



Prótesis de Mano Robotizada para Niños

María Eugenia Piro

Universidad Nacional de Rosario
Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura
Escuela de Ingeniería Mecánica
Rosario, Argentina
Año 2022

Prótesis de Mano Robotizada para Niños

María Eugenia Piro

Proyecto Final de Ingeniería Mecánica presentado como requisito parcial para optar
al título de:

Ingeniero/a Mecánico/a

Director: Dr. Ing. Guillermo Rodríguez

Universidad Nacional de Rosario
Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura
Escuela de Ingeniería Mecánica
Rosario, Argentina
Año 2022

El que no vive para servir, no sirve para vivir.

Santa Madre Teresa de Calcuta

No desperdiciéis el recuerdo del camino recorrido. Ello no retrasa vuestra carrera, sino que la dirige; el que olvida el punto de partida pierde fácilmente la meta.

San Pablo VI

Agradecimientos

Agradezco a todas las personas que estuvieron presentes durante la realización de este proyecto:

A la Universidad Nacional de Rosario y a la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, que me acompañaron durante todos estos años de aprendizaje, brindándome las herramientas necesarias para convertirme en ingeniera.

A la asociación francesa e-Nable por compartir sus interrogantes, que me permitieron elegir el tema de mi proyecto final.

A mis compañeros MATHIEU Corentin, ROLLER Elias y WALTER Luc que comenzaron conmigo esta idea de mejora para la asociación anteriormente mencionada.

Al director de estudios de la Escuela Nacional de Ingenieros de Metz, Ing. Kevin Huynen, que nos guio como tutor durante el pequeño avance del proyecto que realizamos en Francia.

A mi familia y amigos, que me acompañaron a lo largo de todo mi proceso de aprendizaje, guiándome e incentivándome a alcanzar las metas que me proponía, tanto en los ámbitos profesionales como personales.

A Dios que me ilumina y me impulsa a ser una mejor persona, llevándome a superarme constantemente en todos los aspectos de mi vida.

A Guillermo Rodríguez, tutor de mi proyecto final en Argentina, que me ayudó a desarrollar mi mayor potencial durante el transcurso del desarrollo del proyecto final y durante el comienzo de mi vida laboral.

Sinceramente gracias.

Resumen

El presente proyecto tiene como objetivo la propuesta de diseño de una prótesis de mano robotizada para niños. El mismo surge a partir de una necesidad planteada por la asociación francesa e-Nable por lo que debe cumplir con los requerimientos impuestos por la misma, además de los inherentes propios del proyecto.

Se comienza el desarrollo con un análisis de la problemática y la aplicabilidad que el proyecto puede tener en la Argentina. En el marco teórico se describen también los conocimientos básicos que una persona debe tener para comprender un proyecto de esta índole, incluyendo conceptos de la anatomía humana y de las tecnologías disponibles en el mercado, como son los casos de estudio recomendados por la asociación.

A continuación, se analiza nuevamente la problemática para definir las variables y condiciones de contornos del proyecto. Luego, se proponen las soluciones básicas que darán lugar al diseño final de la prótesis.

Además, se desarrollan todos los criterios de diseño a tener en consideración y la selección de componentes para la fabricación de este dispositivo de asistencia a personas con discapacidad.

Finalmente, se evalúa el cumplimiento de los objetivos del proyecto, incluyendo un breve análisis económico, cerrando con las recomendaciones a futuro para aquellas personas que realicen desarrollos de prótesis similares.

Palabras clave: Discapacidad, Niño, Infancia, Prótesis, Robótica, Mano, Arduino.

Abstract

The aim of this project is to design a robotic hand prosthesis for children. It arises from a necessity of the French association e-Nable, so that it must accomplish with their requirements, in addition to those inherent to the project.

The project development begins with the analysis of the problem and the study of the applicability that it may have in Argentina. The theoretical framework also describes the basic knowledge that a person must have to understand a project of this nature, including concepts of human anatomy and the technologies available on the market, such as the case studies recommended by the association.

Thereafter, the problem is analyzed again to define the variables and boundary conditions of the project. Then, the basic solutions that will lead to the final design of the prosthesis are proposed.

In addition, all the design criteria are developed as well as the selection of components for the manufacture of this assistance device for people with disabilities.

Finally, the objective of the project is evaluated to determine if it is achieved. A brief economic analysis is included, and the report closes with future recommendations for those who carry out similar prosthesis developments.

Keywords: Disability, Infant, Childhood, Prosthesis, Robotics, Hand, Arduino.

Contenido

Agradecimientos	VII
Resumen	IX
Abstract	XI
Contenido	XIII
Introducción	1
1. Marco Teórico	5
1.1. Discapacidad	5
1.2. Cifras de actualidad	7
1.3. Discapacidad y preadolescencia	9
1.4. Prótesis	10
1.5. Clasificación de las prótesis de miembro superior	10
Prótesis mecánica	11
Prótesis eléctrica	12
Prótesis neumática	12
Prótesis mioeléctricas	13
Prótesis híbrida	13
1.6. Anatomía	14
1.6.1. Estudio preliminar	15
1.6.2. Esqueleto	16
1.6.3. Estructura muscular	17
1.6.4. Movimientos y articulaciones	18
Los dedos	18
Flexión-extensión metacarpofalángica	19
Abducción-aducción metacarpofalángica	19
Circunducción	19
Flexión-extensión interfalángica	20
El pulgar	20
La muñeca	21
Abducción y aducción	22
Flexión y extensión	22
Circunducción	23
El codo	23
Pronosupinación	24
La flexo-extensión	25
1.6.5. Anatomía funcional de la mano	25
Tipos de prensión	25
Presas propiamente dichas o pinzas	25
Las presas de gravedad	28
Las presas con acción	29
Las percusiones, el contacto y la expresión gestual	30
1.7. Mano mecánica actual	31

1.8. Propuesta motorizada E-Nable.....	32
2. Definición del problema	35
2.1. Motivación	35
2.2. Objetivos	35
2.3. Diagrama de interacción.....	35
2.4. Variables.....	36
2.5. Condiciones límites	37
3. Propuestas de soluciones.....	39
3.1. Diseños básicos	39
3.1.1. Brazo y antebrazo	39
Propuesta 1	39
Propuesta 2.....	40
Propuesta 3.....	40
Propuesta 4.....	41
Propuesta 5.....	41
3.1.2. Muñeca.....	42
Propuesta 1	42
Propuesta 2.....	42
Propuesta 3.....	42
Propuesta 4.....	43
Propuesta 5.....	43
Propuesta 6.....	43
Propuesta 7.....	43
Propuesta 8.....	43
Propuesta 9.....	44
Propuesta 10.....	45
Propuesta 11	45
Propuesta 12.....	45
Propuesta 13.....	46
3.1.3. Rótula	46
Propuesta 1	47
Propuesta 2.....	47
Propuesta 3.....	47
3.1.4. Palma de la mano	48
Propuesta 1.....	48
Propuesta 2.....	49
3.1.5. Dedos	49
Propuesta 1.....	49
Propuesta 2.....	49
Propuesta 3.....	49
3.1.6. Pulgar	50
3.1.7. Mecanismos diferenciales	51
Básica	51
Basado en palanca.....	51
Basado en polea	51
Basado en piñón y cremallera	52
Continuo.....	52
Combinación de mecanismos.....	52
3.1.8. Transmisiones.....	53

3.2. Electrónica y programación.....	53
3.3. Comando y control.....	54
3.4. Tipos de motores	55
3.4.1. Motores de corriente continua	55
3.4.2. Servomotores	56
3.4.3. Motores paso a paso	56
3.5. Técnicas de impresión 3D.....	56
3.5.1. Extrusión de material.....	57
3.5.2. Polimerización VAT.....	58
3.5.3. Fusión en lecho de polvo.....	59
3.5.4. Inyección de material.....	60
3.5.5. Inyección de aglutinante.....	61
3.5.6. Laminación en hojas	61
3.5.7. Resumen.....	63
3.5.8. Selección de tecnología	64
3.6. Material de impresión 3D	64
3.6.1. ABS	64
3.6.2. PLA	65
3.6.3. HIPS.....	65
3.6.4. PVA	66
3.6.5. Material flexible	66
3.6.6. PETG	67
3.6.7. Nylon.....	67
3.6.8. ASA.....	68
3.6.9. Policarbonato	68
3.6.10. Polipropileno	69
3.6.11. Relleno de fibra de carbono	69
3.6.12. Relleno de metal	70
3.6.13. Relleno de madera	70
3.6.14. Selección de materiales	71
4. Diseño	73
4.1. Antropometría de la mano.....	73
4.2. Recomendaciones de diseño.....	74
4.2.1. Brazo.....	74
4.2.2. Antebrazo	75
4.2.3. Muñeca	76
4.2.4. Dedos.....	77
Pulgar	78
4.2.5. Palma de la mano	79
4.2.6. Validación con el usuario	80
4.3. Diseño electrónico	81
4.3.1. Selección de componentes.....	81
Microcontrolador y placa base	81
Motores	82
Sensor de comando.....	83
Batería.....	85
4.3.2. Recomendaciones para la construcción	85
4.3.3. Autonomía	86
4.4. Fabricación	87

4.4.1. Software.....	88
4.4.2. Recomendaciones de impresión	89
Orientación de las piezas	89
Variables de impresión	89
4.4.3. Postproceso	90
4.5. Análisis económico	90
5. Conclusiones y recomendaciones	91
5.1. Conclusiones.....	91
5.2. Recomendaciones.....	91
6. Fuentes bibliográficas	93

Introducción

Es vox pópuli que el cuerpo humano es una máquina compleja, a la cual la humanidad todavía no ha podido descifrar por completo. Con sus sistemas, aparatos y órganos, entre tantas otras cosas, el cuerpo es también la posesión más valiosa de cualquier ser humano. Es por ello que reemplazar un miembro del cuerpo es una tarea desafiante que lleva a apreciar la complejidad del cuerpo humano.

A lo largo del tiempo, la civilización ha ido desarrollando diferentes dispositivos capaces de compensar la ausencia de algún miembro en particular. Comenzando con la famosa “pata de palo”, el progreso en el diseño de las prótesis venía siendo, hasta hace algunos años, relativamente lento. Actualmente, el avance de la tecnología fomentó el surgimiento de un sinnúmero de organizaciones y empresas dedicadas al estudio y la provisión de prótesis, buscando mejorar el bienestar de las personas.

Con esta visión de ayudar al otro surgió e-Nable [1], una comunidad global on-line que engloba a voluntarios de todo el mundo quienes mediante el uso de sus impresoras 3D proveen a niños y adultos de prótesis de miembro superior de bajo costo. Con sus diseños open-source¹ los voluntarios ayudan a las personas privadas de sus dedos o manos, ya sea por nacimiento, guerra, desastres naturales, enfermedades o accidentes.

Con un crecimiento rápido en los últimos años, esta comunidad digital ya cuenta con aproximadamente 40000 voluntarios en más de 100 países. De hecho, un conjunto de estudiantes, grupos, escuelas, profesionales y fabricantes han formado unidades propias en cada país, donde poder generar mejoras en los diseños y trabajar cara a cara con la población compartiendo su lenguaje y su cultura.



Figura 0-1: Extracto del mapa de unidades e-Nable a lo largo del mundo. [1]

¹ En español diseño abierto, hace referencia a diseños accesibles al público, donde todos pueden ver, modificar y distribuir el diseño según lo consideren conveniente. Se debe otorgar el crédito correspondiente y no utilizar el diseño con fines comerciales.

Dentro de la comunidad global, nace en el 2015 la asociación sin fines de lucro e-Nable France [2]. Su misión principal es conectar a las personas que necesitan una prótesis con aquellas personas capaces de fabricarlas. De esta forma, gestionan los recursos, la información y las recaudaciones de fondo en todo el territorio de Francia y la francofonía.

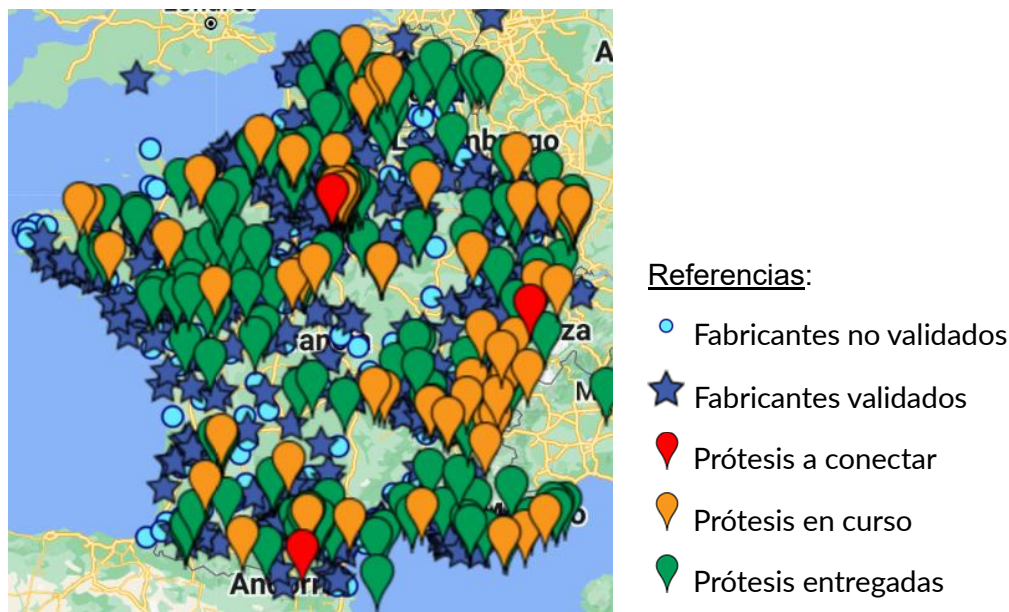


Figura 0-2: Extracto del mapa que refleja el trabajo de e-Nable France con sus referencias. [2]

En línea con la comunidad global, la asociación francesa provee del diseño de las prótesis mecánicas a fabricar mediante tecnologías de impresión 3D por los makers, o fabricantes, que luego serán entregadas a niños y adultos con amputaciones transradiales² o de la mano o dedos. Además, la asociación recibe donaciones para poder afrontar los gastos de los fabricantes y los gastos para participar de eventos importantes para todos los miembros.

Actualmente, las prótesis provistas por la asociación se caracterizan por permitir la realización de movimientos limitados de flexo-extensión que se accionan mediante el movimiento de algún miembro de la persona. Si bien esta solución es práctica para las personas desprovistas de algún dedo, para las personas con amputaciones debajo del codo representa una limitación mayor ya que sólo permite realizar la apertura y cierre de la mano, situación lejana a la gran cantidad de posibles movimientos que el ser humano posee con su mano natural. Es así que se presenta la necesidad de motorizar la mano para ampliar la gama de movimientos posibles y de adoptar un accionamiento que sea más natural para la persona, como es el caso de las prótesis mioeléctricas. Así surge lo que la asociación llama como “proyecto robótico”, la mano HackBerry que es la prótesis mioeléctrica japonesa de Exii para adultos. Este proyecto surge para afrontar la necesidad de la asociación francesa de proveer una mano robótica para niños, la cual actualmente no posee.

Como se ha mencionado anteriormente, e-Nable trabaja bajo un sistema de donaciones y voluntarios por lo que es necesario que el costo de fabricación de las prótesis sea lo más bajo posible. Un precio razonable conduce a que los aportes monetarios de las personas sean capaces de cubrir la mayor cantidad de prótesis posible.

² Hace referencia a las amputaciones debajo del codo.

Un concepto calve a tener en cuenta es que al tratarse de niños las variables sociales influyen en el proyecto. En una sociedad donde el bullying y la discriminación están a la vuelta de la esquina, es difícil para cualquier persona afrontar el hecho de que son físicamente diferentes a los demás, especialmente en el caso de los niños. Por esta razón, es necesario ayudar a la autoestima de los usuarios de las prótesis. Así, más allá de los tipos de movimientos que les permita realizar la prótesis, los niños son capaces de personalizar el diseño y elegir el color de la misma, facilitando su inclusión y haciéndolos partícipes de la solución, lo que les permite transformar su discapacidad en una fuerza.

Dentro de los beneficiarios de la asociación francesa se encuentra Téó, un niño de 12 años que tuvo el infortunio de nacer con una enfermedad que lo privó de su mano y parte de su antebrazo. Él posee actualmente una mano mecánica que le permite realizar solamente los movimientos de apertura y cierre de la mano. Así como él, hay muchísimos niños privados de su miembro superior que necesitan de una prótesis que les permita ampliar la cantidad de tareas que puede realizar.

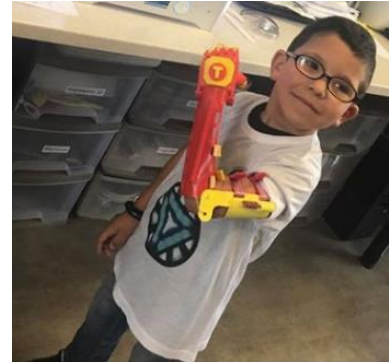


Figura 0-3: Téó con su mano mecánica provista por la asociación e-Nable. [3]

El objetivo de este proyecto es diseñar una prótesis robótica para niños de entre 10 y 12 años que posean una amputación de miembro superior transradial en uno sólo de sus brazos, y que, a pesar de no contar con la mano, no estén privados de la articulación del codo.

Asimismo, siguiendo con la visión de la asociación e-Nable, el dispositivo de asistencia debe ser una prótesis no médica o externa, fabricada mediante impresión 3D, que sea personalizable y de bajo costo.

1. Marco Teórico

El marco teórico que se desarrolla a continuación incluye los conceptos básicos para el entendimiento del desarrollo de este proyecto.

1.1. Discapacidad

Se entiende por discapacidad a toda aquella situación en la cual un sujeto ve limitada su participación en la realización de una acción como consecuencia de una condición de salud, es decir, de la existencia de algún problema en las funciones o estructuras corporales, tales como anomalías, defectos, pérdidas o cualquier otra desviación en ellas. Su existencia puede llegar a implicar una dificultad u obstáculo para la participación del sujeto en la sociedad.

De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS) la “*discapacidad es un término general que abarca las deficiencias, las limitaciones de la actividad y las restricciones de la participación. Las deficiencias son problemas que afectan a una estructura o función corporal; las limitaciones de la actividad son dificultades para ejecutar acciones o tareas, y las restricciones de la participación son problemas para participar en situaciones vitales. Por consiguiente, la discapacidad es un fenómeno complejo que refleja una interacción entre las características del organismo humano y las características de la sociedad en la que vive.*” [4]

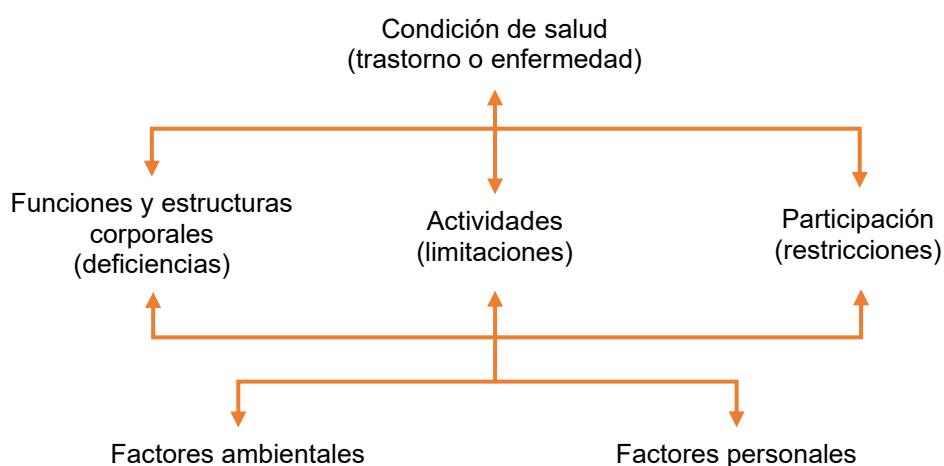


Figura 1-1: Esquema de interacción [5, 6]

Como se ve reflejado en el diagrama de la Figura 1-1, la condición de salud de la persona determina la discapacidad que puede incluir a uno, dos o tres de los conceptos descriptos anteriormente: funciones corporales, actividades y participación. A su vez, es necesario tener en consideración la relación o interacción entre la condición de salud y los factores contextuales, como son los factores ambientales y personales. Esta interacción es dinámica por lo que las intervenciones en un elemento tienen el potencial de modificar uno o más de

los otros elementos; por ejemplo, la presencia de la discapacidad puede incluso modificar a la propia condición de salud.

