficció. Això involucra videojocs, pel·lícules, còmics, llibres... En molts d'aquests apareix la figura del "ciborg" (com podria ser a "Robocop", "Cyberpunk", o "Ghost in the Shell"), una persona modificada amb parts mecàniques que fan que o bé torni a tenir una vida com qualsevol altra persona o bé li dóna capacitats físiques sobrehumanes que un altra persona no tindria, cosa que sempre m'ha fascinat. De fet, el que més em fascina del tema es que, tot i ser ficció, moltes de les coses que es veuen no s'allunyen tant del que podem arribar a fer en un temps. És aquesta evolució el que més m'impulsa a intentar crear les meves pròpies pròtesis fent ús de la imaginació i en un futur poder millorar-les per imitar tot el possible al propi cos.

La última motivació que he tingut ha sigut el fet que la biònica no és un món molt conegut i no es comú trobar a gent que li interessi el tema, tot i que penso que si conseguís construir una pròtesis que es controlés amb impulsos nerviosos seria una manera de mostrar aquesta branca de la biologia i la tecnologia a més gent que poder els hi podria agradar. Tot i això, penso que ens uns anys aquesta ciència farà un creixement exponencial que suposarà un canvi fins i tot en la nostra manera de viure,

ja que la biònica no només suposa pròtesis, sinó que hi ha altra instrumentaria biònica que podrà facilitar-nos el nostra dia a dia, com microxips, nanorobots...

Com ja he esmentat prèviament de manera breu, els meus objectius han sigut: construir una pròtesis que funcioni amb tecnologia EMG i pugui ser 100% funcional en gent amb aquesta discapacitat física, així com recollir els principis de la biònica i dels impulsos musculars de tal manera que proporcioni una base teòrica al treball per poder aclarir conceptes, metodologies o altres dubtes que puguin sorgir. D'igual manera, a mi em servirà per fer un primer contacte amb el món de la enginyeria biomèdica (ja que és la carrera que m'agradaria fer tot just acabi aquest curs). A ser possible, també m'agradaria poder provar la pròtesis en algú que la necessiti i que donés la seva valoració després de passar uns dies utilitzant-la (tot i que no crec que sigui possible perquè no crec que pugui contactar amb ningú que estigui en aquesta situació o accedeixi a col·laborar).

Així doncs, els objectius quedarien recollits de la següent manera:

1. Construir una pròtesi de mà impresa en 3D que funcioni amb tecnologia EMG.
2. Confeccionar una base teòrica que sustenti el meu treball i el producte final.
3. (A ser possible) Probar la pròtesi en algú que realment la necessiti i tenir la seva valoració personal respecte al seu funcionament rutinari.

Quan a la metodologia que he seguit, tot ha girat envers la creació de la pròtesi. Per tant, primer de tot he buscat informació per confeccionar la base teòrica que alhora m'ha servit com a guia per construir la pròtesi. Després, al mateix temps que he anat construint la pròtesi, he anat anotant tot el procediment que he dut a terme. D'aquesta manera els continguts de la memòria han quedat repartits d'aquesta manera:

1. Introducció teòrica sobre la electrofisiologia i el que involucra (tecnologia d'electromiograma, impulsos musculars, neurotransmissors, etc).
2. Introducció teòrica sobre la protètica i el que involucra (biomecànica, robòtica, biomaterials, etc).
3. Descripció del procés pràctic de la construcció de la pròtesi.

Finalment he redactat una conclusió on es recullen les reflexions que he tingut respecte al treball i on he donat una valoració personal del mateix, donant peu a coses que hagués millorat, coses que hagués canviat o per altra banda coses que m'ha agradat fer o penso que les he fet bé. Per últim, he recollit totes les fonts i altres informacions addicionals a l'annex de les últimes pàgines.

# 1. ELECTROFISIOLOGIA NEUROMUSCULAR

El primer gran tema que es veu involucrat en aquest treball és el món dels impulsos nerviosos, més concretament la electrofisiologia neuromuscular. Aquesta és la branca de la biologia i la medicina que estudia els impulsos nerviosos provinents del cervell que reben els músculs a l'hora de dur a terme un moviment com podria ser la contracció o relaxació muscular. Per tant ho podríem definir com: l'estudi que explica com un **event elèctric** (l'impuls) es transforma en un **event mecànic** (la contracció/relaxació). Anem a veure més d'aprop aquests dos events:

1. **Event elèctric:** Es tracta del potencial d'acció que es transmet en forma d'impuls nerviós a través de les membranes cel·lulars.
2. **Event mecànic:** Es tracta de la contracció (i per tant disminució) o relaxació (i per tant elongació) del sarcòmer del múscul.

## 1.1. EL SISTEMA NERVIÓS

El sistema nerviós es un conjunt de cèl·lules, òrgans i estructures que tenen la funció de captar estímuls o senyals per tal de poder processar-los i generar una resposta en forma d'un altra senyal quasi immediata. D'aquesta manera coordina el nostre cos respecte als estímuls que rebem. Els exemples més clars són els nostres cinc sentits. Per exemple, si de cop ens arriba molta llum (senyal) als ulls (òrgan receptor) el sistema nerviós processa aquest estímulo i envia un altra senyal que podria ser tancar els ulls o contraure la pupila (resposta). És per això que el sistema nerviós es clau en aquest projecte, ja que també és el responsable de fer-nos contraure i relaxar els músculs segons els estímuls que nosaltres li enviem. El sistema nerviós es divideix en dues parts:

- **Sistema nerviós central:**
  - Encèfal:
    - Cervell:
      - Diencefal
      - Telencefal
    - Cerebel
    - Tronc encefàlic:
      - Bulb raquidi
      - Protuberància anular
      - Mesencefal
  - Medul·la espinal:
    - Cervical
    - Toràcica
    - Lumbar
    - Sacra
- **Sistema nerviós perifèric:**
  - Vegetatiu o autònom:
    - Composició: Fibres sensitives i motores

- Funció: Connectar el SN central amb la musculatura llisa i cardíaca i per tant controlar les accions del cos involuntàries (la digestió, la freqüència cardíaca, la respiració, etc.)
- Somàtic:
  - Composició: Nervis i ganglis
  - Funció: Controlar principalment la contracció de la musculatura esquelètica (moviments voluntaris)

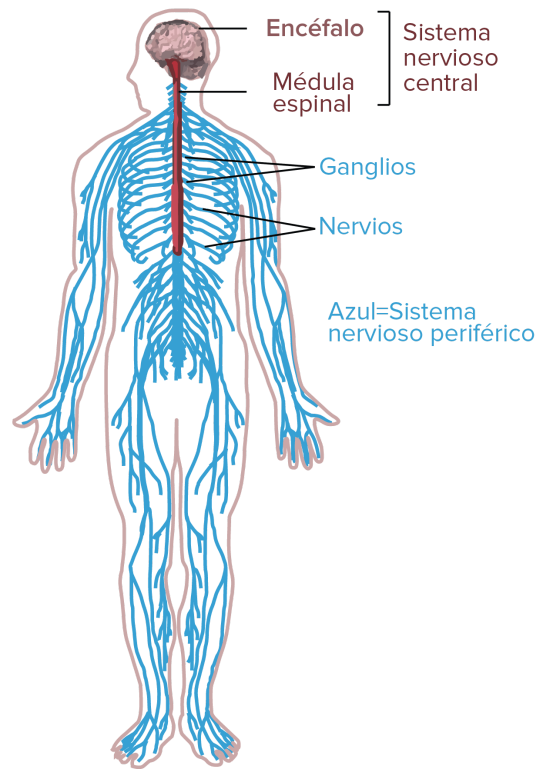
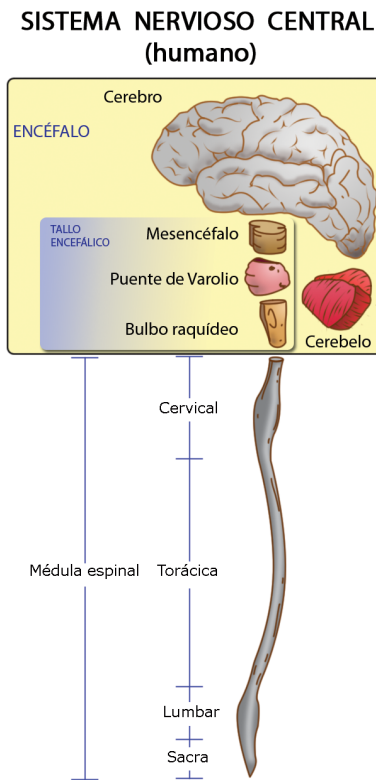


Fig. 1. Esquema gràfic del SNC

Fig. 2. Esquema gràfic del SNP (en blau)

Gràcies a aquesta última funció, la del sistema nervios perifèric somàtic, la part electrònica de la pròtesi serà capaç de recrear el funcionament de la mateixa, processant els senyals elèctrics que li arriben des del SN central i creant una resposta motora. D'aquesta manera es recrearien els passos següents:

1. El sistema nervios central crea i envia un senyal (en aquest cas moure la mà) a través del sistema nervios perifèric (somàtic, per ser més concrets).
2. Com, en aquest cas, el sistema nervios perifèric no té terminacions a la mà, l'electromiograma capta el senyal provinent de l'avantbraç i l'envia a la pròtesi, fent que aquesta dugui a terme l'acció i es tanqui.

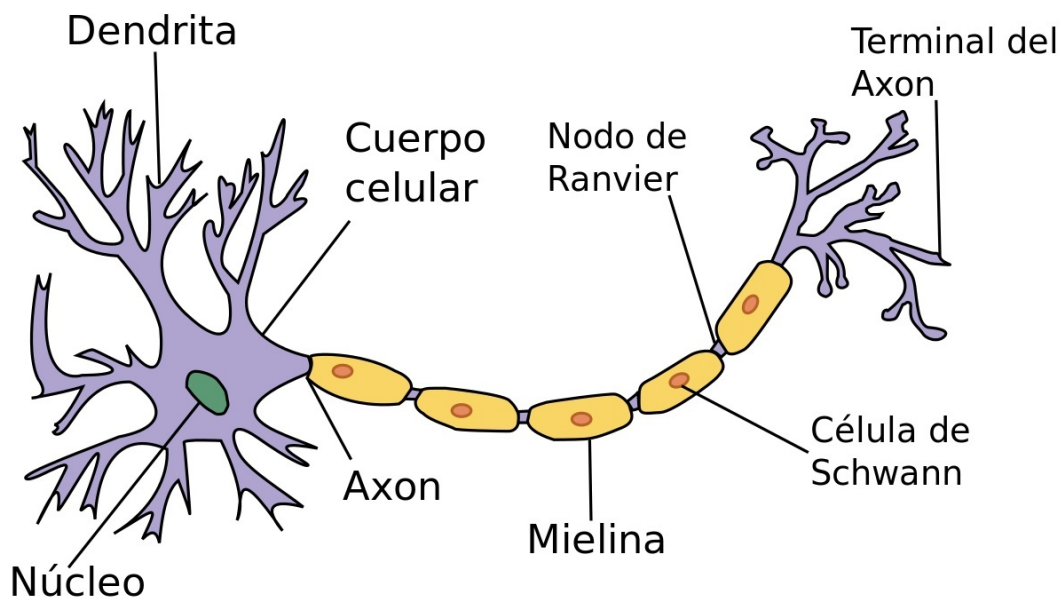


## 1.2. LA NEURONA

Un dels principals components del sistema nerviós són les neurones. Aquestes són cèl·lules capaces i encarregades de rebre una certa informació en forma de senyal elèctric o químic que després és transmès a altres cèl·lules per la pròpia neurona. Per aquesta raó, les neurones són una de les cèl·lules més importants del nostre cos, ja que constitueixen una gran part del funcionament del cervell. A més són les constituents dels nervis, ja que aquests estan fets de fibres nervioses, que alhora són prolongacions de neurones. És per això que una sola neurona pot arribar a fer més d'un metre de llargada.

### 1.2.1. ESTRUCTURA DE LA NEURONA:

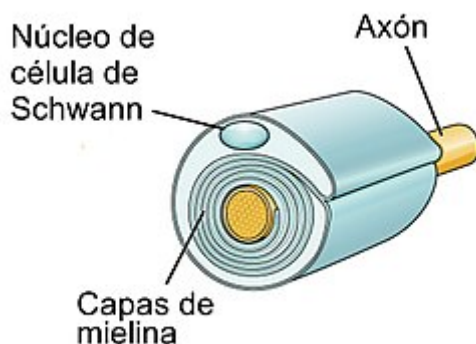
Principalment, el cos d'una neurona es divideix en dues parts: la **soma** o **cos cel·lular** i les seves respectives **dendrites**, i l'**axó**. Tot i això hi ha qui prefereix dividir la neurona en: soma, nucli, axó i dendrites per separat:



*Fig. 3. Esquema gràfic d'una neurona*

- **Soma:** També anomenat cos cel·lular és la part de la neurona que conté el nucli i una serie d'òrgànuls que tenen certes funcions, com podrien ser els ribosomes (on es duu a terme la síntesi de les proteïnes), els mitocondris (on es genera l'energia necessària per aquest procés) o l'aparell de Golgi (el qual afegeix glúcids a les proteïnes en el procés de la glicosilació i empaqueta les proteïnes glicosídiques en vesícules).
- **Nucli:** Aquest es troba visiblement a l'interior del soma i és el que conté tota la informació genètica de la cèl·lula (ADN en forma de cromosomes, els quals juntament amb proteïnes formen la cromatina).

- **Axó:** És la principal prolongació de la neurona, i són el principal component dels nervis, poden arribar a fer fins a un metre i mig de llargada (des de l'espina dorsal fins als peus per exemple). Aquest és l'encarregat de transportar l'impuls elèctric a altres cèl·lules a mode "d'autopista" a través de les terminacions nervioses del seu extrem. Ara bé, com que els impulsos nerviosos són elèctrics, al passar per l'axó haurien de perdre part de la seva càrrega pel camí degut a la resistència que imposa el propi axó. Aquí és on entren les cèl·lules de Schwann, la mielina i els nòduls de Ranvier:
- **Cèl·lules de Schwann:** Aquestes cèl·lules glials recobreixen per complert l'axó de la neurona i s'encarreguen d'aïllar l'axó elèctricament, gràcies a que aquestes cèl·lules generen mielina i aquesta es queda a les capes que estan en contacte amb l'axó.
- **Mielina:** És l'estructura laminar formada per les membranes plasmàtiques de les cèl·lules de Schwann que té la funció d'actuar com a aïllant elèctric, per la qual cosa serveix per evitar perdre part de la càrrega elèctrica durant l'axó i, juntament amb els nòduls de Ranvier, fer que aquest transport sigui el més ràpid i efectiu possible.
- **Nòdul de Ranvier:** Es tracta del petit espai que separa les diferents beines de mielina de l'axó. Aquest serveix per deixar un espai d'aproximadament un micròmetre pel qual l'axó pugui estar en contacte amb el medi extracel·lular i per tant l'impuls elèctric vagi saltant entre les cèl·lules de Schwann. Això fa que el transport sigui més ràpid i tingui la menor probabilitat d'error possible.



