

Tornar a Tocar: Una Segona Oportunitat per als Músics Amputats



Autora: Eva San Rafael Giner

2n Batxillerat Científic

Tutor: Daniel González Bueno

Curs acadèmic: 2025-2026

17 -desembre - 2025

Índex

Introducció.....	3
1 Anatomia i funcions de la mà, canell i avantbraç	5
1.1 Ossos	5
1.2 Articulacions	6
1.3 Músculs	8
1.4 Tendons i Lligaments.....	9
1.5 Connexions mà-cervell (nervis).....	11
1.6 Sistema circulatori.....	12
2 Context Amputacions.....	13
2.1 Xifres d'Amputacions	13
2.2 Causes d'Amputacions	14
2.3 Amputacions de la mà.....	14
2.4 Músics amputats.....	15
3 De l'amputació a la pròtesi de mà i rehabilitació.	16
3.1 Condicions generals per portar una pròtesi de mà	16
3.2 Valoració, disseny i adaptació de la pròtesi de mà.....	18
3.3 Rehabilitació motora fina.....	19
4 Pròtesis	20
4.1 Les pròtesis al llarg de la història	20
4.2 Tecnologia actual i futura	22
4.3 Tipus de pròtesis.....	24
5 De l'anatomia de la mà, a la pròtesi robòtica i a les habilitats per a tocar el piano	25
6 Creació d'un prototip de pròtesi de mà per a tocar el piano	28
6.1 Materials i Costos	28
6.2 Impressió de les peces en 3D	28
6.3 Programació en Arduino	31
6.4 Muntatge de la mà	34
6.5 Fase de proves i reajustaments	37
6.6 Exercicis musicals adaptats a la pròtesi.....	39
6.7 Resultats.....	40
Conclusions i Línies de Futur	42
Bibliografia i webgrafia	44
Annexos: Codi Programació Arduino.....	51

Introducció

A l'hora d'escollir el tema del treball de recerca tenia dues inquietuds: per una banda, poder dedicar-lo a la música, ja que és un tema que m'agrada i que porto anys estudiant, i d'altra banda, volia relacionar-lo amb l'àmbit científic. Això em va generar molts dubtes, ja que no sabia com encaminar-ho, fins que se'm va ocórrer relacionar les pròtesis i el piano, amb la intenció d'ajudar a músics amputats amb la necessitat d'una pròtesi per poder tornar a tocar.

Per tant, la hipòtesi que em plantejo és la següent: és possible que una mà robòtica pugui substituir una mà humana a l'hora de tocar el piano.

Com a objectiu general, em proposo construir un prototip de mà amb l'avantbraç robòtic i funcional per a tocar el piano. Com a objectius específics, em plantejo fer servir una impressora 3D, per garantir baix cost i fàcil funcionament; realitzar-ne el muntatge i el sistema electrònic; programar-lo perquè sigui capaç de tocar una cançó al piano i definir els moviments bàsics i coordinats perquè el que soni segueixi una melodia.

Com a metodologia de treball, tot i ser conscient de les dificultats que trobaria en relació amb la part pràctica del projecte, considero que ha estat un gran repte construir una mà robòtica que imiti una pròtesi, perquè no està adaptada a una persona; tot i així, imita la seva funcionalitat mitjançant la programació. El meu enfocament ha estat abordar-ho com un repte molt positiu des dels processos d'aprenentatge i superació a les dificultats sorgides en el procés, considerant que començava de zero tant en la construcció com en la programació de la pròtesi.

La part teòrica de recerca ha estat també un altre repte, en primer lloc per l'important cerca de bibliografia tant a través de fonts escrites com mitjançant reunions de treball amb persones expertes, de totes les àrees necessàries: anatomia, neurologia, servomotors i electricitat, programació en Arduino i digitació pianística.

També organitzar tota la informació recopilada per poder-la utilitzar de manera ordenada, així com documentar la construcció de la mà, ha implicat llegir i rellegir, ordenar i reordenar fins trobar la millor forma de compartir el projecte.

Finalment, vull agrair a totes les persones que han participat en aquest treball, al Dani González, el meu tutor, per la seva guia i la llibertat que m'ha deixat en desenvolupar les meves idees, a la Pilar Guarné, per introduir-me a l'immens món de la tècnica i digitació pianística.

També a tots els experts que m'han compartit el seu coneixement, al Miguel S. Gutiérrez, Director Tècnic Casio Espanya, com a expert en programació, gràcies per ajudar-me a fer realitat aquesta part del treball; a la Inés Barreda Altaba facultativa especialista en Neurofisiologia Clínica com a experta en l'impressionant funcionament del cervell, a l'Eliecer San Rafael, el meu pare, CEO d'Enactec SL i Tutor Màster en Mecànica de Drons, com a expert en disseny i impressió en 3D per la seva ajuda i optimisme en tots els aspectes i a la Cristina Giner, la meva mare, Head of

Data en DDB Spain i Directora del Postgrau en Business Analytics i Marketing Intelligence en IL3 (Universitat de Barcelona) com a experta en estadística i anàlisi de dades, gràcies per ajudar-me a entendre la magnitud d'aquest projecte i el seu suport incondicional.

Així mateix, vull donar les gràcies a l'institut Guttmann per compartir la seva informació i experiència i a l'Escola Municipal de Música de Can Fargues per deixar-me l'espai per realitzar proves i gravacions, en especial a l'Àlex Ortiga per la seva predisposició en tot moment.

1 Anatomia i funcions de la mà, canell i avantbraç

La mà és una de les estructures anatòmiques més sofisticades del nostre cos. La complexa combinació d'ossos, articulacions, músculs, tendons, nervis i vasos sanguinis, li donen una precisió i versatilitat que han permès a les persones utilitzar eines, explorar l'entorn amb detall i realitzar activitats que requereixen una capacitat de manipulació fina i precisa. (Drake, Vogl, & Mitchell, 2007)

La mà és la part final de l'extremitat superior i s'uneix pel canell amb l'avantbraç. Cada mà està formada pel palmell i cinc dits, el polze, l'índex, el cor, l'anular i el menovell (dit petit). S'encarrega de la manipulació de l'entorn ja que permet agafar i subjectar objectes, i gràcies a les moltes terminacions nervioses, pot recopilar molta informació amb el tacte.

El canell és l'articulació que connecta l'avantbraç amb la mà i permet una gran varietat de moviments fins i precisos. És una estructura complexa formada per ossos petits, que s'estabilitza amb lligaments i es mou pels músculs que, en molts casos, s'originen a l'avantbraç però actuen sobre la mà a través de llargs tendons (Kenhub, 2025).

L'avantbraç és la part del membre superior situada entre el colze i el canell. És una regió complexa formada per ossos, músculs, vasos sanguinis i nervis que permeten moviments precisos i de força de la mà. També té una funció d'estabilització i de transmissió de la sensibilitat. Els seus músculs i ossos mantenen el canell ferm quan cal aplicar força, i els nervis que hi passen porten la informació sensitiva i motora cap a la mà i els dits, fent possible una coordinació fina i precisa. En conjunt, l'avantbraç actua com una peça clau que combina mobilitat, força i control en totes les activitats manuals (Kenhub, 2025).

1.1 Ossos

La mà consisteix en vint-i-set ossos que es divideixen en tres grups, els vuit ossos del carp que formen el canell, els cinc metacarpis que formen el palmell i les falanges que formen els dits. Tots els dits contenen tres falanges excepte el polze que només en té dues. S'anomenen distals, mitjanes i proximals segons la seva proximitat als metacarpis (Drake, Vogl, & Mitchell, 2007).

El canell està format per l'escafoide, el semilunar, el piramidal, el pisiforme, el ganxós, el gran, el trapezoide i el trapezi, essencials per a la mobilitat i estabilitat de la mà. D'altra banda, l'avantbraç conté dos ossos llargs que treballen coordinadament: el radi i el cúbit. El radi està situat al costat lateral (costat del polze), participa en la mobilitat del canell i gira sobre el cúbit durant la pronació i supinació (Institut de la Mà, 2025).

El cúbit, també conegut com ulna, està situat al costat medial (costat del dit petit) i forma la part principal de l'articulació del colze. Els moviments associats són la supinació: gir per posar el palmell cap amunt (radi i cúbit paral·lels) i la pronació: gir per posar el palmell cap avall (el radi creua sobre el cúbit) (Drake, Vogl, & Mitchell, 2007).

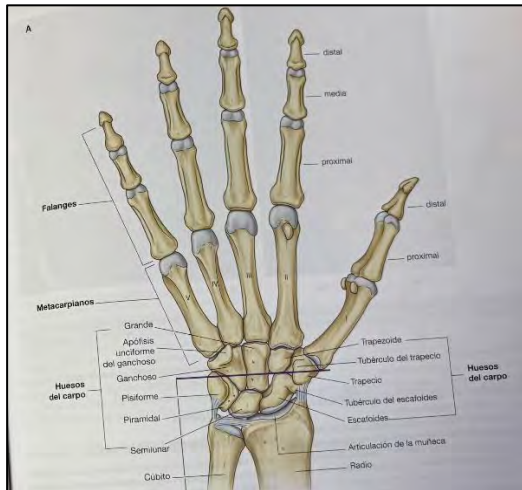


Fig. 1. Ossos de la mà i el canell.



Fig. 2. Ossos i articulacions de la mà.

1.2 Articulacions

En l'àmbit anatòmic, una articulació és la zona del cos on dos o més ossos s'uneixen, permetent diferents graus de moviment o proporcionant estabilitat segons la seva estructura. La mà té catorze articulacions principals en els dits i cinc en el palmell que són els artells.

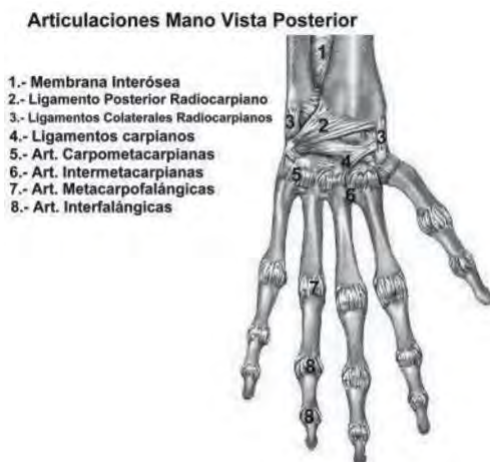


Fig. 3. Articulacions de la mà.

En els dits s'articulen les falanges, la falange proximal va articulada amb el metacarpí corresponent i s'articulen per l'articulació metacarpofalàngica, i amb la falange mitjana per l'articulació interfalàngica proximal. Aquesta segona falange s'uneix amb la falange distal en l'articulació interfalàngica distal. En el cas del dit polze, que només té dues falanges, li manca l'articulació interfalàngica distal.

La biomecànica del cos també permet realitzar moviments amb els dits, (Feel Recovery, 2025) són:

- Abducció: Se separen els dits de la mà aconseguint la màxima obertura
- Adducció: El moviment es realitza ajuntant els quatre dits mantenint el polze separat de la palma de la mà.
- Flexió: Moure els cinc dits cap a la palma provoca que els músculs flexors de la mà puguin realitzar aquesta acció.

- Extensió: Estirar els dits (prèviament flexionats) allunyant-los de la palma, permet que els músculs extensors de la mà realitzin aquesta acció biomecànica.
- Palmar: Aquest moviment permet que les empentes dactilars dels dits índex, cor, anular i dit petit amb la del polze.
- Lateral: El moviment lateral es basa a col·locar el polze al costat de la falange proximal de l'índex.
- Flexió interfalàngica del polze: És possible moure el dit polze entre dues falanges per formar un angle de 90°. L'extensió serà el moviment contrari.
- Flexió metacarpofalàngica de cada dit: Moure a 90 graus cadascun dels dits en relació amb la falange amb els metacarpians provoca en nom d'aquest moviment. L'extensió metacarpofalàngica és l'acció contrària a aquesta tasca biomecànica.
- Flexió interfalàngica proximal i mitja de cada dit: Quan es mou cadascun dels dits entre les falanges proximal i mitja es coneix com a dilució (o extensió, en el cas contrari) dels dits.
- Flexió interfalàngica distal: Per realitzar aquest moviment cal doblar la falange mitjana i distal mantenint la falange proximal recta en relació amb els metacarpians. Es pot realitzar aquest moviment a tots els dits, llevat del polze.
- Adducció de la metacarpofalàngica: Aquest moviment consisteix a moure cadascun dels dits cap a la part externa de la mà entre les falanges proximals i els metacarpians. Tornar a la posició inicial es coneix amb el nom d'abducció metacarpofalàngica.
- Presa cilíndrica: Consisteix a mantenir els quatre dits corbs i el polze per sota, tal com es fa quan s'agafa un objecte cilíndric.
- Ganxo: A diferència de la presa cilíndrica el dit polze s'allunya de la seva posició inferior. És a dir, consisteix a recollir tots els dits i deixar aixecat el polze.
- Presa de punta: Aquest moviment es diferencia del palmar perquè no es toquen les empremtes dactilars sinó els extrems de les ungles.
- Esfèric: Molt semblant a la presa cilíndrica, però en aquest cas el palmell de la mà es troba cap amunt.

El palmell de la mà és la superfície anterior de la mà situada entre el canell i la base dels dits. Està format pels metacarpians, la seva musculatura intrínseca, tendons flexors, vasos i nervis, i presenta una estructura lleugerament còncava que facilita la pressió, la presa i la manipulació fina d'objectes.

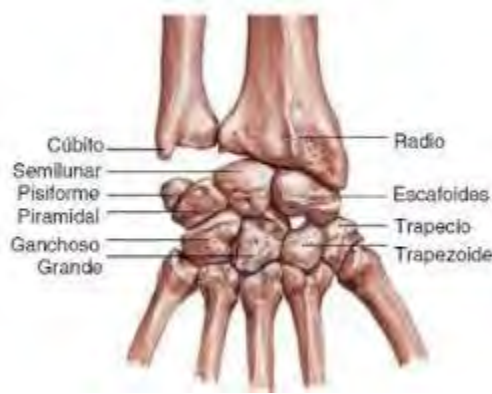


Fig. 4. Articulacions del canell.

L'articulació del canell és considerada una de les més complexes del cos humà perquè realment, està formada per 10 ossos diferents, músculs, tendons i lligaments. Són 4 articulacions diferents que treballen alhora per poder realitzar tots els moviments, flexió, extensió, abducció i adducció (ICATME, 2025).

Els moviments del canell i la mà segons la biomecànica (Feel Recovery, 2025) són els següents:

- Flexió: es produeix aquesta acció quan es porta el palmell de la mà cap a la part anterior de l'avantbraç. Això s'aconsegueix gràcies a la tensió que produeixen els lligaments ubicats als ossos piramidal, trapezi i trapezoide per moure l'os escafoide. L'amplitud des de moviment pot arribar fins als 90°.
- Extensió: és l'acte contrari a la flexió. Consisteix a col·locar la mà, en la seva àrea dorsal, el més a prop possible de la part superior de l'avantbraç. Aquest moviment es pot executar amb una amplitud que arriba fins als 85 °. El radi, el semilunar i l'escafoide són els ossos que actuen amb els lligaments per a aquesta tasca.
- Abducció: consisteix a col·locar el palmell de la mà cap a terra i moure-la, de forma paral·lela al cúbit i radi, cap al tronc. Això s'aconsegueix entre 15 i 25° d'amplitud gràcies a les articulacions que mouen els ossos carpians, l'escafoide i el semilunar.
- Adducció: aquesta acció tracta de col·locar la mà de la mateixa manera que en l'abducció, però girar-la cap al costat oposat. És a dir, moure cap a la part externa del tronc del cos.

1.3 Músculs

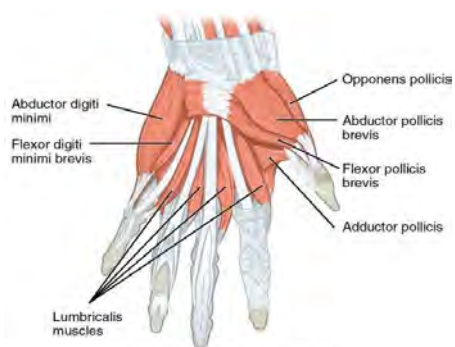


Fig. 5. Músculs superficials de la mà esquerra (vista palmar).

La mà és una estructura molt complexa i precisa que es conforma per més de trenta músculs entre els intrínsecs i extrínsecs. Els músculs extrínsecs, tal com el seu nom indica, estan fora de la mà, s'originen a l'avantbraç i arriben a la mà, relacionats amb la força. Per altra banda, els músculs intrínsecs com l'adductor del polze es troben completament a la mà i exerceixen moviments precisos.

L'avantbraç conté un gran nombre de músculs encarregats de moure el canell i els dits. Els músculs flexors permeten doblegar el canell cap al palmell i tancar la mà, mentre que els extensors fan possible estirar el canell i obrir els dits. També contribueixen a moviments laterals del canell, que ens ajuden a orientar la mà amb precisió. Aquesta combinació de moviments fa possible tant accions de força, com sostenir un objecte pesant, com moviments delicats i fins, com tocar un instrument o manipular peces petites (Drake, Vogl, & Mitchell, 2007).

1.4 Tendons i Lligaments

Els tendons i lligaments són estructures de vital importància pel sistema múscul esquelètic ja que donen el moviment i l'estabilitat a les articulacions. Tots dos són teixit connectiu fibrós però tenen funcions diferents.

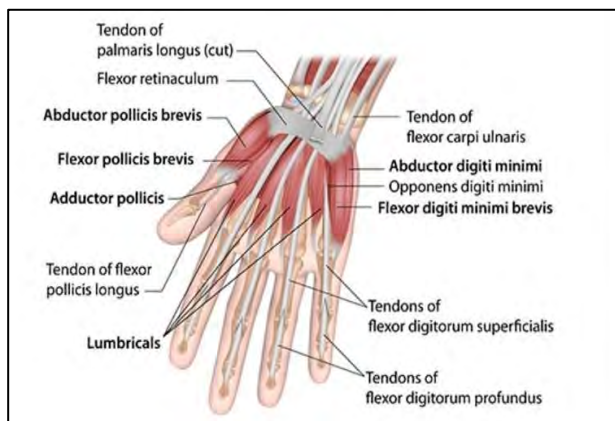


Fig. 6. Tendons de la mà.