Con el fin de conseguir la integración de las diferentes dimensiones es necesario utilizar un enfoque “biopsicosocial”, que proporcione una visión coherente de las diversas dimensiones de la salud desde una perspectiva biológica, individual y social. De esta manera, se requiere unir dos modelos conceptuales opuestos, el médico y el social. Por un lado, el modelo médico considera la discapacidad como un problema de la persona directamente causado por una enfermedad, trauma o condición de salud, que requiere de cuidados médicos prestados en forma de tratamiento individual por profesionales. El tratamiento de la discapacidad está encaminado a conseguir la cura, o una mejor adaptación de la persona y un cambio de su conducta. Por otro lado, el modelo social de la discapacidad, considera el fenómeno fundamentalmente como un problema de origen social y principalmente como un asunto centrado en la completa integración de las personas en la sociedad. Por lo tanto, el manejo del problema requiere la actuación social y es responsabilidad colectiva de la sociedad hacer las modificaciones ambientales necesarias para la participación plena de las personas con discapacidades en todas las áreas de la vida social.

Basándose en los conceptos anteriormente presentados, la OMS redacta la Clasificación Internacional del Funcionamiento, de la Discapacidad y de la Salud (CIF). La misma fue diseñada para proporcionar una base científica para la comprensión y el estudio de la salud, establecer un lenguaje común para describir la salud, permitir la comparación de datos entre países y entre disciplinas sanitarias en diferentes momentos a lo largo del tiempo, y proporcionar un esquema de codificación sistematizado para ser aplicado en los sistemas de información sanitaria.

Los organismos internacionales, así como diferentes entidades gubernamentales, utilizan esta clasificación como herramienta estadística, de investigación, clínica, educativa y de política social. Sin embargo, al tratarse de una clasificación de salud y de aspectos “relacionados con la salud”, también se emplea en otros sectores como las compañías de seguros, la seguridad social, el sistema laboral, la educación, la economía, la política social, el desarrollo legislativo y las modificaciones ambientales.

Debido a la complejidad y nivel de detalle que posee la CIF, es posible clasificar la discapacidad de manera más sencilla. La Convención Internacional sobre los Derechos de las Personas con Discapacidad establece que *“Las personas con discapacidad incluyen a aquellas que tengan deficiencias físicas, mentales, intelectuales o sensoriales a largo plazo que, al interactuar con diversas barreras, puedan impedir su participación plena y efectiva en la sociedad, en igualdad de condiciones con las demás.”* [7] De esta forma, según la deficiencia que se presente la discapacidad se puede clasificar, en líneas generales, en:

- **Discapacidad física:** se puede definir como una desventaja, resultante de una imposibilidad que limita o impide el desempeño motor de la persona afectada en forma definitiva. Esto significa que las partes afectadas son los brazos y/o las piernas.

Las causas de la discapacidad física muchas veces están relacionadas a problemas durante la gestación y nacimiento de la persona, como ser la condición de prematuro del bebé o a dificultades en el momento del parto. También pueden ser causadas por alguna lesión causada en un accidente o problemas del organismo mismo.

- **Discapacidad sensorial:** corresponde a las personas con deficiencias visuales, a la gente con sordera y a quienes presentan problemas en la comunicación y el lenguaje.

Este tipo de discapacidad conlleva problemas de comunicación con los demás y la consecuente dificultad para entablar relaciones sociales. Al margen de esto, la mayoría de las veces las personas con estas discapacidades o sus familiares se adentran en métodos para sobrellevar el problema de la comunicación y así lograr una vida social más activa, ayudando a esto los distintos programas de *inclusión* que establecen las sociedades.

- Visual: disminución parcial o total de la vista, con alguno de los ojos. Toma en cuenta el campo visual, que es el espacio visible con la mirada fija en un punto, y la agudeza visual que es la capacidad del ojo para percibir objetos.
 - Auditiva: déficit total o parcial de la percepción del sonido en cada oído para poder escuchar.
 - Verbal: disminución parcial o total del habla.
- **Discapacidad cognitiva:** se define como un término global que hace referencia a las deficiencias en los procesos cognitivos, afectivos y/o del comportamiento en las estructuras del sistema nervioso, y en las limitaciones que presente el individuo al realizar una tarea o acción en un contexto/entorno normalizado, tomando como parámetro su capacidad o habilidad real sin que sea aumentada por la tecnología o dispositivos de ayuda o de terceras personas. Puede ser ocasionada por trastornos mentales como la depresión mayor, la esquizofrenia, el trastorno bipolar, el autismo, entre otros.
- **Discapacidad intelectual:** está caracterizada por limitaciones significativas en el funcionamiento intelectual y en el aprendizaje de habilidades adaptativas conceptuales, sociales, y prácticas. Dentro de estas habilidades se encuentran la comunicación, el cuidado propio, la vida en el hogar, las habilidades sociales, el uso de la comunidad, la autodirección, la salud, la seguridad, los contenidos escolares funcionales, el ocio y el trabajo. Esta discapacidad se expresa cuando una persona con limitaciones significativas interactúa con el entorno. Por lo tanto, depende tanto de la propia persona como de las barreras u obstáculos que tiene el entorno. Según sea un entorno más o menos facilitador, la discapacidad se expresará de manera diferente.

1.2. Cifras de actualidad

En la actualidad, más de 100 millones de personas a lo largo de todo el mundo padece algún tipo de discapacidad, lo que representa alrededor del 15% de la población mundial. Esta tasa se encuentra en aumento a causa del envejecimiento de la población y el aumento de las enfermedades crónicas a escala mundial.

En Argentina, el Estudio Nacional sobre el Perfil de las Personas con Discapacidad, realizado por el INDEC³ en el año 2018, reveló que el 10,2% de la población de 6 años y más tiene algún tipo de dificultad. Entre ellos, el 5% se corresponde con niños de entre 6 y 14 años.

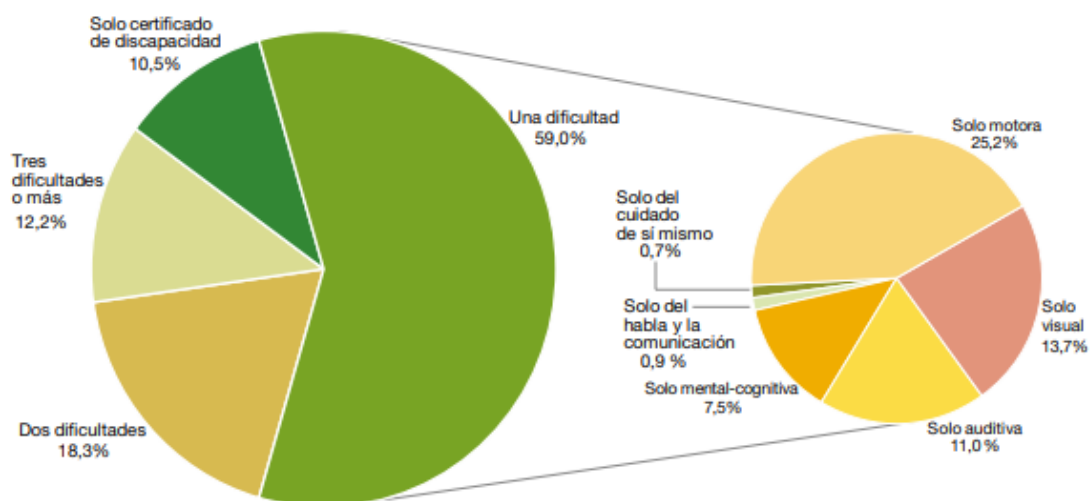


Figura 1-2: Gráfico de torta que refleja la población con dificultad de 6 años y más, segregada por cantidad (gráfico de la izquierda) y tipo de dificultad (gráfico de la derecha). [8]

Como se puede observar en la figura 3, el 59,0% de la población con dificultad de 6 años y más declara experimentar solo una dificultad, mientras que el 30,5% señala tener dos dificultades o más, y el 10,5% tiene solo certificado de discapacidad vigente. En cuanto al tipo de dificultad, entre la población con solo una dificultad se observa que, en orden, la más prevalente es la dificultad motora, seguida por la dificultad visual, la auditiva y la mental-cognitiva. Mientras, las dificultades del habla y la comunicación, y del cuidado de sí mismo son las menos prevalentes.

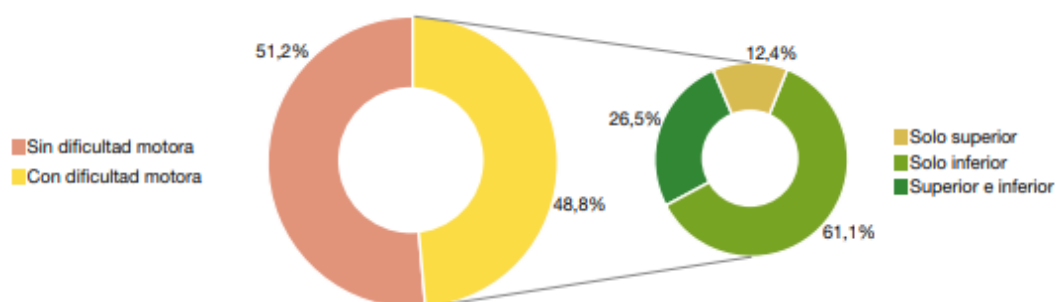


Figura 1-3: Gráfico de torta que refleja la población con dificultad motora de 6 años y más de acuerdo con el tipo de dificultad motora. [8]

Del total de la población con dificultad de 6 años y más, el 48,8% indica tener dificultad motora, esquematizado en la figura 4. Esta población está conformada en un 61,1% por quienes manifiestan tener dificultad solo motora inferior, ya sea para caminar o subir escaleras; en segundo lugar, con un 26,5 %, se encuentran quienes tienen dificultad motora superior e inferior y, en último término, un 12,4% expresa tener dificultad solo superior, para agarrar objetos con sus manos o brazos. Si se suman los dos últimos datos, que poseen una discapacidad motora superior, se tiene que un 38,9% de la población con dificultad motora de 6 años y más presenta dificultades motrices superiores.

³ Instituto Nacional de Estadísticas y Censos - República Argentina.

La población estimada por el INDEC al primero de julio del 2020 es de 45.376.763 argentinos. Así, considerando también los porcentajes expuestos anteriormente, se puede calcular que en Argentina hay cerca de 44000 niños de entre 6 y 4 años con discapacidad motriz superior. La siguiente tabla resume los datos para el cálculo.



Estadísticas		
Población Argentina	45.376.763	personas
Población con discapacidad +6	10,2	%
	4628430	personas
Motriz	48,8	%
	2258674	personas
Superior	38,9	%
	878624	personas
6 a 14 años	5	%
	43931	personas

Tabla 1-1: Tabla resumen de la población argentina con discapacidad. Elaboración propia basado en la información de [8]

1.3. Discapacidad y preadolescencia

La presencia de una discapacidad es un factor que suele llevar a las personas, sin importar la edad, a la marginalidad. En general, presentan peores resultados sanitarios, obtienen resultados académicos inferiores, participan menos en la economía y registran tasas de pobreza más altas que las personas sin discapacidades. Asimismo, es importante destacar que en el caso de la preadolescencia (de 9 a 11 años), los niños dejan de buscar la felicidad en el juego y se vuelven sensibles a la mirada y los comentarios de los demás.

Dentro de la familia, la escuela y la comunidad, la falta de conocimientos sobre la discapacidad y las actitudes negativas relacionadas pueden llevar a que el niño sea excluido de actividades que son cruciales para su desarrollo. Como consecuencia de esta discriminación, puede que los niños con discapacidad tengan malos resultados en materia de salud y educación, baja autoestima, interacción limitada con los demás y mayor riesgo de sufrir violencia y abandono. Cuán vulnerable sea el niño a la discriminación y a la exclusión social dependerá de múltiples factores, como son el tipo de deficiencia, la edad, el género o la condición social.

En el caso particular de la discapacidad motriz, es necesario recordar que la dificultad para moverse e interactuar con el entorno afecta al desarrollo de los niños en todos los niveles: sociales, cognitivos y emocionales. Como se mencionó anteriormente, muchos niños con discapacidad sufren baja autoestima debido a que, entre otras razones, dejan de esperar la aprobación de los padres exclusivamente y pasan a esperar la aprobación del resto de los adultos y, principalmente, de sus iguales. Los niños se encuentran en una etapa de la vida en la cual desean ser aceptados como personas, no como discapacitados.

En el ámbito familiar, es necesario que el niño encuentre apoyo para afrontar con éxito las dificultades que acontecen en sus vidas. En algunas ocasiones, el niño aprende a compartir la necesidad de los padres de ocultar y negar la existencia de cualquier tipo de problema. Como, por ejemplo, el caso de padres que no creen que sus hijos necesitan usar un aditamento ortopédico, o aquellos que desearían que estos fueran lo más discretos posibles, tendiendo a cubrirlos con una media o esconderlos debajo de pantalones largos.

En el área educativa es importante destacar que, al menos en Argentina, la mayor parte de los niños asiste a un establecimiento educativo (93,3 % de la población de 6 a 14 años). Sin embargo, las limitaciones físicas que presentan los llevan a sentirse incompetentes, afectando sus aprendizajes y su interacción con los demás. Los alumnos con discapacidad motora suelen presentar mayores dificultades en tres áreas: área personal y social, área del lenguaje y la comunicación y área de la movilidad, viendo limitada su participación en una gran cantidad de actividades.

Finalmente, es importante destacar que el niño se encuentra en un momento en el cual ya ha tomado consciencia de las capacidades que tiene su cuerpo. Es por ello que, ya sea un caso congénito o una amputación, los niños suelen optar entre las siguientes 3 alternativas:

- Evitar la ejecución de la tarea.
- Compensar la ausencia con la extremidad restante.
- Ejecutar la función reemplazando el miembro perdido por otro artificial.

Cabe destacar que, entre las tres alternativas, la última le permite al individuo superar más fácilmente las barreras físicas o sociales, ampliando su acceso y participación en aquellas actividades consideradas “normales” para cualquier persona de su edad.

1.4. Prótesis

Una prótesis es un sustituto artificial de una parte del cuerpo ausente. Se suele emplear para sustituir la función del miembro que falta, aunque también realiza una función estética. De hecho, existen prótesis cuya única función es estética, como es el caso de las prótesis oculares o mamarias. Como puede verse, las prótesis son utilizadas en diferentes partes del cuerpo, pudiéndose encontrar desde prótesis de fibra de carbono para corredores olímpicos hasta las pelucas por la caída del cabello debido a algunos tipos de quimioterapia.

Las prótesis se pueden clasificar, de manera amplia, en prótesis externas y prótesis internas o implantes. Las primeras se usan por fuera del cuerpo y pueden ponerse y quitarse, mientras que las segundas se insertan en el organismo durante una cirugía. Por ejemplo, es posible utilizar una prótesis de brazo en caso de ausencia del mismo, un dispositivo de voz electrónico para casos en los que la laringe ha sido afectada o implantes que pueden ubicarse en senos o huesos.

Es necesario destacar que, al tratarse de un reemplazo de una parte ausente por una artificial, se busca obtener con ella los grados óptimos de función, comodidad y aspecto amigable basados en la condición del paciente, vocación y deseos.

En el caso particular de las prótesis de miembros superior, existe una clasificación en función del uso y de las tecnologías utilizadas para generar el movimiento de la misma.

1.5. Clasificación de las prótesis de miembro superior

Las prótesis de miembros superiores pueden clasificarse según el material, la funcionalidad, el mecanismo de actuación, la apariencia, el nivel de amputación o el precio.

De acuerdo con la funcionalidad de la prótesis, el mercado se divide en dos grandes grupos:

- Prótesis estéticas o pasivas: son prótesis inmóviles que sólo se utilizan para cubrir el aspecto estético del miembro de una manera muy realista. En general, son fabricadas en silicona, PVC rígido o látex flexible. Esta prótesis en particular está caracterizada por ser liviana y por requerir un mínimo mantenimiento al poseer menor cantidad de piezas móviles. Las nuevas tecnologías, como el escáner 3D, permiten conseguir que las mismas tengan color y forma lo más parecido posible a la extremidad real.



Figura 1-4: Prótesis estética Jens Müller. [9]

- Prótesis funcionales o activas: ellas otorgan cierto movimiento que permite suplir las funciones del miembro real. Su objetivo es dar al usuario la posibilidad de tener una vida lo más normal y cómoda posible. Es por ello que en el mercado es posible encontrar un sinnúmero de estos modelos, cada cual con una tecnología diferente y distintos niveles de movimiento. En el caso de que se requiera también suplir la parte estética, existen unos guantes cosméticos hechos de PVC que simulan el color y la textura de una mano natural.

Estas últimas se clasifican en función del sistema de alimentación energética, también llamado mecanismo de actuación, que utiliza para su funcionamiento. A continuación, se describen los 5 grupos más representativos.

Prótesis mecánica

Son dispositivos controlados con segmentos de arneses, sujetos al hombro al muñón según sea el nivel de amputación, que aprovechan la fuerza corporal del usuario para generar el movimiento de apertura y cierre de la mano en conjunto con el codo en algunos casos.

El funcionamiento se basa en la tensión y relajación de un músculo determinado que provoca la extensión de una liga por medio del arnés que provoca el cierre o la apertura de la prótesis. Como se puede observar, este mecanismo sólo es capaz de efectuar un movimiento, lo que implica que todos los dedos se muevan de forma dependiente y al mismo nivel. Por lo tanto, y sumado a su falta de precisión, sólo tienen la funcionalidad de agarre de objetos relativamente grandes.



Figura 1-5: Diferentes modelos de prótesis mecánicas que entrega la organización Enabling the future. [1]

Prótesis eléctrica

Estas prótesis, alimentadas con una batería recargable, otorgan el movimiento mediante actuadores eléctricos como motores o servomotores. Para controlarlas, existen diversas opciones, dentro de las cuales se pueden mencionar: servo control, botón pulsador, interruptor en arnés o una combinación de las mismas. Por un lado, confieren mayor autonomía y capacidad al usuario debido a que permiten un mayor número de movimientos. Por el contrario, son más pesadas, el mantenimiento es complejo, poseen una baja resistencia a los ambientes húmedos y su costo es elevado.



Figura 1-6: Prótesis eléctrica Greifer eléctrico de la empresa Ottobock. [10]

Prótesis neumática

Este tipo de prótesis hace uso del aire comprimido obtenido por medio de un compresor para obtener el movimiento. Un ejemplo de actuador neumático es el llamado “músculo neumático” que consiste en un tubo de goma cubierto por una red de plástico acomodada en forma de tijera (trenzada), que cuando es inflado con aire comprimido a baja presión acorta su longitud ejerciendo una fuerza en ambos extremos del tubo.

Su ventaja principal es la rapidez de los movimientos, aunque también se puede destacar que es capaz de proporcionar una gran fuerza y lograr movimientos suaves. Sin embargo, también existen varias desventajas que la han llevado a caer en desuso. Dentro de ellas se



Figura 1-7: Mano robótica Shadow Hand de la empresa Shadow Robot Company. [11]

pueden mencionar su difícil control, las complicaciones de los aparatos y accesorios, el alto costo y dificultad de su mantenimiento, el riesgo de posibles fugas del fluido, y el peso y

volumen elevados del sistema de compresión de aire que el paciente debe cargar la mayor parte del día.

Si bien los dispositivos neumáticos no son comúnmente utilizados por las personas en su vida diaria, ciertos dispositivos médicos pueden ser creados para casos específicos. Algunos laboratorios o centros de rehabilitación utilizan circuitos de fluidos comprimidos que no deben ser soportados por el paciente.

Prótesis mioeléctricas

Las prótesis mioeléctricas son aquellas controladas por las señales eléctricas que emite el cuerpo humano al contraer los músculos. Al contraerse o relajarse un músculo, se produce una señal eléctrica, llamada señal electromiográfica (EMG), muy pequeña (5 a 20 μV) que es recibida por unos sensores ubicados en la prótesis y que luego es amplificada e interpretada, y que, finalmente, controla los motores de accionamiento para obtener el movimiento deseado en la mano.



Figura 1-8: Prótesis mioeléctrica i-Limb de la empresa Touch Bionics, recientemente adquirida por Össur. [12]

La ventaja principal de este tipo de prótesis es su sencilla utilización, debido a que el usuario sólo requiere flexionar sus músculos para operarla, a diferencia de las prótesis mecánicas que necesitan un movimiento real del cuerpo. Asimismo, otra ventaja es su mayor comodidad y ergonomía frente a otras prótesis, ya que, por ejemplo, elimina el arnés de suspensión. Esta tecnología tiene una mejor precisión en el agarre de los objetos y mayor naturalidad en el movimiento, puesto que funcionan con la intención de movimiento del paciente, interpretada al contraer o relajar los músculos. Su potencial crecimiento y el avance tecnológico posicionan a estas prótesis mioeléctricas en los campos de mayor desarrollo e innovación.

Como desventaja se puede destacar que, al tratarse de un mecanismo muy complejo, estas prótesis tienen un precio elevado. Además, al utilizar baterías, requiere de un mantenimiento regular, ya sea para su recarga o su eventual reemplazo. Por último, la gran cantidad de componentes, como baterías y motores, la hacen más pesada que algunos otros tipos de prótesis como las estéticas y mecánicas.