*Fig. 4. Esquema gràfic d'una cèl·lula de Schwann amb la seva respectiva beina de mielina envoltant l'axó d'una neurona.*

- **Terminacions nervioses:** L'axó s'acaba ramificant en diverses terminacions que tenen la funció de transmetre l'impuls nerviós a les dendrites d'altres neurones adjacents creant així una cadena i secretar diferents neurotransmissors com la epinefrina o *adrenalina*, la dopamina, la melatonina o la histamina, els quals serveixen per activar

o desactivar el funcionament de diverses cèl·lules del cos. Les terminacions nervioses també poden acabar en un múscul o una glàndula. És el cas de les neurones motores.

- **Dendrites:** Són les diferents ramificacions que s'originen al soma de la neurona i són responsables de la recepció d'estímuls (per això forma part de la secció receptiva de la neurona) y de l'alimentació cel·lular. A més tenen la funció d'establir connexions entre les neurones. Són riques en orgànuls que contribueixen al procés de la sinapsi.

## 1.2.2. TIPUS DE NEURONES

Es poden classificar les neurones segons tres criteris diferents:

- **Segons la funció que fan:**
  - **Neurones motores:** Les responsables del moviment del cos tan voluntari (braç, cama...) com involuntari (batec del cor, respiració...).
  - **Neurones sensorials:** Les responsables de captar i processar els estímuls externs mitjançant els sentits (vista, oïda, olfacte, tacte i gust).
  - **Neurones intraneuronals:** S'organitzen en grans xarxes i són les responsables de crear processos cognitius (pensaments, memòria...).
- **Segons la seva forma:**
  - **Neurones piramidals:** Tenen forma piramidal.
  - **Neurones fusiformes:** Tenen forma cilíndrica.
  - **Neurones polièdriques:** Tenen una forma geomètrica molt definida.
  - **Neurones estrellades:** Tenen forma d'estrella (moltes extremitats).
  - **Neurones esfèriques:** Tenen forma circular o d'esfera
- **Segons la seva polaritat:**
  - **Neurones unipolars:** Tenen una sola prolongació que funciona com axó i com a dendrita al mateix temps.
  - **Neurones monopolars:** Tenen una sola dendrita que es bifurca en dos branques.
  - **Neurones bipolars:** Tenen una dendrita i un axó.
  - **Neurones multipolars:** Tenen un axó i varies dendrites (la majoria).
  - **Neurones anaxòniques:** Les dendrites no es poden diferenciar de l'axó ja que ambdós són molt petits.

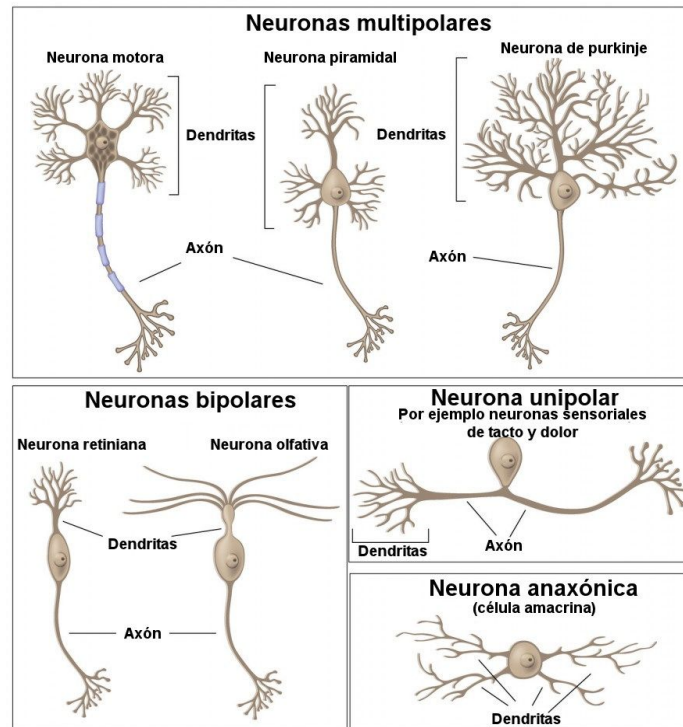


Fig. 5. Els diferents tipus de neurones segons la seva polaritat, forma i funció.

## 1.3. L'IMPULS NERVIÓS I EL POTENCIAL D'ACCIÓ

Un dels punts més importants d'aquest tema és saber què és un impuls (tant nerviós com elèctric) i saber com actua, ja que aquests són els senyals encarregats d'activar o desactivar el múscul per que es contregui o es relaxi, a més d'altres teixits corporals com podrien ser les glàndules. Per començar, hem de saber definir bé el que és el **potencial d'acció** d'un impuls nerviós i saber les seves fases. També és important que el potencial d'acció i l'impuls nerviós en si no són el mateix, ja que el potencial d'acció és la descàrrega elèctrica que genera una ona que es transmet a través de les membranes cel·lulars de les neurones. Aquesta ona és el missatge que es transporta a través del sistema nerviós i que arriba als músculs i a les glàndules i és el que es coneix com impuls nerviós, tot i que moltes vegades s'engloba tot en el potencial d'acció. Per això em centraré en explicar què és i quines fases té.

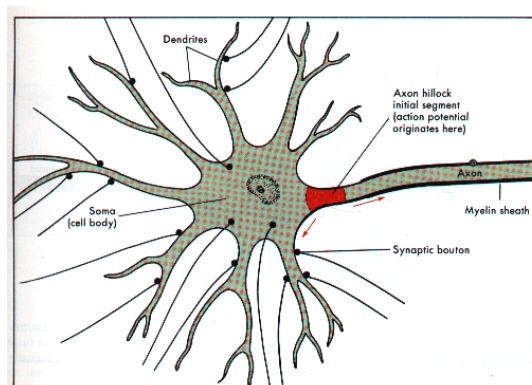
### 1.3.1. POTENCIAL D'ACCIÓ

El potencial d'acció o impuls nerviós és la descàrrega elèctrica que viatja a través de la membrana cel·lular modificant la distribució de la càrrega elèctrica de la mateixa. El cas on més trobem aquest procés és en les cèl·lules del sistema nerviós (neurones), on aquest potencial d'acció es transmet de neurona en neurona fins a arribar a altres teixits corporals com els músculs o les glàndules, les quals desenvolupen una resposta en forma de contracció o relaxació en el cas dels músculs o d'alliberament d'una hormona en el cas de les glàndules.

La principal funció d'un potencial d'acció és transportar un impuls nerviós a través de les neurones que conformen un nervi perquè aquest pugui desenvolupar la seva funció (moure un múscul, activar una glàndula, etc.). Aquest potencial d'acció passa per diferents fases:

1. **Potencial de repòs:** En aquesta primera fase, la neurona es troba en el seu **estat basal**, la qual cosa significa que encara no ha patit cap alteració elèctrica. A més, la **bomba de sodi-potassi** (enzim present a la membrana cel·lular) està activa. Aquesta actua contra gradient, expulsant tres ions de sodi ( $\text{Na}^+$ ) per cada dos ions de potassi ( $\text{K}^+$ ) que absorbeix. Això també fa que s'estableixi un voltatge elèctric negatiu a la membrana, d'entre  $-70$  i  $-90$  mV, ja que surten més ions positius dels que entren.
2. **Despolarització:** És la primera fase del potencial en sí. L'estimulació fa que s'obrin els **canals de sodi** a favor de gradient del **con axònic\***, la qual cosa fa que els ions de sodi ( $\text{Na}^+$ ) entrin a la neurona de forma massiva. A més, les bombes de sodi-potassi deixen de funcionar. Això fa que la càrrega elèctrica de la membrana cel·lular passi de tenir valors negatius ( $-70$  mV) a tenir valors positius ( $30$  mV).

\*El con axònic és una part especialitzada del cos d'una neurona que connecta a l'axó. Aquesta zona està molt enriquida en canals i transportadors que requereixen energia (en forma d'ATP), de manera que aquesta zona de la neurona té una alta concentració en mitocòndries. En el con axònic hi ha una gran quantitat d'ions que són transportats activament contra els seus gradients de concentració.



**FIGURE 4-6** A spinal motor neuron with multiple synapses on both soma and dendrites. The axon hillock-initial segment has the lowest threshold, and as a result, action potentials tend to originate here.

*Fig. 6. Marcat en vermell, representació del con axònic d'una neurona.*

3. **Repolarització:** A continuació, es tanquen els canals de sodi (per la qual cosa els ions de sodi deixen d'entrar a la cèl·lula) i s'obren els **canals de potassi**, cosa que fa que surtin molts ions de potassi de la cèl·lula, repel·lint alhora els ions positius de la cèl·lula, ja que les càrregues del mateix signe es repel·leixen. D'aquesta manera es fa que la càrrega elèctrica de la neurona torni a ser negativa.

4. **Hiperpolarització:** Els canals de potassi segueixen oberts, cosa que fa que la càrrega elèctrica segueixi baixant fins al punt d'hiperpolaritzar-se. Això suposa que la càrrega elèctrica sigui fins i tot més baixa que en el seu estat en repòs (>-70 mV). En aquest punt, es tanquen els canals de potassi i s'obren els de sodi (perquè la càrrega elèctrica deixi de baixar).
5. **Potencial de repòs:** De nou, la bomba de sodi-potassi es torna a activar perquè tornin a entrar ions positius i així regular la càrrega elèctrica. Aquesta torna a ser igual que al seu estat basal (-70 mV).
6. **Potencial d'acció i alliberament de neurotransmissors:** És un procés bioelèctric molt complex que es produeix al llarg de l'axó, anant des del con axònic fins als botons terminals de l'axó. Aquests botons contenen canals de calci que s'activen quan el potencial d'acció passa a través seu. Alhora, les vesícules s'obren i expulsen neurotransmissors a l'**espai sinàptic\***. D'aquesta manera, el potencial d'acció també és el responsable d'alliberar neurotransmissors, sent la principal font de transmissió d'informació nerviosa al nostre organisme.

\*L'espai sinàptic es el lloc de connexió entre dues neurones. És en aquesta zona on es produeix l'intercanvi de neurotransmissors i la sinapsi, la qual posteriorment he explicat amb més detall i amb l'ajuda d'una imatge descriptiva.

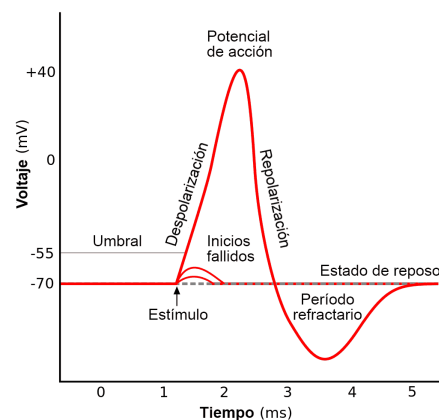


Fig. 6. Esquema gràfic de les diferents fases del potencial d'acció, relacionant el voltatge de la membrana neuronal en mV i el temps que transcorre en ms.

## 1.4. EL SISTEMA MUSCULAR

El sistema muscular és un conjunt d'estructures o teixits anomenats **músculs**, presents a quasi tots els animals. Aquests són més de 650 (40% del volum i la massa total del cos humà) i tenen la funció principal de donar mobilitat, estabilitat i forma al cos. Aquests músculs poden tenir una mobilitat voluntaria o involuntaria segons el tipus de múscul del qual es tracti.

En aquest treball, em centraré sobretot en els músculs de mobilitat voluntaria, és a dir que em centraré en els músculs que requereixin del funcionament del sistema nerviós somàtic per dur a terme el moviment que es desitgi, ja que el braç està format per músculs voluntaris i hauré d'aprofitar els impulsos nerviosos d'aquest per poder construir la pròtesi. Tot i així també incidiré en els músculs involuntaris com el cor, per exemple.

Abans de parlar dels diferents tipus de músculs, és important diferenciar els actes reflexos dels actes voluntaris:

- **Actes reflexos:** Són aquells actes que es duen a terme de manera ràpida i sense l'acció del cervell, sinó que arriben només fins a la medul·la espinal. Per exemple, si apropem la mà al foc, la apartarem tot just notem el calor de la flama. Això es deu a que la mà, sensitivament, capta calor i es tradueix en un impuls que va des de la mà fins a la medul·la espinal, i d'aquesta directament al bíceps. D'aquesta manera es contrau el bíceps i s'aparta la mà.
- **Actes voluntaris:** Són aquells actes dels quals tenim una certa "premeditació", és a dir, és completament voluntari i en som conscients. A diferència dels reflexes, en aquests sí que participa el cervell.

#### 1.4.1. TIPUS DE MÚSCULS

Els diferents músculs que componen el cos es poden classificar segons la seva forma, la manera en la que es facin servir, etc. Tot i que la classificació més comú i més utilitzada per distingir els músculs és segons la seva disposició. Existeixen així tres tipus de músculs: **estriats** o **esquelètics**, **llisos** i **cardíacs**:

- **Músculs estriats o esquelètics:** La unitat fonamental d'aquest tipus de múscul es el **sarcòmer**. Per això, si l'observem amb el microscopi, podem veure les estries clares i fosques característiques del sarcòmer. Està compost per fibres que formen un fus (més curt que el del múscul llis), on els extrems són molt fins. Les fibres musculars estriades estan formades per un seguit de cèl·lules anomenades **mioblasts**, les quals contenen abundants filaments anomenats **miofibril·les** i que creen una espècie de "corda". La raó per la que es diuen músculs esquelètics és el fet de que aquests músculs estiguin connectat als ossos de l'esquelet mitjançant els **tendons**. Per aquest motiu, aquest primer tipus de múscul és el responsable dels moviments voluntaris del cos, ja que són capaços d'estirar-se i relaxar-se a voluntat donant-li així mobilitat a l'esquelet, a més de mantenir la postura i l'estabilitat del mateix. D'aquesta manera, aquest tipus de músculs són els que més coneixen (biceps, triceps, quadriiceps, bessons, etc.) També són la principal font de calor del cos i ajuden a mantenir la temperatura corporal vora els 37° C.