Els tendons connecten els músculs amb els ossos i s'encarreguen de transmetre la força i moviments realitzats pels músculs a les articulacions per poder moure-les. A vegades, son visibles a les extremitats ja que aquestes requereixen força i mobilitat. La seva estructura està composta per fibres de col·lagen molt compactes, això els dona una gran resistència a la tensió, no obstant això, són poc elàstics, ja que la seva funció requereix fermesa més que flexibilitat (Feel Recovery, 2025).

D'altra banda, els lligaments, també de teixit connectiu fibrós, però en aquest cas uneixen els ossos entre sí a les articulacions per tal de mantenir l'estabilitat d'aquestes. Els lligaments eviten moviments extremats que puguin causar lesions, proporcionen protecció i suport al genoll, canell, o el colze. En contraposició als tendons, aquests són més flexibles per poder realitzar els moviments sense deixar de proporcionar estabilitat (Premium Health Sport, 2025). Els tendons i lligaments que componen l'avantbraç, el canell, la mà i els dits requereixen de la força i alhora de la precisió per cobrir la gran varietat de moviments que realitza aquesta extremitat. (Feel Recovery, 2025).

Els tendons de l'avantbraç i la mà s'encarreguen de transmetre la força dels músculs de l'avantbraç als ossos de la mà i dels dits, realitzant els moviments de flexió, extensió, tancar el puny o moure els dits amb precisió. Aquests tendons es distribueixen en dues regions: els flexors, situats a la part anterior de l'avantbraç i que permeten doblegar el canell i els dits, i els extensors, a la part posterior, que permeten estirar-los. (Feel Recovery, 2025).

Entre els més importants es troben:

- El tendó flexor profund dels dits, que permet doblegar les falanges més properes a la palma.
- El tendó flexor superficial dels dits, que ajuda a flexionar les falanges mitjanes.
- El tendó flexor llarg del polze, que permet doblegar el polze.
- El tendó extensor comú dels dits, que els estira.
- El tendó extensor llarg del polze, que estira i separa el polze de la resta de dits.

Aquests tendons passen pel canell a través de túnels fibrosos anomenats retinacles, que fan que es mantinguin en la seva posició i eviten que es desplacin al moure la mà. Un dels més coneguts és el retinacle flexor, que forma el sostre del túnel carpià, pel qual passen els tendons flexors i el nervi mitjà.

- Pel que fa als lligaments, la seva funció principal és mantenir unides les estructures del canell i la mà, aportant estabilitat sense limitar el moviment. (Feel Recovery, 2025)

Alguns dels més importants són:

- El lligament col·lateral radial i el lligament col·lateral cubital del canell, que reforcen els costats de l'articulació i impedeixen moviments laterals excessius.
- Els lligaments intercarpians, que uneixen els petits ossos del carp i mantenen la forma i fermesa del canell.
- El lligament radio carpià, que connecta el radi amb els ossos del carp i permet moviments de flexió i extensió controlats.
- A la mà, els lligaments col·laterals de les articulacions dels dits, que eviten que els dits es desviïn cap als costats quan es flexionen o s'estiren.

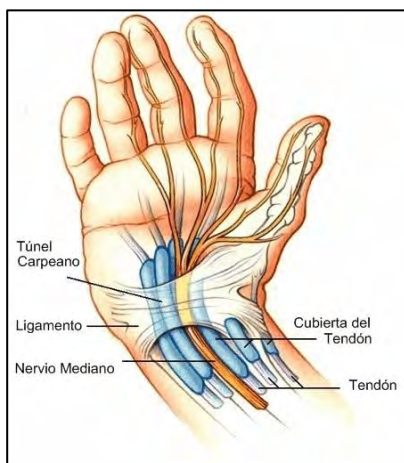


Fig. 7. Lligaments de la mà.

En conclusió, els tendons permeten el moviment precís i coordinat dels dits i del canell, mentre que els lligaments asseguren que aquestes articulacions es mantinguin estables. Gràcies a la combinació d'aquests, podem realitzar des de moviments fins (com escriure o tocar un instrument) fins a accions de força, com subjectar objectes o empènyer.

1.5 Connexions mà-cervell (nervis)

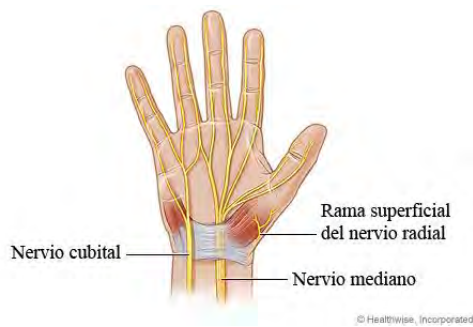


Fig. 8. Nervis de la mà.

Els nervis que permeten la innervació motora i sensorial del braç (des de l'espatlla fins als dits) comencen al coll i l'axil·la, en una estructura anomenada plexe braquial que s'uneix als nervis espinals, que s'originen a la medul·la espinal. Dins d'aquest plexe braquial hi ha tres nervis que destaquen per la seva importància (Cigna, 2024).

El nervi radial, que fa dues ramificacions, el nervi interossi posterior que té una funció motora, és a dir, transmet la informació del cervell per realitzar moviments i el nervi radial superficial, que és sensitiu, també es ramifica i aporta sensibilitat al dors i lateral de la mà, al polze i l'índex. Innerva tots els extensors i permet estendre canell i dits (Kenhub, 2025).

El nervi mitjà passa per l'avantbraç i entra a la mà a través del túnel carpià (format pel retinacle flexor, per on passen també tendons). Permet la flexió i l'extensió del canell a més de la flexió del dit polze, a causa de les ramificacions, ja que possibilita el moviment d'alguns músculs. Per altra banda, també dona sensibilitat a les palmes dels dits i les seves puntes. També controla la majoria de músculs flexors i és fonamental per a la destresa fina de la mà (UNITIA – SECOT, s.d.).

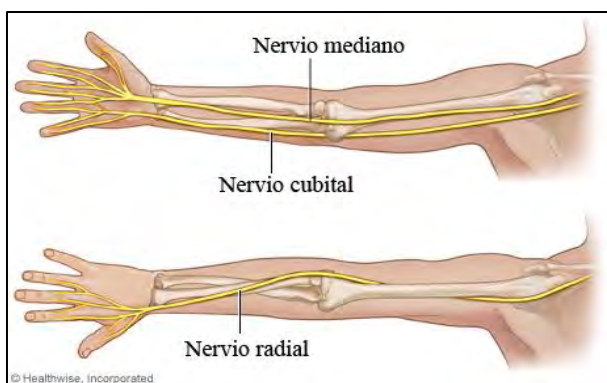
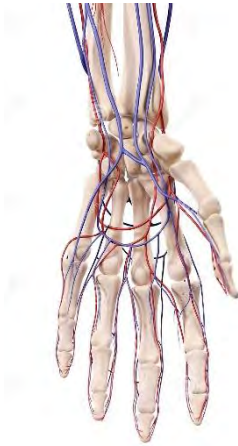


Fig. 9. Nervis del braç.

El nervi cubital passa per darrere del colze a prop de l'os de la música, on es divideix en dues branques, la primera, amb funció motora de tots els petits músculs de la mà, com per exemple, els interossis, i la segona, amb funció sensitiva de la part interna de la mà, l'anular i el dit petit. Controla part dels flexors profunds i molts músculs intrínsecs de la mà. És important per a la força de pinça lateral. (Kenhub, 2025).

Tots tres nervis junts transmeten la informació del cervell als músculs per poder realitzar moviments i per la part sensitiva recopilen informació de l'exterior com la temperatura o la textura d'una superfície per transmetre-la al cervell. (Kenhub, 2025).

1.6 Sistema circulatori



El sistema circulatori de la mà i l'avantbraç és complex ja que al ser la part del cos terminal d'una extremitat es produeixen moltes anastomosis, és a dir, la unió vasos, per poder fer garantir la irrigació sanguínia en cas d'obstrucció. Totes les artèries que arriben a la mà s'originen en dues més grans, les artèries radial i cubital (ulnar), aquestes es ramifiquen en xarxes més petites com l'arc palmar superficial i l'arc palmar profund que alhora deriven en les artèries digitals que arriben als dits. (Kenhub, 2025).

Fig. 10. Sistema circulatori de les mans.

Entre les artèries i les venes es troben els capil·lars, on es l'intercanvi d'oxigen i nutrients per substàncies de rebuig amb els músculs, tendons i nervis. Des dels capil·lars, la sang comença el retorn venós, que la transporten de retorn al cor a través d'un sistema superficial i un altre profund. La xarxa venosa dorsal, a la part del darrere de la mà, que porta la sang cap a la vena cefàlica (costat del polze) i la vena basilica (costat del menovell). Els arcs venosos palmars, situats a la palma, reben sang dels dits i l'envien a les venes profundes de l'avantbraç. A més, aquestes venes es comuniquen amb la xarxa dorsal perquè la sang flueixi bé fins i tot quan tanquem la mà per a agafar alguna cosa.

Aquesta xarxa d'artèries, capil·lars i venes permet que l'oxigen i tots els nutrients necessaris arribin als teixits perquè aquests puguin contreure's i relaxar-se amb precisió, fent possible el moviment de la mà i els dits. Per tant, encara que el sistema circulatori no genera el moviment directament, és indispensable per a mantenir la força, coordinació i recuperació dels teixits que ho fan possible.

La vascularització de l'avantbraç es basa en dues artèries principals que el travessen: l'artèria radial que va pel costat del polze i participa en l'arc palmar profund i l'artèria cubital (ulnar) que va pel costat del dit petit i forma part de l'arc palmar superficial. Aquestes artèries aporten oxigen i nutrients a músculs, ossos i nervis (Kenhub, 2025).

2 Context Amputacions

Amputar significa tallar i separar completament del cos un membre o una porció d'ell (Institut d'Estudis Catalans, s.d.). La Clínica Universitat de Navarra (s.d.), defineix l'amputació com “un procediment quirúrgic mitjançant el qual es realitza L'extirpació total o parcial d' una extremitat o part del cos, com un dit, peu, cama, braç o fins i tot parts del rostre. Es tracta d' una intervenció mèdica indicada generalment quan una zona del cos ha perdut la seva viabilitat funcional, representa una amenaça per a la salut general del pacient o no respon a tractaments conservadors. Des d'un punt de vista mèdic, l'amputació pot ser electiva (planificada) o urgent (per traumatismes o infeccions greus). És una decisió multidisciplinària que implica cirurgians, traumatòlegs, metges rehabilitadors i psicòlegs, i té implicacions físiques, emocionals, socials i funcionals de gran calat”.

2.1 Xifres d'Amputacions

El nombre total de persones residents en llars espanyoles que declaren tenir alguna discapacitat ascendeix a 4,38 milions, segons L'Enquesta de Discapacitat, Autonomia personal i situacions de Dependència (EDAD) de l'any 2020, la qual cosa suposa un 9,3% de la població (47.329.981 habitants a 1 de gener de 2020 xifres de població a 1 de gener de 2020 segons les dades de l'INE (2020) sobre Estadística de Migracions (EM).

Segons el Comitè Espanyol de Representants de Persones amb Discapacitat (CERMI) (2020) el 33,2% de les persones amb discapacitat assenyala les deficiències osts articulars (conjunt de trastorns que afecten ossos, articulacions i teixits circumdants, com a músculs, tendons i lligaments, causant dolor, rigidesa i inflamació que limiten la mobilitat) com la seva causa principal.

L'associació Nacional d'amputats d'Espanya (ANDADE) (s.d.) estima que a Espanya viuen unes 90.000 persones amputades. Aquesta xifra agrupa amputacions de tota mena (membre superior, membre inferior, causes vasculars, traumàtiques, congènites, etc.) i s'utilitza sovint com a referència en recerques sanitàries i de teràpia ocupacional.

Segons la Societat Espanyola de Rehabilitació i medicina física (SERMEF) (2021), les amputacions de membre superior, representen el 16% del total d'amputacions.

La integració d'aquestes dades ens permet fer un càlcul sobre la prevalença de la població espanyola de persones amputades de membre superior. Aquesta prevalença és del 0,03%, això vol dir que 30 de cada 100.000 habitants la pateixen.

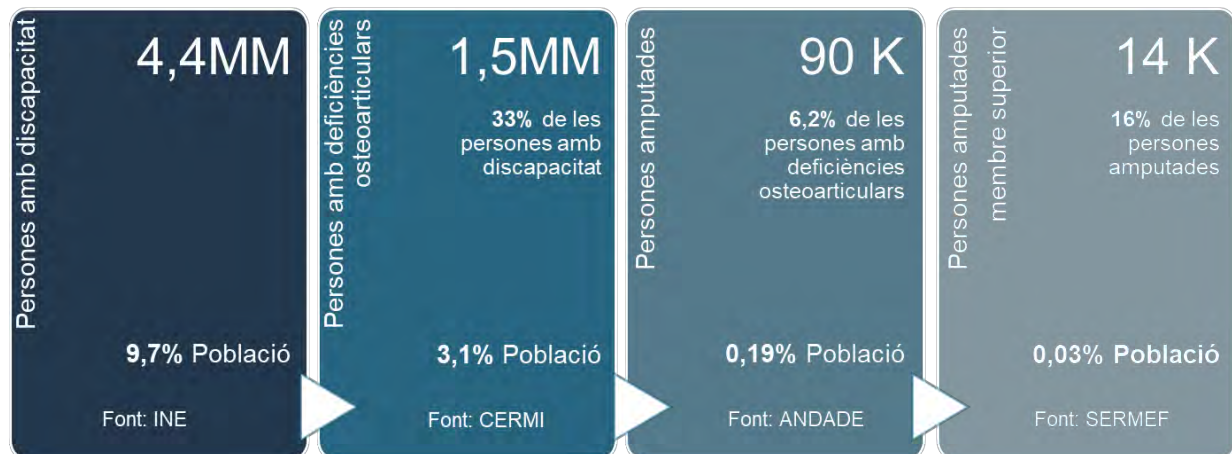


Fig. 11. Context Amputacions a la Població Espanyola (Dades 2020). Elaboració pròpia a partir de la combinació de fonts: INE, CERMI, ANADE i SERMEF.

2.2 Causes d'Amputacions

Les causes de les amputacions són molt diferents i la principal causa canvia segons la zona del planeta. En països en vies de desenvolupament, la principal causa és el traumatisme, mentre que en els països desenvolupats, en els darrers anys, la principal causa d'amputació ha estat la diabetis, degut a l'augment de casos. Aquesta malaltia o l'aterosclerosi (malaltia que es produeix quan s'acumulen greixos, colesterol i altres substàncies (anomenades placa) a les parets de les artèries, enduent-les i estrenyent-les, que pot ser provocada per la diabetis), provoca mala circulació (trombes), acumulació de placa a les artèries, rigidesa i pèrdua de flexibilitat als vasos sanguinis, etc. Tot això impedeix que la sang arribi correctament a totes les parts del cos sobretot als dits i pugui causar una amputació. També es poden donar per infeccions greus i tumors a la zona (Cordella, 2016).

A més, els estudis disponibles mostren que les amputacions de membre superior estan vinculades amb més freqüència a causes traumàtiques: accidents laborals, de trànsit o lesions greus. Això les diferencia de les amputacions de membre inferior, que a Espanya estan fortament associades a causes vasculars derivades de diabetis o malaltia arterial perifèrica (Cordella, 2016).

2.3 Amputacions de la mà

Les amputacions de l'extremitat superior són les menys estudiades degut a que són les menys freqüents, solen ser causades per accidents. Els diferents tipus d'amputacions es classifiquen segons l'altura del braç a la que es realitza l'amputació. Si es realitza a l'alçada de l'articulació (canell, colze o espatlla) s'anomena desarticulació del canell, colze o húmer, per altra banda, si es duu a terme a la meitat d'un os es coneix com a "trans-" seguit de l'os que es talla (radial, metacarpià, humeral...).

Funcionalment, el canell es considera part del "sistema mà", perquè participa en l'orientació de la mà, la precisió, la força de presa i la coordinació fina. Per això, en rehabilitació i en pròtesis, el canell se sol tractar com a part del conjunt biomecànic de la mà, encara que anatòmicament no ho sigui (Cordella, 2016).

2.4 Músics amputats

Tot i que no hi ha una estadística de músics amputats, hem trobat alguns casos que demostren que la idea que una pròtesi pugui ajudar a un músic amputat és viable.



Jason Barnes va patir una amputació del braç dret, a l'edat de 28 anys, a conseqüència d'una descàrrega elèctrica. Barnes va utilitzar pròtesis robòtiques amb electromiografia, intel·ligència artificial i control d'ultrasons per tocar bateria i piano amb precisió (INSIDER Español, 2018).

Fig. 12. Jason Barnes – Bateria i piano amb pròtesi biònica



Manami Ito va perdre el seu braç en un accident de trànsit, Ito utilitza una pròtesi articulada per subjectar i dirigir l'arc del violí, un exemple d'adaptació motora fina amb tecnologia (Palomo, 2023).

Fig. 13. Manami Ito – Violinista amb pròtesi articulada.



João Carlos Martins, una malaltia degenerativa el a fer apartar-se del teclat. Va poder tornar a tocar amb uns guants biònics. Es tracta d'uns guants extensors fets de neoprè, una placa de fibra de carboni i vares d'acer, amb les peces fetes a mida i sortides d'una impressora 3D (Zabalbeascoa, 2025).

Fig. 14. João Carlos Martins – Pianista amb guants biònics

3 De l'amputació a la pròtesi de mà i rehabilitació.

3.1 Condicions generals per portar una pròtesi de mà

Una pròtesi es defineix com l'addició al cos humà d'una peça o d'un aparell artificial que reemplaça un òrgan o part d'un òrgan que manca, com una dent, una cama, etc. (Institut d'Estudis Catalans, s.d.). La principal condició necessària per portar una pròtesi de mà és l'absència parcial o total d'una mà. També és necessària la completa cicatrització del monyó per poder col·locar la pròtesi sense perill d'infecció.