Prótesis híbrida

Como su nombre lo indica, este tipo de prótesis combina el accionamiento de dos o más de las prótesis descritas anteriormente en una sola prótesis. Lo más común es encontrar la combinación de la acción de cuerpo (mecánica) con el accionamiento eléctrico, neumático o mioeléctrico. Por lo general, son utilizadas por pacientes que tienen amputaciones transmurales, es decir, por arriba del codo. De esta forma, por ejemplo, el movimiento del codo es accionado haciendo uso del cuerpo mientras que el movimiento de la mano es controlado con un dispositivo mioeléctrico.



Figura 1-9: Prótesis híbrida ErgoArm de la empresa Ottobock. [10]

1.6. Anatomía

De acuerdo con la Real Academia Española (RAE), la anatomía es la “ciencia que estudia la estructura y forma de los seres vivos y las relaciones entre las diversas partes que los constituyen” [13]. Si bien el estudio de la estructura del cuerpo humano incluye diversas partes, esta sección detallará solamente aquellas que aportan a comprender el funcionamiento del miembro superior.

Por un lado, se encuentran los huesos, que, aunque son generalmente considerados como una materia inerte, en realidad se trata de estructuras con una enorme vitalidad. Sus funciones principales son las de soporte, protección de órganos internos y movilidad; no obstante, también intervienen en otros procesos como son la homeostasis, la producción de células sanguíneas y la reserva energética.

Sin embargo, para permitir el movimiento, los huesos se asocian unos con otros mediante las articulaciones. Estas últimas son puntos de contacto entre dos o más elementos óseos, que se clasifican según el grado de movimientos que permitan. En particular, las articulaciones móviles o diartrosis tienen una estructura compleja que le otorga gran fuerza y flexibilidad a la articulación; se componen de los siguientes elementos:

- **Cartílago articular:** reviste las superficies de los huesos de la articulación, pero no mantiene unidos los huesos.
- **Menisco:** también llamado fibrocartílago interarticular, se interpone entre las superficies articulares a las que se adapta.
- **Cápsula articular:** es la que mantiene unidos a los huesos. Su membrana interna secreta líquido sinovial, que lubrica la articulación y proporciona nutrición al cartílago articular.
- **Ligamentos:** son largos cordones fibrosos que se insertan alrededor de las superficies articulares, reforzando la unión.

Por otro lado, el movimiento no sería posible sin los músculos, que tienen la capacidad de ejercer la fuerza necesaria para ello, y son quienes, gracias a su conexión con los nervios, reciben los estímulos (impulsos nerviosos) que generan la contracción muscular. El sistema locomotor incluye, principalmente, a los músculos esqueléticos o estriados, el único tipo de músculo cuya contracción es voluntaria. Se insertan en los huesos mediante tendones, una

especie de cordones muy resistentes de tejido conjuntivo. Estos músculos esqueléticos permiten realizar una variedad de movimientos: la aducción y la abducción (acercamiento y alejamiento de las extremidades hacia el eje del cuerpo); la flexión y la extensión (acercamiento o separación de dos partes de una extremidad); la circunducción (movimiento circular); la rotación (giro); la pronación (cuando se lleva la palma hacia atrás y adentro); y la supinación (cuando se lleva la palma hacia adelante y afuera).

Como se puede observar, el estudio de la anatomía del hombre es realmente muy complejo. Como lo que se busca es construir un dispositivo que ayude o reemplace a un miembro del cuerpo, es necesario, en primer lugar, comprender la composición y la funcionalidad del miembro propiamente dicho. Como el proyecto está orientado a la discapacidad de miembro superior, es necesario estudiar la anatomía del mismo. Para ello, se lo analiza en tres grandes regiones:

- Región axilar y hombro
- Codo
- Mano

Asimismo, el caso tipo tomado para la investigación es de un niño que posee las articulaciones del hombro y el codo. De esta forma, sumado a la gran extensión del tema, esta sección resume el análisis de la anatomía sólo de la mano.

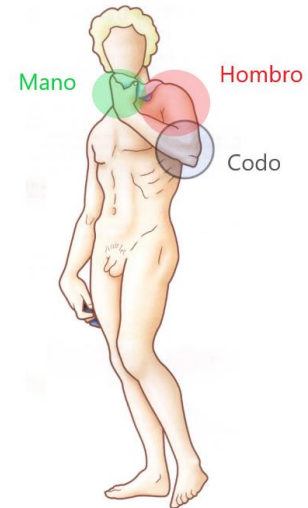


Figura 1-10: Regiones del miembro superior marcadas en el cuerpo humano. Elaboración propia basado en imagen de [14].

1.6.1. Estudio preliminar

Como se ve en la Figura 1-10, la mano es la parte que sigue al antebrazo, que comienza en el pliegue de la muñeca y finaliza en el extremo de los dedos. Para el hombre, ella es una herramienta que permite ejecutar una innumerable cantidad de acciones gracias a su función principal, la prensión, que hace posible realizar tanto una amplia apertura como un cierre sobre si misma o en torno a un objeto. Si bien esta facultad de prensión se puede encontrar en otros animales, ninguno es capaz de alcanzar el grado de perfección propio de la mano humana, otorgado principalmente por la disposición tan particular del pulgar que se puede oponer a todos los demás dedos en una amplitud que ni monos avanzados son capaces de alcanzar.

La mano representa la extremidad efectora del miembro superior que constituye su soporte logístico y le permite adoptar la posición más favorable para una acción determinada. Sin embargo, la mano no es sólo un órgano de ejecución, sino que también es un receptor sensorial extremadamente sensible y preciso, cuyos datos son imprescindibles para su propia acción. Por último, gracias al conocimiento del grosor y de las distancias que le proporciona a la corteza cerebral, es la educadora de la vista, permitiéndole controlar e interpretar las informaciones: sin la mano nuestra visión del mundo sería plana y sin relieve. Por lo tanto, lo más relevante de la mano es la relación mano-cerebro, donde cada término reacciona dialécticamente sobre el otro, y cuya interrelación permite al hombre modificar la naturaleza según sus designios.

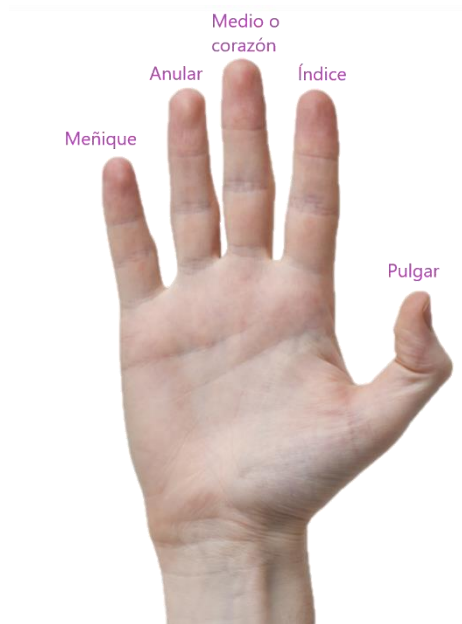


Figura 1-11: Vista de la región palmar de la mano.
Basado en [15].



Figura 1-12: Vista de la región dorsal de la mano.
Basado en [15].

Cuando está completamente abierta, en el interior se puede observar la región palmar (Figura 1-11) que contiene la palma de la mano, continuación de la muñeca y articulada con los cinco dedos. En el centro, la palma está hueca, lo que le permite alojar objetos más o menos voluminosos. Si se observa la mano desde otra vista, se puede reconocer la llamada región dorsal, como la que aparece en la Figura 1-12.

Los cinco dedos se reparten en dos grupos: cuatro dedos largos y uno corto, el pulgar. Por un lado, los cuatro dedos largos son de longitud desigual, y de derecha a izquierda se encuentran: el meñique, el más corto; a continuación, el dedo anular; luego el dedo medio o corazón, que es el más largo y está en el centro; y finalmente, el dedo índice. Todos los dedos largos presentan tres pliegues palmares, lo que indica la presencia subyacente de tres falanges. Por el otro lado, el pulgar, dedo corto, único y proximal se sitúa en la parte superior del borde externo de la mano y contiene sólo dos falanges.

Además de su clasificación, los cinco dedos no tienen la misma relevancia al momento del uso de la mano. La zona del pulgar desempeña un papel preponderante por su oposición a los otros dedos anteriormente descrita, y su pérdida reduce notablemente la gama de movimientos de la mano. La zona de las pinzas, compuesta por el dedo medio y el índice, es indispensable para los movimientos de la pinza bidigital o pinza de precisión (pulgar/índice), usualmente empleada para alcanzar los alimentos. Finalmente, la zona de los alcances, que incluye a los dedos anular y meñique, es indispensable para garantizar la firmeza de la presa con toda la palma de la mano o también la presa en forma de puño, como, por ejemplo, en el caso de agarrar los mangos de las herramientas.

1.6.2. Esqueleto

Los 27 huesos de la mano forman tres grupos óseos distintos, coloreados en las figuras 15 y 16: el carpo (rojo), el metacarpo (azul), y las falanges (amarillo).

Por otro lado, el metacarpo está formado por 5 huesos largos, los metacarpianos, que limitan entre sí los espacios interóseos. En la parte de arriba, se articulan con la fila inferior o carpiana del carpo, mientras que abajo, lo hacen con las primeras falanges de los dedos.

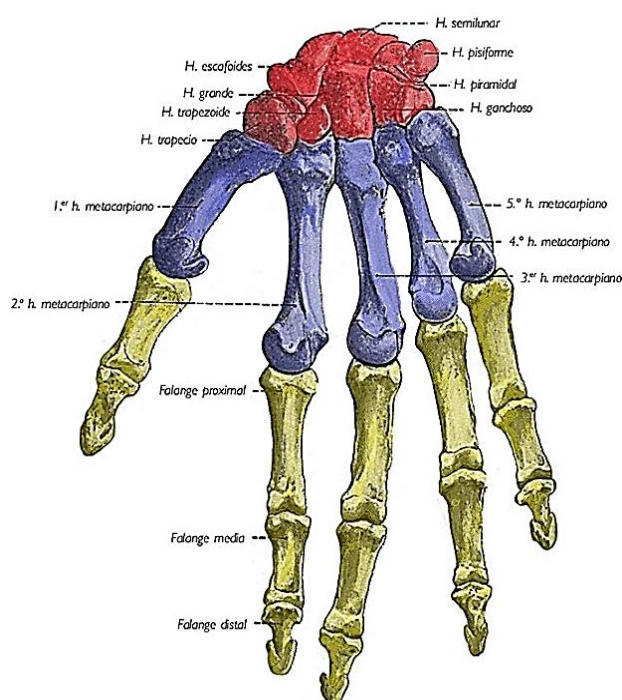


Figura 1-13: Vista palmar del esqueleto de la mano. Colorado propio en base a [16].

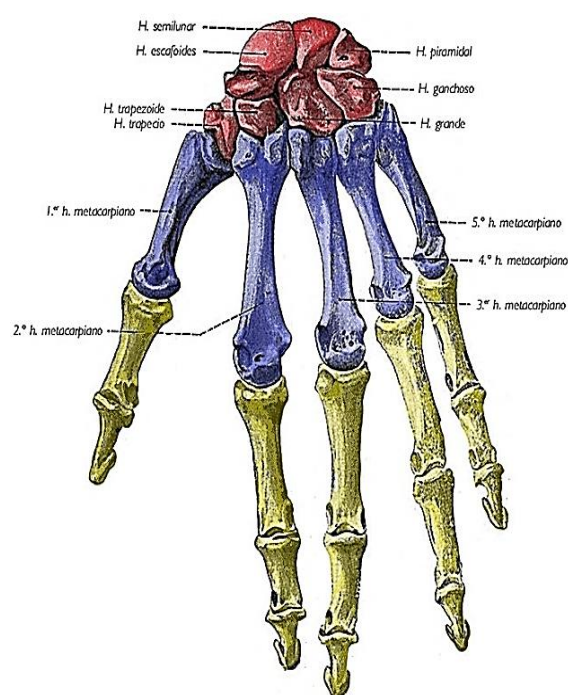


Figura 1-14: Vista dorsal del esqueleto de la mano. Colorado propio en base a [16].

Por último, cada dedo, excepto el pulgar, posee tres segmentos óseos, las falanges; el pulgar tiene sólo dos. Yendo desde el metacarpo hacia el extremo de los dedos las falanges se nombran como: 1er falange o falange proximal; 2da falange o falange media; y, finalmente, 3er falange o falange distal.

1.6.3. Estructura muscular

El miembro superior posee una totalidad de 35 músculos, dentro de los cuales 20 están ubicados en el antebrazo y la mano. De entre estos, se pueden encontrar ejemplos para cada una de las funciones anteriormente descritas: aducción y abducción; flexión y extensión; circunducción, rotación, pronación, y supinación.

Algunos de los músculos que nacen en el antebrazo son músculos largos cuyos tendones llegan a la mano, como es el caso del músculo flexor profundo de los dedos.

El músculo flexor profundo de los dedos es un músculo voluminoso que se extiende desde la parte anteromedial del antebrazo hasta la cara palmar de los cuatro últimos dedos. Desde su origen, el músculo se dirige inferiormente y no tarda en dividirse en cuatro fascículos carnosos que pasan anteriormente al músculo pronador cuadrado, donde continúan por medio de cuatro tendones que se envainan en el túnel carpiano. Llegan así a la palma de la mano, que atraviesan de superior a inferior, separándose unos de otros para acceder a los cuatro últimos dedos. A la altura de los dedos, cada tendón del músculo flexor profundo de los dedos pasa por un anillo formado por el desdoblamiento del tendón del músculo flexor superficial de los dedos, y se inserta en la cara anterior de la base de la falange distal.

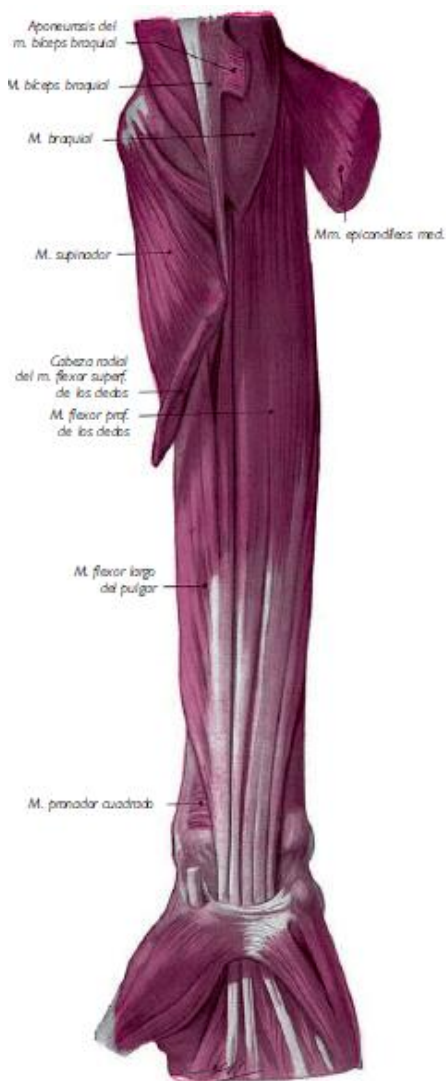


Figura 1-15: Vista superior de los músculos del antebrazo. [17]

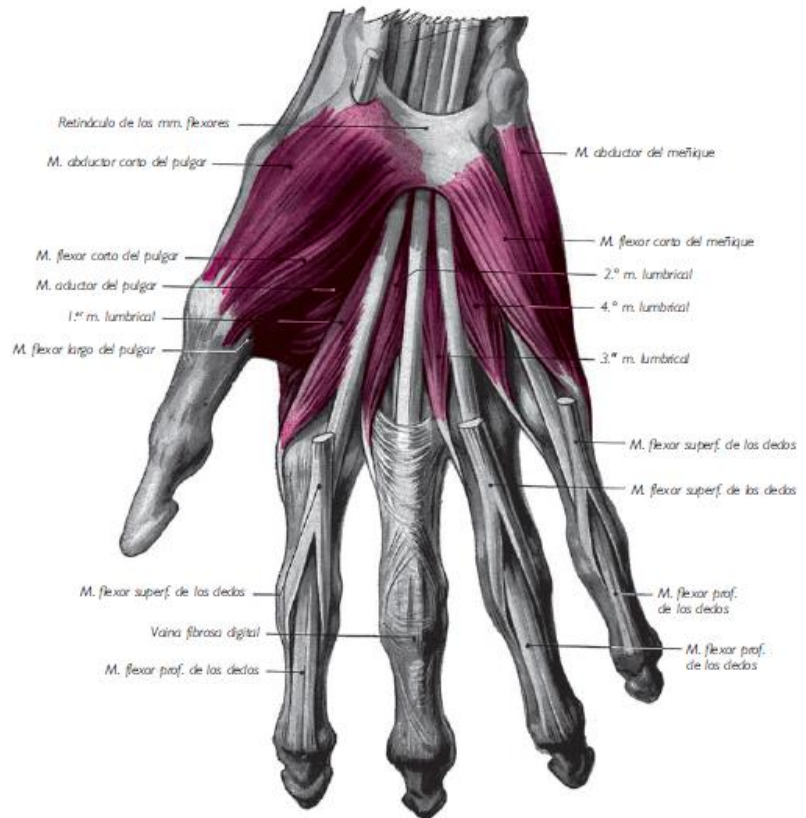


Figura 1-16: Vista superior de los músculos de la mano. [17]

La acción del músculo flexor profundo de los dedos consiste en flexionar la falange distal sobre la falange media, la falange media sobre la falange proximal, la falange proximal sobre el hueso metacarpiano y la mano sobre el antebrazo.

1.6.4. Movimientos y articulaciones

Los dedos

La funcionalidad de la mano, la prensión, no sería posible si no fuese por la existencia de los dedos, que son los que hacen posible el agarre de los diferentes objetos, necesarios para tareas de higiene, alimentación, herramientas, entre otros.

Al estudiar el movimiento de los dedos es importante diferenciar al pulgar de los otros cuatro dedos; y a las articulaciones metacarpofalángicas de las interfalángicas.

La amplitud de los movimientos se mide a partir de la posición anatómica que es cuando el eje de la mano y de los dedos, que pasa por el tercer metacarpiano y por el dedo medio, se localiza en la prolongación del eje del antebrazo.

Flexión-extensión metacarpofalángica

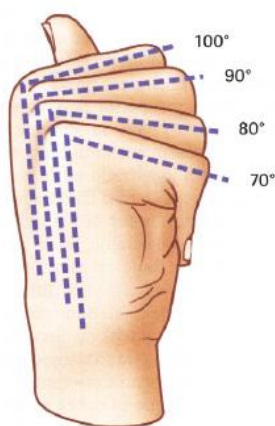


Figura 1-17: Máxima flexión de la articulación metacarpofalángica de los dedos. [14]

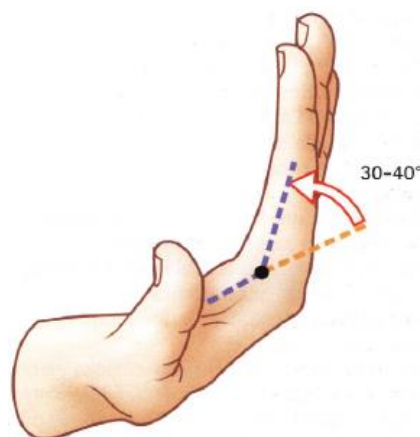


Figura 1-18: Máxima extensión de la articulación metacarpofalángica. [14]

Como se puede observar en la Figura 1-17, la amplitud de la flexión es próxima a los 90° para el dedo índice, aumentando hasta el quinto dedo cuando todos los dedos se encuentran flexionados. Sin embargo, la flexión aislada de un dedo está limitada por la tensión del ligamento, causando que a veces sea imposible la flexión activa de un dedo sin que los otros se flexionen también, aunque en menor ángulo. En el caso de la amplitud de la extensión activa, la misma varía según los individuos, pudiendo alcanzar de 30 a 40°; como consecuencia de un apoyo forzado (extensión pasiva) sobre los dedos en el sentido de la hiperextensión puede llegar a 90°.

Abducción-aducción metacarpofalángica

La abducción es el movimiento que aleja a los dedos de la línea eje de la mano, mientras que la aducción los aproxima, ambos movimientos posibles gracias a que uno de los ligamentos laterales se tensa mientras el otro se distiende. El movimiento de abducción alcanza, cuando los dedos se hallan en extensión, 15° para el dedo índice, 26° para el anular, y 35° para el meñique. Cuando los dedos se hallan en hiperextensión, disminuye dicha amplitud del movimiento. Cuando los dedos están flexionados, la abducción y la aducción no son posibles.