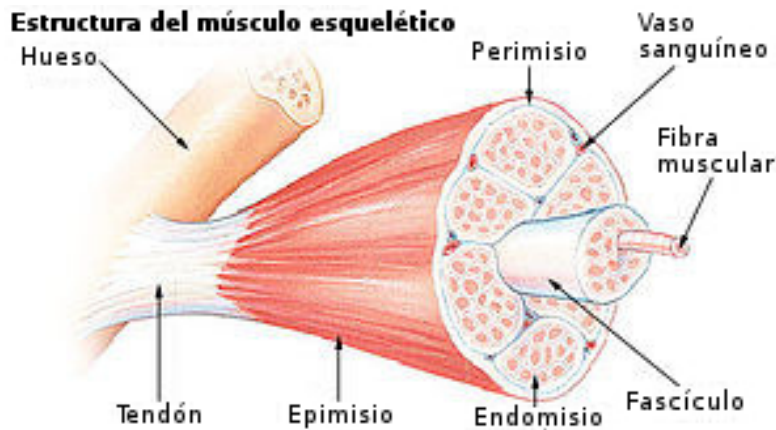


Fig. 7. Representació de l'estructura del múscul estriat o esquelètic.

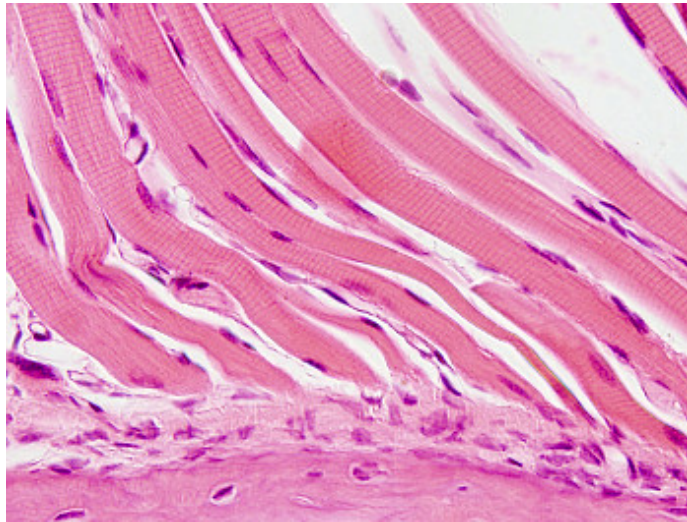


Fig. 8. Imatge a microscopi òptic de cèl·lules musculars estriades anclades al perimisio d'un os extremitat d'un ratolí "mus musculus" (augment no especificat).

- Músculs llisos:** També se'ls coneix amb el nom de músculs viscerals o involuntaris, ja que són els responsables de dur a terme els moviments involuntaris del cos. Així doncs els trobem en els aparells reproductors i excretors, en els vasos sanguinis, en la pell i en els òrgans interns (exceptuant del cor). Aquests músculs estan formats per cèl·lules amb forma de fus (al igual que els seus nuclis). D'igual manera aquests músculs estan connectats amb el sistema nerviós vegetatiu o autònom, ja que és el responsable de contraure'ls i relaxar-los involuntàriament. Alhora, els músculs llisos es poden dividir en: **músculs llisos unitaris** (els que es contrauen ràpidament i sense desencadenar un impuls nerviós) com els de l'úter i el sistema gastrointestinal, i els **músculs llisos multiunitaris** (els quals depenen de l'estimulació nerviosa) com els de l'iris o la tràquea. En general, la funció d'aquest tipus de múscul varia molt segons la zona on es trobi determinat múscul (tub digestiu, vasos sanguinis, bronquis, iris, pupila...).



## Músculo Liso

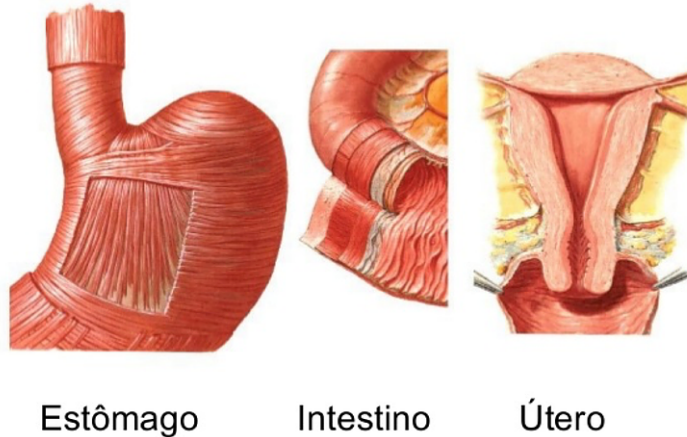


Fig. 9. Tres exemples d'òrgans on podem trobar musculatura llisa.

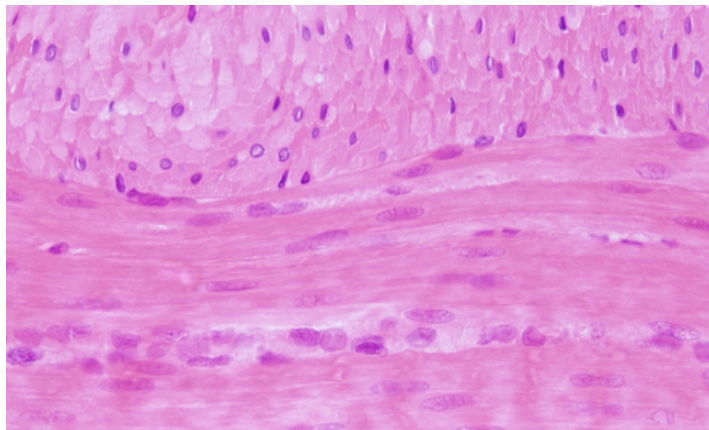


Fig. 10. Imatge a microscopi òptic de cèl·lules musculars del intestí prim d'un ratolí "mus musculus" (augment no específicats).

- **Músculs cardíacs:** També conegut com miocardi, és un tipus de teixit muscular estriat que envolta el cor formant una xarxa de fibres i ramificacions interconnectades a la paret del mateix. La seva única funció es fer que el cor bombi sang a través del sistema circulatori mitjançant la contracció que aquest efectua. És un múscul un tant especial, ja que tot i que sigui estriat, també és de moviment involuntari i rítmic, per la qual cosa no el podem considerar ni esquelètic ni llis. A més no requereix d'estimulació nerviosa per funcionar perquè és un **múscul miogènic**, és a dir, que és autoexcitable. Tot i això, el ritme al qual batega si que ve determinat pel sistema nerviós autònom, tant si el cos està en repòs com si està actiu. En general, el cor batega unes 10.000 vegades al dia, per la qual cosa la mitja de pulsacions per minut (ppm) d'una persona sana és d'entre 60 i 100 ppm, depenent de l'activitat física del moment.

## 1.4.2. UNIONS NEUROMUSCULARS:

Per a que un múscul pugui contraure's o relaxar-se i d'aquesta manera dur a terme la seva funció, prèviament s'ha de transportar l'impuls nerviós des del con axònic (on es crea a partir d'un estímul elèctric) fins al múscul. Això no seria possible sense unes unions que connecten les neurones dels nervis amb els músculs. D'aquestes unions se'n diuen **unions neuromusculars**, i més concretament uneixen l'axó de la neurona amb les fibres musculars.

Les terminacions nervioses situades al final de l'axó i les quals estan en contacte amb el múscul, tenen forma ovalada al seu extrem, a mode de "magatzem". Allà és on es troben els elements (com els mitocondris) que participen en la formació del neurotransmissor responsable de l'estimulació muscular: l'**acetilcolina**.

Al costat oposat de la terminal axònica es troba la membrana cel·lular de la fibra muscular determinada. A aquesta zona se la denomina **placa motora**. Per altra banda, la zona que roman entre la terminal axònica i la placa motora es denomina **esquerda sinàptica**, ja que és on es produeix el procés conegut com **sinapsi**. La forma que adopta la placa motora és la complementària a la terminal nerviosa de l'axó: aquesta és la d'una depressió amb uns petits plecs que fan que augmenti la seva superfície i per tant sigui més fàcil que els neurotransmissors circulin correctament a través de la membrana cel·lular.

A l'interior de la fibra muscular es troben, principalment, els nuclis de les cèl·lules que la conformen i les estructures encarregades de dur a terme la contracció de la fibra: les **miofibril·les**. Aquestes estan formades per unes unitats contràctils anomenades **sarcòmers**. Alhora, a l'interior dels sarcòmers trobem els filaments proteics responsables d'aquest moviment de contracció: l'**actina** i la **miosina** (els quals s'encargolen entre ells longitudinalment). Quan aquestes dues es rellisquen entre elles, es produeix l'escurçament del sarcòmer, el que alhora produeix l'escurçament del propi múscul.

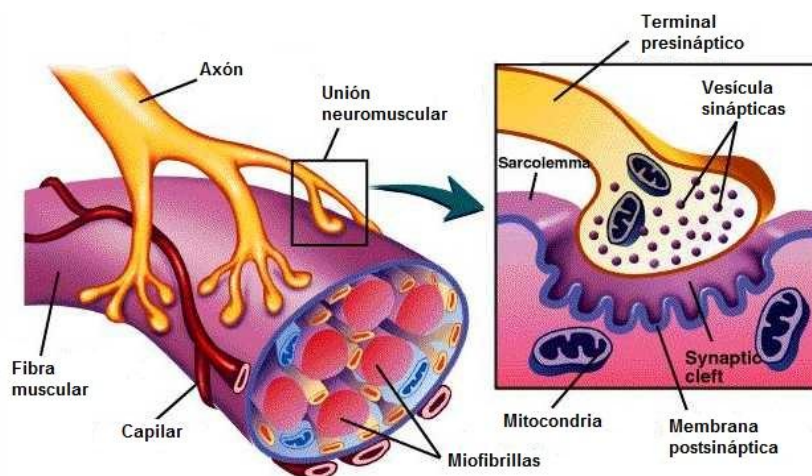
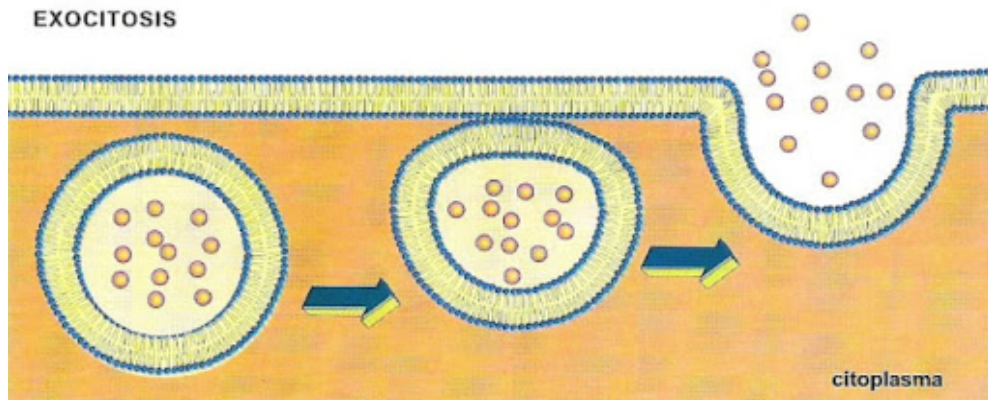


Fig. 11. Representació gràfica d'una unió neuromuscular.

## 1.4.3. TRANSMISSIÓ NEUROMUSCULAR

Per a que l'impuls nerviós arribi a la fibra muscular i compleixi així la seva funció, la de contraure un determinat múscul, abans s'ha de convertir el respectiu potencial d'acció a un senyal químic en forma de **neurotransmissor**, l'acetilcolina. Aquest és alliberat a l'esquerra sinàptica mitjançant un procés conegut com **exocitosis**, en el qual, la membrana plasmàtica de les vesícules que contenen els neurotransmissors es fusiona amb la membrana plasmàtica de la pròpia cèl·lula donant com a resultat l'expulsió dels mateixos a l'espai sinàptic (veure fig. 12).



*Fig. 12. Esquema gràfic sobre el procés d'exocitosis cel·lular.*

Després, el neurotransmissor arriba fins a la superfície de la placa motora, on interacciona amb uns determinats receptors de membrana (s'uneixen dos molècules d'acetilcolina per cada receptor). Aquesta interacció fa que es produeixi un canvi del potencial d'acció de la membrana cel·lular, el qual es transmet a través de tota la membrana muscular. Així és com passa de nou a ser un impuls nerviós (elèctric). Aleshores, un enzim anomenat acetilcolinesterasa, degrada el neurotransmissor i el torna a enviar a la neurona, on servirà per tornar a sintetitzar més acetilcolina.

Aquest procés que acabem de descriure s'anomena **sinapsi** (en aquest cas és, més concretament, una sinapsi química), i és un terme molt important de conèixer en aquest àmbit de la biologia, ja que es dona en totes les connexions neuronals (neurona-neurona, neurona-glàndula, neurona-múscul, etc.) i per tant és la manera amb la que el cervell queda connectat amb totes les parts del nostre cos.

Per tant, el procés que es duu a terme des de que es crea el potencial d'acció a la neurona fins que aquest arriba a la fibra muscular seria el següent:

1. Es crea el potencial d'acció al con axònic de la neurona. (ELÈCTRIC)
2. Aquest potencial d'acció es transmet a través de l'axó fins que arriba als terminals nerviosos de l'axó.
3. El potencial d'acció provoca l'alliberació d'un tipus de neurotransmissor anomenat acetilcolina a l'esquerra sinàptica. (QUÍMIC)
4. L'acetilcolina es transmet a la membrana muscular de la fibra muscular.

5. Els receptors que la reben provoquen que hi hagi una modificació del potencial d'acció a la membrana cel·lular de la fibra muscular. (ELÈCTRIC)

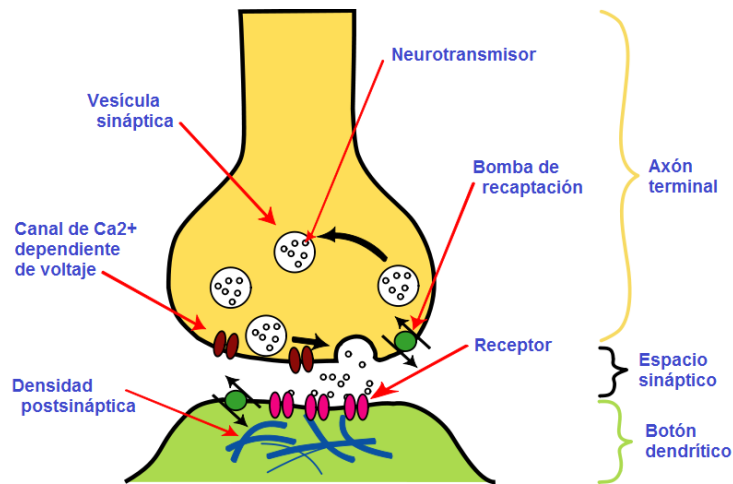


Fig. 13. Esquema gràfic del procés de sinapsi neuronal.