Una persona amb amputació de membre superior que vol tocar un instrument, no només necessita la pròtesi, sinó que el seu cervell ha de "reaprendre" treballant la reeducació motora, fonamental per recuperar l'habilitat per tocar instruments.

La reeducació motora és un procés de rehabilitació per a recuperar o millorar la mobilitat, la coordinació i les habilitats motores després d'una lesió, malaltia o cirurgia. S'enfoca a reaprendre moviments funcionals a través d'exercicis i teràpies personalitzades, com les que es realitzen en fisioteràpia, amb la finalitat de restaurar la funció del cos i millorar la qualitat de vida de l'amputat (Muniesa Portolés et al., 2011).

La neuroplasticitat és la capacitat del cervell de reorganitzar-se creant noves connexions neuronals, adoptant noves funcions i reorganitzant el mapa cortical després d'un dany o amputació. Això permet que les persones s'adaptin a noves experiències, aprenguin habilitats cognitives com la memòria, l'atenció, el raonament, el llenguatge, totes essencials per a l'aprenentatge (Puerta, 2014).

Quan una persona perd una mà, la zona de l'escorça cerebral que abans controlava aquesta mà no desapareix. Aquesta àrea queda "buida", i és ocupada a poc a poc per zones veïnes (cara, braç,...). Aquesta reorganització pot causar fenòmens com a dolor del membre fantasma, sensació que la mà segueix aquí i/o confusió sensorial com ara tocar la cara i sentir la mà.

Això ocorre perquè el mapa cortical és dinàmic gràcies a la neuroplasticitat. La neuroplasticitat permet que la pròtesi "ocupi el lloc" de la mà perduda en el mapa cortical. Com més aviat es comença la rehabilitació, més estable queda el mapa cortical, evitant la reorganització caòtica. Les pròtesis que inclouen feedback sensorial ajuden al fet que l'escorça torni a interpretar senyals com "de la mà". Com millor és l'entrenament i la tecnologia, major integració cerebral s'aconsegueix. El cervell crea noves connexions neuronals per a controlar aquest dispositiu i el mapa cortical comença a readaptar-se a la nova funció. Es redueix el dolor fantasma quan el mapa cortical es reorganitza de manera funcional. Fins i tot, si no existeix mà biològica, la representació mental de la mà continua viva, i el cervell pot assignar aquest territori a la pròtesi.

L'homuncle de Penfield és una representació visual i anatòmica del mapa cortical humà, creada pel neurocirurgià Wilder Penfield en els anys 40 i 50. Serveix per a mostrar com el cervell organitza les funcions sensorials i motores del cos. La paraula homuncle significa "homenet". Penfield ho va construir estimulant elèctricament àrees del cervell de pacients desperts durant cirurgia, per a veure quina part del cos responia (Puerta, 2014).

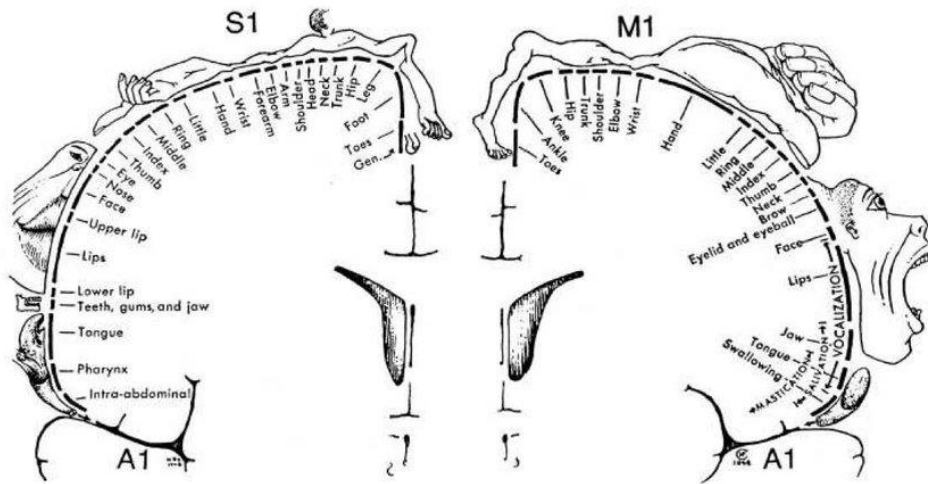


Fig. 15. La divisió de les funcions sensorials (esquerra) i motores (dreta) a la còrteix cerebral.

És un "ninot" o figura humana distorsionada perquè no totes les parts del cos tenen la mateixa importància per al cervell. Hi ha dos tipus d'homuncle, el motor que representa el control de tots els músculs voluntaris i el somat sensorial, que representa la sensibilitat tàctil i propioceptiva (capacitat del cos per a saber on estan les teves parts sense mirar-les). Per exemple, coordinar-te per a caminar sense mirar els peus.

A l'homuncle, les mans, llavis, llengua, cara i dits apareixen enormes, perquè aquestes zones reflecteixen més sensibilitat, més motricitat fina i més neurones dedicades a controlar-les; mentre que el tronc i les cames, són molt més petits.

El fenomen del membre fantasma fa referència a la sensació que una extremitat que ja no està (per amputació) segueix present, sovint amb sensacions de dolor o presència. Aquest fenomen s'explica en part per la reconfiguració cortical o la persistent activitat en les zones que abans transmetien impulsos nerviosos a aquella extremitat (Puerta, 2014).

3.2 Valoració, disseny i adaptació de la pròtesi de mà

Segons l'Institut Guttmann (2024), el procés de portar una pròtesi comença des de la presa de decisió de l'amputació, fins a la consideració de múltiples factors físics i psicològics. La incorporació d'una pròtesi implica l'acompanyament a la persona, en tot el procés, incloent rehabilitació pre i post portar la pròtesi. Serà necessari l'estudi de la musculatura, la mesura lineal de mig pam, que equival aproximadament a la formada pels quatre dits de la mà tancada, sense comptar el polze, el disseny personalitzat de la pròtesi i la integració de sensors musculars d'elevada precisió. Un cop creada la pròtesi, vindrà una fase d'ajustos i seguiment de l'adaptació, doncs en molts casos es necessitarà suport psicològic i fisioteràpia.

Les implicacions de portar una pròtesi són infinites, ja sigui perquè l'usuari ha d'aprendre a fer-ne ús o perquè aquesta no compleix les necessitats per complet o pel fet d'acceptar que un braç o una cama ha sigut amputat. Adaptar-se a una amputació pot causar malalties com síndrome del membre fantasma, la depressió, ansietat, estrès posttraumàtic sobretot si ha sigut a causa d'un accident, també es veu afectada la imatge i l'autoestima de la persona a causa de la pèrdua de qualitat de vida per no poder assolir totes les necessitats i haver patit un canvi tan important. Per aquest motiu és important comptar amb suport social i familiar però també de grups de suport mutu, altres persones que han tingut experiències similars.

La teràpia ocupacional (molt important també pels professionals de la música) i la coordinació amb el tècnic ortopèdic i el metge de rehabilitació són clau en l'adaptació. L'adaptació implica, amb el temps, acostumar-se a la pròtesi per aconseguir la màxima comoditat, oblidar que és externa i sentir-la com una part més del cos.

Amb tota la informació exposada hem arribat a la conclusió que tot portador, a més de l'adaptació, té uns objectius a assolir per garantir la seva salut tant física com mental, que són la mobilitat i l'estètica. Conèixer els moviments i les capacitats de la pròpia pròtesi per realitzar els moviments necessaris en la vida quotidiana de l'amputat, complirà l'objectiu de mobilitat.

L'estètica, que es definiria com la forma en la que es pot veure el dispositiu des de fora, és també un punt que tenim en consideració, ja que la societat en que vivim jutja tot allò fora del que considera normal i per tant portar una pròtesi molt notòria o poc estètica pot tenir implicacions psicològiques a l'hora de relacionar-se amb la resta de persones.

Finalment, el cost, és un factor molt important per accedir a una pròtesi. A Catalunya, el Servei Català de la Salut (s.d.), contempla algunes prestacions ortopèdiques d'ortesis de membre superior: ortesi de dit, ortesi de mà, ortesi de canell i mà, ortesi de canell, mà i dits, i algunes pròtesis sota prescripció mèdica i amb possible copagament per part de l'usuari.

A diferència de les pròtesis, les ortesis són d'ús temporal i molt més econòmiques, ja que no es precisa la seva personalització. Exemples d'ortesi són: un cabestrell, una espatlla, una fèrula o

un estabilitzador de turmell, entre altres tipus. No substitueixen les funcions que proporciona una extremitat de forma permanent, ofereixen suport a la part del cos que ho necessita fins que es recuperi (Servei Català de la Salut, s.d.).

3.3 Rehabilitació motora fina

La rehabilitació de la motricitat fina és un procés per millorar la coordinació i el control dels músculs petits de les mans, dits i canells, especialment després d'una lesió o malaltia. S' enfoca en exercicis de precisió, destresa i coordinació òcul-manual a través d'activitats com manipular objectes petits, esbotzar, escriure, usar plastilina o pinces, per tal de restaurar la funcionalitat per a tasques quotidianes (Institut Guttmann, 2024).

Així doncs, podríem concloure que aquest tipus de rehabilitació és molt important en la música, perquè requereix moviments coordinats, rítmics i de precisió, que es treballen en el procés de rehabilitació com la prensió fina (per exemple, polsar una corda de guitarra) o la coordinació bilateral, com tocar un teclat.

4 Pròtesis

4.1 Les pròtesis al llarg de la història



La història de les pròtesis comença a l'antic Egipte, fa 3000 anys, datació feta a una pròtesi de fusta d'un dit gros del peu, es pensa que no només complia una funció estètica sinó que permetia caminar. Aquest fet es pot considerar com l'inici del que serà una gran evolució tecnològica, mèdica i social a la nostra era.

Fig. 16. Dit protètic egipci (Museu del Caire. Data entre el 950 i 710 aC.



A les civilitzacions grecoromanes també hi ha evidències de pròtesis, generalment fabricades en metall o fusta. La finalitat era sobretot pràctica: permetre el desplaçament mínim a persones amputades, especialment soldats. Tot i la seva simplicitat, aquestes primeres formes de pròtesi mostren la necessitat humana de mantenir autonomia i mobilitat.

Fig. 17. Pròtesi de bronze, trobada a Itàlia 300 aC.



Fig. 18. Mà de Marcus Sergius.

A l'antiga Roma, també s'hi van trobar. En aquest cas relacionades en l'ús a les guerres. Destaca la mà dreta de Marcus Sergius, un militar d'alt rang, que tenia una mà de ferro que li permetia agafar l'escut i així continuar lluitant. Malgrat això, només se les podien permetre les persones adinerades, pels més pobres i fora les batalles hi havia la cama de fusta i el garfi.



Fig.19. Mà d'alt-Ruppin construïda amb ferro l'any 1400.

Durant l'Edat Mitjana, es van utilitzar metalls bastant pesats, principalment destinades a soldats o cavallers. L'objectiu principal era la protecció o estètica més que el funcionament real

Al Renaixement, Ambroise Paré (1510–1590), cirurgià francès, va crear la primera pròtesi d'una cama amb una articulació mecànica que permetia fer de genoll i doblegar-la. Aquesta innovació, va suposar una revolució en la fabricació de pròtesis, amb la introducció d'articulacions mecàniques per als genolls i mans que podien obrir i tancar els dits.

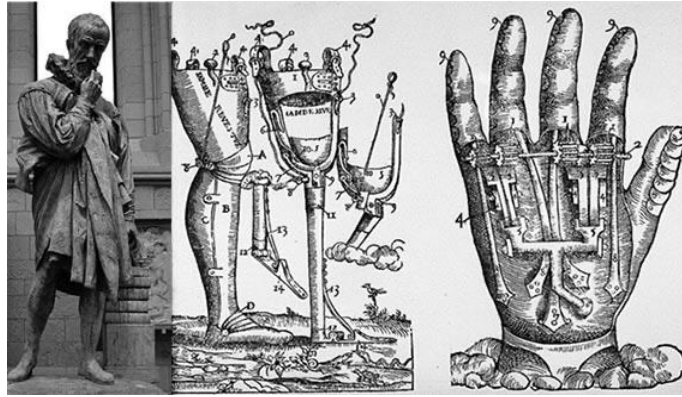


Fig. 20. Dissenys de pròtesi ortopèdiques per cames i mans mecàniques, que apareixen a l'obra del cirurgià francès.

Gràcies al procés d'industrialització als segles XVIII i XIX s'introdueixen materials nous i més lleugers, com l'acer refinat i posteriorment l'alumini, a la construcció de les pròtesis. Aquest període es caracteritza per l'augment de la demanda de pròtesis a causa de conflictes armats, especialment la Guerra Civil Americana, que va deixar milers d'amputats.

Ja als segles XVIII i XIX, en plena revolució industrial, a la guerra civil americana, es va començar a fer servir acer, material més lleuger, que després es substituiria per l'alumini, per a la creació de pròtesis.

No fa tant anys, a meitat del segle XX, es van produir grans innovacions, prioritzant la funcionalitat i la imitació dels moviments humans. Van aparèixer les pròtesis mioelèctriques, on el pacient podia controlar els seus moviments a partir dels impulsos elèctrics dels seus propis músculs. Així mateix, es van incorporar materials encara més lleugers, com la fibra de carboni, silicona, o resina, i es van millorar en la comoditat i personalització de les pròtesis. Sempre amb la intenció de millorar la funcionalitat.



Fig. 21. "Sauerbruch arm", una reconstrucció artificial del braç i l'avantbraç del Dr. Ferdinand Sauerbruch.

4.2 Tecnologia actual i futura

Actualment, les pròtesis han assolit un nivell de tecnologia inimaginable no fa tants anys. Les innovacions més destacades inclouen l'osteo-integració, que permet ancorar la pròtesi directament a l'os, eliminant la necessitat de sòcols (part de la pròtesi que encaixa amb el monyó); les interfícies neuronals, que connecten el sistema nerviós amb la pròtesi i permeten registrar o estimular l'activitat entre el cervell i el cos; les pròtesis hàptiques, capaces de transmetre sensacions de pressió i textura; i la impressió 3D, que abarateix costos i millora enormement la personalització anatòmica (Borthakur, 2024).

La impressió 3D consisteix en la creació d'un objecte tridimensional mitjançant l'addició de capes successives d'un material. Aquesta tècnica ha sigut revolucionària en el camp de les pròtesis, ja que fa que la fabricació de peces totalment personalitzades, lleugeres, resistents i econòmiques sigui més fàcil.

Generalment, aquest procés comença amb un escaneig 3D de la part del cos on s'ha d'adaptar la pròtesi i això permet obtenir mesures i característiques exactes a més d'un futur ajust perfecte. A partir d'aquest escaneig, es crea un model digital, és a dir, una representació virtual en 3D de la pròtesi, que serveix com una guia per a la impressora i permet determinar les formes, dimensions i mecanismes abans de fabricar la peça real. Un cop finalitzat el disseny, s'envia a una impressora 3D, que construeix la pròtesi o les seves peces afegint capes del material seleccionat, que pot ser àcid polilàctic (PLA), resina d'alta resistència (ABS), niló o fins i tot metalls com titani o acer inoxidable, segons la durabilitat i funció requerida. Es preveu que en el futur també puguin realitzar impressions amb teixit orgànic, cèl·lules.

Després de la impressió, sovint és necessari muntar components mecànics o electrònics, especialment en pròtesis accionades pel cos o mioelèctriques. Utilitzar la impressió 3D aporta diversos avantatges importants: permet una personalització total, redueix els costos de fabricació, accelera el procés de producció, fa possibles dissenys que serien inimaginables amb tècniques tradicionals i fa accessibles les pròtesis a zones amb pocs recursos (Diletto, 2025).

A més a més, el desenvolupament de la intel·ligència artificial (IA), ha permès que es puguin entendre i aprendre els impulsos nerviosos de cada moviment en específic i també de cada persona. D'aquesta manera la pròtesi pot respondre als impulsos nerviosos que rep el múscul i realitzar el moviment que feia el braç humà. El fet que la IA tingui la capacitat d'aprendre i adaptar-se als moviments musculars i patrons del cervell de cada persona fa que siguin exclusius de cada usuari de la pròtesi. Aquest aprenentatge evoluciona i s'amplia amb el temps degut a l'ús continu (Somovilla, 2020).

En definitiva, aquestes noves tecnologies en l'àmbit de les pròtesis no només busquen recuperar moviments, sinó també les sensacions i funcions fines, apropant-se progressivament al

funcionament d'un membre humà. Al mercat, destaquen empreses pioneres com Neuralink, Össur, e-NABLE o *Open Bionics*.



Fig. 22. Luke arm, última tecnologia.

Neuralink va ser fundada al 2016 per l'empresari Elon Musk també conegut per empreses com Tesla i SpaceX. L'empresa treballa en interfícies cervell-màquina (ICM) amb l'objectiu de connectar directament el cervell humà amb dispositius externs. La seva voluntat és ajudar a persones paralizades a escriure o controlar dispositius amb el pensament, i en algun moment recuperar o aconseguir mobilitat perduda o absent. Aquesta tecnologia utilitza implants cerebrals molt petits amb fils ultrafins que capturen l'activitat neuronal, per implantar-los cal un robot quirúrgic d'alta precisió per evitar tocar vasos sanguinis i causar danys cerebrals. L'empresa també treballa perquè el dispositiu sigui fàcilment controlable mitjançant aplicacions de telèfon, sense necessitat d'anestèsia general en cas de necessitar manipular-lo (McFarland, 2019).

Össur és una empresa líder en ortopèdia no invasiva, fundada a Islàndia per Össur Kristinsson (un tècnic protètic), que desenvolupa i fabrica tecnologia avançada per a les pròtesis, ortesis i teràpia de compressió per millorar la mobilitat i qualitat de vida de persones amb limitacions físiques, enfocant-se en les pròtesis i la seva unió amb els monyons i altres suports, desenvolupant models diferents a més de exoesquelets i neurortesis per millorar la qualitat de vida de pacients amb malalties neurodegeneratives com l'esclerosi múltiple.