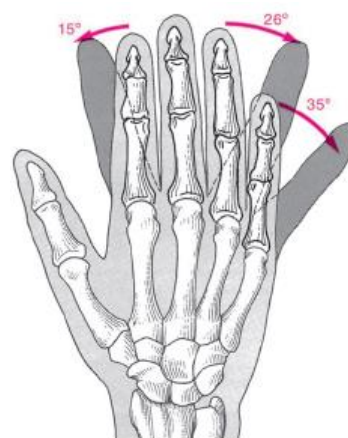


Figura 1-19: máxima abducción de los dedos de la mano. [17]

Circunducción

La combinación de los movimientos de flexión-extensión y abducción-aducción resulta en el movimiento de circunducción, que describe un cono con vértice en la articulación metacarpofalángica y base en la figura descrita por el extremo del dedo a analizar. El dedo

índice tiene mayor facilidad para realizar este movimiento de manera aislada, característica privilegiada que le otorgó su nombre.

Flexión-extensión interfalángica

Las articulaciones interfalángicas poseen un grado de libertad, ya que son articulaciones de un solo eje. Es por ello que sólo pueden realizar voluntariamente el movimiento de flexo-extensión, donde el verdadero movimiento funcional activo es la flexión ya que la extensión es simplemente el retorno a la posición de partida.

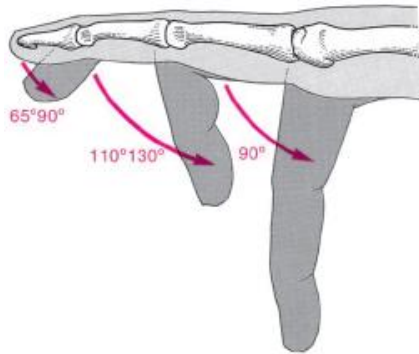


Figura 1-20: Movimiento de flexo-extensión de los dedos. [17]

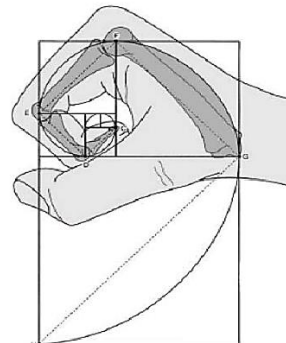


Figura 1-21: Representación de los "Rectángulos de oro" en el enrollamiento de la mano. [18]

Como se puede observar en la figura, la flexión de la falange distal sobre la media presenta una amplitud de 65 a 90°; la flexión de la falange media sobre la proximal puede alcanzar entre 110 y 130°; y, por último, la articulación metacarpofalángica descrita anteriormente, que representa la flexión de la falange proximal sobre la palma de la mano, alcanza casi los 90°. El valor de las amplitudes aumenta progresivamente del segundo al quinto dedo, como se describió en la articulación metacarpofalángica.

Si se considera la flexión de los cuatro segmentos de una cadena digital (un metacarpiano y tres falanges) puede constatarse que ésta se lleva a cabo por enrollamiento a modo de espiral logarítmica, construida en base a la encajadura sucesiva de "Rectángulos de Oro", cuya proporción entre su longitud y su anchura es de 1,618, el "Número de Oro".

El pulgar

Como se ha mencionado anteriormente, el pulgar desempeña una función indispensable para realizar diferentes tareas, en especial para movimientos precisos; sin él, la mano pierde la mayor parte de sus posibilidades. Esta característica se debe, por una parte, a su localización por delante tanto de la palma de la mano como de los otros dedos, y, por otra parte, a la organización tan peculiar de su columna articular y de sus motores musculares.

La columna osteoarticular del pulgar contiene cinco piezas óseas: el escafoides, el trapecio, el primer metacarpiano, la falange proximal y la falange distal. Estos huesos dan lugar a las cuatro articulaciones de la columna pulgar:

- 1) *Articulación trapezoescafoidea*: en este caso se esboza un movimiento de flexión de escasa amplitud.
- 2) *Articulación trapezometacarpiana*: dotada de dos grados de libertad.
- 3) *Articulación metacarpofalángica*: que posee dos grados de libertad.

4) *Articulación interfalángica*: con un único grado de libertad.

De esta manera, el pulgar posee un total de cinco grados de libertad, que le permiten realizar su función característica: la oposición del pulgar.

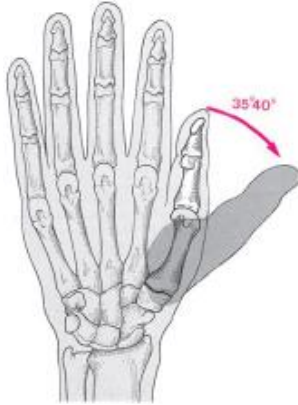


Figura 1-22: Movimiento de abducción-aducción del pulgar. [17]



Figura 1-23: Movimiento de flexión-extensión del pulgar. [17]



Figura 1-24: Movimiento de oposición del pulgar. [17]

El análisis mecánico completo del pulgar es muy complejo, por lo que sólo se mostrará que el dedo pulgar puede efectuar los siguientes movimientos principales:

- La flexión-extensión, en las articulaciones metacarpofalángicas e interfalángicas.
- La abducción-aducción separa o aproxima el dedo pulgar del eje de la mano; su amplitud es de 35 a 40°.

La oposición que, combinada con la flexión del dedo pulgar, lo conduce frente al dedo meñique. Su amplitud alcanza desde 45 a 60°. La reposición es el movimiento que devuelve al pulgar a su posición inicial.

La muñeca

La muñeca es el complejo articular que permite al ser humano adoptar la posición óptima para la prensión. Gracias a sus dos grados de libertad y a la pronosupinación, rotación del antebrazo sobre su eje longitudinal que agrega un tercer grado de libertad a la muñeca, la mano se puede orientar en cualquier ángulo para sujetar un objeto.

El núcleo central de la muñeca es el carpo, conjunto compuesto por ocho pequeños huesos explicado anteriormente. Se la llama complejo articular porque incluye, en realidad, a dos articulaciones móviles:

- *Articulación radiocarpiana*: une el antebrazo con el carpo, y se denomina así porque sólo el hueso radio se articula directamente con el carpo, diferente a lo que sucede con el cúbito.
- *Articulación mediocarpiana*: une las dos filas de los huesos del carpo.

Cualquier movimiento de la muñeca es el resultado del funcionamiento interdependiente de ambas articulaciones.

La muñeca permite realizar los movimientos de abducción y aducción; flexión y extensión; circunducción y una muy leve rotación.

Abducción y aducción

La amplitud de los movimientos se mide a partir de la posición anatómica que es cuando el eje de la mano se localiza en la prolongación del eje del antebrazo, representado por el tercer metacarpiano y el dedo medio. A partir de este eje, por un lado, la amplitud del movimiento de abducción o inclinación radial no sobrepasa los 15° . Por el otro lado, la amplitud de aducción o inclinación cubital es de 30 a 45° .

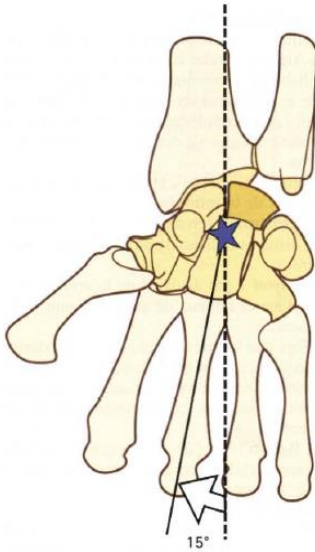


Figura 1-25: Máximo ángulo de inclinación radial. [14]

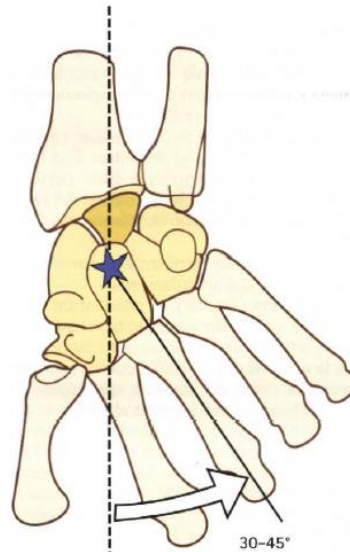


Figura 1-26: Máximo ángulo de inclinación cubital. [14]

Flexión y extensión

La amplitud de estos movimientos se mide también a partir de la posición anatómica que, para la vista que se necesita de este análisis, se construye por la muñeca alineada y la cara dorsal de la mano en la prolongación de la cara posterior del antebrazo.

La amplitud de la flexión activa es de 85° , mientras que la amplitud de la extensión, erróneamente llamada “flexión dorsal”, también es de 85° .

Cuando se realizan estos movimientos con la intervención de un elemento o superficie, se habla de amplitud de flexión pasiva, que alcanza los 95° , y amplitud de extensión pasiva, que puede alcanzar hasta 100° .

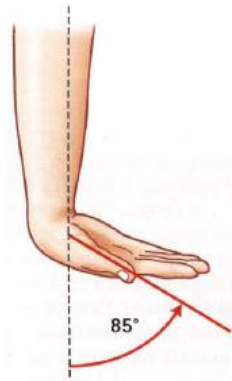


Figura 1-27: Amplitud de la flexión activa. [14]

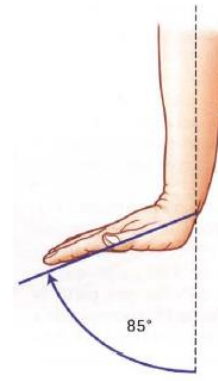


Figura 1-28: Amplitud de la extensión activa. [14]

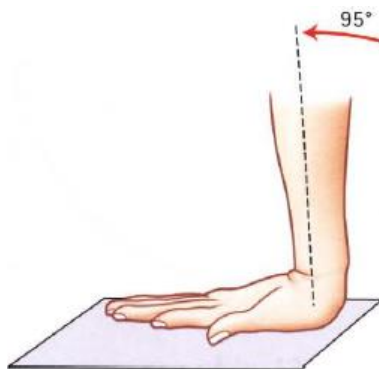


Figura 1-29: Amplitud de la flexión pasiva. [14]

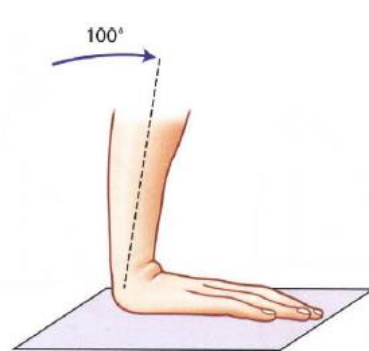


Figura 1-30: Amplitud de la extensión pasiva. [14]

Circunducción

El movimiento de circunducción es el resultante de la combinación de los movimientos de flexo-extensión con los movimientos de aducción-abducción, debido a que el movimiento se realiza simultáneamente en relación a los dos ejes de la articulación de la muñeca.

Cuando el movimiento de circunducción alcanza su máxima amplitud, el eje de la mano describe una superficie cónica en el espacio, denominado cono de circunducción. El vértice del cono se ubica en el centro de la muñeca y la base está determinada por la trayectoria que recorre la punta del dedo medio durante el movimiento de máxima circunducción.

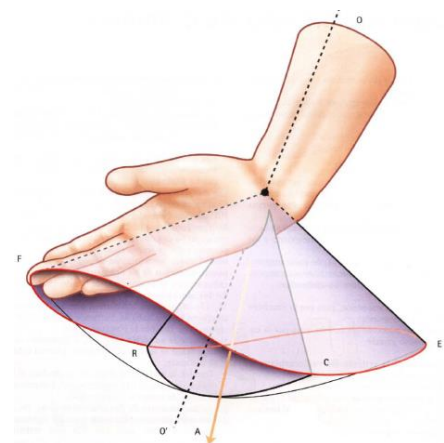


Figura 1-31: Cono que describe el movimiento de circunducción. [14]

El codo

El codo es la articulación intermedia del miembro superior que realiza la unión mecánica entre el brazo y el antebrazo. Junto con el hombro, que posibilita la orientación en los tres planos del espacio, permiten que la mano se desplace más o menos lejos del cuerpo.

El hombre puede llevarse los alimentos a la boca gracias a la flexión del codo. De hecho, la flexión de la articulación del codo es fundamental para la función de la alimentación, al punto

de que un individuo con ambos codos bloqueados en extensión o en semiextensión sería incapaz de alimentarse por sí solo.

La articulación del codo está compuesta a su vez por tres articulaciones: la articulación humerocubital, mediante la cual el húmero se une al cúbito; la articulación humerorradial, que une el húmero con el extremo superior del radio; y la articulación radiocubital proximal, que une los extremos superiores del radio y del cúbito. Sin embargo, anatómicamente esta división no puede sostenerse, ya que las tres articulaciones se confunden en una, presentando una sola cavidad articular.

Por otro lado, la fisiología permite distinguir dos funciones distintas:

- La flexo-extensión, que precisa de la actuación de la articulación humerocubital y la articulación humerorradial.
- La pronosupinación, que afecta a la articulación radiocubital proximal, y a la articulación radiocubital distal, que se encuentra en la mano.

Pronosupinación

La pronosupinación es el movimiento de rotación del antebrazo en torno a su eje longitudinal, que introduce un tercer grado de libertad en el complejo articular de la muñeca.

Este movimiento es indispensable para tres ámbitos específicos: la alimentación, el aseo y el trabajo. Por ejemplo, gracias a la pronosupinación, la mano puede desde sujetar una bandeja o un objeto, hasta realizar el movimiento de rotación cuando se utiliza un destornillador, cuyo eje coincide con el eje de pronosupinación.

La pronosupinación sólo se puede analizar cuando el codo se encuentra pegado al cuerpo y flexionado 90°. A partir de allí, la posición anatómica está determinada por la dirección del pulgar hacia arriba y de la palma de la mano hacia dentro y paralela al eje de simetría del cuerpo, caso en el cual no se presenta ni pronación ni supinación.

El movimiento de supinación se realiza cuando la palma de la mano se dirige hacia arriba con el pulgar hacia fuera, llegando a alcanzar una amplitud de 90°, situándose en el plano horizontal.

El movimiento de pronación se realiza cuando la palma de la mano se dirige hacia abajo y el pulgar hacia dentro, alcanzando un máximo de 85°.

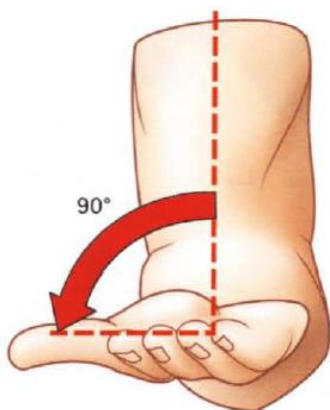


Figura 1-32: Mano en posición de supinación. [14]



Figura 1-33: Mano en posición anatómica. [14]

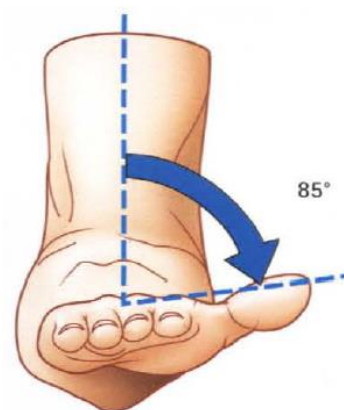


Figura 1-34: Mano en posición de pronación. [14]

La flexo-extensión

La posición anatómica para la medición de amplitudes se define como la posición en la cual el eje del antebrazo se localiza en la prolongación del eje del brazo.

La extensión es el movimiento que dirige el antebrazo hacia atrás. Como la posición anatómica corresponde a la extensión completa, por definición, no existe amplitud en el caso de la extensión del codo, excepto en algunos sujetos, como las mujeres y los niños, que pueden alcanzar una hiperextensión (hE) de 5 a 10°.

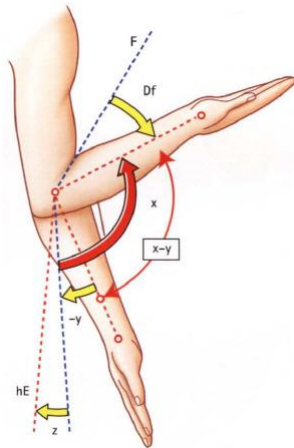


Figura 1-35: Esquema del brazo donde -y es el déficit de extensión; +x la flexión; Df es el déficit de flexión; z es la hiperextensión; y x-y es el recorrido útil de flexo-extensión. [14]

Sin embargo, la extensión relativa siempre es factible a partir de cualquier posición de flexión de codo. Cuando la extensión es incompleta se mide negativamente, siendo el caso en el cual el codo queda flexionado en un ángulo cuando en realidad se intenta extenderlo completamente.

La flexión es el movimiento que dirige el antebrazo hacia delante, de tal forma que la cara anterior del antebrazo contacta con la cara anterior del brazo. La amplitud de la flexión activa es de 140-145°. La amplitud de la flexión pasiva es de 160° y puede obtenerse cuando el evaluador empuja la muñeca hacia el hombro.

1.6.5. Anatomía funcional de la mano

La función de la extremidad superior, comparada con la extremidad inferior, es considerablemente más variada y compleja debido a que, casi en la totalidad de los casos, lleva consigo un movimiento en tres planos.

En general, la compleja organización anatómica de la mano se suele resumir en una única funcionalidad: la prensión. Sin embargo, esto no resume todas las posibilidades de acción, debido a que, además de la prensión, la mano también puede realizar percusiones, contacto, y expresión gestual. Asimismo, no existe un solo tipo de prensión, sino varios que se clasifican en tres grandes grupos: las presas propiamente dichas o pinzas, las presas con la gravedad y las presas con acción.

Tipos de prensión

Presas propiamente dichas o pinzas

Son aquellas donde no se necesita la participación de la gravedad. De acuerdo con los elementos de la mano que utilizan se clasifican en 3 grandes categorías: presas digitales, presas palmares y presas centradas.

Las **presas digitales** son aquellas que involucran solamente a los dedos, por lo que se subclasifican en dos grandes grupos según si utilizan dos o más dedos:

- **Presas bidigitales:** Constituyen la clásica pinza de dos dedos, generalmente pulgar-índice. Se clasifican según la oposición en:

Terminal

El pulgar y el dedo índice, o el dedo medio, se oponen por el extremo del pulpejo⁴ o por el borde de la uña para sujetar un objeto muy fino o de pequeño calibre, como una aguja. Es la prensión más fina y precisa.



Figura 1-36: Ejemplo de presa bidigital terminal. [14]

Subterminal

Es el tipo más común y permite sujetar objetos relativamente más gruesos como un lápiz o una hoja de papel entre la yema de los dedos.



Figura 1-37: Ejemplo de presa bidigital subterminal. [14]

Subtermolateral

La cara palmar del pulpejo del pulgar contacta con la cara externa de la primera falange del dedo índice. La presa es menos fina, aunque sigue siendo sólida.



Figura 1-38: Ejemplo de presa bidigital subtermolateral. [14]

Interdigital laterolateral

Es un tipo de prensión accesoria donde, generalmente, se sujeta un objeto pequeño entre el dedo índice y el medio, como es el caso de sujetar un cigarrillo.



Figura 1-39: Ejemplo de presa bidigital interdigital laterolateral. [14]

- **Presas pluridigitales:** Hacen intervenir al pulgar y a los otros dos, tres o cuatro dedos. Es una prensión más firme, pero con menos precisión, que se suele usar para sostener objetos más grandes. Según es la cantidad de dedos utilizados se subclasifican en:

Tridigitales

Son el tipo de prensión más usado. En ella, el pulpejo del dedo pulgar se opone al de los dedos índice y medio, dando lugar, desde la prensión utilizada para comer alimentos con la mano, hasta la sujeción del lápiz.



Figura 1-40: Ejemplo de presa tridigital. [14]

⁴ Parte carnosa y mollar de un miembro pequeño del cuerpo humano.

TetradigitalesTetradigital del pulpejo

El contacto se lleva a cabo por el pulpejo en el caso del pulgar, dedo índice y dedo medio, mientras que es lateral en el caso del dedo anular, cuya función es evitar que el objeto se escape hacia dentro.



Figura 1-41: Ejemplo de presa tetradigital del pulpejo. [14]

Tetradigital pulpejo-lateral

Como al desenroscar una tapa, el contacto del pulgar abarca el pulpejo y la cara palmar de la primera falange, así como sobre el dedo índice y el dedo medio. En cambio, es lateral y del pulpejo en la segunda falange del dedo anular que bloquea el objeto por dentro.



Figura 1-42: Ejemplo de presa tetradigital pulpejo-lateral. [14]

Tetradigital del pulpejo pulgotridigital

Como cuando se sostiene un pincel, el pulpejo del pulgar dirige y mantiene el objeto con fuerza contra el pulpejo del dedo índice, medio y anular casi en máxima extensión.



Figura 1-43: Ejemplo de presa tetradigital del pulpejo pulgodigital. [14]

PentadigitalesPentadigital del pulpejo

Similar al tetradigital del pulpejo, intervienen los 5 dedos, y sólo el quinto dedo efectúa un contacto lateral. Usado para objetos pequeños.