#### 1.4.4. CONTRACCIÓ MUSCULAR

Abans d'explicar el procés de contracció muscular, hem de tenir molt clara la estructura del sarcòmer de les fibres musculars, més concretament de les miofibril·les que el conformen:

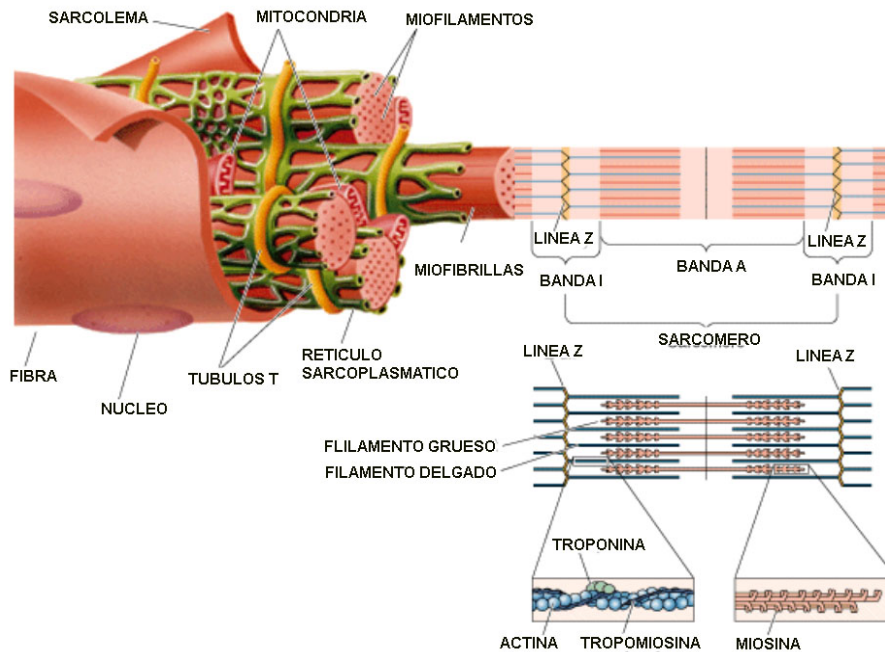


Fig. 14. Esquema gràfic de l'organització de la fibra muscular.

Ara sí, anem a veure les tres principals etapes de la contracció muscular:

1. Per començar i com ja he anomenat prèviament, s'envia un impuls elèctric (el potencial d'acció) a través de les neurones fins a la connexió entre la neurona i la fibra muscular (unió neuromuscular). És aquí on s'allibera el neurotransmissor anomenat acetilcolina, que s'uneix als receptors de la fibra muscular. Llavors s'inicia una reacció química als sarcòmers del múscul.
2. Una vegada s'ha unit l'acetilcolina als receptors, s'obren els canals de membrana de la fibra muscular. Això permet que s'alliberi calci dins del sarcòmer. Alhora, el calci facilita que una proteïna anomenada troponina s'uneixi a la banda de tropomiosina del sarcòmer. Aquesta banda fa que la miosina no es pugui unir a la actina i per tant no hi hagi contracció muscular. Ara bé, quan entra el calci, aquest activa a la troponina perquè desprengui la tropomiosina de la actina, i per tant els caps globulars de la miosina es puguin unir a les unions de l'actina.
3. Aleshores els caps globulars de la miosina es contrauen i d'aquesta manera contrau també l'actina, cosa que provoca la contracció total del múscul. Una vegada els receptors de membrana deixen de rebre acetilcolina, el procés s'inverteix i es relaxa el múscul.

## 1.5. ELECTROMIOGRAFIA

La **electromiografia** o (EMG) és un estudi clínic que registra l'activitat elèctrica dels músculs esquelètics. Aquest anàlisi es pot fer de dues maneres:

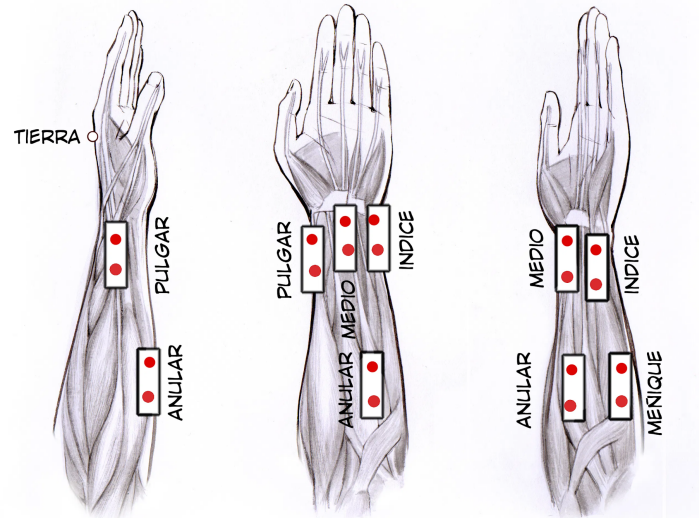
1. Amb **electrodes intramusculars**: Aquests electrodes són dues agulles que s'insereixen dins del múscul del pacient per captar amb més precisió l'activitat elèctrica d'aquell determinat múscul.



*Fig. 15. Exemple de electromiografia amb electrodes intramusculars.*

En un inici, el meu objectiu era construir una pròtesi de mà que fos capaç de distingir cada dit, per així poder moure els dits indeterminadament, sense haver de tancar tots els dits alhora. El problema estava en que per aconseguir aquest nivell de precisió

havia de recórrer a una electromiografia amb electrodes intramusculars, i per tant havia de punxar-me a mi mateix o a algún voluntari per provar la pròtesi, cosa que per motius obvis no podia ser. En la imatge següent es pot observar els punts d'inserció de les agulles per recollir l'activitat elèctrica de cada dit:



*Fig. 16. Esquema gràfic dels punts d'inserció de les agulles segons cada dit.*

2. Amb **electrodes superficials**: Aquests electrodes són uns sensors adhesius que s'enganxen a la pell del pacient sobre el múscul del qual es vulgui fer l'anàlisi.



*Fig. 17. Exemple d'electromiografia amb electrodes superficials.*

L'estudi d'electromiografia s'utilitza principalment en tres àmbits diferents:

1. Científics → Estudi del sistema neuromuscular.
2. Metges → Diagnòstic de malalties neuromusculars.
3. Fisioterapeutes → Monitorització de l'activitat dels músculs del pacient.

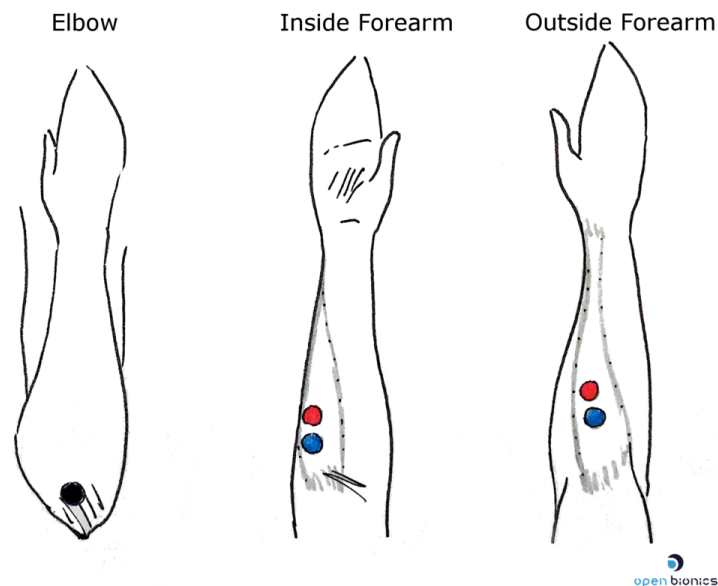
Aquest tipus d'electromiografia es el que faré servir per a la confecció de la pròtesi. Amb els adhesius captaré els estímuls elèctrics de l'avantbraç que es produeixen al tancar la mà, i d'aquesta manera transformaré els estímuls en senyals elèctriques que seran enviades als servomotors.

Al igual que al cas anterior, els sensors elèctrics de la electromiografia tenen una determinada manera de col·locar-los sobre la superfície del múscul. És important, abans de posar els electrodes, netejar la zona d'adhesió per evitar interferències. Per tenir una bona lectura elèctrica, s'han de posar els adhesius de la següent manera:

Vermell → Centre del múscul del qual volem la lectura (vermell en la fig. 18).

Verd → Part final del múscul del qual volem la lectura (blau en la fig. 18).

Groc → Zona aliena a la qual volem fer la lectura (negre en la fig 18).



*Fig. 18. Esquema gràfic dels punts d'adhesió dels electrodes al avantbraç.*

En aquest cas, estem buscant una lectura del múscul flexor radial del carpi, ja que és el múscul més superficial de l'avantbraç i el que ens pot donar resultats més clars. També podríem prendre el múscul braquioradial, tot i que aquest només controla la flexió o extensió del polze. D'aquesta manera, si prenem el múscul flexor del carpi aconseguirem una lectura elèctrica de la flexió i relaxació dels quatre dits restants, i per tant de la contracció i relaxació del palmell de la mà. Per tant, a l'hora de col·locar els electrodes adhesius, els disposarem de la manera següent:

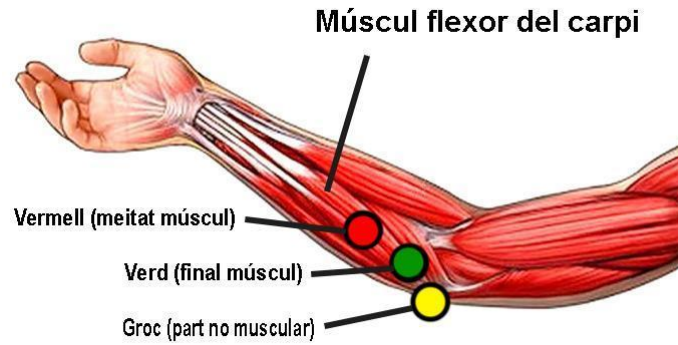


Fig. 19. Esquema gràfic de la disposició dels electrodes a l'avantbraç.

Els senyals elèctrics són captats pels elèctrodes i transportats fins a un amplificador, el qual amplifica el senyal perquè pugui ser captat pel sistema de registre, el qual normalment sol ser un monitor que genera un gràfic digital. Els resultats que mostra s'utilitzen per determinar si hi ha alguna malaltia en cas que el resultat sigui anormal. Aquest normalment indica una neuropatia o una miopatia.

A continuació podem veure un exemple de gràfica obtinguda amb un electromiograma. Com es pot apreciar, la senyal és estable quan no està fent cap esforç muscular, però quan això canvia i el pacient fa un esforç (com podria ser en aquest cas tancar el puny) es capta un pic de senyal. Aquest pic de senyal és el que utilitzaré per fer que els servomotors de la pròtesi s'activen, fent que quan es detecti un augment dràstic de senyal elèctrica al tensar els músculs de l'avantbraç s'activi el circuit elèctric.

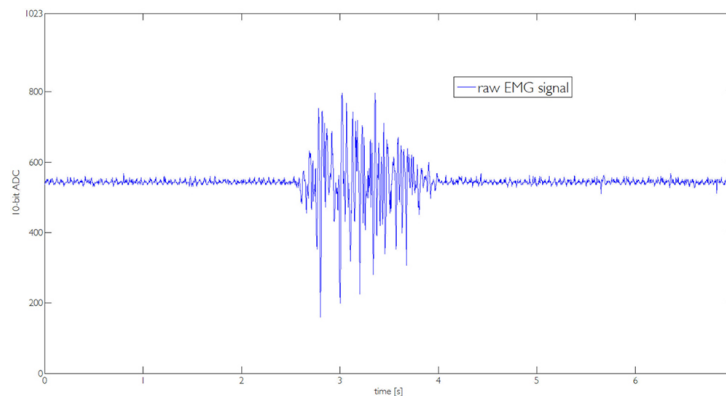


Fig. 20. Exemple de lectura elèctrica presa per un electrode a l'hora d'una contracció.

## 2. BIÒNICA I PROSTÈTICA

Una vegada ja hem parlat de la primera meitat del treball on es veu involucrada la part mèdico-biològica, ens cal parlar de l'altra meitat: la biònica i la prostètica, ja que comprendre les bases d'aquests dos camps és essencial per possibilitar la construcció de la pròtesi.



Per començar faré una breu explicació teòrica dels aspectes que poden resultar més tècnics sobre la prostètica i sobre els biomaterials, tot i que m'enfocaré més a explicar la part mèdica i la repercussió social que tenen les pròtesis al món.

## 2.1. PRÒTESIS I BIOMATERIALS

Per començar cal que coneguem la part més tècnica dels diferents tipus de pròtesis i biomaterials, de les seves funcions i propietats.

### 2.1.1. PRÒTESIS

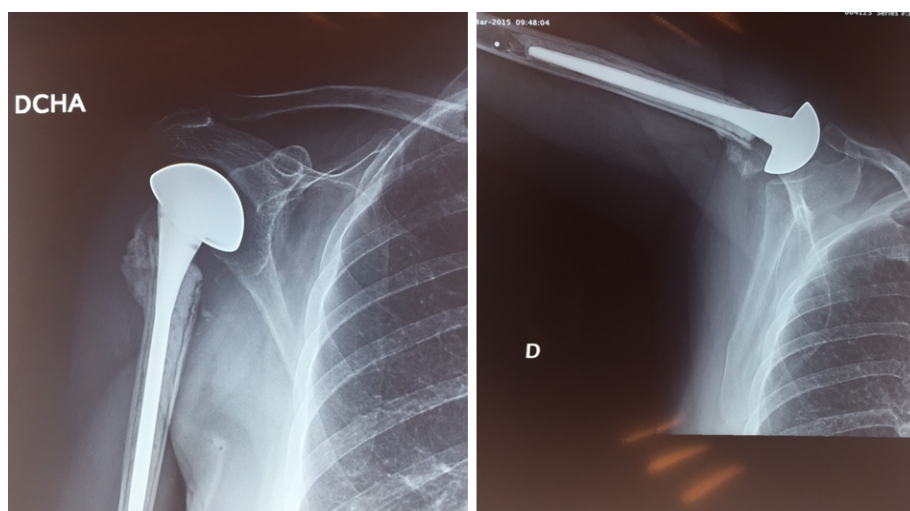
Entenem el terme pròtesi com una eina mecànica i artificial que s'implanta en un cos per substituir o proveir una part del cos que manca principalment per dues raons: amputacions o malformacions. Aquesta serveix per:

- Suplantar la funció que tindria la part mancant. Ex: Una pròtesi de cama que permet a una persona que hagi quedat coixa que pugui tornar a caminar.
- Fer-ne un ús estètic. Ex: Pròtesi ocular de vidre (ull de vidre).
- Suplir el cos de funcions que naturalment no tindria. Ex: Pròtesi mamària per a canvis de sexe.