L'organització e-NABLE és una comunitat global en línia de voluntaris d'arreu del món que utilitzen les seves impressores 3D per fabricar dispositius protètics gratuïts i de baix cost per a nens i adults necessitats. Els dissenys de codi obert creats per ells ajuden aquells que han nascut sense dits i mans o que els han perdut a causa de la guerra, desastres naturals, malalties o accidents.

Open Bionics és una empresa britànica dedicada a dissenyar i fabricar pròtesis biòniques avançades, assequibles i lleugeres, principalment el "Hero Arm", un braç mioelèctric imprès en 3D que utilitza senyals musculars per controlar el moviment i oferir funcionalitat a persones amb amputacions, amb dissenys personalitzables i, en alguns casos, temàtiques de superherois per a nens.

4.3 Tipus de pròtesis

Les pròtesis es diferencien entre elles segons la seva estructura interna i la forma en que es controlen. Els principals tipus són (Mecanicos Valencia, 2023) , de menys a més funcionalitats:

- Pròtesi passiva: no està formada per mecanismes ni cap part mòbil. La seva funció és principalment estètica però poden servir de suport o per estabilitzar objectes, com per exemple, aguantar el paper per escriure amb l'altra mà.
- Pròtesi accionada pel propi cos: internament està formada per mecanismes de cables i politges que aprofiten el moviment de l'espatlla o el tronc per accionar-se i permetre el moviment del que seria el colze, el canell o la mà. El seu moviment és prou limitat però són resistents i econòmiques ja que no requereixen components electrònics.
- Pròtesi mioelèctrica: (mio= múscul) la seva estructura interna és complexa, incorpora sensors que detecten els impulsos nerviosos que reben els músculs i els transformen en moviments precisos de la mà o els dits. Un microprocessador interpreta els senyals i activa els motors i mecanismes que permeten moviments més naturals i semblants als d'una mà humana, com una millor agafada. Tot i la seva gran funcionalitat requereix manteniment i una gran quantitat econòmica per poder-la adquirir.
- Pròtesis biòniques, aporten restitució mecànica, ampliació de capacitats i rehabilitació accelerada a través de feedback immediat, facilitant la neuroplasticitat
- Pròtesi híbrida: és una combinació de l'accionada pel cos i la mioelèctrica ja que incorpora mecanismes dels dos tipus. Per exemple, el colze s'acciona per cables gràcies al moviment de l'espatlla i la mà respon a senyals elèctrics dels músculs, així s'obté un gran control amb una elevada funcionalitat.
- Pròtesi especialitzada: està dissenyada per activitats concretes com pot ser un esport o una feina, pot portar eines incorporades, d'aquesta manera la pròtesi varia segons per a què està pensada.
- Pròtesis robòtiques multigrup: permeten diferents preses, més útils per manipular objectes delicats (per exemple, una baqueta, una corda de guitarra o una embocadura d'instrument).
- Pròtesis hàptiques, capaces de transmetre sensacions de pressió i textura.

5 De l'anatomia de la mà, a la pròtesi robòtica i a les habilitats per a tocar el piano

Construir una pròtesi robòtica per a tocar el piano implica tenir un coneixement profund de l'anatomia humana, hem de traduir aquests principis anatòmics a una estructura mecànica controlada electrònicament. La idea fonamental és comprendre com funcionen els dits naturals i dissenyar mecanismes equivalents usant servomotors, articulacions impreses en 3D i cables que actuïn com a tendons.

L'objectiu no és només imitar la forma de la mà, sinó replicar funcions musicals imprescindibles per a tocar aquest instrument: velocitat, precisió i control de les dinàmiques (nivell de volum, més fort o més fluix).

Com veurem més endavant amb programació i motors adequats, és possible crear un sistema capaç d'executar patrons pianístics bàsics i evolucionar cap a més complexitat si té l'estructura i materials adients.

Les articulacions humanes permeten flexió, extensió, abducció, adducció i oposició del polze, mentre que en una mà robòtica a través de moviments preprogramats intenta aconseguir aquests mateixos moviments. Tanmateix dins de les limitacions de coneixement i materials per a tocar el piano, és només imprescindible la flexió dels dits.

Com prèviament hem comentat, la mà humana pot realitzar moviments de precisió, com manipular eines, pressionar i fer força, percebre textures i temperatures, pot gesticular o fins i tot comunicar-se amb llenguatge de gestos. La mà robòtica podrà realitzar moviments més limitats sense la capacitat de realitzar activitats que requereixin gran capacitat motora. La sensibilitat tàctil és també imprescindible per controlar pressió, velocitat i precisió en tocar el piano. La mà robòtica no ho podrà imitar, hauríem de parlar de mans biòniques d'última generació per adquirir aquesta funcionalitat.

Mentre que l'estructura òssia de la mà consisteix en tres falanges per dit (dos al polze), metacarpis i carps, en una pròtesi robòtica els dits són articulats amb falanges impreses en 3D, articulacions mecàniques i cables que imiten els tendons. Quan un múscul tira d'un tendó, el dit es flexiona. En la pròtesi, aquest múscul se substitueix per un servomotor, i el tendó es reemplaça per un cable de niló. Aquests cables recorren l'interior de les dues o tres falanges per permetre la flexió i l'extensió.

En la mà robòtica es realitzaran moviments equivalents a les articulacions dels dits naturals:

- Articulació distal → unió de la falange mitjana i distal
- Articulació medial → unió de la falange mitjana i proximal
- Articulació proximal → unió de la falange proximal i el metacarp, és a dir, la unió del dit amb la mà (artells)

Els nervis són els encarregats de connectar amb el cervell per tal de permetre el moviment; una pròtesi robòtica, no rep senyals nervioses, sinó que opera mitjançant la programació per activar els servos, servomotors, dispositius que permeten controlar amb gran precisió la velocitat i la posició del seu eix.

Cada servo controlarà un dit o una articulació i l'angle del servo definirà quant baixa el dit sobre la tecla, aquestes direccions vindran donades per la placa Arduino prèviament programada, que en una mà humana serien els nervis.

Per altra banda, l'avantbraç també té un gran paper en la tècnica pianística, permet els moviments de pronació i supinació que són vitals en la interpretació de qualsevol obra. A més, fa de nexa a través del colze amb el braç.

Finalment amb programació amb Arduino, controlarem la posició de cada servo. El temps entre pulsacions definiran el ritme i la dinàmica es definirà amb l'angle i la velocitat de moviment.

Per aconseguir correspondència amb la tècnica pianística, la independència de dits és possible assignant un servo a cada dit, la velocitat es controla mitjançant la programació del mateix servomotor i la dinàmica se simula ajustant acceleració i angle d'atac a la tecla, on també participa la velocitat a la qual es flexiona els dits.

En el cas de la mà robòtica, la independència dels dits és millor ja que en la mà humana tenim una cinta tendinosa que uneix els dits cor, anular i petit, fent que quan es mou un indirectament es moguin la resta també, sent l'anular el més perjudicat a causa de la cinta present unint-lo amb el cor i el menovell.

Tocar el piano requereix habilitats que la mà humana assoleix gràcies a la musculatura fina i a la sensibilitat tàtil. La digitació precisa i la independència de dits són factors importants, per aconseguir una interpretació òptima.

Digitar consisteix a seleccionar l'ordre successiu o simultani dels dits que han d'executar l'obra musical, xifrant-los a sobre o a sota de les notes corresponents. El conjunt de xifres resultant constitueix el que denominen digitació. Al piano s'assignen els números de l'1 al 5 als dits de les dues mans, del polze al dit petit, respectivament (Nieto, 2011).

La digitació pianística ens permet trobar les millors combinacions i seqüències dels dits a fer servir quan s'ha de tocar. Presenta dues dificultats: la purament física, que inclou l'anatomia i fisiologia de la mà, la topografia del teclat i l'angle del cos i la pròpia escriptura pianística (Nieto, 2011).

En la mà robòtica aquestes dificultats s'accentuen perquè aquesta no consta de tots els moviments necessaris que té una mà humana i a més, certes composicions que requereixen de desplaçaments o creuaments dels dits impedeixen que la mà les pugui interpretar correctament.

En la taula següent es facilita la comparació entre la mà humana, la pròtesi robòtica i els requeriments del piano en diferents àmbits.

	Mà humana	Pròtesi robòtica	Requisits pel piano
Mobilitat	Moviments complexos: flexió, extensió, abducció, adducció.	Moviments limitats dependents del servo (només flexió-extensió).	Flexió ràpida i precisa de cada dit; retorn a posició inicial.
	Elevat control.	Control segons la programació.	Independència de dits i velocitat.
Sensibilitat	Alta sensibilitat tàctil amb mecanoreceptors.	Generalment nul·la, excepte en les darreres tecnologies	Detectar força necessària per a dinàmiques: piano, forte.
	Retroalimentació (retorn de la informació captada al cervell) immediata.	Retroalimentació basada en sensors electrònics.	Control fi de la velocitat de pulsació.
Força i Control Dinàmic	Ajust precís de força gracies a músculs intrínsecs.	Força específica del model del servo.	Cop suau o fort segons la intenció musical.
	Capacitat per executar matisos complexos	Limitada precisió per la mecànica i la programació.	Diferents graus d' intensitat segons el moment i la obra.

6 Creació d'un prototip de pròtesi de mà per a tocar el piano

6.1 Materials i Costos

Materials	Unitats	Preu unitari	Preu Total
Filament PLA negre, vermell i blanc	1	21,50 €	21,50 €
Cables tipus Dupont (mascle i femella)	4	1,50 €	6,00 €
4 cordes de guitarra (mi i sol)	4	1,00 €	4,00 €
Placa protoboard Ariston	1	8,60 €	8,60 €
Placa Arduino ESP32 T-Display (amb wifi)	1	22,00 €	22,00 €
5 servos mg90 (9kg de força)	5	3,70 €	18,50 €
Font d'alimentació regulable de 0 a 30 volts	1	46,50 €	46,50 €
Connectors banana 4mm	6	0,33 €	1,98 €
Connector cable USB	1	3,21 €	3,21 €
Silicona calenta	1	5,00 €	5,00 €
Super glue i accelerant	1	7,80 €	7,80 €
5 servos mg90 (15kg de força)	5	4,40 €	22,00 €
Total Materials			167,09€

6.2 Impressió de les peces en 3D

Després d'haver decidit quin seria el producte final vam començar la recerca d'alguna pàgina web que mostrés instruccions per a construir una mà robòtica que pogués arribar a assolir l'objectiu del treball. Vam trobar unes instruccions a la web d'*Instructables*, on hi havia projectes dedicats a *do it yourself* (fes-ho tu mateix), i arxius descarregables de les peces de la mà per fer-los servir directament a la impressora 3D. També hi havia un llistat del material i les explicacions per al muntatge (TechMarian, s.d.)

Un cop llegida i entesa, vam descarregar els arxius i els vam carregar al programa Orca Slicer, que lamina la peça (cada làmina és una capa) per a poder-la imprimir (arxiu gcode). Un cop vam tenir això ho vam carregar a un USB per poder posar-lo a la impressora i començar la impressió.

L'ordre d'impressió es va fer de les peces més grans perquè eren les de més durada, a les més petites:

1. Avantbraç (10 hores 1 minut)
2. Canell (6 hores 39 minuts)
3. Palmell (6 hores 2 minuts)
4. Part de darrera de l'avantbraç (5 hores 40 minuts)
5. Falanges de tots els dits (4 hores 50 minuts) – canvi de color
6. Suport dels servos (3 hores 43 minuts) – canvi de color

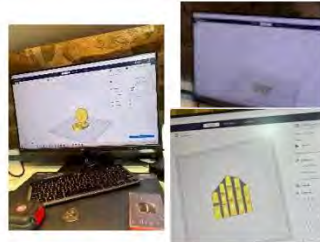
7. Suport de la placa protoboard i l'arduino (1 hora 55 minuts)
8. Guies pels cables als servos (1 hora 11 minuts)
9. Intermedi Palmell (1 hora 2 minuts)

Una vegada teníem impreses les peces vam decidir que volíem una mà dreta ja que aquesta és la que generalment toca la melodia al piano. Per tant, vam haver d'invertir el palmell i l'articulació del polze, les vam reimprimir.

Juny 2025
Impressió de peces



1 - Transformació dels arxius amb el programa Unimaker Cura, programa que lamina les peces per poder imprimir-les.



2- Traspasem els arxius des de l'ordinador a una targeta SD (magatzem de dades segur) per poder-la introduir a la impressora.



3- Posem en marxa la impressora 3D, posem la capa la base, coneguda com lilit, per tal que s'adhereixin les peces.



5 – Ens trobem amb problemes de calibració, que resollem reajustant la inclinació del lilit.



4- Realitzem les primeres proves d'impressió, provem amb les peces més senzilles per confirmar el calibratge de la impressora.



6 – Comencem la impressió de les peces, primer les guies per on passaran els cables que connectats als servomotors permetran els moviments.



7- Seguim amb les peces de més a menys grandària, que donaran la forma a l'avantbraç, el canell, el palmell, també la peça que subjectarà la placa protoboard (placa de connexió dels cables).



8- Ara toca el suport dels servos que col·locarem dins la peça de l'avantbraç prèviament impresa.



9- Finalment acabem amb la impressió dels dits, que decidim canviar de color per fer-los més visibles.

Fig. 23. Procés d'impressió en 3D. Elaboració pròpia.

6.3 Programació en Arduino

Tal i com ens va recomanar l'expert en programació, el cervell que processarà els arxius de dades i generarà el moviment dels dits serà un microcontrolador ESP32 (és un mini ordinador programable, de la mida del palmell de la mà), el qual inclou un microprocessador Xtensa dual-core LX6. Aquesta placa disposa de memòria RAM i Flaix (no volàtil), ports digitals i analògics, comunicació sense fil Wifi i Bluetooth, i una pantalla petita IPS LCD que ens ajuda a comprovar el que s'està executant.

Aquesta placa es pot programar amb diferents entorns i llenguatges, com Micropython, C, C++. Encara que existeixen entorns d'implementació més professionals, com a *Visual Studio Code* de Microsoft amb l'extensió PlatformIO, per simplicitat en el nostre cas farem servir el IDE o entorn d'Arduino.

Utilitzarem llibreries ja disponibles per a la gestió de la comunicació Wifi, els servos i la gestió de la pantalla. Però implementarem per complet la pàgina web que la placa ESP32 publicarà des del seu *Servidor WEB*.

En iniciar la placa ESP32, la lògica carregarà des de la memòria flaix alguns arxius de text pla amb valors necessaris per al funcionament de la lògica. En l'arxiu "posicionis.txt" s'emmagatzemen les últimes posicions dels servos (dits), l'arxiu "ports.txt" conté els ports digitals assignats a cada servo (dit), això és especialment útil, ja que cada distribució de placa ESP32 té una assignació de ports digitals distinta.

Un servomotor és un motor de corrent continu amb uns engranatges i tres línies (cables): alimentació positiu, alimentació negatiu i control que permet girar en el sentit de les agulles del rellotge, i en el sentit contrari de les agulles del rellotge, tants graus com es necessiti per generar moviment, cal connectar-lo a les sortides digitals de la placa ESP32.

Després d'iniciar la placa i llegir els arxius de la memòria flaix, la llibreria Wifi activarà el mode "punt d'accés" publicant un SSID sense seguretat (sense clau d'accés).

Fent servir un ordinador, un telèfon intel·ligent o tauleta, podem connectar-nos a aquest punt Wifi, des del navegador Web del dispositiu usat, escrivim la IP 10.10.1.1 perquè el servidor Web de l'ESP32 ens mostri la pàgina Web prèviament programada en l'arxiu "index.HTML" emmagatzemat en la memòria flaix de la placa.

La pàgina web ha estat implementada amb codi HTML, encara que inclou una mica de codi Javascript i CSS (Cascading Style Sheets) per als estils de la presentació.

Mitjançant la interfície que ens presenta la pàgina web, bàsicament podem:

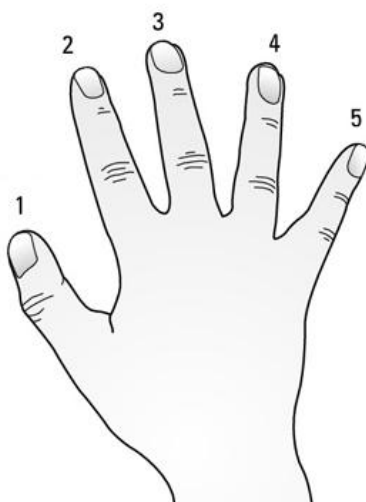
1. Configurar ajustos. (Els ajustos bàsicament són l'assignació dels ports digitals GPIO als servos)
2. Provar la connectivitat amb els servos (dits), podem usar els lliscadors de “test” i comprovar que els servos responen.
3. Carregar arxius de comandos. Els moviments de la mà estan codificats en arxius de text pla .CMD, Mitjançant la interface web, podem seleccionar arxius, pujar-los a la memòria flaix de la placa i executar-los.

El nostre codi [Veure Annexos] consisteix crear uns controls que ens permeten pujar arxius d'instruccions (equivalents a partitures musicals) a la memòria no volàtil (que no s'esborra) del dispositiu (la placa). Amb aquests arxius podrem executar instruccions per crear seqüències de moviment dels dits, impulsats pels servomotors. La segona cosa que necessitem a més del codi, és una carpeta on pujarem els arxius de dades “musicals”.

El projecte consta d'un fitxer principal, l'arxiu “mà.ino”, que conté el codi principal de tot el projecte i una carpeta de dades que conté els fitxers auxiliars (CSS, TXT, HTML). Aquests fitxers auxiliars inclouen la pàgina web, l'estil de la pàgina web, el fitxer dels graus de cada dit (de l'últim moviment) i el número del port digital assignat a cada dit.

En la lògica de la programació, els servos es nomenen de servo un a servo cinc, representant cadascun dels cinc dits.

[servo, graus, velocitat]



Servo: (servo 1: dit polze, servo 2: dit índex, servo 3: dit cor, servo 4: dit anular, servo 5: dit petit).

Graus: (angle del dit: 0 posició mà en repòs, 60 la inclinació per tocar la tecla).