Figura 1-44: Ejemplo de presa pentadigital del pulpejo. [14]

Pentadigital pulpejo-lateral

Para objetos un poco más voluminosos, como una pelota de tenis. Los cuatro primeros dedos contactan con toda su cara palmar y envuelven el objeto casi totalmente, mientras que el dedo meñique evita mediante su cara externa cualquier posible desplazamiento del objeto.



Figura 1-45: Ejemplo de presa pentadigital pulpejo-lateral. [14]

Pentadigital comisural

Agarra objetos gruesos hemisféricos, como por ejemplo una computadora, envolviéndolo con la primera comisura. Por un lado, el pulgar y el dedo índice ampliamente extendidos y separados contactan con toda su cara palmar. Por el otro, el medio, anular y contactan a través de sus dos últimas falanges.



Figura 1-46: Ejemplo de presa pentadigital comisural. [14]

Pentadigital panorámica

Es usada para sostener grandes objetos planos, como las bandejas, y consiste en separar ampliamente los dedos para que con una leve flexión sean capaces de agarrar el borde del objeto.



Figura 1-47: Ejemplo de presa pentadigital panorámica. [14]

Por otro lado, las **presas palmares** hacen intervenir a los dedos y a la palma de la mano, y se clasifican en:

Digitoplar

Opone la palma de la mano a los cuatro últimos dedos. Es un tipo de presa accesoria pero utilizada con frecuencia cuando se maneja una palanca o sujeta un volante. El objeto, de poco diámetro, se sostiene entre los dedos flexionados y la palma de la mano, sin la participación del pulgar. Cuanto más importante es el diámetro del objeto, menos firmeza posee la presa.



Figura 1-48: Ejemplo de presa digitopalmar. [14]

Palmar con la totalidad de la mano

Es la prensión de fuerza para los objetos pesados y relativamente voluminosos. La mano se enrolla literalmente en torno a objetos cilíndricos o esféricos.

El volumen del objeto que se agarra condiciona la fuerza de la prensión, la cual es óptima cuando el pulgar puede contactar con el dedo índice y es tanto menos firme cuanto mayor es el diámetro.



Figura 1-49: Ejemplo de presa palmar con la totalidad de la mano. [14]

Por último, las **presas centradas** son aquellas en las cuales, además de intervenir los dedos y la palma de la mano, el dedo índice desempeña una función orientativa indispensable para dirigir un objeto de forma alargada, lo que genera una simetría en torno al eje longitudinal de la mano similar al eje del antebrazo. Como ejemplo de estas presas también llamadas direccionales se pueden mencionar la sujeción de una batuta de un director de orquesta, un destornillador, un tenedor o un cuchillo.



Figura 1-50: Ejemplo de presa centrada. [14]

Las presas de gravedad

En este tipo de presas, la mano sirve como soporte para diversos objetos que se encuentran sometidos a la fuerza de gravedad, como cuando se sujeta una bandeja. De esta forma, la acción de la gravedad es indispensable, ya que, sin ella, los objetos no serían capaces de mantenerse sobre la mano.

Si bien las presas de gravedad no poseen una clasificación determinada, las mismas se pueden diferenciar según sea la posición que adopta la mano para sostener el objeto. A continuación, se resumen algunas de ellas.

Con la palma de la mano horizontal y mirando hacia arriba, y los dedos extendidos, la mano sirve de soporte para una bandeja, por ejemplo. Si los dedos se flexionan, se obtiene una especie de trípode por debajo del objeto a sujetar.



Figura 1-51: Ejemplo de presa de gravedad. [14]

Gracias a la gravedad, la mano también puede comportarse como una cuchara que contiene granos, harina o líquidos. El hueco de la palma de la mano se prolonga con los dedos aducidos al máximo para evitar las posibles fugas, mientras que el pulgar cierra la cavidad al tomar contacto con el dedo índice.



Figura 1-52: Ejemplo de presa de gravedad. [14]

Cuando, similar al caso anterior, se aproximan las dos manos huecas en forma de dos semicuencos, se puede constituir una cavidad mucho más amplia, como es el gesto de ofrenda.



Figura 1-53: Ejemplo de presa de gravedad. [14]

Vale aclarar que la palma de la mano hacia arriba sólo es posible si se realiza el movimiento de supinación.

Por último, se encuentra la presa de una taza con tres dedos, donde la circunferencia de la taza queda sujeta entre dos topes, el pulgar y el dedo medio, además de un gancho formado por el dedo índice. Esta presa necesita una gran estabilidad de los dedos.



Figura 1-54: Ejemplo de presa de gravedad. [14]

Las presas con acción

Las presas que se han analizado hasta ahora son presas estáticas. Sin embargo, la mano también es capaz de realizar una acción a la vez que está sosteniendo un objeto, dando lugar a las denominadas presas con acción.

Algunas de estas acciones son elementales como son el caso de lanzar un trompo mediante una presa pulgar-índice tangencial, o también lanzar una bolita mediante un impulso brusco de la segunda falange del pulgar con la bolita sujeta previamente en la concavidad del dedo índice totalmente flexionado.



Figura 1-55: Ejemplo de presa con acción. [14]



Figura 1-56: Ejemplo de presa con acción. [14]

Existen otras acciones todavía más complejas donde el objeto sujeto por una parte de la mano sufre una acción que procede de otra parte. Si bien existen innumerables presas-acción donde la mano actúa sobre sí misma, a continuación se enumeran algunos ejemplos.



Figura 1-57: Ejemplo de presa con acción. [14]



Figura 1-58: Ejemplo de presa con acción. [14]



Figura 1-59: Ejemplo de presa con acción. [14]



Figura 1-60: Ejemplo de presa con acción. [14]

Durante la acción de encender un mechero, el mechero está sujeto en la concavidad del dedo índice y de los otros dedos mientras que el pulgar en forma de gancho actúa sobre el mecanismo.

Cuando se trata de apretar el resorte de un frasco de aerosol, el objeto está sujeto por una presa palmar y la flexión del dedo índice en forma de gancho es la que actúa sobre el tapón.

En el caso de la acción de cortar con tijeras, las anillas se ensartan una por el pulgar y la otra por el dedo medio o anular. Mientras que el primero realiza la acción motora para cerrar y abrir las tijeras, el segundo orienta la tijera, lo que constituye una presa-acción orientadora.

La mano izquierda de un violinista o guitarrista realiza una presa-acción móvil, en la cual el pulgar sujeta el mango del violín mientras que, aun desplazándose, sirve de contra-apoyo a la acción de los otros cuatro dedos que, al tocar las cuerdas, forman las notas.

Las percusiones, el contacto y la expresión gestual

Como se ha mencionado anteriormente, más allá de la facultad de la prensión, la mano humana también puede utilizarse para las percusiones, el contacto y la expresión gestual.

En primer lugar, la percusión hace referencia a la capacidad de golpear diversos objetos que posee nuestra mano. Además del típico golpe a puño cerrado o el chasquido de los dedos, otro ejemplo de esta acción es el hecho de escribir en el teclado del ordenador, cuando cada dedo se comporta como un martillo diminuto que golpea las teclas.



Figura 1-61: Ejemplo de percusión. [14]



Figura 1-62: Ejemplo de contacto. [14]



Figura 1-63: Ejemplo de expresión gestual. [14]

En segundo lugar, el contacto es una acción menos brusca que la percusión, que desempeña una función primordial en el contacto social y sobre todo afectivo. Varía desde un

apretón de manos hasta una caricia donde se requiere de una sensibilidad cutánea intacta para la mano.

Por último, la expresión gestual es un atributo irremplazable de la mano, sobre todo en el ámbito de la comunicación. Estas expresiones se suelen utilizar para acentuar el sentido de la expresión, aunque muchas veces el gesto sobrepasa a la palabra y se basta por sí solo para expresar sentimientos y situaciones. Además, más allá de la gesticulación característica de algunos países o regiones, la expresión conjunta de la mano y la cara constituye un lenguaje comprendido en todos los rincones del planeta, donde un puño alzado es signo de amenaza, el saludo con la mano ampliamente abierta es signo de paz, el dedo señalando es un signo de acusación, entre otras.

1.7. Mano mecánica actual

Actualmente, la asociación E-Nable propone una variedad de prótesis para miembro superior imprimibles en 3D, aunque la mayoría de los diseños requieren de una muñeca funcional capaz de doblarse al menos 30° y una palma de la mano completa o parcial.

Dentro de los diseños más fabricados por la comunidad para aquellos que tienen una muñeca funcional se encuentra la mano Phoenix Hand. En este dispositivo la flexión de la muñeca genera la apertura y cierre de la mano, por lo cual es importante que los destinatarios posean suficiente palma como para generar la palanca necesaria para realizar el movimiento. Esta mano funciona gracias a un tensor y unos cables que se conectan a los dedos de la mano. Para asegurar la extensión, también posee unos elásticos al dorso de los dedos que varían según sea el modelo de la prótesis.

Los componentes plásticos se obtienen mediante impresoras a fusión de plástico (FDM) en material PLA. Como se aprecia en la

Figura 1-64, además de dichas piezas son necesarias otras piezas adicionales que son incluidas en kits repartidos por la asociación, o que son de fácil acceso para los fabricantes de cualquier país. Dentro de estos elementos adicionales se encuentran: 1m de velcro, tornillos, elásticos, cables de nylon, espuma autoadhesiva y dedales de gel para la palma de los dedos.



Figura 1-64: nueva versión de la prótesis de mano Phoenix Hand v3. [19]



Figura 1-65: Pieza base (izquierda) y pieza a termoformar (derecha). [2]

Vale aclarar que la pieza que sujeta la prótesis al antebrazo del destinatario, donde se coloca el velcro, es obtenida bajo termofusión. Se calienta la pieza a termoformar en un contenedor de agua hirviendo y, pasados unos segundos, se saca con mucho cuidado y se la coloca sobre la pieza base para que tome el arco correspondiente.

Para las personas cuya discapacidad no les permite aplicar para la prótesis antes descrita, existe otro modelo como el brazo mecánico que posee Téó, la Phoenix Unlimbited Arm. El funcionamiento de esta mano es similar, con la diferencia que la palanca ahora es realizada con la articulación del codo en lugar de con la muñeca. En este caso, se utilizan técnicas de termofusión para la palma de la mano, el antebrazo, y la parte que se coloca en el brazo como interfaz de sujeción entre la prótesis y la persona.



Figura 1-66: Prótesis de mano Unlimbited Arm de la asociación E-Nable armada. [20]

1.8. Propuesta motorizada E-Nable

En el último tiempo, con el avance de las tecnologías, la asociación comenzó a estudiar algunas prótesis mioeléctricas. Surgió así la posibilidad de ofrecer las prótesis HackBerry, prótesis mioeléctricas con un diseño formidable realizado por el equipo japonés de Exii. Actualmente, e-Nable invita a sus colaboradores a animarse a fabricar este tipo de prótesis, incorporando progresivamente las mejoras que surjan, como puede ser un comando por voz o adaptar sus dimensiones al tamaño de un niño.



Figura 1-67: Prótesis de brazo Hackberry creada por Exii. [21]

Un usuario de la mano Hackberry es capaz de realizar diferentes gestos como son la apertura y cierre de la mano, el movimiento único del índice como así también el movimiento único del pulgar gracias a la presencia de 3 servomotores ubicados en el interior de la palma de la mano. La combinación de movimientos a ejecutar será seleccionada según los botones que se presionen en el dorso de la mano. Además, los botones en la muñeca permiten la rotación de la muñeca hacia delante y hacia atrás (ver Figura 1-68), como así también el giro de la mano hacia derecha e izquierda, sobre su propio eje (ver Figura 1-69).

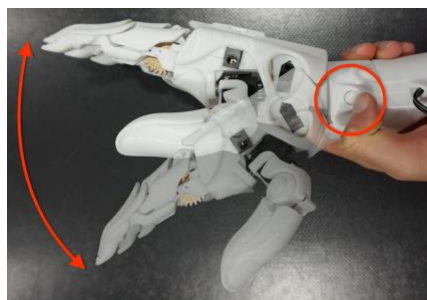


Figura 1-68: Indica rotación de la muñeca hacia delante y hacia atrás de la prótesis Hackberry. [21]

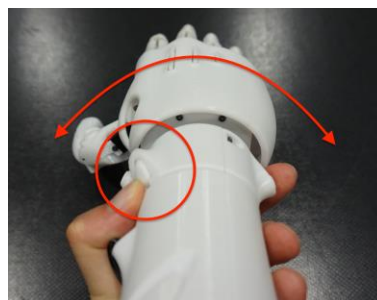


Figura 1-69: Indica rotación de la muñeca hacia delante y hacia atrás de la prótesis Hackberry. [21]

Una vez seleccionado el movimiento a realizar, un captor mioeléctrico ubicado sobre el bíceps de la persona es el encargado de enviar la señal de apertura o cierre, de acuerdo a la señal eléctrica captada por la contracción del músculo.

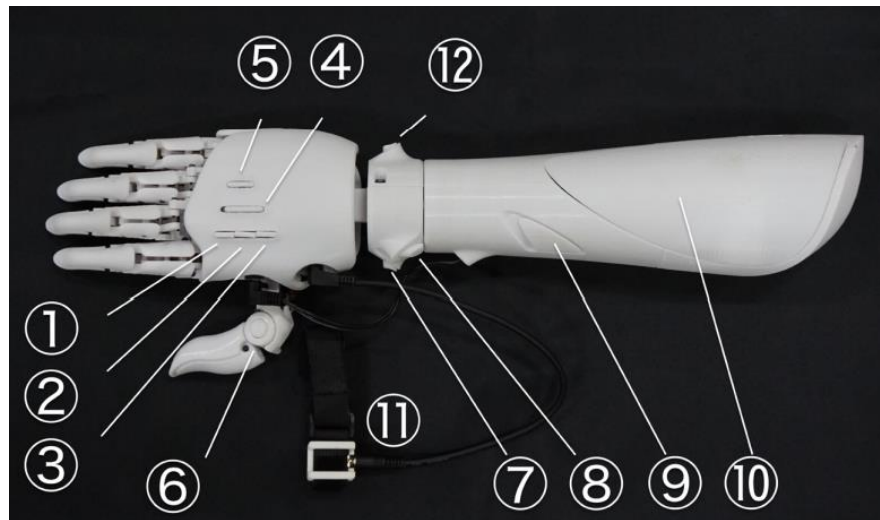


Figura 1-70: Mano Hackberry con indicación de varios de sus componentes. [21]

De acuerdo con la Figura 1-70, algunos de los componentes de la a prótesis Hackberry son:

1. Botón de calibración
2. Botón de extensión (no utilizado)
3. Botón de rotación del pulgar
4. Interruptor encendido / apagado
5. Botón de activación de los 3 dedos, comandados por un mismo servomotor.
6. Botón de encendido del pulgar.
7. Botón de regulación del ángulo de la muñeca.
8. Botón de rotación de la muñeca
9. Palanca de apertura de la tapa de la batería.
10. Tapa de la batería
11. Sensor de presión simple
12. Botón de conexión /desconexión de la muñeca.

2. Definición del problema

2.1. Motivación

El proyecto surge en el marco de un intercambio estudiantil con la universidad francesa ENIM, durante el cual, como proyecto del semestre, se presenta la posibilidad de responder a los requerimientos de la asociación E-Nable para realizar una prótesis motorizada para niños.

Se selecciona este proyecto debido a que muestra una cara diferente de la ingeniería donde mediante la mecánica se puede ayudar al prójimo de una forma directa. El impacto social en las comunidades y el gran aprendizaje que aporta el tema son el motor del proyecto.

2.2. Objetivos

El objetivo del proyecto es diseñar de forma funcional una prótesis robótica para niños de entre 9 y 11 años que posean una discapacidad motriz que afecte sólo a una mano y que, a pesar de no contar con el antebrazo, no los haya privado de la articulación del codo.

La prótesis debe ser capaz de realizar los movimientos de: presa bidigital subterminal, presa palmar, y las expresiones gestuales de pulgar hacia arriba, aplausos y saludo con la mano extendida. Además, para facilitar la adaptación y aumentar la confianza de los niños, el dispositivo deberá poseer una anatomía dimensional similar a la de la mano real y debe poder ser personalizado a gusto.

Por último, debe cumplir con los requerimientos característicos de la asociación E-Nable que son prótesis de bajo costo y fabricada mediante impresión 3D.

2.3. Diagrama de interacción

En el desarrollo de un producto es necesario tener en consideración cuáles son las funciones que el mismo va a tener a lo largo de toda su vida útil. Para ello se realiza un análisis funcional a través del cual se identifican las funciones de servicio que consideraran al punto de vista externo que engloba aquello que el usuario espera del producto. Una herramienta para analizar estas funciones es el diagrama de interacción que se constituye a partir del conjunto de elementos del entorno circundante al producto durante todo su ciclo de vida.

A continuación, se puede apreciar el diagrama de interacción realizado para la prótesis de mano robotizada para niños y una tabla que resume las funciones de servicio identificadas en el mismo.

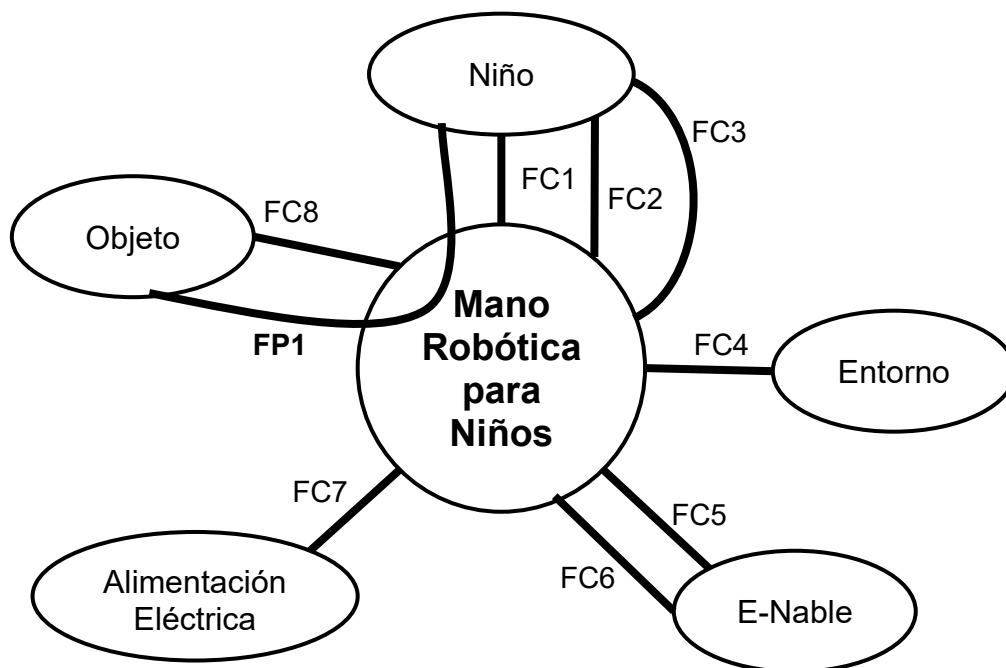


Figura 2-1: Diagrama de interacción de la prótesis de mano robotizada para niños.

Sigla	Expresión de función de servicio
FP1	Poder sostener y desplazar objetos.
FC1	Unir la prótesis al niño.
FC2	Tener dimensiones similares a las reales de un niño y ser personalizable.
FC3	Responder a la orden del niño.
FC4	Ser resistente a impactos con objetos y a la temperatura ambiente.
FC5	Tener un diseño simple y con precio accesible.
FC6	Tener movimientos de los dedos motorizados.
FC7	Adaptarse a la energía eléctrica de la región del usuario.
FC8	Sujetar objetos de diversas formas.

Tabla 2-1: Tabla de funciones solución de la prótesis de mano robotizada para niños.

2.4. Variables

A continuación, se listan las variables a considerar para el diseño de la prótesis.

- Grados de libertad de la prótesis: representa la cantidad de parámetros independientes que se necesitan para definir la posición de la mano. Este valor determina la cantidad de actuadores que poseerá el mecanismo.
- Movimiento de los dedos: siendo los dedos los miembros que dan lugar a los distintos tipos de prensión, es importante analizar si es necesario que cada dedo y/o cada falange se mueva de manera independiente. Por otro lado, también se debe determinar la forma de la cadena cinemática y sus enlaces.
- Movimiento del pulgar: la porción de la cadena cinemática que corresponde a este movimiento requiere especial atención debido a la existencia de la llamada oposición del pulgar, movimiento adicional a los demás dedos.
- Movimiento de la muñeca: se puede optar entre prescindir de esta articulación o replicarla en la mano robótica con la posibilidad de realizar los movimientos de

flexo-extensión, aducción-abducción y/o la pronosupinación que, si bien es del codo, puede simplificarse como un giro de la muñeca sobre su propio eje.