A part d'aquestes funcions, una pròtesi és una eina clau en la recuperació emocional del/a pacient. Mitjançant la implantació d'una pròtesi, la persona aconsegueix superar el trauma de tenir una part mancant i aconsegueix una rehabilitació més ràpida. Aquesta és una funció molt important que poca gent té en compte.

Les pròtesis es poden dividir en dos grans grups:

- **Endopròtesis:** Requereixen d'una cirurgia per implantar-se. Exemple: Pròtesis de maluc o valvular del cor.



*Fig. 21. Radiografia d'una endopròtesi d'espatlla.*

- **Exopròtesis:** Són considerades aparells ortopèdics, ja que la majoria poden

ser retirades a voluntat del pacient. Es classifiquen de la següent manera:

- **Motores:** Per realitzar funcions bàsiques.



*Fig. 22. Nigel Ackland amb la seva exopròtesi mecànica de braç Bebionic3, considerada la millor pròtesi de braç fins al moment.*

- **Sensorials:** Es refereix a les pròtesis mecanitzades que interactuen amb l'entorn i per tant substitueixen els òrgans sensorials.



*Fig. 23. Rob Spence, el cas d'un cineasta que al perdre l'ull dret el va substituir amb una exopròtesi sensorial incorporada amb una càmera que li permet veure. Tot i aquesta classificació, també es poden classificar més detalladament segons la*

part que reemplacin: capilars (perruques), de pit, d'extemitats, testicular, de penis, de laringe, de zones facials, oculars (ull), etc. A més, depenent de la quantitat de teixit que abarquín, reben un nom o un altre. Un altra classificació podria ser el tipus de material del que estigui feta (plàstic, alumini, resina...) o la manera amb la que es controli la pròtesi (pasiva/sense moviment o activa/amb moviment voluntari), d'entre altres possible classificacions.

Per acabar, una pròtesi activa també es pot classificar segons la font d'energia que utilitzi per a desenvolupar seu moviment. Aquesta pot ser:

- Mecànica o d'energia corpòria (convencionals): S'activen amb la pròpia força motora de l'individu.
- Mio-elèctriques o d'energia extracorporea: Són aquelles pròtesis actives que s'activen amb una força aliena, com per exemple l'impuls muscular del propi monyó. En aquest cas, la pròtesi que em dispo a construir és una de tipus mio-eléctrica activada amb els impulsos que es reben de l'avantbraç.
- Híbrida o d'energia mixta: Combinen el funcionament de les mecàniques i les mioelèctriques.

És important recalcar el fet que tot i que parlem de diferents tipus de pròtesis, la gran majoria de pròtesis que subvenciona la sanitat espanyola per a gent que les necessita són molt bàsiques, i generalment no aporten la qualitat de vida que havia perdut el pacient. Les pròtesis més modernes són molt escasses i costoses. Tenim l'exemple de l'investigador mexicà Max Ortiz Catalán, el qual és un dels pioners d'aquest món i ha creat multitud de pròtesis considerades de les més avançades fins al moment, entre aquestes la primera pròtesi de mà sensitiva de la història.

Per acabar, existeix la "Asociación de Amputados de España" o "ANDADE" formada per diferents persones amputades i socis, i fundada el 2007 amb l'objectiu de lluitar pels drets i dels interessos del col·lectiu i per assegurar una qualitat de vida digna per qualsevol amputat. Des de l'associació ens donen la dada de que, a España, aproximadament 90.000 persones han patit una amputació per diverses causes. Això ens dóna molt en què pensar. Personalment penso que aquesta és una de les raons per les que s'hauria d'invertir més en projectes d'I+D d'aquest àmbit i així poder suplir a tots els afectats amb pròtesis o altres tipus d'eines que els ajudin a poder recuperar un estil de vida normal i garantir que tinguin les mateixes oportunitats que qualsevol altra persona.

## **2.1.2. BIOMATERIALS**

Un biomaterial és qualsevol matèria o construcció que interacciona o està present en un sistema biològic per augmentar o reemplaçar algun teixit, òrgan o funció del cos. Aquests són materials sense acció farmacològica que poden ser utilitzats en implants o pròtesis. Els biomaterials normalment deriven de materials naturals, però també poden haver estat sintetitzats en un laboratori.

A més, són biocompatibles, és a dir, no interfereixen ni degraden el medi biològic en què són implantats. Els veiem com una cosa molt específica i puntual, però són també presents en el dia a dia, en medicaments, cirurgia i aplicacions dentals.

Les aplicacions dels biomaterials són molt variades:

- Pròtesis per ossos
- Marcapassos i vàlvules
- Lents oculars
- Implants dentals
- Implants de pit
- Teixit artificial (reparar la pell)

Els biomaterials es poden classificar de diferents maneres. Els principals tipus de biomaterials són:

- **Metalls:** Són resistents, però poc biocompatibles, i es poden corroir en medis fisiològics. Exemples: acer i titani.
- **Polímers:** Són elàstics i fàcils de fabricar, però són poc resistents i es degraden amb el temps. Exemples: silicones, tefló i niló.
- **Materials ceràmics:** Tenen bona biocompatibilitat i resistència a la corrosió, però són inelàstics i difícils de produir. Exemples: òxids d'alumini i titani, i la hidroxiapatita, mineral que forma part de l'os

També es poden classificar segons la resposta que provoquen en el teixit viu:

- **Bioinerts:** Són poc solubles i reactius, però són correctament acceptats per l'organisme i resistents. S'utilitzen per implants permanents. Exemple: titani.
- **Bioactius:** Reaccionen químicament amb els fluids corporals formant un fort enllaç implant-teixit-hoste. S'utilitzen per a implants dentals i pròtesis ortopèdiques. Exemples: hidroxiapatita d'alta densitat, compostos de titani i vidres bioactius o algunes ceràmiques vítries.
- **Biodegradables:** Després de ser implantats es van degradant amb el temps, donen lloc a productes no tòxics per l'organisme. Es fan servir en sutures o reconstruccions òssies. Exemple: hidroxiapatita porosa.

Però també poden ser classificats segons el tipus de material del que estan fets, segons siguin de procedència:

- Artificial
- Natural

Per altra banda, un dels materials més innovadors amb el que ja es comença a treballar són les cèl·lules mare. Aquestes s'utilitzen en la impressió d'implants de diferents parts del cos com cartílags, pell, ossos o fins i tot múscul. A més aquestes compten amb una taxa molt baixa de rebuig ja que és un material de caràcter 100%

biològic. De fet ja es comença a parlar de que aquesta tecnologia ens obre la porta a la futura impressió d'òrgans i teixits sencers purament impresos amb cèl·lules mare.



*Fig. 24. Exemple d'impressió de pell nasal amb una impressora de cèl·lules mare.*

## 2.2. BREU HISTÒRIA I EVOLUCIÓ

Tant les pròtesis com els biomaterials han tingut un llarg recorregut en el món de la medicina i de la tecnologia. Pel que fa a les pròtesis, les primeres constatacions d'aquest tipus d'eines es donen al voltant del 300 a.C. Per tant podem dir que aquest món ha estat en constant evolució durant quasi 2500 anys.

- **424 a.C.** → Primeres pròtesis descobertes. Aquestes eren pròtesis simples fetes de materials comuns com fusta o metalls com ferro que prenen les funcions de substituir extremitats perdudes en el camp de batalla.
- **Del 476 d.C. al 1000 d.C.** → És l'època dels famosos ganxos i cames de fusta dels pirates. En aquesta época les pròtesis es van millorar incloent mecanismes com molles i engranatges per dotar la pròtesi de funcions més complexes.
- **Del 1400 al 1800** → Amb l'arribada del moviment artístic del Renaixentisme també va arribar una millora notable en el món de la medicina, la biología i la mecànica. Per això la fabricació de pròtesis es va reprendre i millorar, fent-les més complexes i de millors materials com acer o coure.
- **Del s. XVII al s. XIX** → L'estudi de l'anatomia i de la mecànica creix molt i es desenvolupen tant noves maneres d'amputació de manera que són més segures i de major qualitat com nous mecanismes protèsics, com l'articulació. Es crea la primera pròtesi articulada.



*Fig. 25. Aquesta és la pròtesis més antiga que s'ha descobert fins al moment. Es tracta d'una pròtesis del dit gros del peu trobada a Egipte i datada de l'any 300 a.c.*



*Fig. 26. Més exemples d'antigues pròtesis mecàniques.*

L'àmbit de la protèsica ha crescut mesuradament els últims anys. Amb aquesta evolució han anat acompanyats de millores importants com la implementació de dispositius electrònics a les mateixes pròtesis per dotar-les de funcions digitals o la substitució dels materials pesants de fabricació per altres més lleugers com plàstics, materials sintètics com la fibra de carboni. A més, la fabricació s'ha desancorat de les extremitats i poc a poc s'han anat dissenyant pròtesis per altres parts del cos com

dents, ulls de vidre o fins i tot orelles. Aquests en són alguns exemples:

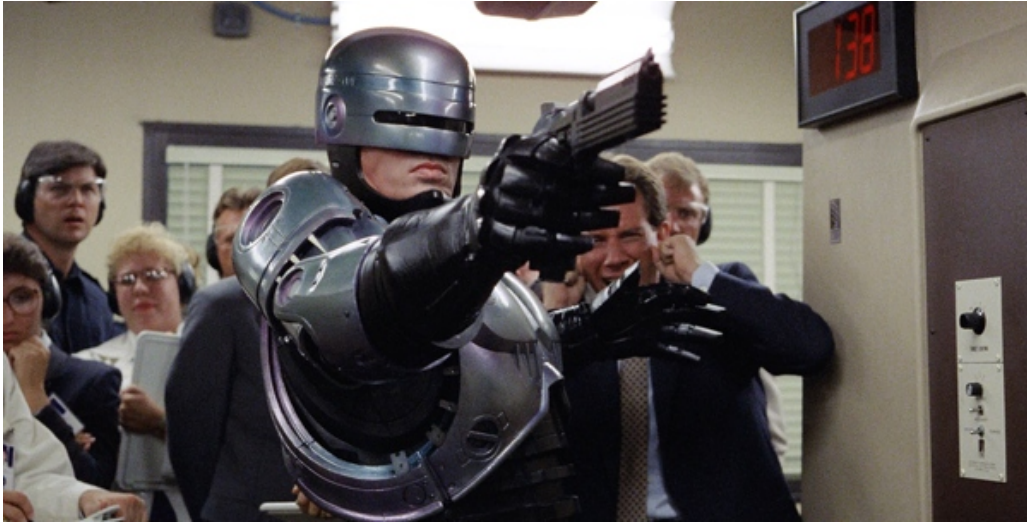


*Fig. 27. Pròtesi estètica que substitueix un ull.*



*Fig. 28. Pròtesi estètica que substitueix una orella.*

Els experts asseguren que en el món de la prostètica, en un futur, hi haurà una evolució exponencial de la tecnologia de les pròtesis i podríem arribar a veure exemples que fins fa uns dies només podríem haver imaginat o haver vist en pel·lícules de ciència ficció.



*Fig. 29. "Robocop", el perfecte exemple un futur on la prostètica ha avançat tant que fins i tot es pot substituir un cos sencer per una pròtesi.*

Pel que fa als biomaterials, aquests són més recents. De fet es podria dir que tot just s'ha començat a explorar aquest món i que li espera una llarga trajectòria acompanyada de la prostètica. Un dels estudis més importants que hi ha hagut sobre els biomaterials va ser un finançat per la Unió Europea anomenat *ABREM (Advanced biomaterials for regenerative medicine)*, i va estar actiu des del 2010 al 2015. Els principals objectius d'aquest projecte era l'estudi de nous biomaterials nanoestructurats, les seves característiques i la seva aplicació en medicina regenerativa. Avui en dia, els biomaterials que s'utilitzen no són 100% bioactius, és a dir, que interaccionin amb el cos, però s'intenta que cada vegada més nombre de biomaterials siguin bioactius, ja que aporten un benefici major per l'individu.

## **2.3. DIAGNÒSTIC I IMPLANTACIÓ**

A l'hora de fer un estudi sobre les pròtesis és important conèixer també el mecanisme de diagnòstic i implantació d'una pròtesi, des dels criteris que s'han de complir per poder fer una implantació fins a la rehabilitació que ha de fer el pacient per poder acostumar el seu organisme a la pròtesi.

### **2.3.1 CRITERIS D'IMPLANTACIÓ D'UNA PRÒTESI**

En cada circumstància (tipus de pròtesis, pacient i operació), els criteris que s'utilitzen per determinar si una persona és apta o no per al procés d'implementació d'una pròtesis varien segons:

- L'edat del pacient (si és molt jove o molt vell pot ser que no sigui apte). Ex: A un nadó que ha nascut sense un braç no se li pot posar una pròtesi artificial.
- Si el pacient pateix enfermetats o al·lèrgies que impossibilitin la operació (rebuig dels materials utilitzats, al·lèrgia o reacció a l'anestèsia, enfermetats cardíaques o vasculars que afegeixin complicació i perill a la operació, etc.).



Ex: A un pacient que pateixi un trastorn hemorràgic no se li pot posar una pròtesi de maluc, ja que la operació seria molt arriscada.

- L'estat basal del pacient: (capacitats funcionals i mentals). Ex: Un pacient amb demència pot no adaptar-se a la funcionalitat d'una pròtesi.
- El consentiment del pacient, ja que tot i que una pròtesis pot ser beneficiosa, el pacient es pot veure superat i desitjar que no se li implanti una pròtesi.
- Tot i que no ho pugui semblar i molts especialistes afirmen que ja es comencen a considerar com un producte comercial, el cost de la pròtesis moltes vegades és el principal obstacle, ja que són instruments molt costosos. Per posar un exemple, una pròtesi de mà amb control dels dits pot arribar a costar fins a 60.000€. A més, tot i que sovint la seguretat social cobreix una part dels costos, ha de ser l'individu qui s'ha de pagar la pròtesi que necessita.

Aquests criteris es donen tant en pròtesis funcionals com en estètiques, tot i que aquestes últimes se solen implantar en clíniques privades, per la qual cosa el que sol manar per sobre de tot són els diners.