Velocitat: canvi de la posició del servo, en un temps determinat, pot prendre valors entre 1 i 10.

Fig. 24. Numeració dels dits.

Juliol 2025
Programació en Arduino



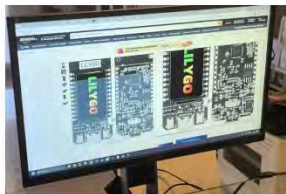
1- Per donar moviment a la mà, fem servir una placa ESP32 T-Display (mini ordinador) i cinc servomotors.



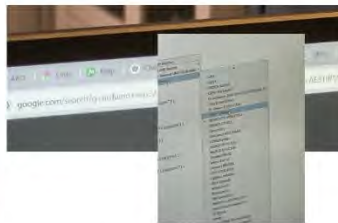
2- Vista de la placa ESP32 T-Display.



3- Vista d'un servomotor.



4- Connectem la placa a l'ordinador.



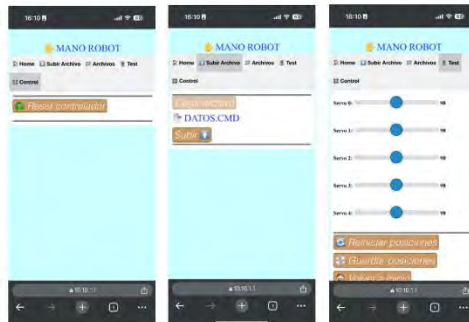
5- Busquem a Google les Llibries d'Arduino necessàries.

```
// RECURSOS
// ***** IDE Arduino 1.8.18 *****
// https://downloads.arduino.cc/arduino-1.8.18-windows.exe
// ***** icons para código HTML *****
// Font Awesome -> <i class=
// https://fontawesome.com/
// Material Icons -> <span class=
// https://fonts.google.com/icons
// SVGs o imágenes .png
// https://emojipedia.org
// https://getemoji.com
// https://unicode.org/emoji/charts/full-emoji-list.html
// *****
```

6- Escrivim el Codi Arduino.



7- Connectem els servos a la placa per comprovar que funcionen, després els desconnectem per muntar-los a la mà.



8- Modificant la pàgina web de la placa, creem una aplicació per testar el funcionament de la mà. Necessitem connexió wifi.

Fig. 25. Placa, servos i programació en Arduino. Elaboració pròpia.

6.4 Muntatge de la mà

El següent pas que vam realitzar va ser iniciar el muntatge. En primer lloc, vam col·locar el suport dels servos dins l'avantbraç i vam fixar-lo amb cargols. Després a l'hora de posar els servos, no hi havia angle per cargolar-los. Això ens va portar a desmuntar-ho i començar de nou sense seguir els passos de la web que no ens va semblar gaire correcte. De nou, en primer lloc, vam cargolar les guies dels cables als servos i vam col·locar aquests al suport.

Seguidament, vam unir les falanges amb la corda de guitarra, donat que les falanges tenien 3 forats, un per a passar una corda i connectar-la als servos i els altres dos per passar-ne una altra i unir les falanges entre elles i amb el palmell. Per fixar els dos extrems de la corda de cada dit (falanges ja unides) al palmell vam fer servir cargols.

Després d'això, vam passar la corda de guitarra més fina pel forat que va quedar lliure a les falanges de cada dit, i pels forats específics del palmell fins a l'avantbraç, la zona dels servos. A l'extrem vam fer un nus perquè no s'escapés la corda. El següent pas que vam realitzar va ser la fixació del suport, amb els servos i les guies ja col·locats, a l'avantbraç.

Ara ens tocava posar les cordes al seu suport corresponent de cada servo, fent un nus a l'extrem a més d'enganxar-les amb cianoacrilat (super glue).

A continuació vam passar els cables dels servos darrere i vam unir les peces que representen el colze a l'avantbraç.

Vam adaptar la peça final per a poder col·locar un trípode, a sobre d'aquestes peces vam subjectar la placa *proto-board* mitjançant un cargol. Sobre la placa *proto-board* vam enganxar la capsa transparent amb l'Arduino a dins i vam fer-li un forat per poder connectar un cable tipus USB-c per l'alimentació, a més a més, vam connectar els cables dels servos a la placa *proto-board* distingint positius de negatius i els de control de cada servo a l'Arduino. També dues masses de l'Arduino a pol negatiu en la *proto-board*.

Vam connectar un cable del pol positiu i un altre del negatiu a la font d'alimentació a més de l'USB de l'Arduino que també vam endollar a la font d'alimentació.

Una vegada vam tenir tot muntat, ens vam adonar que el mecanisme de les falanges era massa feble i no podia fer el retorn a la posició inicial. Vam decidir imprimir unes làmines fines per fer de tensor i col·laborar en el moment de retornar els vam enganxar al llarg del dit (totes les falanges) fins a l'inici del palmell.

Per tal de tenir un funcionament més clar, vam ordenar els cables i els vam enganxar amb silicona tèrmica per evitar trencaments, tant els de la placa *proto-board* com els dels servos.

Tot i així no aconseguíem la força suficient perquè sonessin tots els dits i vam decidir canviar el servos a uns més potents, i afegir una peça de pes al dit polze.

Problemes de disseny i muntatge:

- llargada dels dits allunyada de la realitat sobretot el polze.
- els forats per on passen els cables que van als servos posen una resistència excessiva a la fricció dels cables fins al punt de canviar un servo
- poca precisió dels dits

Juliol 2025
Iniciem el muntatge



1- Amb totes les peces impreses, iniciem el muntatge.



2- Encaixem i caragolem les peces.



3- Col·loquem el primer servo el dit polze, i seguim amb els servos de la resta de dits.

Agost 2025
Seguim amb el muntatge



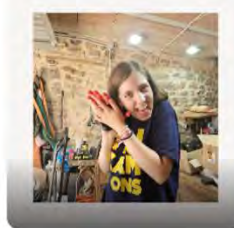
4- Llimem peces i traiem suports de suport, per procedir al muntatge.



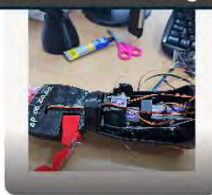
5- Posem el cable d'unió de les peces falanges dels dits amb el palmell de la mà. Hem utilitzat cordes de guitarra "Mi" de metall, perquè són dures i mal·leables, ja que el filferro no retorna al lloc.



6- Habemus mà.



Setembre 2025
Seguim amb el muntatge



7- Continuem amb el muntatge, col·locant els fils des dels servos als dits que permetran el moviment, i els introduïm a la peça de l'avantbraç.



8- Unim la mà a la peça de l'avantbraç, i comprovem manualment que els dits es mouen.

Fig. 26. Muntatge de la mà. Elaboració pròpia.

6.5 Fase de proves i reajustaments

Un cop vàrem crear el codi amb la cançó a reproduir, vàrem començar les primeres proves, i vàrem trobar les primeres modificacions a fer. Específicament els dits cor i anular tocaven, tot i això, el polze i el dit petit eren massa curts i no arribaven a les tecles pel que vam haver d'imprimir de nou algunes làmines més per afegir-les als dits i allargar-los.

En el cas de l'índex, el problema que vam detectar va ser més greu, degut al disseny del palmell, específicament en el pas dels cables al servo no tenia prou força per pressionar la tecla perquè els forats pincen el cable impedint la correcta fricció. Vam prendre la decisió de comprar un servo amb més força i canviar-lo, desmuntant part de la feina ja feta i tornant-la a fer per garantir el funcionament.

Octubre 2025 Primeres Proves	1- Incorporem la placa a la mà i fem les primeres proves 2- La mà es mou i el piano sona, però amb matisos.
Octubre - Novembre 2025 Reajustaments	3- Detectem problemes de disseny i muntatge: - Llargada dels dits allunyada de la realitat sobretot el polze. - Els forats per on passen els cables que van als servos posen una resistència excessiva a la fricció dels cables fins al punt de canviar un servo. - Les falanges era massa feble i poc precises, no podien fer el retorn a la posició inicial. 4- Solucions: (1) Vam decidir imprimir unes làmines fines per fer de tensor i col·laborar en el moment de retornar els vam enganxar al llarg del dit (totes les falanges) fins a l'inici del palmell. (2) Vam ordenar els cables i els vam enganxar amb silicona tèrmica per evitar trencaments, tant els de la placa protoboard com els dels servos. (3) Canviem tots els servos per una versió més potent, i afegim un pes al dit polze per millorar la precisió.

Fig. 27. Fase de proves i reajustaments. Elaboració pròpia.

6.6 Exercicis musicals adaptats a la pròtesi



Validat el funcionament del nostre prototip, preparem uns petits exercicis musicals, de menys a més complexitat, per validar la coordinació entre els servos dels dits i les notes musicals, i poder crear finalment la partitura en Arduino a tocar.

Fig. 28. Mà Robòtica fent exercicis Musicals. Elaboració Pròpia.

Exercici 1: escala ascendent (Do–Re–Mi–Fa–Sol) Pulsació simple: baixar dit – “so” - pujar dit [servo, graus, velocitat] [1,60,5] //baixar dit polze [1,0,5] //pujar dit polze [2,60,5] //baixar dit índex [2,0,5] //pujar dit índex [3,60,5] //baixar dit cor [3,0,5] //pujar dit cor [4,60,5] //baixar dit anular [4,0,5] //pujar dit anular [5,60,5] //baixar dit petit [5,0,5] //pujar dit petit	Exercici 2: acord Do Major (Do–Mi–Sol) Moviment simultani dels 3 dits [servo, graus, velocitat] [1,60,5] //baixar dit polze [1,0,5] //pujar dit polze [3,60,5] //baixar dit cor [3,0,5] //pujar dit cor [4,60,5] //baixar dit petit [4,0,5] //pujar dit petit
Exercici 3: terceres (Do–Mi–Re–Fa–Mi–Sol) Pulsació simple: baixar dit – “so” - pujar dit [servo, graus, velocitat] [1,60,5] //baixar dit polze [1,0,5] //pujar dit polze [3,60,5] //baixar dit cor [3,0,5] //pujar dit cor [2,60,5] //baixar dit índex [2,0,5] //pujar dit índex [4,60,5] //baixar dit anular [4,0,5] //pujar dit anular [3,60,5] //baixar dit cor [3,0,5] //pujar dit cor [5,60,5] //baixar dit petit [5,0,5] //pujar dit petit	Exercici 4: contrast dinàmic (piano–forte) En la nostra prototipus implica canvi de graus per a què la mateixa velocitat puguem aconseguir més força Canviem el paràmetre referit als graus, de 60° a 100°, mantenint la mateixa posició inicial de la mà.

Finalment, descartem exercicis tipus escales completes (Do–Re–Mi–Fa–Sol–La–Si–Do) i Escales amb alteracions (Ex. Re–Mi–Fa#–Sol–La–Si–Do#–Re) doncs impliquen moviment de l'espatlla i moviment del canell respectivament, i el nostre prototipus no pot assolir aquestes funcionalitats. Descartem també exercicis Do Maj 7 (Do–Mi–Sol–Si) doncs implica l'obertura de la mà , i el nostre palmell és fixe.

6.7 Resultats

Programació de “l’Himne a l’alegria”, de Ludwig van Beethoven, de la seva novena simfonia. Combina moviments de pulsació simple.

[3,60,5]
[3,0,5]
[3,60,5]
[3,0,5]
[4,60,5]
[4,0,5]
[5,60,5]
[5,0,5]
[5,60,5]
[5,0,5]
[4,60,5]
[4,0,5]
[3,60,5]
[3,0,5]
[2,60,5]
[2,0,5]
[1,60,5]
[1,0,5]
[1,60,5]
[1,0,5]
[2,60,5]
[2,0,5]
[3,60,5]
[3,0,5]
[3,60,5]
[3,0,5]
[2,60,2]
[2,0,2]
[2,60,10]



Fig. 29. Mà preparada al piano. Elaboració pròpia



Fig. 30. Partitura de l’Himne a l’Alegria per a piano.

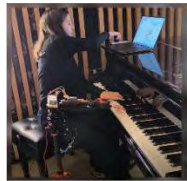
Desembre 2025
Muntem, Ajustem, Assaig i ...
La première



1- Ens traslladem a l'Escola Municipal de Música Can Fargues, i col·loquem la mà en posició per tocar





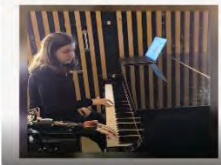


2- Hem de fer alguns reajustaments al codi, en quant a la força dels dits, perquè el piano de cua és més dur que el teclat electrònic amb el que hem fet la programació.









3- Fem alguns exercicis de comprovació, i assagem a veure com queda

4- Et Voilà ... (Llegir QR per veure la gravació)





Fig. 31. Resultat i accés a QR de la demostració. Elaboració pròpia.

Conclusions

La hipòtesi inicial del treball plantejava que era possible dissenyar una mà robòtica capaç de substituir una mà humana a l'hora de tocar el piano. Tot el procés de recerca ha permès confirmar que aquesta hipòtesi és viable, dins de certes condicions com la senzillesa de l'obra a interpretar. També he pogut observar que existeix una distància significativa entre els moviments que pot realitzar el meu prototip de pròtesi i les capacitats fines de la mà humana, especialment pel que fa al tacte i a la sensibilitat i també a la continuïtat de moviments. Això confirma que és possible la imitació funcional, però està encara lluny de substituir completament en tots els aspectes a una mà humana.

Així mateix, he aconseguit assolir l'objectiu plantejat inicialment, construir un prototip de mà amb l'avantbraç robòtic i funcional per a tocar el piano, fent servir una impressora 3D. Després de moltes proves, errors i canvis, he fet el muntatge, el sistema electrònic i amb l'ajuda indicada també la programació, per finalment poder tocar el piano amb el prototip, definint moviments bàsics, i coordinats aconseguint una melodia.

Al llarg del projecte he assolit diversos aprenentatges en àmbits molt diferents. Un dels més importants ha estat la possibilitat de materialitzar una idea. Poder transformar un concepte inicial, abstracte i ambiciós, en un procés real amb fases, materials i decisions concretes que desemboquin en un producte funcional.

Durant la recerca he consultat llibres, pàgines web i contactes amb experts que han aportat una informació pràctica impossible d'adquirir només a través de fonts escrites, sobretot en la programació. També ha estat clau l'organització i la planificació prèvia, per poder arribar a tots els detalls d'un projecte tan extens.

A més, el projecte m'ha permès integrar aprenentatges de diferents assignatures i disciplines, una de les meves intencions des de l'inici del treball. Això ha demostrat que la tecnologia, la música i la medicina es poden complementar perfectament.

Un cop finalitzat el treball, si hagués de tornar a començar, probablement faria canvis en el disseny i muntatge del prototip i també dedicaria més temps a la fase inicial de recerca per decidir què incloure en el treball abans d'avançar, per així evitar redaccions i estructures caòtiques, i haver de realitzar grans canvis amb el treball ja redactat. D'aquesta manera, canviaria el disseny del prototip en alguns aspectes, per exemple, la grandària dels dits més proper a la realitat, buscar la manera d'insonoritzar els servos, la connexió entre les peces que representen les falanges per evitar torsions, etc.

Pel que fa a idees de futur, el projecte obre moltes portes: el desenvolupament de pròtesis amb tacte i sensibilitat, la creació de sistemes capaços de fer un seguiment de l'evolució de la destresa i les sensacions d'un pacient, la idea d'ortopedistes especialitzats en música, la necessitat de

desaprendre a tocar per aprendre a tocar d'una altra manera, o la importància de disposar d'un cens d'amputats i, les seves tipologies per poder especificar les solucions que reben i adaptar millor les pròtesis a les necessitats de cadascú. També apareix com a línia de futur la incorporació de moviment de canell, essencial per ampliar l'expressivitat i funcionalitat musical.

En conjunt, aquest projecte no només ha validat una hipòtesi, sinó que ha obert camins nous que conviden a continuar investigant, creant i imaginant. Tot plegat ha anat acompanyat d'optimisme però també una certa por al fracàs, que ha estat clau per superar els obstacles i mantenir l'esforç en tot moment per assolir els objectius.



post-credit scene

Bibliografia i webgrafia

ALZOLA, Matías. *El pianista manco* [en línia]. Buenos Aires: matiasalzola.com, 17 d'agost 2020. [Consulta: 4 d'agost de 2025]. Disponible a: <https://www.matiasalzola.com/pianistamanco/>.

ANDADE. *Associació Nacional d'Amputats d'Espanya* [en línia]. [Consulta: 16 de setembre de 2025]. Disponible a: <https://www.andade.es/>.

Autor desconegut. *Artículos Rápidos sobre servoaccionamientos: aprende todo sobre los servo-accionamientos* [en línia]. Lloc desconegut: A-M-C, s. d. [Consulta: 14 de juliol de 2025]. Disponible a: <https://www.a-m-c.com/es/aprende-todo-sobre-los-servo-accionamientos/>.

Autor desconegut. *Basics of Servo Motor Technology* [en línia]. Lloc desconegut: Monolithic Power Systems, s. d. [Consulta: 14 de juliol de 2025]. Disponible a: <https://www.monolithicpower.com/en/learning/mpscholar/electric-motors/servo-motors/basics-of-servo-motor-technology>.

Autor desconegut. *Beyond bionics: how the future of prosthetics is redefining humanity* [vídeo]. [En línia]. [Consulta: 8 de juny de 2025]. Disponible a: <https://www.youtube.com/watch?v=GgTwa3CPriE>.

Autor desconegut. *Conozca al joven de 24 años cuyas prótesis están cambiando vidas* [vídeo]. [En línia]. [Consulta: 16 de setembre de 2025]. Disponible a: <https://www.youtube.com/watch?v=E0dbagxeMT0>.

Autor desconegut. *Cómo las prótesis de mano impresas en 3D están cambiando la vida de estos niños* [vídeo]. [En línia]. [Consulta: 23 de setembre de 2025]. Disponible a: <https://www.youtube.com/watch?v=Cl8ijPGEKO8>.

Autor desconegut. *History of prosthesis explained* [vídeo]. 6 minuts. [Consulta: 6 d'agost de 2025]. Disponible a: <https://www.youtube.com/watch?v=0CpiQdgV81g>.