- Movimiento del codo: este enlace en la prótesis debe diseñarse considerando que el niño posee dicha articulación y un pequeño muñón en el antebrazo.
- Accionamiento: hace referencia a la forma en la cual se recibirá la orden para ejecutar los movimientos deseados. Cada grado de libertad podrá ser comandado de diferente manera.
- Facilidad de colocación: es importante que sea sencilla la instalación de la prótesis al cuerpo humano ya que, al tratarse de una prótesis externa, el niño no la usará todo el tiempo, además de quitarla para su recarga.
- Área de contacto: desde la sujeción de la prótesis hasta el fin del brazo del niño, se debe asegurar que la superficie de contacto entre el material de la prótesis y el cuerpo del niño sea cómoda y no lo lastime.
- Costo: es importante considerar esta variable debido a que, además de ser un requerimiento de la asociación, un bajo costo hace que el producto sea accesible a un mayor número de niños.
- Personalización: para mayor alegría y mejor inserción social del niño, sumados al carisma de la asociación, las prótesis deben poder modificarse en color y estética, según los deseos de la persona, dando lugar a prótesis personalizadas de Iron Man, por ejemplo. Este cambio en el diseño debe realizarse rápidamente.
- Material: se debe definir el tipo de plástico en el cual se deberá imprimir la mano robótica.
- Peso objeto: corresponde al peso de los objetos que va ser capaz de elevar el niño con la mano artificial. De acuerdo con el análisis de la resistencia de la solución planteada se podrá establecer un límite máximo a este valor, considerando que el usuario debe ser capaz de agarrar la mayor cantidad de los elementos más utilizados.
- Grado de protección: considerando que el usuario será un niño, es importante que los componentes electrónicos estén protegidos contra un leve derrame de agua o arena.

2.5. Condiciones límites

En esta sección se listan las condiciones fijas que el producto diseñado debe cumplir.

- Anatomía: la prótesis debe ser estructuralmente similar a la mano humana, manteniendo especialmente la cantidad de articulaciones que se posee.
- Fuente de energía: el dispositivo que alimente a la prótesis robótica debe poseer una autonomía tal que le permita al niño utilizarla por al menos 5hs.
- Método de fabricación: siguiendo con los requerimientos de E-Nable, la prótesis debe ser realizada mediante impresión 3D, proceso sencillo, rápido y económico.

- Vida útil: por el rango etario del alcance del proyecto, el mecanismo deberá tener una vida útil de al menos 2 años.
- Golpes: el dispositivo debe tener una resistencia mínima al impacto a causa de los golpes que pueda recibir cuando el niño choca la prótesis, sin intención, contra algunos objetos.
- Dimensiones máximas: existe un valor límite en las dimensiones que puede tener la prótesis a partir de las cuales el niño podrá utilizar el diseño de la mano adulta.
- Peso máximo: para evitar el cansancio del niño por el uso de la prótesis dada su limitación en la fuerza muscular, el mecanismo no podrá sobrepasar el peso de 0,5 Kg.
- Seguridad: ante todo se debe preservar la salud del niño, haciendo especial cuidado en esfuerzos excesivos y en los componentes eléctricos.
- Sobrepresión: el dispositivo no debe dañar a los objetos que se sujetarán por sobrepresión.
- Impacto ambiental: la selección de componentes y materiales debe considerar el cuidado del medio ambiente y por lo tanto tener un reducido impacto ambiental a lo largo de su vida útil.

3. Propuestas de soluciones

3.1. Diseños básicos

En este apartado se presentarán diversas soluciones propuestas para los diferentes componentes de la prótesis a realizar, con una breve descripción de las mismas.

En algunos apartados, las propuestas incluyen diseños para piezas diferentes que pueden ser combinadas con otras soluciones. Por ejemplo, la propuesta n°1 del brazo puede ser combinada con la n°2 del antebrazo y viceversa.

3.1.1. Brazo y antebrazo

En todas las opciones de diseño se considera que el niño mantiene la movilidad del codo por lo que sólo se considera un pivote que le otorga al niño la posibilidad de comandarlo con su propia articulación, siempre y cuando la porción del antebrazo del niño tome contacto con la prótesis para generar la palanca necesaria para realizar el movimiento.

Además, si bien no aparece en los esquemas propuestos, para todos los casos del antebrazo se deberá tomar en consideración que la batería a utilizar deberá ser alojada de alguna manera en ese espacio.

Propuesta 1

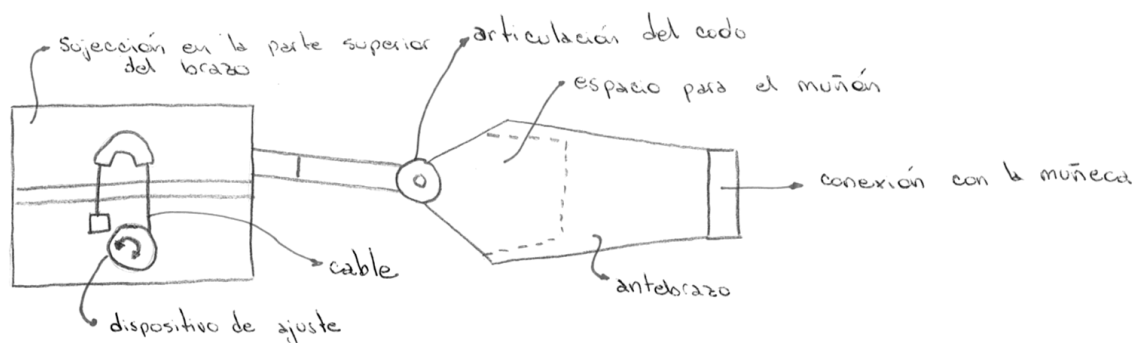


Figura 3-1: Croquis de Propuesta 1 para brazo y antebrazo.

Se propone un brazo, que es la interfaz de contacto con el niño, que sea fijo pero regulable mediante un dispositivo de ajuste en el cual, con un cable y una especie de polea, el giro de la polea acorta la distancia entre ambas partes al tensionar el cable.

Como desventaja de este sistema es que toda el área de contacto de la prótesis con el niño puede llegar a generarle molestias al ser tan robusto y poco flexible.

En esta propuesta en particular el antebrazo cuenta con un espacio para el muñón dentro de la pieza que simula un antebrazo real completando desde la circunferencia posterior al codo hasta la de la muñeca.

Propuesta 2

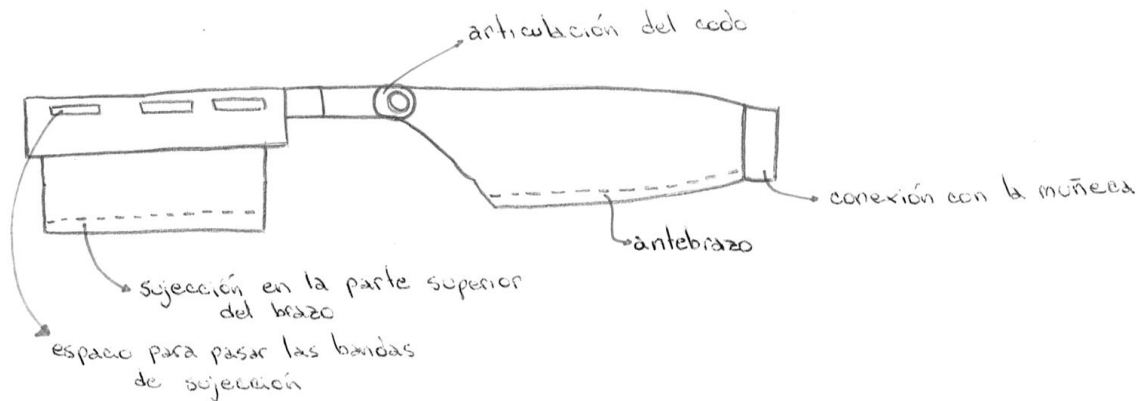


Figura 3-2: Croquis de Propuesta 2 para brazo y antebrazo.

Tomando de referencia el diseño actual de la mano que entrega la asociación e-Nable, se propone mantener la idea de sujeción del brazo mediante una media caña de la prótesis sumado a unas bandas de sujeción, que podrían ser cintas de velcro. Se propone que en lugar de realizar la impresión 3D y luego termoformar la pieza, se utilice directamente un material flexible que fácilmente pueda adaptarse a la forma del brazo del niño. En este último caso será necesario mantener de plásticos más duros al menos unas guías o columnas que se contacten con la articulación del codo.

En este caso, además se propone que el antebrazo no posea una circunferencia completa, sino que sea abierto, causando que no sea necesario dejar un espacio para el muñón porque ya estaría generado y en contacto con la prótesis. Si bien no se aprecia en la Figura 3-2, el muñón tendrá que estar sujetado, al menos con una cinta de velcro, a la parte del antebrazo de la prótesis.

Propuesta 3

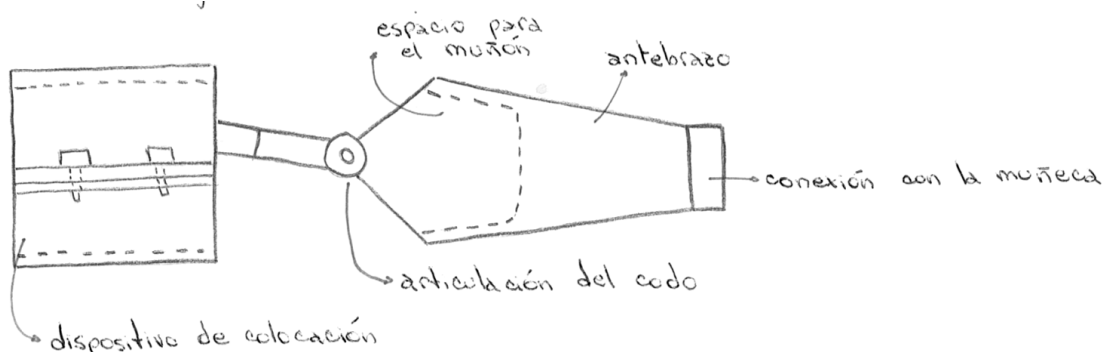


Figura 3-3: Croquis de Propuesta 3 para brazo y antebrazo.

El llamado dispositivo de colocación o interfaz niño-prótesis, es en este caso un diseño completamente fijo que se une mediante el uso de unos pernos tipo clip, cuyo extremo final tiene la posibilidad de abrirse generando la traba necesaria para mantenerse en la posición

debida. Este diseño tiene como desventajas que posee sólo una posición y no una regulación a la medida del niño, por lo que además de generar una mayor área de contacto y molestia en el área de contacto, tampoco podrá adaptarse bien a su forma, quedando fácilmente en una condición de apriete o de mucha holgura.

Para el antebrazo se mantiene la misma idea que la de la Propuesta 1.

Propuesta 4

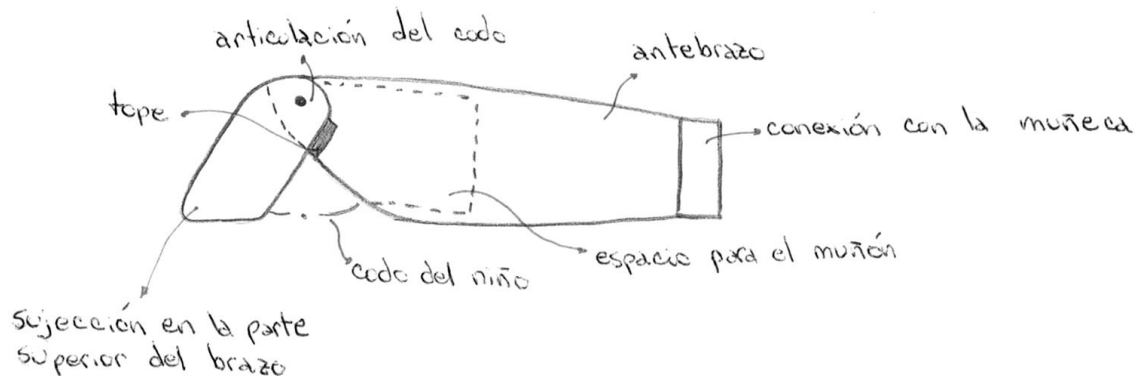


Figura 3-4: Croquis de Propuesta 4 para brazo y antebrazo.

En este caso, la sujeción de la prótesis es mucho menor que en las propuestas anteriores. Jugando con las dimensiones del niño, se diseña que la sujeción en el brazo sea apenas por encima del codo, con un cierto grado de apriete para que sea cómodo pero que igual la prótesis quede sujeta, que en parte se logrará gracias a la propia articulación del codo que obra como tope. Para evitar que la persona haga una sobre-extensión se puede poner un tope en el antebrazo que impida el giro del codo a partir de determinada posición angular.

Para el antebrazo se mantiene la misma idea que la de la Propuesta 1.

Propuesta 5

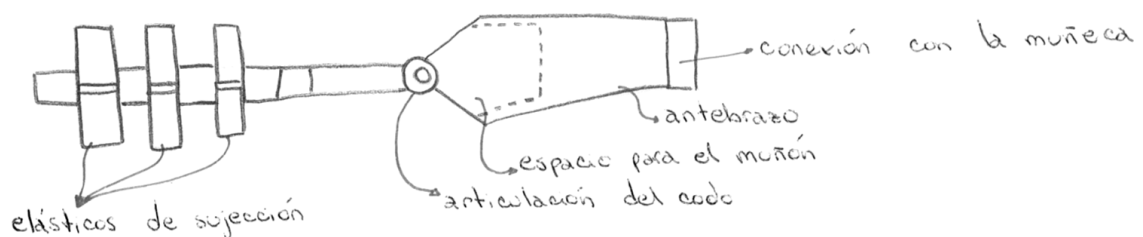


Figura 3-5: Croquis de Propuesta 5 para brazo y antebrazo.

Siguiendo los lineamientos de la Propuesta 2, se podría mantener una espina, columna o eje principal que va a ambos lados del brazo de un material duro, para luego unirlos con elásticos de sujeción o incluso velcros que rodean toda la circunferencia del brazo. En este caso puede ser difícil que ambos ejes se mantengan paralelos, generando movimientos y malestar en el niño ya que estos tienen contacto con su brazo.

Para el antebrazo se mantiene la misma idea que la de la Propuesta 1.

3.1.2. Muñeca

Los diseños propuestos para la muñeca varían de acuerdo a los movimientos que la misma va a ser capaz de hacer. Se pretende que la misma sea capaz de realizar la mayor cantidad de movimientos, supliendo especialmente la flexo-extensión de la muñeca y la pronosupinación del antebrazo.

Vale la pena aclarar que la solución definitiva puede basarse en una combinación de más de una de las opciones propuestas en esta etapa de ingeniería básica o conceptual. Es por ello que la mayoría de las figuras de este apartado, donde especifican muñeca puede ser una parte de la muñeca o el mismo antebrazo.

Propuesta 1

Esta propuesta consiste en fijar la mano al antebrazo de forma fija, sin permitir la movilidad relativa entre ambas piezas. Esta unión se realiza mediante pernos tipo clips como los mencionados anteriormente. Su desventaja es que la misma limita las funciones capaces que puede realizar la prótesis.

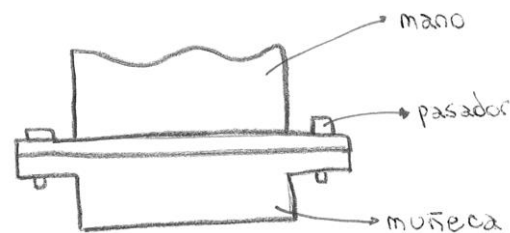


Figura 3-6: Croquis de Propuesta 1 para la muñeca.

Propuesta 2

Se trata de una unión que permite sólo el movimiento de flexión, en el cual el niño debe posicionar la muñeca de la forma que más le quede cómodo, teniendo en consideración que la posición se mantiene sólo por la fricción entre los tornillos y las piezas. Un croquis de la idea se puede apreciar en la Figura 3-7.

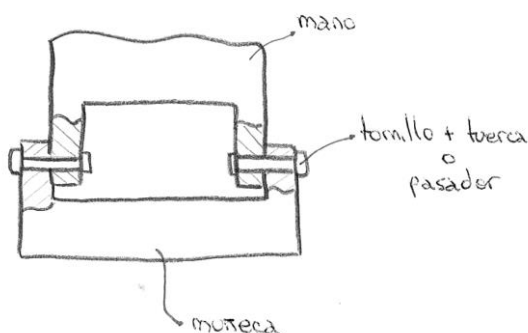


Figura 3-7: Croquis de Propuesta 2 para la muñeca.

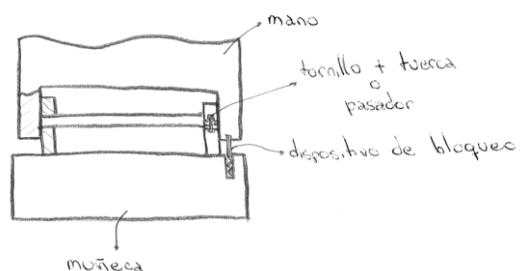


Figura 3-8: Croquis de Propuesta 3 para la muñeca.

Propuesta 3

Como se aprecia en la Figura 3-8, esta es una solución muy similar a la Propuesta 2 en la cual la flexo-extensión se da gracias a un pasador, en este caso completo, que permite el giro de la unión entre la mano y la muñeca. En este caso se agrega un dispositivo de bloqueo tipo botón o traba para que no sea sólo la fricción la que mantiene a la muñeca en la posición deseada.

Propuesta 4

En línea con las propuestas descriptas anteriormente, se propone el uso de una tuerca mariposa para que sea más fácil la regulación de parte del niño de la fricción entre las piezas que bloquea el giro de esta unión entre la mano y la muñeca o el antebrazo.

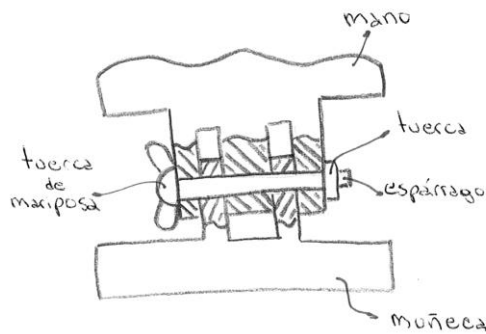


Figura 3-9: Croquis de Propuesta 4 para la muñeca.

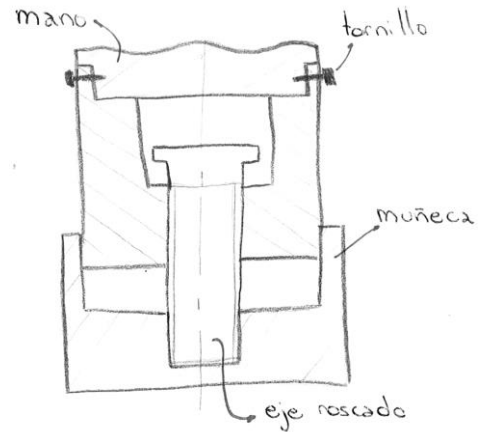


Figura 3-10: Croquis de Propuesta 5 para la muñeca.

Propuesta 5

Una posibilidad para la realización del movimiento de la pronosupinación es el uso de un eje roscado, en donde la muñeca también es roscada y lo mismo pasa con una pieza intermedia que va unida a la mano. Así el niño tendría la posibilidad de controlar el giro de la mano y mantenerlo en la posición deseada. Según sea el ángulo en el que se esté sujetando un objeto con la prótesis, existirá algún leve giro generado por el agregado del peso del objeto.

Propuesta 6

El antebrazo y la muñeca o la mano pueden estar conectados entre sí a través del uso de un motor, que permitiría un movimiento controlado de la articulación. En contraposición, el uso del motor agrega un valor adicional en el costo de la prótesis y reduce el espacio disponible para la instalación de otros componentes electrónicos necesarios.

Propuesta 7

Siguiendo los lineamientos del diseño de la prótesis para adulto Hackberry de Exii, en esta posibilidad el antebrazo se une a la muñeca o directamente a la mano a través de un sistema con bolas de acero y tornillos que permiten el giro relativo entre ambas partes, dando lugar a la ya conocida pronosupinación. En este caso, a través de un botón con otra bola de acero y un resorte, se consigue que al apretarlo se libere la presión y se puedan girar las piezas de acuerdo a las necesidades del usuario.

Propuesta 8

Similar a lo descrito en la propuesta anterior, esta propuesta hace uso de unos engranajes que giran sobre su propio eje y sobre unos dientes exteriores e interiores,

similar al sistema conocido como tren epicycloidal. La desventaja que se puede mencionar es que la fabricación de engranajes a través de la impresión 3D es más complicada que la compra directa de esferas de acero.