### **2.3.2. PREOPERATORI PER A LA IMPLANTACIÓ**

Normalment, abans de tota operació per la implantació d'una pròtesis s'han de dur a terme els procediments següents per preparar al pacient:

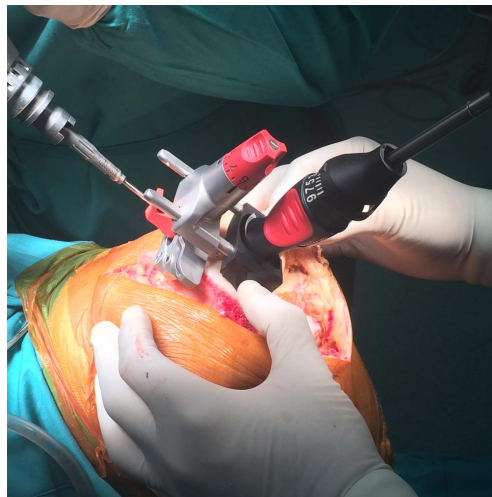
- Anàlítica completa amb la informació de la coagulació de la sang (important).
- Electrocardiograma i radiografia.
- Valoració del cirurgià i del anestesista.
- Mesura dels paràmetres biometrics (tamany, llargada, amplitud de la part del cos) principalment per dissenyar la pròtesis.
- En el cas que sigui una pròtesis d'una extremitat, s'ha de fer un embenat meticulós i intensiu de la zona on es col·locarà la pròtesis, o en el cas que sigui, per exemple una pròtesis d'ull s'ha de fer un buidat de la concavitat de l'ull (depenen de cada tipus de pròtesis i operació).
- El pacient cal que mantingui un estil de vida saludable (dieta i esport) per mantenir en correcte estat el seu estat de salut.
- A més el pacient ha de deixar de prendre medicaments aproximadament 48 hores abans de l'operació per evitar reaccions o complicacions.
- En bastants casos el pacient també necessita suport psicològic per parlar sobre el tema, aclarir coses i fer-li més lleugera la situació.

### **2.3.3. OPERACIÓ D'IMPLANTACIÓ**

Aquest és el procés que més varia, ja que en cada pacient, hospital, tipus de pròtesis... és diferent. La intervenció sempre està protocolitzada i adaptada a cada centre hospitalari depenent dels recursos materials, humans, etc.

Per exemple, anem a veure com seria una operació per posar una pròtesis de genoll:

Un cop el pacient ha estat anestesiats i el camp quirúrgic preparat, es practica una incisió a la zona a operar. S'exposa l'articulació del genoll i es resseca l'os necessari per implantar la pròtesi. El seu traumatòleg realitzarà el que es coneix com una reducció de prova, que consisteix a situar en posició una pròtesi temporal que li permetrà conèixer la mida dels components que millor s'adaptin a la seva anatomia. Un cop satisfet amb l'elecció, procedirà a fixar en posició els components definitius. En funció de les característiques del pacient o les preferències del cirurgià, la fixació podrà ser mitjançant ciment ossi o per mitjà d'implants que busquin una fixació biològica o osteointegració. Finalment es procedirà a el tancament de tots els plànols de la ferida quirúrgica mitjançant l'ús de sutures i/o grapes quirúrgiques.



*Fig. 30. Implantació real d'una pròtesi de genoll.*



*Fig. 31. Resultat de la implantació de la pròtesi de genoll vista amb una radiografia.*

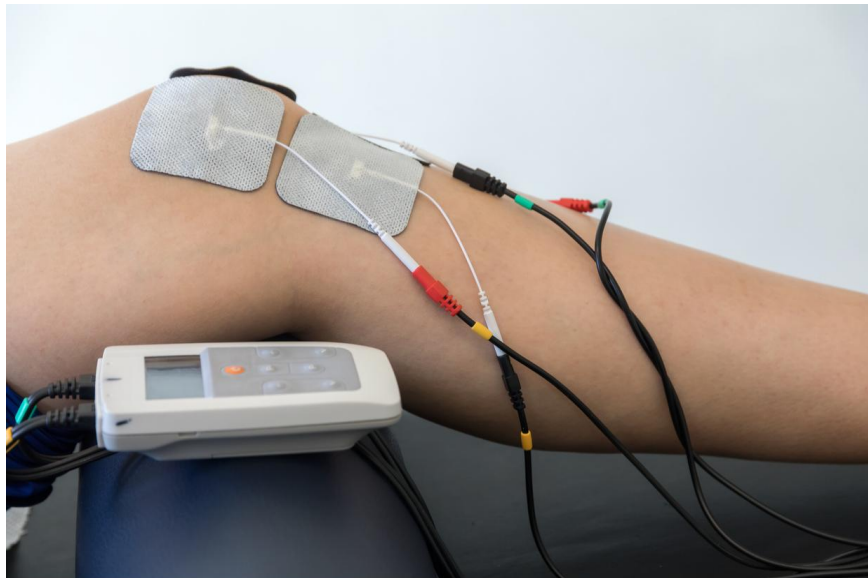
#### **2.3.4. PROCÉS DE REHABILITACIÓ**

Així com en les operacions, cada rehabilitació està protocolitzada i compta amb activitats i teràpies diferents, entre les quals es troben:

- Repòs (sobretot).
- Activitats físiques de mobilitat centrades en enfortir les articulacions afectades.

- Massatges fisioterapèutics.
- T.E.N.S. o Estimulació Nerviosa Transcutània.
- Sessions de teràpia psicològica per què el pacient s'adapti mentalment a la pròtesis (tractant-se d'una operació greu com una amputació).

En cas de que el pacient sigui una persona dement o amb dificultats cognitives, la teràpia ha de comptar amb molta més assistència i fins i tot amb una supervisió quasi constant.



*Fig. 32. El T.E.N.S. (estimulació nerviosa subcutanea) és un mètode de rehabilitació molt freqüent, el qual utilitza petits impulsos elèctrics per estimular el múscul. Per tant, la seva funció és la inversa al sensor EMG, ja que en lloc de captar els senyals elèctrics del múscul, els hi envia.*

### 3. CONFECCIÓ D'UNA PRÒTESI AMB EMG

Per acabar, les dues parts anteriors convergeixen en aquesta última, en la qual explicaré el procediment de la construcció de la pròtesi final. Abans de començar cal recordar que l'objectiu principal d'aquest treball era confeccionar una pròtesi de mà que funcionés amb tecnologia d'electromiograma, és a dir, que captés els impulsos elèctrics dels músculs de l'avantbraç i els utilitzés per accionar la pròtesi.

#### 3.1. MATERIALS I COMPONENTS

Pel que fa als components electrònics, he necessitat:

- 1 x Arduino Nano ATmega328P amb placa d'expansió i cable USB a Mini USB B → La seva funció és la mateixa que la del **cervell**, interpretar els senyals captats i executar una resposta.

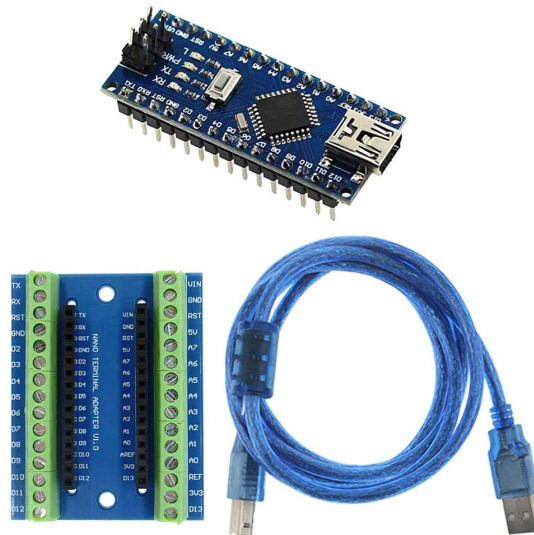


Fig. 33. Arduino Nano amb la seva placa d'expansió i el cable USB.

- 1 x Sensor EMG de senyal muscular amb les seves respectives connexions mini Jack i electrodes → Aquest component no es correspon clarament amb cap funció corporal, tot i que el podríem atribuir als **sentits**, ja que s'encarrega de captar els estímuls i transformar-los en un en un senyal elèctric que s'envia a l'Arduino (cervell).

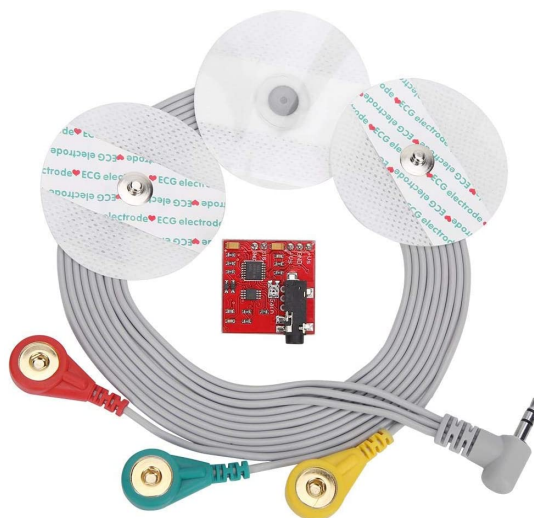


Fig. 34. Sensor EMG amb les seves connexions i electrodes.

- 2 x Servomotors per Arduino amb una força de 10 kg/cm → Els servomotors són els que capaciten el moviment de la pròtesi, per tant es podrien comparar amb els nostres **músculs**, ja que capten els impulsos que envia la Arduino (cervell) i s'activen o desactiven segons aquest mateix impuls elèctric.



*Fig. 35. Servomotor amb alguns accessoris.*

- 1 x Bateria externa de mòbil → Aquesta ens aporta l'energia necessària per fer que la resta de components funcioni, per tant seria el que per a nosaltres són els **nutrients** que ens aporten la energia que necessitem per mover-nos. Primer de tot vaig pensar en connectar-ho tot directament al ordinador, pero llavors vaig pensar que seria millor que comptés amb una alimentació externa i vaig pensar en utilitzar un parell de piles de 9V. Finalment se'm va ocórrer utilitzar una bateria de mòbil externa de 7000 mAh, ja que aquesta es pot recarregar i ens estalvia haver d'anar gastant piles. D'aquesta manera aconseguixo que la pròtesi sigui una mica més sostenible.



*Fig. 36. Bateria externa de 7000 mAh.*

Tot i utilitzar una bateria externa, el sensor EMG ha d'anar alimentat per separat amb dues piles alcalines de 9V, ja que consumeix una gran quantitat d'energia.



*Fig. 37. Piles de 9V amb els seus connectors.*

- Jumper wires (tant mascle-masclé, femella-femella com mascle-femella) → Aquest tipus de cables molt comuns en muntatges amb Arduino permeten connectar tots els components entre ells. Com són els que transporten els senyals elèctrics els podríem considerar els **nervis** del circuit.



*Fig 38. Exemple de cables jumper wires. (De dalt a baix) Femella a femella, mascle a mascle i femella a mascle.*

Per altra banda, tenim el material que he hagut d'utilitzar per construir la base material de la pròtesi, és a dir, les parts que recreen la mà en si. Aquesta part he decidit fer-la amb tecnologia d'impressió 3D. Per tant he necessitat:

- Impresora 3D Artillery X1 Sidewinder → Ens permet imprimir l'estructura física de la pròtesi amb filament termoplàstic (en aquest cas).



*Fig. 39. Impresora 3D que he fet servir per obtenir la pròtesi.*

- Bobina de filament termoplàstic PLA (àcid polilàctic) → Aquest és el més utilitzat en la impressió de peces en 3D, ja que ofereix unes característiques bàsiques a un preu relativament barat. Substitueix la funció dels **ossos**.



*Fig. 40. Bobina de filament PLA amb un exemple de peça impresa en 3D.*

- Corda elàstica i fil de pescar → Aquests es connecten amb el servomotor i amb els dits, i quan aquest s'acciona, s'escurça i d'aquesta manera s'aconsegueix que la mà es tanqui. Els podríem relacionar amb els **tendons**.

- Productes de tractament per a les peces de plàstic de la pròtesi: Paper de vidre per allisar la superfície, aerosol d'imprimació i pintura en aerosol per pintar les peces → L'única funció d'aquests materials és aconseguir un acabat visual més atractiu, per tant es corresponen amb els **productes de bellesa** que s'utilitzen per tenir una pell millor.

## 3.2. PROCEDIMENT PRÀCTIC

El primer pas abans de començar a imprimir la pròtesi i a muntar-la va ser buscar un model que em pogués servir per guiar-me. Vaig estar cercant a la pàgina web "Thingiverse", on gent d'arreu del món penja els models 3D que ells mateixos han creat per a que la gent els pugui descarregar-los i imprimir-los. Després de barallar diferents opcions vaig decantar-me per un model d'una pròtesi de mà de l'usuari "grossrc" (Ryan Gross) amb el nom de "Robotic Prosthetic Hand". En aquest projecte s'especificaven diversos paràmetres d'impressió i de muntatge electrònic, així que vaig decidir imprimir aquell model. Trobareu l'enllaç a la pàgina web a l'apartat de "fontes documentals".

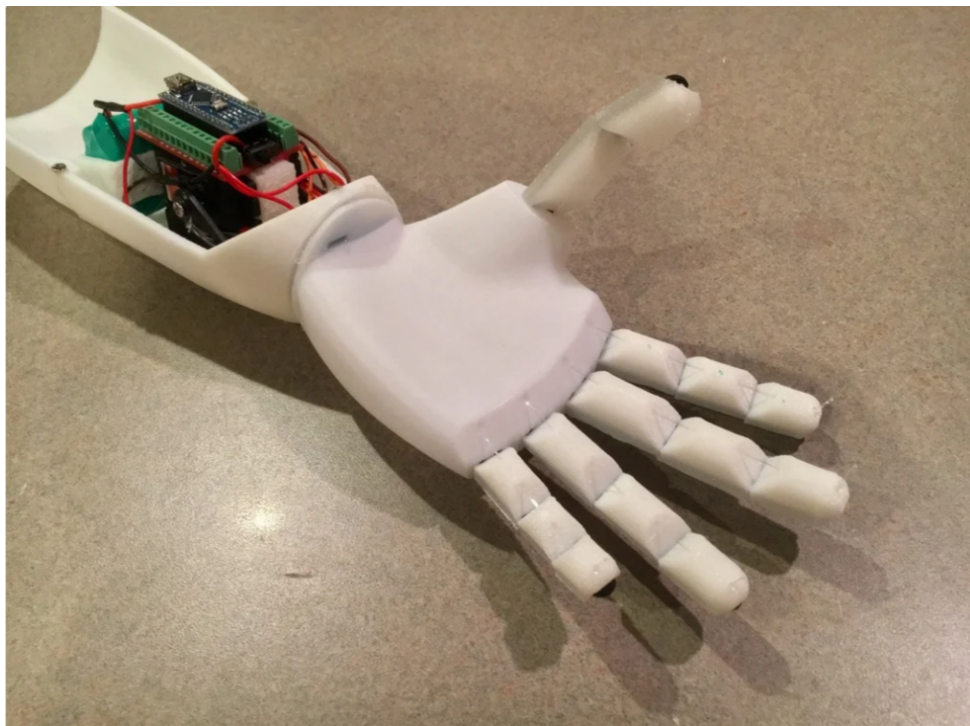


Fig. 41. Pròtesi final feta per l'usuari de Thingiverse.