Autor desconegut. *Manos biónicas impresas en 3D están cambiando la vida de los niños | Freethink Superhuman* [vídeo]. [En línia]. Freethink. [Consulta: 15 de juny de 2025]. Disponible a: <https://www.youtube.com/watch?v=FY5TOevYAh8>.

Autor desconegut. *Prótesis mecánicas de brazo: estructura interna y tipos* [en línia]. València: Mecánicos Valencia. [Consulta: 15 de juny de 2025]. Disponible a: <https://mecanicosvalencia.es/protesis-mecanicas-de-brazo/>.

Autor desconegut. *Servomotores en Arduino. Guía Básica* [vídeo]. [En línia]. YouTube. [Consulta: 9 de juliol de 2025]. Disponible a: https://www.youtube.com/watch?v=kE_ou58E7Hw.

Autor desconegut. *SERVOMOTORES: concepto, estructura y aplicaciones...* [vídeo]. YouTube. Durada: 9:01 min. [Consulta: 14 de juliol de 2025]. Disponible a: <https://www.youtube.com/watch?v=jiUeJ3SGZLE>.

Autor desconegut. *The Robot-Arm Prosthetic Controlled by Thought* [vídeo]. [En línia]. 5 minuts. [Consulta: 16 de setembre de 2025]. Disponible a: https://www.youtube.com/watch?v=sk1NkWI_W2Y.

Autor desconegut. *These prosthetic arms are 3D printed for a perfect match* [vídeo]. 7 minuts. [Consulta: 9 de setembre de 2025]. Disponible a: <https://www.youtube.com/watch?v=zTBH8jBwJFM>.

BORTHAKUR, P. P. “The role and future directions of 3D printing in custom prosthetic design” [en línia]. *Engineering Proceedings*, 81(1), 2024. [Consulta: 13 de novembre de 2025]. Disponible a: <https://www.mdpi.com/2673-4591/81/1/10>.

CERMI – COMITÈ ESPANYOL DE REPRESENTANTS DE PERSONES AMB DISCAPACITAT. [En línia]. [Consulta: 16 de setembre 2025]. Disponible a: <https://www.cermi.es>.

CIGNA. “Nervis del braç” [en línia]. [Consulta: 9 de juny de 2025]. Disponible a: <https://www.cigna.com/es-us/knowledge-center/hw/nervios-del-brazo-ax1000>.

Clínica Universitat de Navarra. (s.d.). *Amputació: què és i definició mèdica*. [en línia]. [Consulta: 16 de setembre de 2025]. Disponible a: <https://www.cun.es/diccionario-medico/terminos/amputacion> <https://www.cun.es>

CORDELLA, F., CIANCIO, A. L., SACCHETTI, R., DAVALLI, A., CUTTI, A. G., GUGLIELMELLI, E., & ZOLLO, L. (2016). *Literature review on needs of upper limb prosthesis users*. *Frontiers in Neuroscience*, 10, Article 209. [Consultat: 7 d'octubre 2025]. Disponible a: <https://www.frontiersin.org/journals/neuroscience/articles/10.3389/fnins.2016.00209/full>

DILETTO, J. *Cómo se fabrican las prótesis* [en línia]. Madrid: protesifacial.com, 2 de juny 2025. [Consulta: 23 de juny de 2025]. Disponible a: <https://www.protesifacial.com/como-se-fabrican-las-protesis/>.

DRAKE, Richard L.; VOGL, Wayne; MITCHELL, Adam W. M. *Anatomía para estudiantes*. Madrid: Elsevier, 2007. ISBN 978-84-8174-832-1.

E-NABLE. *E-Nable360* [en línia]. França: E-Nable. [Consulta: 28 de setembre de 2025]. Disponible a: <https://e-nable360.fr/es/>.

EL MUNDO. *El pianista manco* [blog]. Madrid: El Mundo, 15 de maig 2010. [Consulta: 4 d'agost de 2025]. Disponible a: <https://www.elmundo.es/blogs/elmundo/blogdepecho/2010/05/15/el-pianista-manco.html>.

ELDIARIO DE SALUD. “Dissenys de pròtesi ortopèdiques per cames i mans mecàniques...” [en línia]. [Consulta: 8 juny 2025]. Disponible a: <https://eldiariodesalud.com/catedra/ambroise-pare-y-las-heridas-por-arma-de-fuego>.

FEEL RECOVERY. “*Tendons de la mà*” [en línia]. [Consulta: 10 de juny de 2025]. Disponible a: <https://feelrecovery.com/es/partes-del-cuerpo/manos-munecas/>

GEORGIA INSTITUTE OF TECHNOLOGY. *Center for Music Technology* [en línia]. Atlanta: Georgia Tech. [Consulta: 16 de setembre de 2025]. Disponible a: <https://gtcmt.gatech.edu/>.

GRAN ENCICLOPÈDIA CATALANA. “Dit” [en línia]. [Consulta: 23 setembre 2025]. Disponible a: <https://www.enciclopedia.cat/gran-enciclopedia-catalana/dit-1>.

HATAKEYAMA, Kaito; KANEBAKO, Junichi; MINAMIZAWA, Kouta. *MusiArm project* [en línia]. Tòquio: Embodied Media Project, 10 setembre 2025. [Consulta: 18 setembre 2025]. Disponible a: <https://www.embodiedmedia.org/projects/musiarm>.

ICATME. *Canell – Unitat de mà, colze i microcirurgia* [en línia]. Barcelona: ICATME, 9 setembre 2025. [Consulta: 16 de juliol de 2025]. Disponible a: <https://icatme.com/unidades-medicas/unitat-de-ma-colze-i-microcirurgia/canell-especialidad/>.

Institut d'Estudis Catalans. *Amputar*. En *Diccionari de la llengua catalana* (DIEC2). [en línia]. [Consulta: 23 de setembre de 2025]. Disponible a: <https://dlc.iec.cat>

INE. *Enquesta de Discapacitat, Autonomia personal i Situacions de Dependència (EDAT) 2020 – Principals resultats* [en línia]. [Consulta: 16 de setembre de 2025]. Disponible a: https://www.ine.es/prensa/edad_2020_p.pdf.

Institut Nacional d'Estadística. (2020, 8 juny). *Xifres de Població a 1 de gener de 2020 y EM-2019* [en línia]. [Consulta: 16 de setembre de 2025]. Disponible a: https://www.ine.es/prensa/cp_e2020_p.pdf

INSTITUT DE LA MÀ. *Canell – Especialitats Institut de la Mà* [en línia]. Barcelona: Institut de la Mà. [Consulta: 10 de juny de 2025]. Disponible a: <https://institutdelama.com/muneca-especialidades-institut-de-la-ma/>.

INSTITUT GUTTMANN. *Clínica de Pròtesis Avançades i Neurorrehabilitació* [en línia]. Barcelona: Institut Guttmann, 2024. [Consulta: 19 de setembre 2025]. Disponible a: <https://barcelona.guttmann.com>.

INSTRUCTABLES. *3D-Printed Robotic Hand* [en línia]. [Consulta: 11 de juny de 2025]. Disponible a: <https://www.instructables.com/3D-Printed-Robotic-Hand/>.

INSIDER ESPAÑOL. *Estos brazos robóticos fueron diseñados para músicos amputados* [vídeo]. [En línia]. [Consulta: 11 d'agost de 2025]. Disponible a: <https://www.youtube.com/watch?v=Ib1jVC-uS4>

KENHUB. *“Biomecánica de la mano, dedos y muñeca”* [en línia]. [Consulta: 10 de juny de 2025]. Disponible a: <https://www.kenhub.com/es/library/anatomia-es/mano-y-muneca>.

LAMBERT, Chris. *3D printed prosthetics: What they are and how they work* [en línia]. UPTIVE Advanced Manufacturing. [Actualitzat: desembre 2024]. [Consulta: 13 novembre 2025]. Disponible a: <https://uptivemfg.com/3d-printed-prosthetics/>.

LIGAMENTS (Premium Health Sport). *“Lligaments de la mà”* [en línia]. [Consulta: 14 de juny de 2025]. Disponible a: <https://premiumhealthsport.com/blog/problemas-en-manos-y-muneca-en-musicos-sindrome-del-tunel-carpiano/>

McDONALD, C. L.; WESTCOTT-McCOY, S.; WEAVER, M. R.; HAAGSMA, J.; KARTIN, D. “Global prevalence...” *Prosthetics and Orthotics International*, 45(2), 2021, p. 105–114.

McFARLAND, Alex. *Elon Musk, Neuralink and brain-machine interfaces* [en línia]. [Consulta: 28 d'octubre de 2025]. Disponible a: <https://www.unite.ai/>

MINISTERIO DE SANIDAD. *Borrador de actualización del catálogo de prótesis externas. Anexo CMBD 2017*. Madrid: Ministerio de Sanidad, 2017.

MUNIESA PORTOLÉS, J. M., CABRA MARTORELL, M., & SAMSÓ BARDÉS, F. (2011). *Reincorporación laboral en pacientes con amputación traumática de extremidad superior. Rehabilitación: Revista de la Sociedad Española de Rehabilitación y Medicina Física*, 45(2), 134–138. [en línia]. [Consulta: 23 de setembre de 2025]. Disponible a: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3649056>

MUSEU DEL CAIRE. “*Dit protètic egipci...*” [en línia]. [Consulta: 20 de juliol de 2025]. Disponible a: <https://historia.nationalgeographic.com.es>

NEVADO, E.; LÓPEZ, P.; SÁNCHEZ, N.; ÁLVAREZ, C. “*Consecuencias psicológicas...*” *Revista Española de Salud Pública*, 98 (2024), e202403012.

NIETO, Albert. *La digitació pianística*. Saragossa: Mira Editores, 2011. ISBN 978-84-8465-394-3.

OPEN BIONICS; DEUS EX; RAZER. *Augmented Future – Open Bionics × Deus Ex × Razer* [vídeo]. [Consulta: 28 d'octubre de 2025]. Disponible a: <https://www.youtube.com/watch?v=la3P-RHVWQ>.

ÖSSUR. *Pàgina oficial de Össur Espanya* [en línia]. Reykjavík: Össur. [Consulta: 28 d'octubre de 2025]. Disponible a: <https://www.ossur.com/es-es>.

PALOMO, G. (2023). *Manami Ito, violinista, enfermera y exatleta paralímpica de Japón*. Megavisión. [en línia]. [Consultat: 17 d'agost de 2025]. Disponible a: <https://megavision.com.sv/web/manami-ito-violinista-enfermera-y-exatleta-paralimpica-de-japon/>

PENFIELD & RASMUSSEN (1950). Imatge “The division of sensory and motor cortex” [en línia]. [Consulta: 4 d'agost de 2025]. Disponible a: <https://www.researchgate.net/>

PROTHOTIC. *3D printed prosthetics – Everything you need to know* [en línia]. 21 abril 2023. [Consulta: 6 de juny de 2025]. Disponible a: <https://prothotic.com>

PUERTA HUERTAS, R. de la. (2014). Neuroplasticidad asociada a miembro fantasma. *Revista de la Sociedad Española del Dolor*, 21(6), 345-350. . [en línia][Consultat: 4 d'agost de 2025]. Disponible a: <https://dx.doi.org/10.4321/S1134-80462014000600008>

Servei Català de la Salut. (s.d.). *Prestacions ortoprotètiques — CatSalut*. Consulta: 28 d'octubre de 2025]. Disponible a: <https://catsalut.gencat.cat/ca/serveis-sanitaris/prestacions-complementaries/prestacions-ortoprotetiques/>

Societat Espanyola de Rehabilitació i Medicina Física. 2021. *Propuesta de reordenación de servicios de rehabilitación y medicina física (Cap. 9.8: Amputaciones)*. SERMEF. [Consultat: 23 de novembre de 2025]. Disponible a: https://www.sermef.es/wp-content/uploads/2021/09/02_libro_reordenacion_toimp.pdf

SAUERBRUCH ARM. “*Reconstrucció artificial...*” [en línia]. [Consulta: 16 setembre 2025]. Disponible a: <https://ww1.habsburger.net/en/media/sauerbruch-arm>

SOMOVILLA, Fátima. *Inteligencia Artificial para el diseño de prótesis biomédicas* [en línia]. Logronyo: Universidad de La Rioja, 27 maig 2020. [Consulta: 8 de juny de 2025]. Disponible a: <https://www.unirioja.es>

THAUT, Michael. *Rhythm, Music, and the Brain*. Nova York: Routledge, 2005.

TIMETOAST. “Mà de Marcus Sergius” [en línia]. [Consulta: 16 setembre 2025]. Disponible a: <https://www.timetoast.com/timelines/historia-de-las-protesis>.

UNITIA – SECOT. “VALORACIÓN NEUROLÓGICA DE LA MANO” [en línia]. [Consulta: 9 de setembre de 2025]. Disponible a: https://unitia.secot.es/web/manual_residente/CAPITULO%20111.pdf.

UNIVERSITAT DE VALÈNCIA. “Articulacions del braç i l’avantbraç” [en línia]. [Consulta: 8 de juny de 2025]. Disponible a: https://www.uv.es/sanzuda/articulacions_del_bra_i_lavantbra.html.

ZABALBEASCOA, A. (2025, 30 d’octubre). *João Carlos Martins: “Ante una adversidad se puede saltar al abismo o intentar un vuelo más alto”*. *El País*. [en línia]. [Consultat: 27 de novembre 2025]. Disponible a: <https://elpais.com/eps/2025-10-30/joao-carlos-martins-ante-una-adversidad-se-puede-saltar-al-abismo-o-intentar-un-vuelo-mas-alto.html>

Webgrafia d’imatges

Portada: Elaboració pròpia.

Fig. 1: DRAKE, Richard L.; VOGL, Wayne; MITCHELL, Adam W. M. *Anatomía para estudiantes*. Madrid: Elsevier, 2007. ISBN 978-84-8174-832-1.

Fig. 2: UNIVERSITAT DE VALÈNCIA. “Articulacions del braç i l’avantbraç” [en línia]. [Consulta: 8 de juny de 2025]. Disponible a: https://www.uv.es/sanzuda/articulacions_del_bra_i_lavantbra.html.

Fig. 3: ZÚÑIGA TENESACA, D. A., & ANDRADE ZEAS, D. M. (2011). *Articulaciones de la mano* ResearchGate. . [en línia]. [Consulta: 27 de novembre 2025]. Disponible a: https://www.researchgate.net/figure/Articulaciones-de-la-mano-Fuente-http-wwwanatomiahumanaucvcl-efi-modulo4html_fig9_312263802

Fig. 4: INSTITUT DE LA MÀ. *Canell – Especialitats Institut de la Mà* [en línia]. Barcelona: Institut de la Mà. [Consulta: 10 de juny de 2025]. Disponible a: <https://institutdelama.com/muneca-especialidades-institut-de-la-ma/>.

Fig. 5: WikiSM. (7 de gener de 2025). *Intrinsic Muscles of the Hand* [en línia]. [Consulta: 17 de setembre de 2025]. Disponible a: https://wikism.org/Intrinsic_Muscles_of_the_Hand.

Fig. 6: FEEL RECOVERY. “Tendons de la mà” [en línia]. [Consulta: 10 juny 2025]. Disponible a: <https://feelrecovery.com/es/partes-del-cuerpo/manos-munecas/>

Fig. 7: LIGAMENTS (Premium Health Sport). “*Lligaments de la mà*” [en línia]. [Consulta: 14 de juny de 2025]. Disponible a: <https://premiumhealthsport.com/blog/problemas-en-manos-y-muneca-en-musicos-sindrome-del-tunel-carpiano/>.

Fig. 8: CIGNA. (2024). “*Nervios de la mano*”. ” [en línia]. [Consulta: 9 de juny de 2025]. Disponible a: <https://www.cigna.com/es-us/knowledge-center/hw/nervios-de-la-mano-tp13103>

Fig. 9: CIGNA. “*Nervis del braç*” [en línia]. [Consulta: 9 de juny de 2025]. Disponible a: <https://www.cigna.com/es-us/knowledge-center/hw/nervios-del-brazo-ax1000>.

Fig. 10: KAULITZKI, S. (s.d.). *Los vasos sanguíneos de la mano Dreamstime*. ” [en línia]. [Consulta: 16 d'octubre de 2025]. Disponible a: <https://es.dreamstime.com/stock-de-ilustraci%C3%B3n-los-vasos-sangu%C3%ADneos-de-la-mano-image56648127>

Fig. 11: Elaboració pròpia.

Fig.12: GEORGIA INSTITUTE OF TECHNOLOGY. *Center for Music Technology* [en línia]. Atlanta: Georgia Tech. [Consulta: 16 de setembre de 2025]. Disponible a: <https://gtcmt.gatech.edu/>.

Fig. 13: Autor desconegut. (s.d.). *Notícia sobre Manami Ito*. [En línia]. [Consulta: 16 de setembre de 2025]. Disponible a: <https://kentron.am/en/news/159677>

Fig. 14: Melómano Digital. (2025, 1 d'octubre). *João Carlos Martins recibe el Premio Fundación MAPFRE a Toda una Vida Profesional*. Melómano Digital. [en línia]. [Consultat: 16 d'octubre 2025]. Disponible a: <https://www.melomanodigital.com/joao-carlos-martins-recibe-el-premio-fundacion-mapfre-a-toda-una-vida-profesional/> *Melómano - La revista de música clàssica*

Fig. 15: GRAMFORT, A. (2009). “*Cortical homunculus by Wilder Graves Penfield*”. En *Mapping, timing and tracking cortical activations with MEG and EEG: Methods and application to human vision* (tesis). ResearchGate. [en línia]. [Consultat: 16 d'octubre de 2025]. Disponible a: https://www.researchgate.net/figure/Cortical-homunculus-by-Wilder-Graves-Penfield-174-It-represents-the-mapping-the_fig4_278634318

Fig. 16: MUSEU DEL CAIRE. “*Dit protètic egipci...*” [en línia]. [Consulta: 16 de setembre de 2025]. Disponible a: <https://historia.nationalgeographic.com.es>

Fig. 17: Science Museum Group. (s.d.). *Replica of the Capua Leg*. [en línia]. [Consulta: 16 de setembre 2025]. Disponible a: <https://collection.sciencemuseumgroup.org.uk/objects/co82279>

Fig. 18: TIMETOAST. “*Mà de Marcus Sergius*” [en línia]. [Consulta: 16 de setembre de 2025]. Disponible a: <https://www.timetoast.com/timelines/historia-de-las-protesis>.