Propuesta 9

Partiendo de la base de las últimas dos alternativas, se propone un sistema similar al de la Propuesta 7 pero donde las bolas de acero giran sobre las pistas en otro sentido. Ver Figura 3-14.

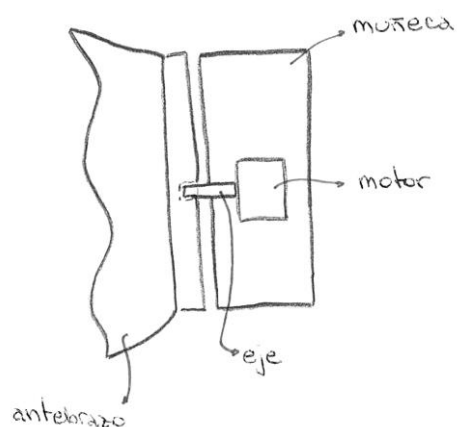


Figura 3-11: Croquis de Propuesta 6 para la muñeca.

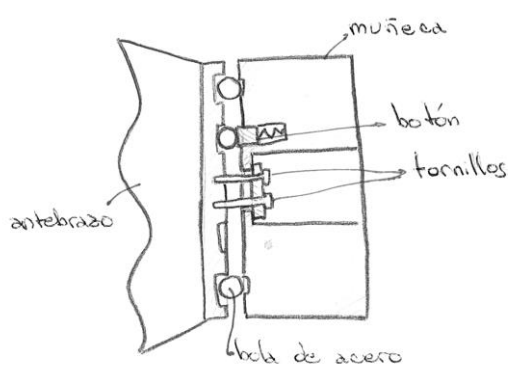


Figura 3-12: Croquis de Propuesta 7 para la muñeca.

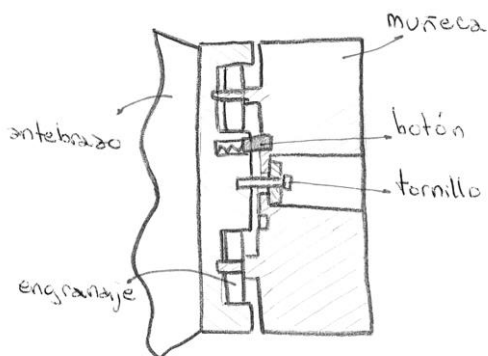


Figura 3-13: Croquis de Propuesta 8 para la muñeca.

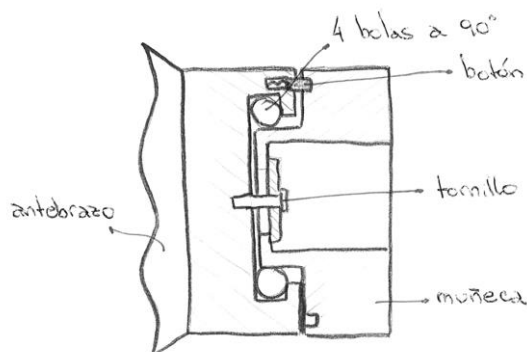


Figura 3-14: Croquis de Propuesta 9 para la muñeca.

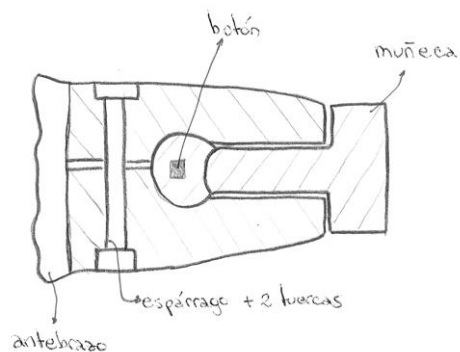


Figura 3-15: Croquis de Propuesta 10 para la muñeca.

Propuesta 10

En este caso, antebrazo y muñeca o mano son unidos mediante una rótula, agregándose una pieza intermedia que, partida al medio, se uno mediante un espárrago con dos tuercas y genera la pista sobre la cuál va a girar la rótula mencionada anteriormente. Se propone tener un botón a través del cual se pueda liberar la fricción sobre la rótula y así poder posicionar la mano de la manera que el usuario lo requiera. Este posicionamiento debe ser realizado por el niño de manera manual.

Propuesta 11

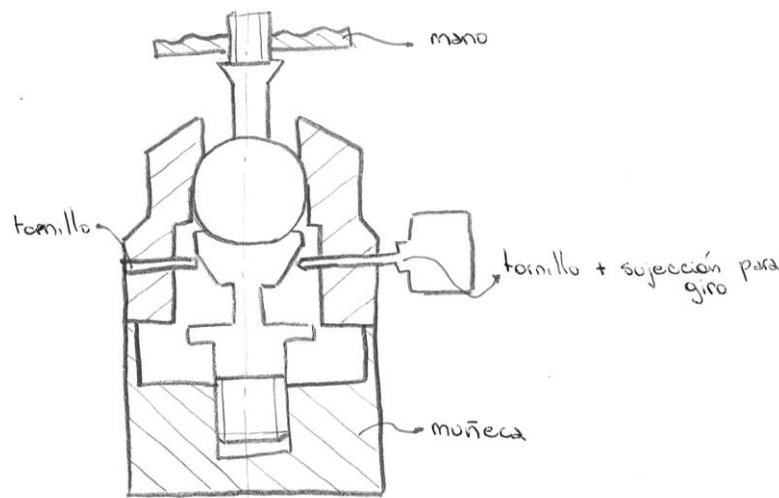


Figura 3-16: Croquis de Propuesta 11 para la muñeca.

Con la idea principal de la rótula como la de la propuesta anterior, en este caso se considera que hay una pieza intermedia roscada que funciona como base para la rótula, y que a la vez se une a la muñeca o al antebrazo. La regulación de la fricción que permite el movimiento o la inmovilidad de la mano viene dado por un tornillo que al acercarse genera que se aumente la presión sobre la esfera de la rótula.

Asimismo, se muestra que la unión entre la mano y la rótula puede hacerse mediante el uso de una unión roscada. Esto puede llegar a traer problemas a la hora que el niño lo utilice ya que puede aflojarse cuando intente hacer el posicionamiento de la mano completa al tomarla una vez liberada la rótula.

Propuesta 12

Otra propuesta para la rótula es que existan dos piezas intermedias, una que va fija y unida al antebrazo mediante un espárrago y tuercas, y otra móvil que se apoya sobre el antebrazo (muñeca en la Figura 3-17) dándole la flexibilidad del desplazamiento, permitiendo que la misma suba al desplazarse un tornillo a su lado, aumentando así la fricción sobre la rótula e impidiendo el giro de la misma.

En la unión de la rótula con la mano se propone una unión fija mediante tornillos o pasadores tipo clips que fueron descritos anteriormente.

Se puede concluir que el posicionamiento de la mano será realizado por el usuario con su otra mano, y a su vez le permitirá replicar los movimientos de flexo-extensión, abducción-aducción y pronosupinación de una mano real.

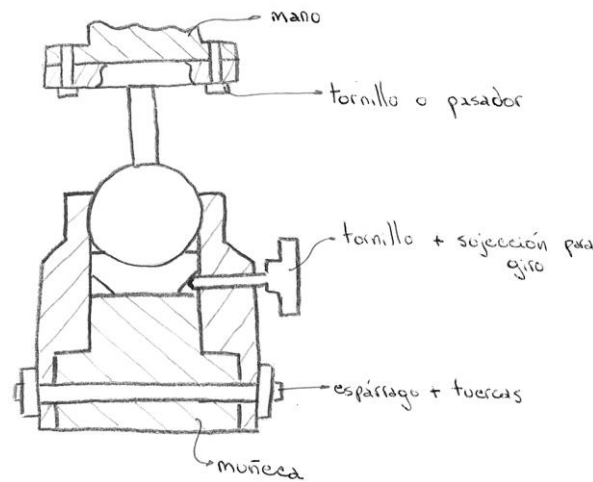


Figura 3-17: Croquis de Propuesta 12 para la muñeca.

Propuesta 13

Continuando con el uso de la rótula, este diseño consigue realizar la fricción necesaria para impedir el movimiento de la rótula a través de una pieza roscada que se une al antebrazo y abraza a la rótula.

Asimismo, se utiliza un pasador de tipo clip para conectar la rótula a la palma de la mano.

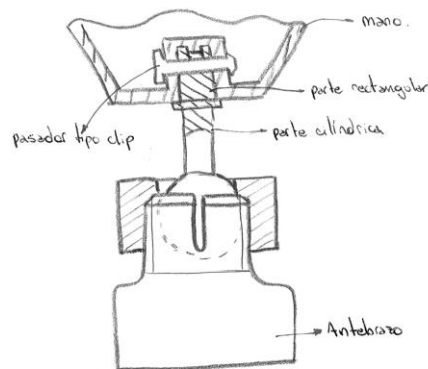


Figura 3-18: Croquis de Propuesta 13 para la muñeca.

3.1.3. Rótula

En el caso que se decida utilizar una rótula para la muñeca de la prótesis, es necesario considerar que la misma no es recomendable imprimirla en una sola pieza en el caso de impresoras 3D típicas FDM debido a que las capas de impresión serán paralelas a la sollicitación de la pieza. Es por ello que se sugieren dos diferentes opciones para poder imprimir a dicha pieza en dos partes y luego unir las. Por un lado, se propone utilizar pasadores tipo clip que unan ambas piezas. Por el otro, se propone directamente hacer uso de alguno de los pegamentos de plásticos que existen en el mercado.

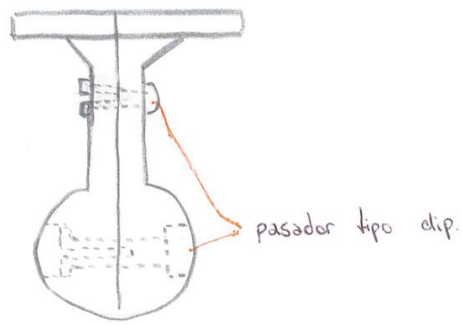


Figura 3-19: Croquis de unión de rótula mediante pasadores tipo clip.

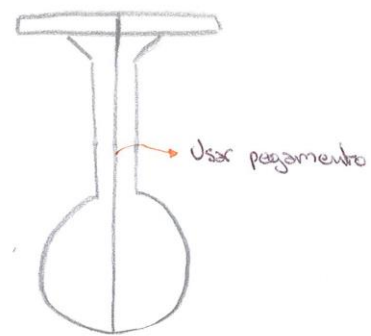


Figura 3-20: Croquis de unión de rótula mediante uso de pegamento.

Asimismo, en el caso de utilizar una rótula es necesario considerar cuales son las opciones disponibles para realizar la unión con la palma de la mano. A continuación, se presentan algunas propuestas que representan cómo realizar dicha conexión diferentes a las que fueron mencionadas anteriormente.

Propuesta 1

La primera opción es fijar la mano a la rótula con un tornillo, aunque la misma no es fácilmente compatible con lo descrito anteriormente en la fabricación en dos piezas de la rótula.

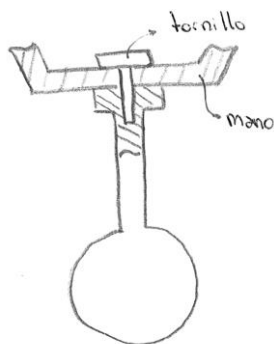


Figura 3-21: Croquis de Propuesta 1 para la unión rótula-mano.

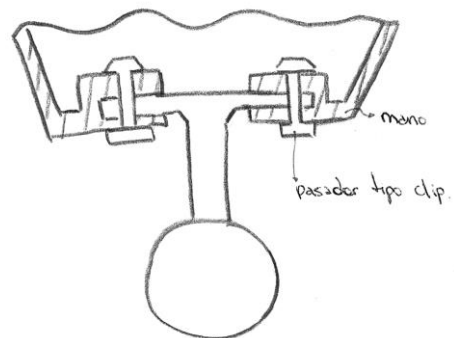


Figura 3-22: Croquis de Propuesta 2 para la unión rótula-mano.

Propuesta 2

La segunda opción es unir la rótula en su parte superior a través de un par de pasadores tipo clip que se colocan paralelos al eje de la rótula. De esta forma se pueden ubicar de manera que sean compatibles con la fabricación en dos partes de la propia rótula.

Propuesta 3

Finalmente, la tercera opción consiste en que la parte superior de la rótula coincida con un agujero hecho en la palma de la mano, para que luego, al taparse la palma, también quede fijada totalmente la rótula a la palma de la mano. En este caso, las dos partes de la mano será unidas mediante el uso de tornillos en distintos puntos de la misma.

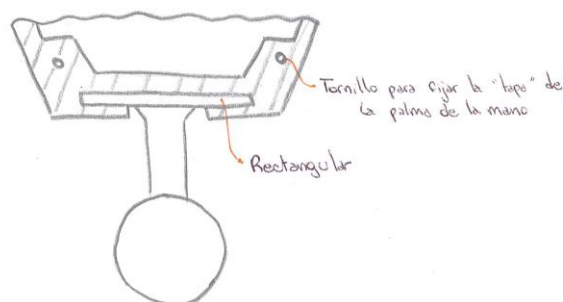


Figura 3-23: Croquis de Propuesta 3 para la unión rótula-mano.

3.1.4. Palma de la mano

La palma de la mano es una pieza muy crítica debido a que se relaciona con los 5 dedos, la muñeca y, a su vez, también contendrá a gran parte de los componentes electrónicos. En esta sección, se muestran dos ideas principales básicas de como pensar a esta pieza en particular.

Propuesta 1

Por un lado, se propone que el diseño de la palma de la mano sea de acuerdo a la geometría deseada y que luego simplemente se añada una especie de cajón con todos los componentes electrónicos que requerirán para realizar los movimientos.

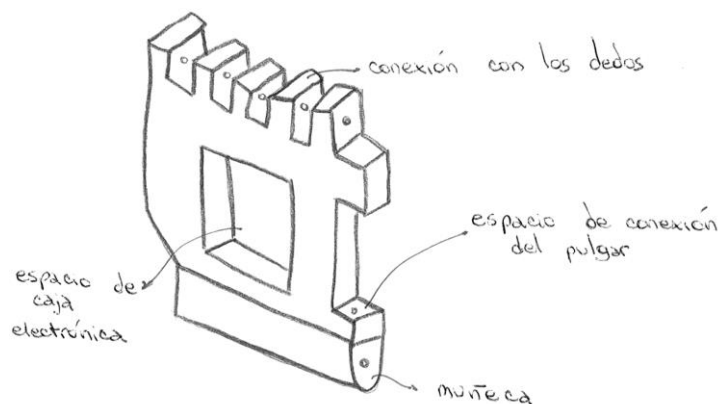


Figura 3-24: Croquis de Propuesta 1 para la palma de la mano.

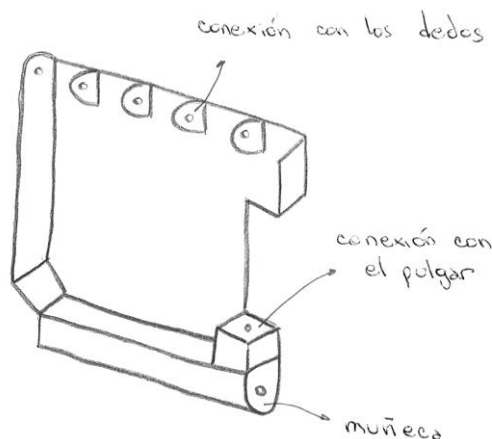


Figura 3-25: Croquis de Propuesta 2 para la palma de la mano.

Propuesta 2

Por otra parte, se propone que la palma de la mano sea una pieza completamente hueca en la cual se puedan montar una cierta cantidad de componentes electrónicos. La misma deberá contener los resaltes necesarios para poder conectar los cinco dedos de las manos.

3.1.5. Dedos

Una de las condiciones límites del proyecto hace referencia a que se debe mantener la anatomía general del miembro superior. Para lograrlo, en relación a los dedos índice, medio, anular y meñique, se puede considerar realizar las tres falanges de manera independientes o que las falanges distal y media sean una sola pieza.

Propuesta 1

Las falanges de los dedos tienen entre sí todas uniones de tipo pivote. Para que se muevan de manera conjunta y secuencial en la flexión, se propone utilizar un cable que estará conectado a un motor y generará la tensión necesaria para obtener el movimiento deseado. Para que la extensión de los dedos no dependa sólo de la ausencia de tensión del cable, se propone conectar las falanges mediante el uso de resortes que devuelvan a los dedos a la posición inicial previa a la flexión.

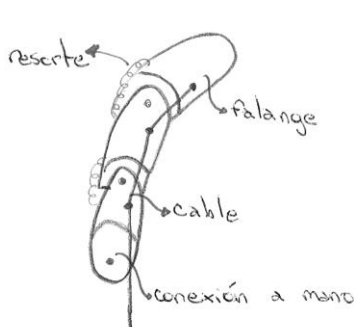


Figura 3-26: Croquis de Propuesta 1 para los dedos.

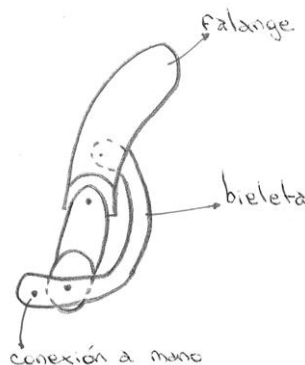


Figura 3-27: Croquis de Propuesta 2 para los dedos.

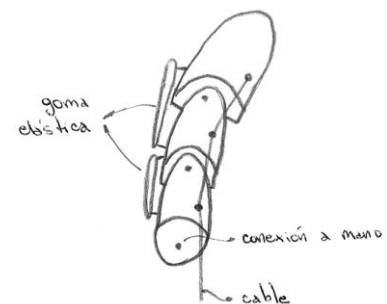


Figura 3-28: Croquis de Propuesta 3 para los dedos.

Propuesta 2

Con sólo dos falanges representadas en este caso, se propone utilizar un mecanismo de tipo biela que genere la flexo-extensión de los dedos comandada con un motor a través de la transmisión que se considere para el caso.

Propuesta 3

En línea con el diseño actual de la asociación e-Nable, se propone mantener el sistema de cables para la flexión y de gomas elásticas para la extensión, siendo esta última la única diferencia con la Propuesta 1.

3.1.6. Pulgar

En el diseño del pulgar se debe tener en cuenta si es que se quiere mantener las dos falanges o mantener una única pieza que tenga las dos falanges del pulgar. En ambos casos es posible realizar los movimientos requeridos en el objetivo del proyecto. En el caso en el que se mantengan las dos falanges se puede optar por una flexión por cables o simplemente que el usuario lo acomode de forma manual.



Figura 3-29: Croquis de pulgar con dos falanges comandado mediante cable.



Figura 3-30: Croquis de pulgar de una sola pieza.

Otro movimiento necesario alcanzar en el pulgar es la oposición del mismo. Si esto se requiere que sea comandado, se proponen algunas formas en las cuales se pueden montar los motores para obtener el movimiento deseado.

La primera opción pone al motor en el interior de la palma de la mano, y mediante una transmisión por engranajes, se genera la oposición del pulgar.

En la segunda opción, el motor se monta sobre el pulgar y se fija a la palma de la mano. La desventaja de este diseño es que el pulgar quedará de grandes dimensiones.

Finalmente, la tercera opción propone un motor en línea con el pulgar, también montado en el interior de la mano.



Figura 3-31: Croquis de opción 1 para movimiento de oposición del pulgar.



Figura 3-32: Croquis de opción 2 para movimiento de oposición del pulgar.



Figura 3-33: Croquis de opción 3 para movimiento de oposición del pulgar.

3.1.7. Mecanismos diferenciales⁵

Se llama mecanismo diferencial a aquel que se equilibra cuando las fuerzas externas que actúan sobre el mismo no son iguales. En el diseño de las prótesis subactuados se los suele utilizar a menudo ya que cuando un dedo toca un objeto y se detiene, los otros dedos podrían continuar cerrando y envolviendo el objeto hasta que queden todos en contacto.

Básica



Figura 3-34: Croquis de propuesta básica para el diseño del mecanismo diferencial.

El caso más básico que se puede encontrar de un mecanismo diferencial es aquel que utiliza la actual mano de la asociación e-Nable. En este caso, un cable une a un par de dedos, pasando por un punto fijo. Esto genera que, al doblarse la mano, cuando un dedo toma contacto con el objeto, el cable puede seguir tensionándose un poco más, causando que el otro dedo pueda acercarse aún más al objeto que se está intentando sujetar.

En el caso de la prótesis e-Nable mecánica, se utilizan 3 mecanismos diferenciales, uniendo índice con medio, meñique con anular, y dejando sólo al pulgar.

Basado en palanca

En el mecanismo diferencial basado en palanca, la fuerza F_i de entrada actúa sobre un punto pivote y genera dos fuerzas de salida F_1 y F_2 . Mientras que las cargas externas sean iguales, la palanca no se inclinará; sin embargo, cuando las cargas externas no estén balanceadas, la palanca estará inclinada y el lado con mayor carga se detendrá mientras que el lado con la carga más pequeña continuará moviéndose.