A continuació, com personalment no compto amb una impressora 3D, vaig contactar amb els propietaris del compte d'Instagram "3DEspana", els quals es dediquen a imprimir peces en 3D per comanda, i una vegada els vaig enviar els 17 arxius que componien pròtesi (14 falanges dels dits, 1 palmell i 2 peces per a l'avantbraç), em van imprimir les peces del model en un total de 25 hores amb la impressora i el filament prèviament anomenats.



*Fig. 42. Peces impreses de la pròtesi.*

Aleshores, per donar-li un aspecte més professional i atractiu vaig tractar les 17 peces amb tres productes que van millorar el resultat:

1. Paper de vidre per allisar la superfície del plàstic i eliminar tota possible impuresa o relleu.
2. Spray d'imprimació per facilitar la adherència i resistència de pintura a la superfície.
3. Pintura en forma d'aerosol de color rosat, ja que el color taronja original del plàstic es veia molt artificial i ressaltava massa. Aquest procediment és el més opcional i personalment vaig pensar que pintar la pròtesi d'aquest color li donaria un acabat més natural, discret i semblant al meu propi braç.

No obstant no he pogut posar imatges de les peces tractades ja que ha sigut una idea espontània d'últim moment i tant l'spray d'imprimació com la pintura s'havia d'assecar.

Llavors vaig muntar les diferents parts i peces de la pròtesi utilitzant la corda elàstica i el fil de pescar a mode de tendons. Bàsicament aquest muntatge va consistir en unir les peces de falanges dels dits entre elles i amb el palmell per a què agafés la forma de la mà. A més la peça de l'avantbraç, al ser buida, em va permetre utilitzar-la com a compartiment per col·locar-hi els components electrònics i així tenir un acabat més atractiu. Aquesta va ser la part més senzilla de la confecció de la pròtesi.



*Fig. 43. Base de la pròtesi muntada.*

Una vegada vaig tenir la pròtesi impresa, tractada i muntada, vaig haver de fer el muntatge dels components electrònics. Per començar vaig fer recerca dels components que requeria i posteriorment vaig fer la comanda via Internet. Com a anècdota, puc explicar que els components originals de la pròtesi tenien un preu massa elevat i per tant vaig haver de buscar alternatives que abaratissin el cost total del projecte. En part, aquest fet va fer que intentés trobar la manera de fer una pròtesi funcional el més assequible possible, ja que com ja he esmentat amb anterioritat, un dels principals problemes a l'hora d'adquirir una pròtesi és que els seus preus poden ser molt elevats.

Després de rebre els components per correu vaig contactar amb en Gerard Gascón, un alumne de l'institut amb coneixements sobre programació amb Arduino que va accedir a col·laborar amb mi en el muntatge electrònic de la pròtesi. Aquesta part va consistir en programar la placa d'Arduino amb un codi font perquè al connectar tots els components poguessin dur a terme la seva funció correctament.

El primer pas va ser descarregar la última versió del programari d'Arduino anomenat "Arduino IDE", el qual ens permet programar qualsevol placa d'Arduino escrivint el codi font a la senzilla interfície que ens ofereix. Amb aquest instal·lat i la placa connectada a l'ordinador mitjançant el cable USB, vam poder escriure el codi font (el qual també trobareu complet a l'annex I). Aquest codi el que fa es reconèixer el sensor EMG i els servomotors i executar una resposta segons la informació que li arribi.

En aquest cas, la mesura anomenada *threshold* (mesura límit) vam posar que fos de 250 unitats, ja que en un múscul inactiu les lectures del sensor no superen les 250 unitats. Si el sensor EMG capta senyals inferiors o iguals a 250 unitats (braç relaxat), els servomotors no s'activen i per tant la pròtesi queda amb la mà oberta. Per altra banda, si el sensor capta senyals superiors a 250 unitats (braç tens) la placa Arduino envia una ordre als servomotors i aquests s'activen girant 170 graus i tancant així la mà. A més vam fer que els resultats quedessin impresos en forma de gràfic al monitor de l'ordinador.

Una vegada el codi font va ser programat, vam haver de buscar per internet esquemes de circuits electrònics per veure com connectar correctament tots els components. Ens vam guiar principalment en aquests dos esquemes, ja que tot i mostrar connexions amb una placa Arduino Uno en lloc de una Arduino Nano, aquestes són iguals:

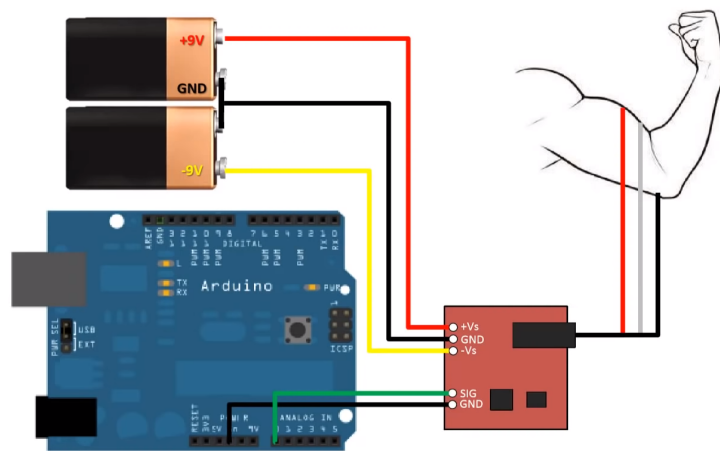


Fig. 44. Esquema de connexió entre el sensor EMG, les bateries i la placa Arduino.

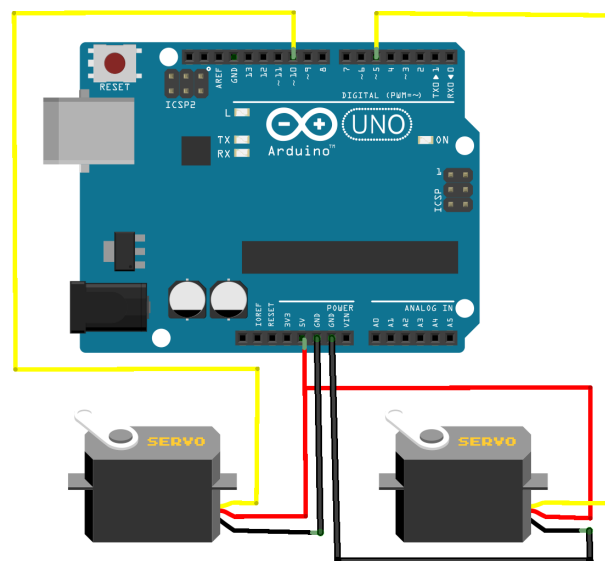
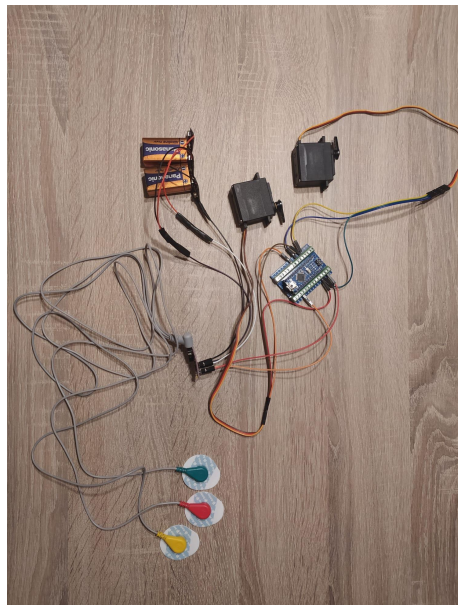


Fig. 45. Esquema de connexió entre dos servomotors i la placa Arduino.

Finalment vam aconseguir connectar el sensor EMG i els servomotors a la placa Arduino i pujant el codi font a la mateixa vam aconseguir que el sensor EMG enviés senyals a la placa Arduino, tot i que no els correctes. Ens vam trobar amb el problema de que la placa reconeixia el sensor i aquest enviava senyals intermitents, però quan em connectava els electrodes al múscul, aquests senyals no variaven ni tan sols semblava reconèixer-los. Aleshores vam intentar canviar les connexions i el codi font, ja que pensàvem que allà podia erradicar l'error, tot i que va ser en va. Finalment el sensor va acabar sobrecaient-se i va començar a desprendre fum. Per consegüent, va deixar d'enviar senyals i vam pensar que s'havia fos.

Una estona més tard ho vaig tornar a intentar individualment, tot i que novament va ser sense cap efecte, ja que el sensor seguia sense reconèixer els senyals musculars. Malauradament no vaig poder solventar aquest problema i, tot i que era una part del treball molt important vaig haver de prescindir pel moment de l'accionament per mitjà del sensor EMG. Després de comprovar en diverses ocasions el codi font i les connexions, vaig arribar a la conclusió de que el problema podria erradicar en la qualitat del sensor o en la compatibilitat entre la placa Arduino i el mateix sensor. Des d'un punt de vista més personal em cal dir que no m'esperava aquest inconvenient i que seguiré treballant per esbrinar el problema i intentar solventar-lo per assolir l'objectiu del treball al complet.

No obstant, vaig seguir endavant amb el muntatge i vam optar per programar la pròtesi de tal manera que s'accionés segons les ordres que li donés jo des de l'ordinador. Un exemple podria ser fer que s'accionés de manera intermitent en intervals de temps dictats pel codi font que li incorporéssim (trobareu el codi font d'aquest exemple explicat als annexos), o bé fer que s'obrís i es tanqués segons la placa Arduino estigués encesa o apagada. Les possibilitats de programació són pràcticament il·limitades si tenim en compte la varietat de sensors i paràmetres que existeixen.



*Fig. 46. Muntatge electrònic.*

Per acabar, vaig instal·lar el circuit electrònic dins de la peça de l'avantbraç i vaig enllaçar el fil de pescar amb els servomotors. D'aquesta manera, quan la placa Arduino envia el senyal als servomotors, aquests giren i tiben dels fils, fent que s'escurcin i tanquin els dits. Així doncs vam aconseguir el resultat final.

### 3.3. RESULTAT FINAL

A continuació mostro una imatge del resultat final del treball: un prototip de pròtesi funcional que substitueix un braç dret.



*Fig. 47. Pròtesi final.*

Després d'estar provant-la de diferents maneres, he pogut comprovar que la pròtesi compleix la seva funció correctament i que podria millorar-se per fer-la més precisa i per fer que funcionés amb el sensor EMG. Tot i això, per a mí es satisfactori veure que el resultat del treball funciona.

A l'annex II trobareu més fotografies de la pròtesi, del seu muntatge i de les proves.

## CONCLUSIONS

Per concloure el treball i després d'haver treballat per poder aconseguir els objectius que em vaig plantejar en un principi, puc afirmar que no he pogut assolir-los tots i per tant el resultat final no ha estat l'esperat.

Pel que fa a l'objectiu principal, construir una pròtesi impresa en 3D que funcionés amb tecnologia EMG, he aconseguit fer un prototip de pròtesi funcional amb un impresora 3D i diversos components amb una placa Arduino Nano com a nucli del circuit electrònic que funciona per mitjà de les ordres que se li envien des de l'ordinador. Així doncs, l'accionament de la pròtesi no ha sigut el desitjat ja que no ho fa per mitjà del sensor EMG sinó per la pròpia placa Arduino. No obstant he pogut solventar el problema i optar per una forma d'accionament alternativa que no depengui del sensor EMG. En aquest sentit, he pogut assolir la part pràctica de la prostètica però m'ha mancat la part on la biomedicina es veu involucrada. Les limitacions que han pogut causar aquest problema són: la qualitat del material al qual he tingut accés (ja que comprar components d'aquest tipus i que siguin de gran qualitat és tant difícil com costós) i el fet que no hagi pogut utilitzar un electromiògraf d'agulles (ja que és molt més precís), la formació que he adquirit de com programar amb Arduino (la qual és molt escassa i, tot i haver fet recerca per poder-ne aprendre, no és la suficient com per dur a terme un muntatge d'aquestes magnituds) i la limitació de temps per poder millorar i perfeccionar la pròtesi amb més funcions i més precisió.

No obstant, sí he pogut assolir el segon objectiu, ja que he pogut crear una base teòrica on es recull tota la informació necessària per a entendre el funcionament de la pròtesi i fins i tot m'ha servit per a la pròpia creació d'aquesta. A més, penso que aquesta part serveix com a introducció per a l'enginyeria biomèdica, ja que combina parts de les ciències mèdiques (com l'anatomia i el funcionament neuronal) i parts de l'enginyeria pròpiament dita (com la programació amb arduino o la mecànica d'una pròtesi). Finalment aquestes dues bases teòriques han convergit en la part pràctica de l'elaboració de la pròtesi i m'han permès obtenir el resultat final.

En quant al tercer objectiu, he decidit no intentar-lo, ja que era un objectiu opcional que m'havia proposat, però per dur a terme una vegada fos una pròtesi complerta al cent per cent i no un prototip. El fet de poder contactar amb algú que complís les característiques necessàries per poder utilitzar la pròtesi és complicat (i més vivint a una ciutat amb un nombre baix d'habitants i que no compta amb una associació o organització de gent amb amputacions) alhora que m'hagués interessat poder-ho fer. De ben segur que quan la pròtesi deixi de ser un prototip i estigui dotada de funcionalitat completa, buscaré a algun/a voluntari/a que estigui disposat/ada a provar-la.

Per acabar i amb una visió global del treball, crec haver assolit la majoria d'objectius i haver adaptat el treball a les meves possibilitats sense deixar de banda cap part. L'únic problema que ha sorgit ha estat empipador però no és res que en un futur, amb més recerca, no es pugui solventar.

M'agradaria concloure el treball amb una cita del famós físic Albert Einstein, la qual considero molt certa i penso que resumeix molt bé la funció del Treball de Recerca:

- Mai consideris l'estudi com una obligació, sinó com una oportunitat per penetrar en el bonic i meravellós món del saber.