Fig. 19: Time.Graphics. (s.d.). *Title of the event or description*. [en línia]. [Consultat: 8 de novembre de 2025]. Disponible a: <https://time.graphics/es/event/1646887>

Fig. 20: ELDIARIO DE SALUD. “*Dissenys de pròtesi ortopèdiques per cames i mans mecàniques...*” [en línia]. [Consulta: 8 de setembre de 2025]. Disponible a: <https://eldiariodesalud.com/catedra/ambroise-pare-y-las-heridas-por-arma-de-fuego>.

Fig. 21: SAUERBRUCH ARM. “*Reconstrucció artificial...*” [en línia]. [Consulta: 16 setembre 2025]. Disponible a: <https://ww1.habsburger.net/en/media/sauerbruch-arm>

Fig. 22: London Prosthetics Centre. (s.d.). *Luke Arm – Upper limb prosthetics – Bionics*. London Prosthetics. ...” [en línia]. [Consulta: 16 de setembre de 2025]. Disponible a: <https://www.london-prosthetics.com/prosthetic-solutions/upper-limb/bionics/luke-arm/>

Fig. 23: Elaboració pròpia.

Fig. 24: ArtsMúsica. 2023. 2. *La digitación en el piano*. ArtsMúsica. ” [en línia]. [Consulta: 3 de setembre 2025]. Disponible a: <https://www.artsmusica.net/curso-completo-de-piano/2-la-digitacion-en-el-piano/>

Fig. 25: Elaboració pròpia.

Fig. 26: Elaboració pròpia.

Fig. 27: Elaboració pròpia.

Fig. 28: Elaboració pròpia.

Fig. 29: Elaboració pròpia.

Fig. 30: Musescore. *Ode to joy (Piano for kids)* [en línia]. [Consulta: 23 d'octubre de 2025]. Disponible a: <https://musescore.com/user/191626/scores/182061>

Fig. 31: Elaboració pròpia.

Annexos: Codi Programació Arduino

A continuació adjuntem el codi utilitzat, a dues columnes, per facilitar la lectura.

```
// RECURSOS
// ***** IDE Arduino 1.8.18 *****
// https://downloads.arduino.cc/arduino-1.8.18-windows.exe
// ***** Iconos para código HTML *****
// Font Awesome → <i class=
// https://fontawesome.com/
// Material Icons → <span class=
// https://fonts.google.com/icons
// SVGs o imágenes .png
// 🌐 https://emojipedia.org
// 🌐 https://getemoji.com
// 🌐 https://unicode.org/emoji/charts/full-emoji-list.html
// *****

//***** Versión SINCRONA *****

//***** Includes *****
#include <WiFi.h>
#include <ESPAsyncWebServer.h>
#include "SPIFFS.h"
#include <ESP32Servo.h>
#include <Ticker.h>
#include <vector>
#include <Adafruit_GFX.h> // Core graphics library
#include <Adafruit_ST7789.h> // Hardware-specific library for ST7789
#include <SPI.h>

// pinouts from https://github.com/Xinyuan-LilyGO/TTGO-T-Display
//T-Display
#define TFT_MOSI 19
#define TFT_SCLK 18
#define TFT_CS 5
#define TFT_DC 16
#define TFT_RST 23
#define TFT_BL 4

// T-Display S3
// #define TFT_MOSI 6 // SPI MOSI
// #define TFT_SCLK 7 // SPI CLK
// #define TFT_CS 5 // Chip Select
// #define TFT_DC 4 // Data/Command
// #define TFT_RST -1 // No se usa, manejado internamente
// #define TFT_BL 38 // Backlight (PWM para brillo)

// ***** Variables y estructuras *****
#define POSITIONS_FILE "/posiciones.txt" // Ficheros de configuración en memoria no volátil
#define PUERTOS_FILE "/puertos.txt" // Ficheros de configuración en memoria no volátil
#define LOGS_ACTIVADOS // 🔄 Comenta esta línea para desactivar logs

const char* ssid = "MANO_EVA";
const char* password = "88888888";

const IPAddress local_IP(10, 10, 1, 1);
const IPAddress gateway(10, 10, 1, 1);
const IPAddress subnet(255, 255, 255, 0);

struct MovimientoServo {
    int destino;
    unsigned long ultimaActualizacion;
    int velocidad; // tiempo entre pasos (ms)
```

```

boolbool enMovimiento;
unsignedunsigned longlong tiempoInicio; // [NUEVO: guarda cuándo empezó el movimiento, para mostrar el tiempo total de un
movimiento
};

struct Comando {
    int s; // índice del servo
    int p; // posición (0-180)
    int v; // duración total del movimiento en milisegundos
};

// constructor for data object named tft
Adafruit_ST7789 tft = Adafruit_ST7789(TFT_CS, TFT_DC, TFT_MOSI, TFT_SCLK, TFT_RST);

// Estructura para comandos ya parseados
std::vector<Comando> comandosGlobales;
size_t indiceGlobal = 0;

MovimientoServo movimientos[5];

// Ajustes para el control de los servos
Servo servos[5];
int servoPins[5] = {16, 17, 21, 22, 26}; // Puertos digitales del ESP32 asignados a cada servo
int servoPos[5] = {90, 90, 90, 90, 90}; // Posición inicial de cada servo tras un reinicio del ESP32

Ticker reinicio; // Usado para un delay cuando se reinicia el ESP-2 desde el web
// *****

AsyncWebSocket ws("/logs"); // Ruta WebSocket
AsyncWebServer server(80); // Se inicia el servidor Web en el puerto TCP número 80

void enviarLog(const char *format, ...) {
    char buffer[128]; // Aumentar si se necesitan logs más largos
    va_list args;
    va_start(args, format);
    vsnprintf(buffer, sizeof(buffer), format, args);
    va_end(args);

    String mensaje = String(buffer);
    ws.textAll(mensaje); // Envía al WebSocket
    Serial.println(mensaje); // También al puerto serie (opcional)
}

// ***** Procedimientos para la gestión de los servos *****

##### actualizarServos() #####
// Recorre cada servo y, si está en movimiento, verifica si ya es momento de dar
// el siguiente paso (según el tiempo transcurrido). Si es así, avanza (o retrocede)
// 1 grado hacia su destino. Cuando llega, lo marca como
#####
void actualizarServos() {
    unsigned long ahora = millis();

    /*
    // Asignar nuevos comandos si el servo está libre, se solapan los movimientos
    while (indiceGlobal < comandosGlobales.size()) { // Hay comandos por procesar
        Comando cmd = comandosGlobales[indiceGlobal]; // Tomamos el siguiente comando del array
        if (!movimientos[cmd.s].enMovimiento) { // Procesamos si el servo está parado (ha terminado de procesar el
comando anterior)
            MoverServo(cmd.s, cmd.p, cmd.v); // Ejecutamos movimiento
            indiceGlobal++; // Contador de comandos
        } else {
            break; // Esperar a que este servo termine // El servo aún está en movimiento ejecutando comando anterior,
abortamos.
    }
    */

```



```

}
}
*/

// ***Esperar a que todos los servos estén detenidos antes de iniciar un nuevo comando****
bool todosDetenidos = true;
for (int i = 0; i < 5; i++) {
    if (movimientos[i].enMovimiento) {
        todosDetenidos = false;
        break;
    }
}

if (todosDetenidos && indiceGlobal < comandosGlobales.size()) { // Verifica si todos los servos están detenidos y aún hay
comandos pendientes por procesar
    Comando cmd = comandosGlobales[indiceGlobal]; // Obtiene el siguiente comando en la lista de comandos
    MoverServo(cmd.s, cmd.p, cmd.v); // Ejecuta el movimiento del servo indicado en el comando (s: índice del
servo, p: posición, v: velocidad)
    indiceGlobal++; // Incrementa el índice global para apuntar al próximo comando en la siguiente
iteración
}
//*****

bool algunoEnMovimiento = false;

for (int i = 0; i < 5; i++) {
    if (movimientos[i].enMovimiento) {
        algunoEnMovimiento = true; // Marca que al menos un servo está en movimiento. Se utiliza después para saber si todavía
hay tareas activas en progreso.

        // Comprueba si ha pasado suficiente tiempo desde la última actualización del servo i, según
        // la velocidad configurada (velocidad en milisegundos entre pasos). Este control regula la velocidad del movimiento.
        if (ahora - movimientos[i].ultimaActualizacion >= movimientos[i].velocidad) {
            movimientos[i].ultimaActualizacion = ahora; // Actualiza el tiempo de la última actualización para este servo. Esto
asegura que el
                // siguiente paso se haga en el próximo intervalo apropiado, y no antes.
            yield(); // <- ⚡ Esto es importante para evitar resets ESP32

            if (servoPos[i] < movimientos[i].destino) {
                // Si la posición actual del servo es menor que el destino:
                // Incrementa la posición en 1 grado.
                // Envía esa nueva posición al servo con write().
                // Esto hace que el servo se mueva suavemente paso a paso hacia adelante.
                servoPos[i]++;
                servos[i].write(servoPos[i]);
                yield(); // ⚡ importante aquí para evitar resets ESP32
            } else if (servoPos[i] > movimientos[i].destino) {
                // Si la posición actual es mayor que el destino:
                // Disminuye la posición en 1 grado.
                // Escribe la nueva posición.
                // Esto permite que el servo se mueva suavemente hacia atrás.
                servoPos[i]--;
                servos[i].write(servoPos[i]);
                yield(); // ⚡ también aquí para evitar resets ESP32
            } else {
                // Si la posición actual ya es igual al destino:
                // Marca que el servo ha terminado su movimiento (enMovimiento = false).
                // Imprime un mensaje por serial indicando que el servo i llegó a su posición final.
                movimientos[i].enMovimiento = false;
                // Serial.printf(
                unsigned long tiempoTotal = ahora - movimientos[i].tiempoInicio; // ➡ NUEVO
                #ifdef LOGS_ACTIVADOS
                // Serial.printf(
                enviarLog("✅ Servo %d: llegó a %d° en %lu ms\n", i, servoPos[i], tiempoTotal); // ➡ NUEVO LOG
                #endif
                showpositions(i, servoPos[i]);
            }
        }
    }
}

```

```

    }
  }
}

if (!algunoEnMovimiento && indiceGlobal >= comandosGlobales.size()) {
  //Serial.println(
  comandosGlobales.clear();
}
}

##### actualizarServos() #####

##### EjecutarArchivoDeMovimientos #####
// Lee un archivo de comandos estructurado así:
// [0,90,2]
// [1,120,5]
// [2,30,2]
// y carga cada línea válida como un comando en comandosGlobales, que
// luego será ejecutado uno por uno por la función actualizarServos().
#####

void EjecutarArchivoDeMovimientos(const char* filename) {
  File file = SPIFFS.open(filename, "r"); // Abrimos el fichero (filename) de comandos de la memoria SPIFFS
  if (!file) {
    #ifdef LOGS_ACTIVADOS
      //Serial.println(
      enviarLog("✗ No se pudo abrir el archivo");
    #endif
    return;
  }

  comandosGlobales.clear(); // Se borra el vector comandosGlobales para empezar limpio.
  indiceGlobal = 0;

  while (file.available()) { // Mientras queden datos por leer en el archivo (líneas de texto), continúa
    procesando.
    String linea = file.readStringUntil('\n'); // Lee una línea completa desde el archivo hasta el salto de línea (\n) y la
    guarda como String
    linea.trim(); // Elimina espacios en blanco al inicio y al final de la línea.

    // Valida la línea:
    // Debe tener al menos 5 caracteres (ejemplo mínimo: [0,90,100]).
    // Debe comenzar con [ y terminar con ]. Si no cumple, se descarta con continue.
    if (linea.length() < 5 || linea.charAt(0) != '[' || linea.charAt(linea.length() - 1) != ']') continue;

    // Se eliminan los corchetes que rodean la línea, dejando el contenido interno:
    // por ejemplo, de [0,90,100] → 0,90,100.
    linea.remove(0, 1); // quitar '['
    linea.remove(linea.length() - 1); // quitar ']'

    // Se buscan las posiciones de las comas.
    // Si no hay al menos dos comas, se descarta la línea.
    int sep1 = linea.indexOf(',');
    int sep2 = linea.indexOf(',', sep1 + 1);
    if (sep1 < 0 || sep2 < 0) continue;

    // Se extraen los 3 componentes del comando:
    // s: índice del servo (0–4)
    // p: posición (0–180 grados)
    // v: duración total del movimiento en milisegundos
    // Cada uno se convierte de String a int usando .toInt().
    int s = linea.substring(0, sep1).toInt();
    int p = linea.substring(sep1 + 1, sep2).toInt();
    int v = linea.substring(sep2 + 1).toInt();

    // Se guarda el comando extraído en el vector global comandosGlobales.
    // Cada entrada es de tipo Comando, estructurado como {s, p, v}.
    comandosGlobales.push_back({s, p, v});
  }
  file.close();
  #ifdef LOGS_ACTIVADOS

```

```
//Serial.printf(
enviarLog("📄 %d comandos leídos.\n", comandosGlobales.size());
#endif
)//////// EjecutarArchivoDeMovimientos //////////

//////// MoverServo //////////
// La función MoverServo() configura un movimiento para el servo indicado, estableciendo
// el destino, la velocidad y marcándolo como activo. El avance del servo lo realiza la
// función actualizarServos(), que irá incrementando o decrementando gradualmente el ángulo
// en base a la velocidad definida.
// Ejemplos comandos:
// [0,90,2] 90 pasos, cada 2 ms = 180 ms
// [0,90,5] 90 pasos, cada 5 ms = 450 ms
// [0,90,10] 90 pasos, cada 10 ms = 900 ms
// 10 ms → V. Lenta
// 5 ms → V. Media
// 2 ms → V. Rápida
////////
voidvoid MoverServo(intint s, intint nuevaPos, intint velocidadMs) {
    if (s < 0 || s >= 5) returnreturn; // Si el número de Servo es menor de 0 o mayor de 5, abortamos

    // Valida el índice del servo. Si está fuera del rango permitido (0 a 4), no hace nada y sale de la función.
    if (velocidadMs < 2) velocidadMs = 2;

    movimientos[s].destino = nuevaPos; // Guarda la posición objetivo del servo s dentro de la estructura movimientos[s].
    movimientos[s].velocidad = velocidadMs; // Guarda la velocidad de movimiento (intervalo entre pasos) en milisegundos.
    movimientos[s].enMovimiento = true; // Marca que este servo ahora está en movimiento.
    // Esto es importante para que la función actualizarServos() sepa que debe seguir moviéndolo en
    los siguientes ciclos.
    movimientos[s].ultimaActualizacion = millis(); // Registra el tiempo actual (en milisegundos desde que se encendió el ESP32)
    como momento de la // última actualización del movimiento. Esto se usará para controlar el ritmo del movimiento.
    movimientos[s].tiempoInicio = movimientos[s].ultimaActualizacion; // 🔄 NUEVO

    // Imprime por el puerto serie un mensaje indicando:
    // 1. qué servo se va a mover,
    // 2. hacia qué posición,
    // 3. y con qué velocidad.
    // Esto es útil para depuración.
    #ifdef LOGS_ACTIVADOS
    //Serial.printf(
    enviarLog("📄 Servo %d: moviendo hacia %d° a velocidad %dms", s, nuevaPos, velocidadMs);
    #endif
}
//////// MoverServo //////////

// *****FIN Procedimientos para la gestión de los servos *****

// ***** Procedimientos gestion WIFI *****
//////// WiFiEvent() //////////
// Imprime los códigos de eventos WiFi
////////
voidvoid WiFiEvent(WiFiEvent_t event) {
    #ifdef LOGS_ACTIVADOS
    Serial.printf("\n[WiFi-event]: %d <->", event);
    switchswitch (event) {
        casecase ARDUINO_EVENT_WIFI_STA_START:
            Serial.println("WiFi client started");
            breakbreak;
        casecase ARDUINO_EVENT_WIFI_STA_STOP:
            Serial.println("WiFi clients stopped");
            breakbreak;
        casecase ARDUINO_EVENT_WIFI_STA_LOST_IP:
            Serial.println("Lost IP address and IP address is reset to 0");
            breakbreak;
        casecase ARDUINO_EVENT_WIFI_AP_START:
            Serial.println("Punto de acceso WiFi iniciado");
    }
    #endif
}
```

```

        breakbreak;
    casecase ARDUINO_EVENT_WIFI_AP_STOP:
        Serial.println("Punto de acceso WiFi detenido");
        breakbreak;
    casecase ARDUINO_EVENT_WIFI_AP_STACONNECTED:
        Serial.println("Cliente conectado.");
        Serial.printf("[Estaciones conectadas]: %d\n", WiFi.softAPgetStationNum());
        if (WiFi.softAPgetStationNum() > 0) {
            showpostemplate();
        }
        breakbreak;
    casecase ARDUINO_EVENT_WIFI_AP_STADISCONNECTED:
        Serial.println("Cliente desconectado.");
        Serial.printf("[Estaciones conectadas]: %d\n", WiFi.softAPgetStationNum());
        if (WiFi.softAPgetStationNum() == 0) {
            showinfowifi();
        }
        breakbreak;
    casecase ARDUINO_EVENT_WIFI_AP_STAIPASSIGNED:
        Serial.println("Assigned IP address to client");
        breakbreak;
    defaultdefault: breakbreak;
}
#endifif

} //##### WiFiEvent() #####

#####
##### processor() #####
// Pone las posicoones de los 5 servidor
// en la página HTML servida por el Web Server
#####
StringString processor(constconst StringString& var) {
    StringString placeholder = "";
    loadpuertos(PUERTOS_FILE);

    if (var == "POS0") {
        placeholder = StringString(servoPos[0]);
        returnreturn placeholder;
    }
    if (var == "POS1") {
        placeholder = StringString(servoPos[1]);
        returnreturn placeholder;
    }

    if (var == "POS2") {
        placeholder = StringString(servoPos[2]);
        returnreturn placeholder;
    }

    if (var == "POS3") {
        placeholder = StringString(servoPos[3]);
        returnreturn placeholder;
    }

    if (var == "POS4") {
        placeholder = StringString(servoPos[4]);
        returnreturn placeholder;
    }

    if (var == "PUERTO0") {
        placeholder = StringString(servoPins[0]);
        returnreturn placeholder;
    }
    if (var == "PUERTO1") {
        placeholder = StringString(servoPins[1]);
        returnreturn placeholder;
    }
}

```

```

    if (var == "PUERTO2") {
        placeholder = StringString(servoPins[2]);
        return placeholder;
    }

    if (var == "PUERTO3") {
        placeholder = StringString(servoPins[3]);
        return placeholder;
    }

    if (var == "PUERTO4") {
        placeholder = StringString(servoPins[4]);
        return placeholder;
    }

    return StringString();
} //##### processor() #####

##### servidor_ON() #####
#####
void servidor_ON() {
    // Archivos principales
    server.on("/", HTTP_GET, [](AsyncWebServerRequest *request){
        //request->send(SPIFFS,
        request->send(SPIFFS, "/index.html", "text/html", false, processor);
    });

    server.on("/style.css", HTTP_GET, [](AsyncWebServerRequest *request){
        request->send(SPIFFS, "/style.css", "text/css");
    });

    server.on("/upload", HTTP_POST, [](AsyncWebServerRequest *request){
        //request->send(SPIFFS,
        request->send(200, "text/plain", "OK");
    }, handleUpload);

    // Listado de archivos
    server.on("/listar", HTTP_GET, [](AsyncWebServerRequest *request){
        StringString lista = "<!DOCTYPE html><html><head><link rel='stylesheet' href='/style.css'></head><body>";
        lista += "<h2></h2><ul>";
        File root = SPIFFS.open("/");
        File file = root.openNextFile();
        while (file) {
            StringString filename = file.name();
            lista += "<li><p class='Estilo2'><a href='\" + filename + \"'>\" + filename + \"</a></li>";
            file = root.openNextFile();
        }
        lista += "</ul></body></html>";
        request->send(200, "text/html", lista);
    });

    server.on("/list", HTTP_GET, [](AsyncWebServerRequest *request){
        StringString output = "";
        File root = SPIFFS.open("/");
        File file = root.openNextFile();
        bool first = true;

        while (file){
            StringString name = file.name(); // ya incluye '/'
            if (name.endsWith(".cmd") || name.endsWith(".CMD")) {
                if (!first) output += ",";
                output += "\" + name + \"\"; // <-- mantiene la /
                first = false;
            }
        }
    });

```

```

    file = root.openNextFile();
}

output += "]]";
request->send(200, "application/json", output);
});

server.on("/delete", HTTP_POST, [](AsyncWebServerRequest *request){
    if (request->hasParam("filename", true)) {
        String filename = request->getParam("filename", true)->value();

        if (!filename.startsWith("/")) {
            filename = "/" + filename;
        }

        if (SPIFFS.exists(filename)) {
            SPIFFS.remove(filename);
            request->send(200, "text/plain", "Archivo eliminado");
        } else {
            request->send(404, "text/plain", "Archivo no encontrado");
        }
    } else {
        request->send(400, "text/plain", "Falta parámetro filename");
    }
});

server.on("/ejecutar", HTTP_GET, [](AsyncWebServerRequest *request){
    if (request->hasParam("filename")) {
        String archivo = "/" + request->getParam("filename")->value(); // Asegurar ruta correcta
        #ifdef LOGS_ACTIVADOS
            Serial.println("Ejecutando archivo: " + archivo);
        #endif
        EjecutarArchivoDeMovimientos(archivo.c_str());
        request->send(200, "text/plain", "✅ Ejecutado: " + archivo);
    } else {
        request->send(400, "text/plain", "❌ Faltó parámetro filename");
    }
});

// Test de Control de servos
server.on("/set", HTTP_GET, [](AsyncWebServerRequest *request){
    if (request->hasParam("servo") && request->hasParam("pos")) {
        int s = request->getParam("servo")->value().toInt();
        int p = request->getParam("pos")->value().toInt();

        if (s >= 0 && s < 5 && p >= 0 && p <= 180) {
            MoverServo(s, p, 2); // ✅ ahora sí, mover desde la posición actual hacia p
            #ifdef LOGS_ACTIVADOS
                //Serial.printf(
                enviarLog("Servo: %d - Nuevo destino: %d\n", s, p);
            #endif
        }
    }
    request->send(200, "text/plain", "OK");
});

// Usar esto en el navegador web http://10.10.1.1/ver?archivo=/puertos.txt para ver el contenido de un archivo..
server.on("/ver", HTTP_GET, [](AsyncWebServerRequest *request){
    if (request->hasParam("archivo")) {
        String nombre = request->getParam("archivo")->value();
        if (SPIFFS.exists(nombre)) {
            File f = SPIFFS.open(nombre, "r");
            String contenido;
            while (f.available()) contenido += (char)f.read();
            f.close();
            request->send(200, "text/plain", contenido);
        } else {

```



```

    request->send(404, "text/plain", "Archivo no encontrado");
}
} else {
    request->send(400, "text/plain", "Falta parámetro 'archivo'");
}
});

// Se han recibido los puertos
server.on("/puertos", HTTP_POST, [](AsyncWebServerRequest * request) {
    for (int i = 0; i < 5; i++) {
        String nombre = "_PUERTO" + String(i);
        servoPins[i] = request->getParam(nombre, true)->value().toInt();
    }
    savepuertos(PUERTOS_FILE);

    for (int i = 0; i < 5; i++) {
        servos[i].detach(); // Desconecta el servo del pin anterior
        servos[i].attach(servoPins[i], 500, 2400); // Lo conecta al nuevo pin
        //servos[i].write(servoPos[i]); // Restaura la posición actual
    }
    request->redirect("/");
});

// Test de Control de servos
server.on("/_SAVE", HTTP_GET, [](AsyncWebServerRequest *request){
    savepositions(POSITIONS_FILE); // Guardar las posiciones
#ifdef LOGS_ACTIVADOS
    //Serial.println(
    enviarLog("posiciones guardadas");
#endif
    request->send(200, "text/plain", "OK");
});

// RESET servos
server.on("/_RESET", HTTP_GET, [](AsyncWebServerRequest *request){
    for (int i = 0; i < 5; i++) {
        //servos[i].setPeriodHertz(50); // 50 Hz estándar para servos
        //servos[i].attach(servoPins[i], 500, 2400); // PWM min/max (us)
        servoPos[i]=0;
        servos[i].write(servoPos[i]); // posición inicial
        showpositions(i, 0);
    }
#ifdef LOGS_ACTIVADOS
    //Serial.println(
    enviarLog("Servos reiniciados");
#endif
    request->redirect("/");
});

// Devolver posiciones de todos los servos
server.on("/get_pos", HTTP_GET, [](AsyncWebServerRequest *request){
    String json = "{";
    for (int i = 0; i < 5; i++) {
        json += "\"pos" + String(i) + "\": " + String(servoPos[i]);
        if (i < 4) json += ",";
    }
    json += "}";
#ifdef LOGS_ACTIVADOS
    //Serial.println(
    enviarLog("Posición de servos actualizada en los sliders");
#endif
    request->send(200, "application/json", json);
});

// Servir archivos directamente
server.onNotFound([](AsyncWebServerRequest *request){
    String path = request->url();

```

```

    if (!path.startsWith("/")) path = "/" + path;

    if (SPIFFS.exists(path)) {
        String contentType = "text/plain";
        if (path.endsWith(".html")) contentType = "text/html";
        else if (path.endsWith(".css")) contentType = "text/css";
        else if (path.endsWith(".js")) contentType = "application/javascript";
        else if (path.endsWith(".png")) contentType = "image/png";
        else if (path.endsWith(".jpg") || path.endsWith(".jpeg")) contentType = "image/jpeg";
        request->send(SPIFFS, path, contentType);
    } else {
        request->send(404, "text/plain", "Archivo no encontrado: " + path);
    }
};

// Resetear ESP32
server.on("/_RESET", HTTP_GET, [] (AsyncWebServerRequest *request) {
    request->send(200, "text/html", "<meta http-equiv='refresh' content='2;url=/><h1>Reiniciando...</h1>");
    reinicio.once(1.0, [] () {
        ESP.restart();
    });
});

// Inicializamos el servidor Web del ESP32
server.begin();
} // ##### servidor_ON() #####

// ***** FIN Procedimientos gestion WIFI *****

##### loadpuertos #####
// Recupera las posiciones
#####
boolean loadpuertos(const char * filename) {
    String mybuffer = "";
    const char LF = '\n';
    const char CR = '\r';
    int i = 0;

    if (!SPIFFS.begin(true)) {
        return false;
    }

    File myfile = SPIFFS.open(filename);
    if (!myfile) {
        return false;
    }

    while (myfile.available()) {
        char mychar = myfile.read();
        if (mychar != LF) {
            if (mychar != CR) {
                mybuffer += mychar;
            }
        } else {
            servoPins[i] = mybuffer.toInt();
            mybuffer = "";
            i++;
        }
    }
    myfile.close();
    return true;
} // ##### loadpuertos #####

##### loadpositions #####
// Recupera las posiciones
#####

```

```

boolean loadpositions(constconst charchar * filename) {
    StringString mybuffer = "";
    constconst charchar LF = '\x00A';
    constconst charchar CR = '\x00D';
    intint i = 0;

    ifif (!SPIFFS.begin(true)) {
        returnreturn false;
    }

    File myfile = SPIFFS.open(filename);
    ifif (!myfile) {
        returnreturn false;
    }

    whilewhile (myfile.available()) {
        charchar mychar = myfile.read();
        ifif (mychar != LF) {
            ifif (mychar != CR) {
                mybuffer += (charchar)mychar;
            }
        } elseelse {
            servoPos[i] = mybuffer.toInt();
            mybuffer = "";
            i++;
        }
    }
    myfile.close();
    returnreturn true;
} //##### loadpositions #####

##### savepuertos() #####
// Guarda las posiciones en SPIFFS
// Fichero : PUERTOS_FILE
#####
boolean savepuertos(StringString filename) {
    ifif (!SPIFFS.begin(true)) {
        returnreturn false;
    }
    File myfile = SPIFFS.open(filename, FILE_WRITE);
    ifif (!myfile) {
        returnreturn false;
    }
    forfor (intint i = 0; i < 5; i++) {
        myfile.println(StringString(servoPins[i]));
    }
    myfile.close();
    returnreturn true;
} //##### savepuertos #####

##### savePositions() #####
// Guarda las posiciones en SPIFFS
// Fichero : POSITIONS_FILE
#####
boolean savepositions(StringString filename) {
    ifif (!SPIFFS.begin(true)) {
        returnreturn false;
    }
    File myfile = SPIFFS.open(filename, FILE_WRITE);
    ifif (!myfile) {
        returnreturn false;
    }
    forfor (intint i = 0; i < 5; i++) {
        myfile.println(StringString(servoPos[i]));
    }
    myfile.close();
    returnreturn true;
} //##### savepositions() #####

```

```
//***** procedimientos para imprimir en TFT *****  
voidvoid showpositions(intint s, intint p) {  
  intint y = 0;  
  
  switchswitch (s) {  
    casecase 0: y = 0; breakbreak;  
    casecase 1: y = 25; breakbreak;  
    casecase 2: y = 50; breakbreak;  
    casecase 3: y = 75; breakbreak;  
    casecase 4: y = 100; breakbreak;  
    defaultdefault: returnreturn;  
  }  
  
  tft.fillRect(190, y, 60, 20, ST77XX_BLACK); // Limpia el área  
  tft.setCursor(190, y);  
  tft.setTextColor(ST77XX_RED);  
  tft.print(p);  
}  
  
voidvoid showpostemplate(){  
  tft.fillScreen(ST77XX_BLACK);  
  tft.setTextColor(ST77XX_WHITE);  
  
  tft.setCursor(0, 0);  
  tft.println("Ult.Pos.Servo-0:");  
  
  tft.setCursor(0, 25);  
  tft.println("Ult.Pos.Servo-1:");  
  
  tft.setCursor(0, 50);  
  tft.println("Ult.Pos.Servo-2:");  
  
  tft.setCursor(0, 75);  
  tft.println("Ult.Pos.Servo-3:");  
  
  tft.setCursor(0, 100);  
  tft.println("Ult.Pos.Servo-4:");  
}  
  
voidvoid showinfowifi(){  
  tft.fillScreen(ST77XX_BLACK);  
  tft.setTextWrap(true);  
  tft.setTextSize(2); // ← Tamaño de fuente más grande (2x)  
  
  tft.setTextColor(ST77XX_GREEN);  
  tft.setCursor(0, 0);  
  tft.println("AP iniciado.");  
  
  tft.setTextColor(ST77XX_WHITE);  
  tft.setCursor(0, 30);  
  tft.print("SSID:");  
  tft.setTextColor(ST77XX_RED);  
  tft.setCursor(90, 30);  
  tft.println(ssid);  
  
  tft.setTextColor(ST77XX_WHITE);  
  tft.setCursor(0, 60);  
  tft.print("IP:");  
  tft.setTextColor(ST77XX_RED);  
  tft.setCursor(90, 60);  
  tft.println(WiFi.softAPIP().toString());  
  
  tft.setTextColor(ST77XX_WHITE);  
  tft.setCursor(0, 90);  
  tft.print("Clave:");  
  tft.setTextColor(ST77XX_RED);
```

```

tft.setCursor(90, 90);
tft.println(password);
}

voidvoid showcredits(){
  tft.fillScreen(ST77XX_BLACK);
  tft.setTextWrap(true);
  tft.setTextSize(2); // ← Tamaño de fuente más grande (2x)

  tft.setTextColor(ST77XX_WHITE);
  tft.setCursor(0, 0);
  tft.println("Autora:");

  tft.setCursor(50, 30);
  tft.println("Eva San Rafael");

  tft.setCursor(0, 60);
  tft.println("Proyecto:");

  tft.setTextColor(ST77XX_BLUE);
  tft.setCursor(50, 90);
  tft.println("Mano Robot");

  tft.setTextColor(ST77XX_RED);
  tft.setCursor(140, 120);
  tft.println("(C) 2025");
  delay(2000);
}
//***** procedimientos para imprimir en TFT *****

##### setup() #####
#####
voidvoid setup() {

  pinMode(TFT_BL, OUTPUT); // TTGO T-Display enable Backlight pin 4
  digitalWrite(TFT_BL, HIGH); // T-Display turn on Backlight
  tft.init(135, 240); // Initialize ST7789 240x135
  tft.setRotation(1);
  tft.fillScreen(ST77XX_BLACK);
  showcredits();
  #ifdef LOGS_ACTIVADOS
    Serial.println(F("TFT Inicializada"));
  #endif

  // Logs por Web
  ws.onEvent([](AsyncWebSocket *server, AsyncWebSocketClient *client,
    AwsEventType type, voidvoid *arg, uint8_t *data, size_t len) {
    if (type == WS_EVT_CONNECT) {
      #ifdef LOGS_ACTIVADOS
        Serial.println("🔌 Cliente WebSocket conectado");
      #endif
    } else if (type == WS_EVT_DISCONNECT) {
      #ifdef LOGS_ACTIVADOS
        Serial.println("🔌 Cliente WebSocket desconectado");
      #endif
    }
  });
  server.addHandler(&ws);

  Serial.begin(115200);

  if (!SPIFFS.begin(true)) {
    #ifdef LOGS_ACTIVADOS
      //Serial.println(
      enviarLog("Error al montar SPIFFS");
    #endif
  }

```

```

returnreturn;
}
loadpuertos(PUERTOS_FILE);

WiFi.onEvent(WiFiEvent);
WiFi.softAPConfig(local_IP, gateway, subnet);
WiFi.softAP(ssid, password);

#ifdef LOGS_ACTIVADOS
  Serial.println("AP iniciado. IP: " + WiFi.softAPIP().toString());
#endif

for (int i = 0; i < 5; i++) {
  movimientos[i].destino = servoPos[i];
  movimientos[i].ultimaActualizacion = 0;
  movimientos[i].velocidad = 2; // 10 ms entre pasos (ajustable)
  movimientos[i].enMovimiento = false;
}

// Inicializar servos
for (int i = 0; i < 5; i++) {
  servos[i].setPeriodHertz(50); // 50 Hz estándar para servos
  servos[i].attach(servoPins[i], 500, 2400); // PWM min/max (us)
  servos[i].write(servoPos[i]); // posición inicial
}

delay(2000);
loadpositions(POSITIONS_FILE); // Cargamos las posiciones desde el fichero POSITIONS_FILE
for (int s = 0; s < 5; s++) {
  servos[s].write(servoPos[s]);
}

#ifdef LOGS_ACTIVADOS
  Serial.println("Posiciones recuperadas");
#endif

showinfowifi(); // muestra los datos WiFi (SSID /PASSWORD)
servidor_ON(); // Activamos servidor Web

} // ##### setup() #####

// ##### handleUpload() #####
// procedure para la carga de los ficheros en la memoria SPIFFS
// #####
void handleUpload(AsyncWebServerRequest *request, String filename, size_t index,
  uint8_t *data, size_t len, bool final) {
  static File uploadFile;

  if (index == 0) {
    if (SPIFFS.exists("/") + filename)) SPIFFS.remove("/") + filename);
    uploadFile = SPIFFS.open("/") + filename, FILE_WRITE);
    #ifdef LOGS_ACTIVADOS
      Serial.printf("Subiendo: %s\n", filename.c_str());
    #endif
  }

  if (uploadFile) uploadFile.write(data, len);

  if (final && uploadFile) {
    uploadFile.close();
    #ifdef LOGS_ACTIVADOS
      Serial.printf("Archivo %s guardado correctamente.\n", filename.c_str());
    #endif
  }
} // ##### handleUpload() #####

```



```
##### loop() #####  
void loop() {  
  actualizarServos();  
  //delay(1); // deja respirar al sistema (watchdog, WiFi, etc.)  
} #####
```