Albert Einstein

## FONTS DOCUMENTALS

ANÒNIM. *Electrofisiología neuromuscular*. Publicat per l'usuari "xlucyx Apellidos". Slideshare. 25 de maig de 2015. <<https://es.slideshare.net/xconox/electrofisiologa-neuromuscular>> [29/07/2020]

MARTÍN, Arnau. *Lesions medul·lars: Sistema electrònic pel control d'un actuator amb senyals mioelèctrics*. INS La Roca. Roca del Vallès (Barcelona). Desembre 2017. <<https://docplayer.es/95931173-Lesions-medul-lars-sistema-electronic-pel-control-d-un-actuator-amb-senyals-mioelectrics-autor-arnau-marin-llobet.html>> [30/07/2020]

ANÒNIM. *Histología general. Tejido muscular*. Santiago, Xile. Pontificia Universidad Católica de Chile. Facultad de Medicina. <<http://publicacionesmedicina.uc.cl/Histologia/paginas/mu32953.html>> [30/07/2020]

ANÒNIM. *Nervi*. Viquipèdia, l'enciclopèdia lliure (edició lliure). <<https://ca.wikipedia.org/wiki/Nervi>> [30/07/2020]

ANÒNIM. *El sistema nervioso*. Saragossa, Aragó. Instituto Ramón Pignatelli. <[http://agrega.educacion.es/repositorio/14062013/46/es\\_2013061412\\_9103939/SistemaNervioso/propagacin\\_del\\_impulso\\_nervioso.html](http://agrega.educacion.es/repositorio/14062013/46/es_2013061412_9103939/SistemaNervioso/propagacin_del_impulso_nervioso.html)> [30/07/2020]

ANÒNIM. *Impulso nervioso*. Ecured (edició lliure). <[https://www.ecured.cu/Impulso\\_nervioso](https://www.ecured.cu/Impulso_nervioso)> [30/07/2020]

ANÒNIM. *El impulso nervioso*. Educatina. Youtube. 19 de juliol de 2011. <<https://www.youtube.com/watch?v=IDPYT25lvpl>> [30/07/2020]

ANÒNIM. *Contracciones musculares: Cómo los neurotransmisores y las reacciones químicas mueven los músculos y huesos*. Visible Body. <<https://www.visiblebody.com/es/learn/muscular/muscle-contractions>> [30/07/2020]

ANÒNIM. *Introducción al sistema nervioso central y periférico*. Barcelona. Share4Rare. <<https://www.share4rare.org/es/library/spinal-muscular-atrophy/introduccion-al-sistema-nervioso-central-y-periferico#:~:text=Transmite%20se%C3%B1ales%20el%C3%A9ctricas%20a%20diferentes.cerebro%20y%20la%20m%C3%A9dula%20espinal>> [31/07/2020]

FIGUEROBA, Alex. *Sistema nervioso periférico (autónomo y somático): partes y funciones*. Psicología y Mente. <<https://psicologiymente.com/neurociencias/sistema-nervioso-periferico#:~:text=A%20usu%20vez%20el%20sistema,los%20nervios%20craneales%20y%20espinales>> [31/07/2020]

ANÒNIM. *Significado de neurona*. Significados. <<https://www.significados.com/neurona/>> [05/08/2020]



ANÒNIM. *Neurotoxicidad de organofosforados y carbamatos. Transmisión nerviosa. Estructura de las neuronas.* Universidad de Alcalá. Facultad de Química. Alcalá de Henares, Madrid.  
<[http://www3.uah.es/bioquimica/Tejedor/bioquimica\\_ambiental/tema12/tema%2012-estructura-neurona.htm](http://www3.uah.es/bioquimica/Tejedor/bioquimica_ambiental/tema12/tema%2012-estructura-neurona.htm)> [05/08/2020]

ANÒNIM. *Células del sistema nervioso.* Universidad de La Coruña. La Coruña, Galicia. <<https://www.udc.es/areas/psicobiologia/neuropsicologia2/tema%201.pdf>> [06/08/2020]

ANÒNIM. *Célula de Schwann.* Viquipèdia, l'enciclopèdia lliure (edició lliure). <[https://es.wikipedia.org/wiki/C%C3%A9lula\\_de\\_Schwann](https://es.wikipedia.org/wiki/C%C3%A9lula_de_Schwann)> [06/08/2020]

RODRÍGUEZ, Crisal. *Qué es el potencial de acción.* Unprofesor. 28 de novembre de 2017.  
<<https://www.unprofesor.com/ciencias-naturales/que-es-el-potencial-de-accion-1372.html>> [11/08/2020]

OROZCO, Devanhi. *Potencial de acción.* Slideshare. 7 d'octubre de 2013.  
<<https://es.slideshare.net/devanhiorozco/potencial-de-accion-e-impulso-nervioso-26951737>> [13/08/2020]

CASTILLEIRO, Oscar. *Potencial de acción: ¿qué es y cuáles son sus fases?.* Psicología y Mente. <<https://psicologiymente.com/neurociencias/potencial-de-accion>> [13/08/2020]

ANÒNIM. *Todo lo que debes saber sobre el potencial de acción.* mDurance estudio.  
<<https://blog.mdurance.eu/academia/el-potencial-de-accion/>> [13/08/2020]

ANÒNIM. *Sistema muscular.* Ecured (edició lliure).  
<[https://www.ecured.cu/Sistema\\_muscular](https://www.ecured.cu/Sistema_muscular)> [20/08/2020]

ANÒNIM. *Sistema muscular.* Wikipedia, la enciclopedia libre (edició lliure).  
<[https://es.wikipedia.org/wiki/Sistema\\_muscular#M%C3%BAsculo\\_estriado\\_\(esquel%C3%A9tico\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Sistema_muscular#M%C3%BAsculo_estriado_(esquel%C3%A9tico))> [20/08/2020]

ANÒNIM. *Tejidos animales. Muscular. Esquelético.* Vigo, Galicia. Universidad de Vigo. Facultad de Biología.  
<[https://mmegias.webs.uvigo.es/a-imagenes-grandes/muscular\\_estriado.php](https://mmegias.webs.uvigo.es/a-imagenes-grandes/muscular_estriado.php)> [20/08/2020]

ANÒNIM. *Unión neuromuscular.* Wikipedia, la enciclopedia libre (edició lliure).  
<[https://es.wikipedia.org/wiki/Unión\\_neuromuscular](https://es.wikipedia.org/wiki/Unión_neuromuscular)> [26/08/2020]

ANÒNIM. *Síndromes Hipertérmicos. La unión neuromuscular.* Burgos, Castilla i Lleó. Uninet. Universidad de Burgos. <<https://www.uninet.edu/tratado/c090304.html>> [26/08/2020]

CASTILLEIRO, Oscar. *Unión neuromuscular: el puente entre neurona y músculo*. Psicología y Mente.  
<<https://psicologiaymente.com/neurociencias/union-neuromuscular>> [26/08/2020]

CASTILLEIRO, Oscar. *Sinapsis: qué son, tipos y funciones*. Psicología y Mente.  
<<https://psicologiaymente.com/neurociencias/sinapsis>> [28/08/2020]

ANÒNIM. *Contracciones musculares: Cómo los neurotransmisores y las reacciones químicas mueven los músculos y huesos*. Visible Body.  
<<https://www.visiblebody.com/es/learn/muscular/muscle-contractions>> [11/10/2020]

ANÒNIM. *Electromiografía*. MedlinePlus. Estats Units d'Amèrica.  
<<https://medlineplus.gov/spanish/ency/article/003929.htm>> [11/10/2020]

ANÒNIM. *Sarcómero. Contracción muscular*. Egg Educación. Youtube. 27 de juliol de 2018. <<https://www.youtube.com/watch?v=XcfPmMfV5q0>> [12/10/2020]

ANÒNIM. *Electromiografía*. Wikipedia, la enciclopedia libre (edició lliure).  
<<https://es.wikipedia.org/wiki/Electromiograf%C3%ADa>> [12/10/2020]

HORTA, Katheryn Laura; SOBREVILLA, Tania. *Prótesis*. Iztapalapa, Ciudad de México. Centro de rehabilitación dif Iztapalapa. Slideshare.  
<<https://es.slideshare.net/taniasobrevilla/protesis-2686266>> [06/12/2020]

GROSS, Ryan. *Robotic Prosthetic Hand*. Publicat per l'usuari "grossrc". Thingiverse. 27 de juliol de 2016. <<https://www.thingiverse.com/thing:1691704>> [06/12/2020]

GROSS, Ryan. *Assembly of 3D Printed Prosthetic Hand*. Youtube. 23 d'octubre de 2016. <<https://www.youtube.com/watch?v=RJNDjnWV8Eo&t=2s>> [07/12/2020]

ANÒNIM. *Arduino Muscle Sensor (EMG) Tutorial*. Publicat per l'usuari "Au Robots". Youtube. 9 d'abril de 2017. <<https://www.youtube.com/watch?v=1LjE07z5r7c>> [10/12/2020]

ANÒNIM. *Cómo controlar el servomotor utilizando EMG Muscle Sensor*. Publicat per l'usuari "MERT Arduino & Tech". Youtube. 21 de març de 2018. <<https://www.youtube.com/watch?v=D-6GDlvAMCI&t=39s>> [10/12/2020]

YOUNGBLOOD, Tim. *Servo Motor Control with an Arduino*. All About Circuits. 3 de juny de 2015.  
<<https://www.allaboutcircuits.com/projects/servo-motor-control-with-an-arduino/>> [11/12/2020]

HERNÁNDEZ, Luís del Valle. *Servomotor con Arduino tutorial de programación paso a paso*. Programarfacil.com.  
<<https://programarfacil.com/tutoriales/fragmentos/servomotor-con-arduino/>> [11/12/2020]

ANÒNIM. *Cómo controlar un Servo por Serial con Arduino*. Publicat per l'usuari "N4n0". Robologs. 9 de maig de 2014. <<https://robologs.net/2014/05/09/como-controlar-un-servo-por-serial-con-arduino/>> [11/12/2020]

ANÒNIM. *Servo Motor Control using Arduino Tutorial and Code*. Mechatrofice. <<https://mechatrofice.com/arduino/servo-motor>> [11/12/2020]

MARGOLIS, Michael. *Arduino Cookbook. Serial communications*. O'Reilly. Boston, Estats Units d'Amèrica. <<https://www.oreilly.com/library/view/arduino-cookbook/9781449399368/ch04.html>> [12/12/2020]

HRISKO, Joshua. *Arduino Servo Motor Basics and Control*. Maker Portal. 20 de maig de 2020. <<https://makersportal.com/blog/2020/3/14/arduino-servo-motor-control>> [12/12/2020]

ANÒNIM. *Tutorial uso de servomotores con arduino*. Naylamp Mechatronics. <[https://www.naylampmechatronics.com/blog/33\\_Tutorial-uso-de-servomotores-con-arduino-.html](https://www.naylampmechatronics.com/blog/33_Tutorial-uso-de-servomotores-con-arduino-.html)> [12/12/2020]

DIOSDADO, Raúl. *Control de servomotores con Arduino*. Zona Maker. Badajoz, Extremadura. <<https://www.zonamaker.com/arduino/modulos-sensores-y-shields/control-de-servomotores-con-arduino>> [13/12/2020]

ANÒNIM. *How to Control Servo Motor With Arduino and Serial Monitoring Window*. Publicat per l'usuari "ujash patel". Instructables. <<https://www.instructables.com/How-to-Control-servo-motor-with-arduino-and-serial/>> [13/12/2020]

BALAGUÉ, Edgar; CALVET, Nil. *Pròtesis i biomaterials*. La Seu d'Urgell, Lleida. Presentació acadèmica. Institut Joan Brudieu. 11 de juny de 2020. <[https://docs.google.com/presentation/d/1c5Y-SWBliq7dFjZZTxw5J6jk5ru\\_U\\_pDpu1BxbPoFLY/edit?usp=sharing](https://docs.google.com/presentation/d/1c5Y-SWBliq7dFjZZTxw5J6jk5ru_U_pDpu1BxbPoFLY/edit?usp=sharing)> [05/12/2020]

## ANNEX I - CODIS FONT UTILITZATS

Codi font escrit per programar la placa Arduino Nano amb el sensor EMG:

```
#include <Servo.h>

#define SERVO_PIN1 3
#define SERVO_PIN2 5

float emgResults;

Servo servo1;
Servo servo2;

float threshold = 250;

float openDegrees = 170, closedDegrees = 10;
float secOpenDegrees = 170, secClosedDegrees = 10;

void setup() {
  // put your setup code here, to run once:
  Serial.begin(115200);

  servo1.attach(SERVO_PIN1);
  servo2.attach(SERVO_PIN2);
}

void loop() {
  Serial.println(emgResults);

  if(emgResults > threshold){
    servo1.write(openDegrees);
    servo2.write(secOpenDegrees);
  }else{
    servo1.write(closedDegrees);
    servo2.write(secClosedDegrees);
  }

  delay(100);
}
```

En aquest codi font, s'inclouen els dos servomotors i el sensor EMG al circuit. Si les lectures d'aquest sensor sobrepassen les 250 unitats els servomotors passen de tenir una posició de 10 graus a 170 graus. Si no les sobrepassen, tornen a la posició inicial.

Codi font utilitzat com a exemple per fer la presentació davant el tribunal:

```

#include <Servo.h>

#define CLOSE_FIRST true

Servo servo1, servo2;

const int delayDuration = 5000;

void setup() {
  servo1.attach(3);
  servo2.attach(5);
}

void loop() {
  while(true){
#if CLOSE_FIRST
  servo1.write(0);
  servo2.write(0);
  for(int i = 0; i < delayDuration; i++){
    servo1.write(0);
    servo2.write(0);
    delay(1);
  }
  servo1.write(180);
  servo2.write(180);
  for(int i = 0; i < delayDuration; i++){
    servo1.write(180);
    servo2.write(180);
    delay(1);
  }
#else
  servo1.write(180);
  servo2.write(180);
  for(int i = 0; i < delayDuration; i++){
    servo1.write(180);
    servo2.write(180);
    delay(1);
  }
  servo1.write(0);
  servo2.write(0);
  for(int i = 0; i < delayDuration; i++){
    servo1.write(0);
    servo2.write(0);
    delay(1);
  }
#endif
}

```

}

En aquest codi font, els servomotors es basen en intervals de temps per accionar-se. En aquest precís cas, els servomotors passen de 0 a 180 graus i viceversa en intervals de 5 segons.

## ANNEX II - IMATGES DE MUNTATGE I PROVES

En aquest annex he decidit inserir fotografies del procés de muntatge de la pròtesi i de proves que vaig fer amb la mateixa a mode de collage.