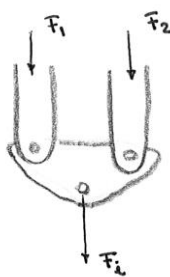


Figura 3-35: Croquis de propuesta basada en palanca para el diseño del mecanismo diferencial.

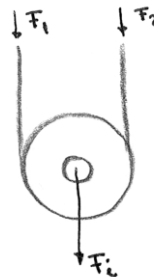


Figura 3-36: Croquis de propuesta basada en polea para el diseño del mecanismo diferencial.

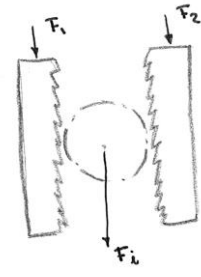


Figura 3-37: Croquis de propuesta basada en piñón y cremallera para el diseño del mecanismo diferencial.

Basado en polea

Siguiendo el razonamiento de la propuesta básica, en el mecanismo diferencial basado en poleas la fuerza de entrada actúa sobre el centro de la polea generando dos fuerzas de

⁵ Concepto basado en [40]

salida que, cuando las cargas externas no están equilibradas, el lado con mayor carga se detendrá mientras que el de la carga más pequeña continuará moviéndose. Cabe destacar que la llamada fuerza de entrada para estos casos, equivale a la fuerza que se genera en la tensión de los cables del caso básico anteriormente descrito. Un croquis de esta propuesta se puede apreciar en la Figura 3-36.

Basado en piñón y cremallera

Como se observa en la Figura 3-37, el mecanismo diferencial basado en piñón y cremallera posee el mismo principio de funcionamiento que en el mecanismo basado en poleas. En este caso la fuerza de entrada actúa sobre el piñón, dando lugar a dos fuerzas de salidas en los dos bastidores deslizantes.

Continuo

El mecanismo diferencial continuo que se aprecia en la Figura 3-38 es un mecanismo complejo que consta de una barra base, una columna impulsora flexible, dos columnas conducidas flexibles y una barra final rígida. Las columnas conducidas pueden deslizarse por los agujeros en la barra base y se unen en la barra final. Siguiendo el razonamiento de los otros mecanismos anteriormente descritos, en este caso la fuerza de entrada actúa sobre la columna impulsora y cuando las cargas externas no están balanceadas, como la entrada continúa empujando, la columna se doblará y se generarán salidas diferenciales.

La diferencia principal con los otros mecanismos es que, al tener columnas flexibles, se aumenta la energía potenciar en las columnas y la fuerza generada de salida también aumenta, es decir, no solo se generan fuerzas de tiro como en los tendones, sino que también se generan fuerzas de empuje. Esto permite que una vez que las fuerzas alcanzan la carga externa, pueden empezar a moverse de nuevo para continuar distribuyendo las fuerzas de salida.

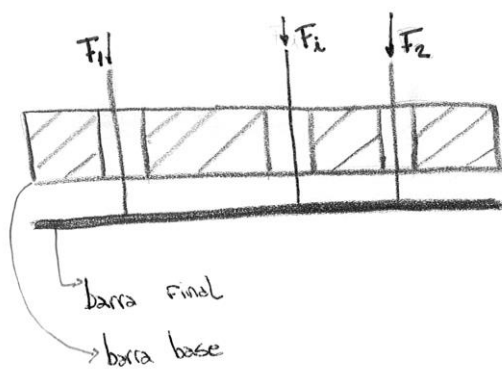


Figura 3-38: Croquis de propuesta continua para el diseño del mecanismo diferencial.

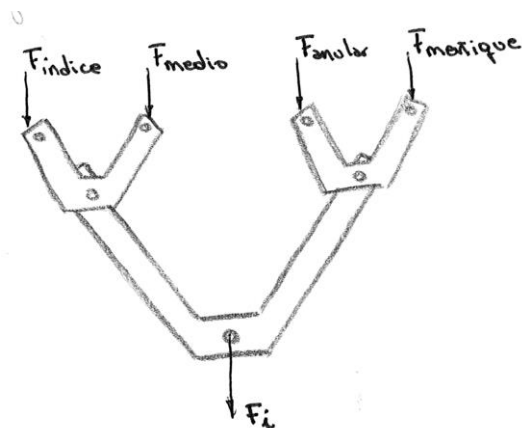


Figura 3-39: Croquis de combinación de mecanismos diferenciales.

Combinación de mecanismos

Como se aprecia en la Figura 3-39, los mecanismos diferenciales se pueden combinar para multiplicar la cantidad de movimientos generados en base de un actuador. Es decir,

una única fuerza de entrada actúa mientras fuerzas de salida que harán frente a las cargas externas. Algo similar puede aplicarse para el mecanismo de los dedos.

3.1.8. Transmisiones

Dadas las dimensiones de la palma de la mano, es necesario tener en consideración algunos mecanismos de transmisión para transmitir la energía cinemática desde el motor hacia los dedos de las manos. Tanto la Figura 3-40 como la Figura 3-41 muestran un mando excéntrico que, con un mecanismo de barras, transmiten el movimiento hacia los dedos, en un caso a todos por igual, y en el otro de manera diferenciada a cada uno de los dedos. La Figura 3-42 en cambio, representa un corte transversal en el cual se ve un engranaje a la salida del motor que transmite movimiento a los dedos debido a su contacto con otro medio engrane.

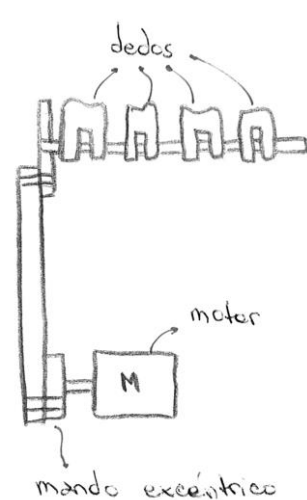


Figura 3-40: Croquis de mando excéntrico para la transmisión del motor a los dedos por igual.

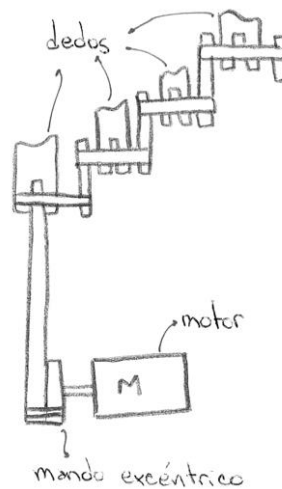


Figura 3-41: Croquis de mando excéntrico para la transmisión del motor a los dedos de manera diferencial.

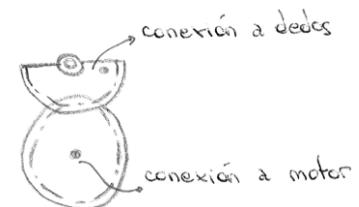


Figura 3-42: Croquis de mando por engranajes para la transmisión del motor hacia los dedos.

Se tendrán en consideración otras formas de transmisión mecánica para la ingeniería de detalle de la prótesis robótica para niños debido a que dependerá de la disponibilidad de espacios y de lay-out en el interior de la palma de la mano.

3.2. Electrónica y programación

Como se comentó en capítulos anteriores, la asociación e-Nable utiliza para las prótesis que entrega diseños open-source que pueden ser modificados de acuerdo a las necesidades del usuario o en caso de que un tercero encuentre una oportunidad de mejora. En línea con este principio, se propone que para los componentes electrónicos y la programación se utilice Arduino.

Arduino es una plataforma electrónica programada de código abierto basada en una tarjeta electrónica microcontroladora y un entorno de software. Básicamente, es el hardware y software necesarios para implementar de manera rápida, sencilla y económica todo tipo de aplicaciones electrónicas. A través de una computadora, se programan las placas Arduino que de acuerdo con la lectura de las entradas envían un conjunto de

instrucciones al microcontrolador en la placa para convertirlas en la salida requerida, como puede ser activar un motor o encender un LED.



Figura 3-43: Placa Arduino 1, la más robusta, utilizada y documentada de toda la familia Arduino. [22]

Control de robots, impresoras 3D, motores, luces son unos pocos de los usos que tiene esta plataforma en proyectos a lo largo de todo el mundo. Niños, estudiantes, aficionados, artistas, programadores y profesionales aprovechan esta herramienta que ofrece diversos beneficios frente a otros sistemas con microcontroladores:

- **Entorno simple de programación:** el software Arduino (IDE) es fácil de usar para principiantes como así también lo suficientemente flexible como para ser aprovechado por usuarios avanzados.
- **Multiplataforma:** el IDE Arduino se puede ejecutar en los sistemas operativos Mac, Windows y Linux.
- **Software extensible:** el software Arduino se publica como herramienta open-source para que los programadores experimentados lo extiendan, ya sea a través de bibliotecas C++ o con el lenguaje de programación AVR-C.
- **Hardware extensible:** los planos de las placas Arduino son compartidos bajo una licencia open-source que les permite a los diseñadores de circuitos experimentados hacer su propia versión del módulo, ampliarlo e incluso mejorarlo.
- **Económicos:** las placas Arduino son relativamente económicas en comparación con otras plataformas de microcontroladores, como pueden ser Parallax Basic stamp o Phidets.
- **Comunidad extensiva:** existe una gran comunidad mundial en la red de creadores en torno a Arduino quienes contribuyen con una gran cantidad de conocimiento accesible y gratuito al alcance de todos los usuarios.

3.3. Comando y control

De acuerdo a lo establecido en los objetivos, se realizará una prótesis robótica, por lo que algunos movimientos serán realizados por motores instalados en el interior de la prótesis. Además, como se aprecia en las opciones de diseño propuestas, algunos

movimientos podrán continuar siendo efectuados de manera manual para no encarecer los costos del dispositivo.

En los casos en los que la acción no sea realizada manualmente, se podrán obtener las directivas para la ejecución de tareas mediante:

- Control gestual: con la programación correcta y los sensores adecuados se puede realizar un agarre automático mediante el movimiento suave de la prótesis en una dirección determinada a partir de un mismo punto inicial de partida. Por ejemplo, comenzando con el codo flexionado a 90° y la mano paralela al piso, se podría activar un movimiento determinado de acuerdo con la dirección en la que se lo mueva.
- Control por botones: con la instalación de botones o pulsadores en la prótesis se pueden activar diversos movimientos.
- Control por aplicación: una aplicación en el teléfono celular también puede ser capaz de comandar algunos movimientos típicos del dispositivo de asistencia.
- Control muscular: mediante la contracción muscular se pueden obtener señales eléctricas que se transforman en comandos de los diversos movimientos a realizar. Mientras más señales se puedan obtener, mayor será la gama de movimientos que se puedan comandar con este tipo de control. También es posible medir la fuerza que realiza el músculo contra un sensor de presión.
- Control de proximidad: gracias al avance de la tecnología, actualmente se pueden obtener sensores muy pequeños con Bluetooth que, puestos en determinados objetos, permiten que al aproximarse la prótesis se realice algún movimiento en particular.

Dentro de estas posibilidades, se utilizará el control mediante señales eléctricas musculares, que le permitirán al niño no depender de un dispositivo adicional para realizar los movimientos ni de la realización de algún movimiento particular del brazo para el agarre de los objetos.

3.4. Tipos de motores

En palabras simples, los motores son máquinas que transforman la energía eléctrica en energía mecánica, y en este proyecto se van a utilizar para generar algunos movimientos. Para los proyectos que utilizan Arduino se utilizan comúnmente tres principales tipos de motores: motores de corriente continua (CC), servomotores, y motores paso a paso.

3.4.1. Motores de corriente continua

Los motores de corriente continua son esencialmente los tipos más simples de motor, y los actuadores más comunes. Se compone de dos partes principales; por un lado, el estator, que corresponde a la parte fija del motor, y por el otro el rotor, que se corresponde con la parte móvil del mismo. Su funcionamiento se puede resumir, básicamente, en que se dispone de dos campos magnéticos desalineados que giran hasta alinearse, con un sistema de delgas y escobillas para invertir el campo magnético de uno de ellos cuando se alinean ya que si ambos campos magnéticos se alinean el motor se para. Según sea el

diseño del motor, el estator o el rotor serán uno un campo magnético de imán permanente y el otro un campo magnético inducido por la circulación de corriente a través de unas espiras.

Estos motores se caracterizan por tener altas velocidades de giro y un bajo par. En contraposición, poseen un mal control de posición y de velocidad. Es por ello que suele utilizárselos con un encoder que permite saber la posición del eje. Un ejemplo típico de uso es el de los ventiladores de techo. Para conducir estos motores con un microcontrolador Arduino es necesario disponer de un controlador externo que transforme los 5V de salida de la placa en los hasta 12V que requieren los motores de CC.

3.4.2. Servomotores

Siendo actuadores comúnmente utilizados en proyectos de robótica, los servomotores reciben la señal de la posición deseada y autónomamente se alcanzarán dicha posición. Esto se debe a que internamente están constituidos por un motor de corriente continua acoplado a un reductor junto con un controlador que es el encargado de posicionar al eje en el ángulo indicado.

Una de sus principales ventajas es que pueden alcanzar alta velocidad y alto torque, manteniendo un control total en posición y giro y de alta precisión. Su principal desventaja es que no pueden dar una vuelta completa, siendo su rango habitual de 180° aunque hay algunos modelos en particular que permiten un giro de 360°. Estas características lo hacen ser ampliamente utilizados en brazos robóticos, hexápodos o robots bípedos.

3.4.3. Motores paso a paso

Los motores paso a paso, también conocidos como *steppers*, son aquellos motores en los cuales el eje gira un ángulo fijo llamado “paso” indicado por un procesador interno. En este caso, el rotor está rodeado por bobinas electromagnéticas que, si se les aplica una secuencia de encendido adecuadas, el imán se orientará progresivamente haciendo girar al eje del motor.

Su funcionamiento por pasos lo convierten en un motor con baja velocidad, pero ofrece un alto torque, aunque sigue siendo menor que el de un servomotor. Se los utiliza en aplicaciones en las cuales se requiere un enfoque preciso y lento como son los proyectos de impresoras 3D y máquinas CNC.

3.5. Técnicas de impresión 3D

Cuando se diseña un objeto se debe considerar que la funcionalidad del mismo es derivada de una combinación de la geometría del objeto y sus propiedades. Para garantizar dicha combinación, será necesario seleccionar la correcta tecnología de fabricación. Existen tres principios básicos de procesos de manufactura que solos, o combinados entre ellos, dan lugar a la transformación de un material en el objeto diseñado.

- Conformado formativo: La forma deseada del objeto se obtiene mediante la aplicación de presión a un cuerpo de materia prima. Por ejemplo: forja, plegado, fundición, inyección, entre otras.

- Conformado substractivo: La forma deseada se obtiene por remoción selectiva del material. Por ejemplo: fresado, torneado, taladrado, electroerosión, etc.
- Conformado aditivo: El objeto adquiere la forma deseada a través de una sucesiva adición del material, como en el caso de la impresión 3D.

De esta forma se puede afirmar que la impresión 3D es una tecnología de fabricación por adición con la capacidad de crear objetos tridimensionales mediante la unión por fusión o adhesión de la materia prima generalmente capa por capa hasta conseguir la forma deseada.

Antes de comenzar con el proceso de impresión 3D es necesario contar con un modelo tridimensional del objeto a fabricar, y un software que permita establecer las variables de impresión para el tipo de impresora seleccionada. La correcta selección de la técnica de impresión a utilizar y los parámetros seleccionados serán determinantes en la calidad del producto. En esta selección, según sean las propiedades fundamentales del objeto será necesario también tener en consideración:

- Tipo de material: polímero, metal, cerámico o materiales compuestos.
- Principio aplicado para fusión o adhesión: fusión, curado, sinterización, etc.
- Materia prima a utilizar: líquido, polvo, suspensión, filamento, hoja, etc.
- Cómo se une el material, que dependerá de la arquitectura de la máquina.

Actualmente existen una gran variedad de técnicas de impresión 3D. Es por ello que a continuación se describirán de manera resumida sólo las seis categorías para los polímeros, material a utilizar en este proyecto.

3.5.1. Extrusión de material

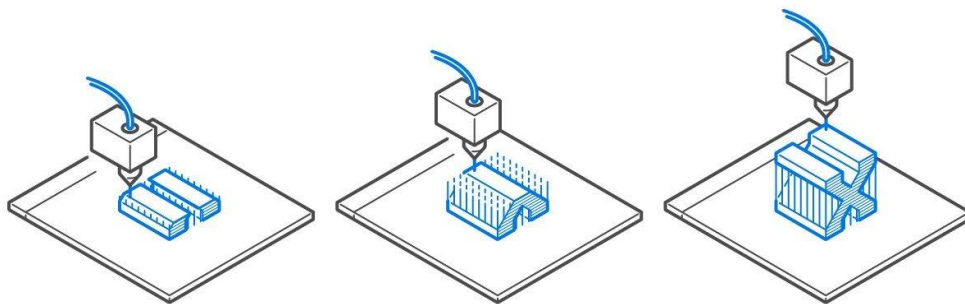


Figura 3-44: Técnica de impresión 3D por extrusión de material. [23]

La extrusión de material es uno de los procesos de impresión 3D mediante el cual un motor empuja a un filamento de termoplástico sólido a través de una boquilla calentada que derrite al material y lo deposita sobre una plataforma o cama de construcción de acuerdo con una trayectoria predeterminada, donde el filamento finalmente se enfría y solidifica. Así, se va construyendo capa sobre capa hasta obtener el objeto sólido deseado. En algunos casos, según sea la geometría del objeto, será necesario añadir estructuras de soporte que luego deberán ser removidas.

Tecnología de impresión 3D	Modelado por deposición fundida (FDM)
Materiales	Filamento termoplástico
Precisión dimensional	$\pm 0,5 \%$ (límite inferior $\pm 0,5 \text{ mm}$)
Aplicaciones comunes	Carcasas eléctricas. Patrones de fundición de precisión. Plantillas y fijaciones.
Ventajas	Gama completa de colores. Múltiples materiales disponibles. Económica.

Tabla 3-1: Resumen de características de la técnica por extrusión de material. [23]

3.5.2. Polimerización VAT.

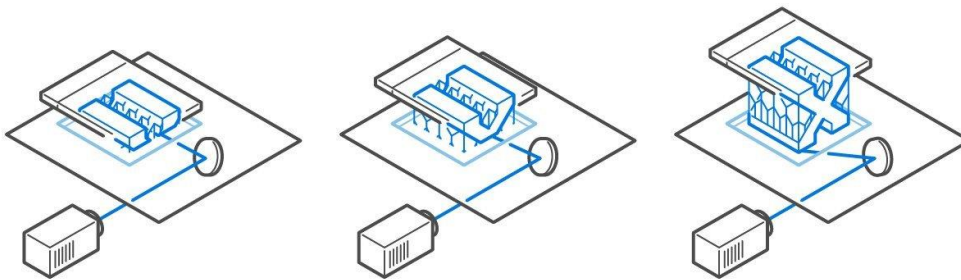


Figura 3-45: Técnica de impresión 3D por polimerización en tanque con láser. [23]

La polimerización en tanque con láser (VAT) es un proceso de impresión 3D en el que el objeto se obtiene a través del curado o endurecimiento selectivo de una resina de fotopolímero en un tanque mediante una fuente de luz. Para dar la forma deseada a la pieza, capa por capa la luz se dirige con precisión a puntos específicos de una pequeña capa de plástico líquido para endurecerla. En general, la plataforma toma contacto con el baño de resina y va elevándose a medida que se van generando las diversas capas del objeto.

Según sea la fuente de luz que se utiliza para curar la resina, diferente será la tecnología de impresión 3D. Las tres más comunes son:

- Estereolitografía (SLA).
- Procesamiento digital de la luz (DLP).
- Estereolitografía enmascarada (MSLA).

El constante avance de la tecnología lleva a que algunos proveedores de impresoras profesionales tengan patentadas algunas variaciones únicas de la polimerización en tanque, por lo que es probable encontrar en el mercado otros tipos diferentes a los anteriormente mencionados.

Tecnología de impresión 3D	Estereolitografía (SLA) Procesamiento digital de la luz (DLP) Estereolitografía enmascarada (MSLA) Microestereolitografía (μ SLA)
Materiales	Resinas de fotopolímeros

Precisión dimensional	$\pm 0,5$ % (límite inferior $\pm 0,15$ mm o 5 nanómetros en el caso de la μ SLA).
Aplicaciones comunes	Aplicaciones dentales. Fundición de joyas. Prototipos de polímero en forma de molde de inyección.
Ventajas	Acabado superficial liso. Precisión en los detalles.

Tabla 3-2: Resumen de características de la técnica por polimerización en tanque con láser. [23]

3.5.3. Fusión en lecho de polvo

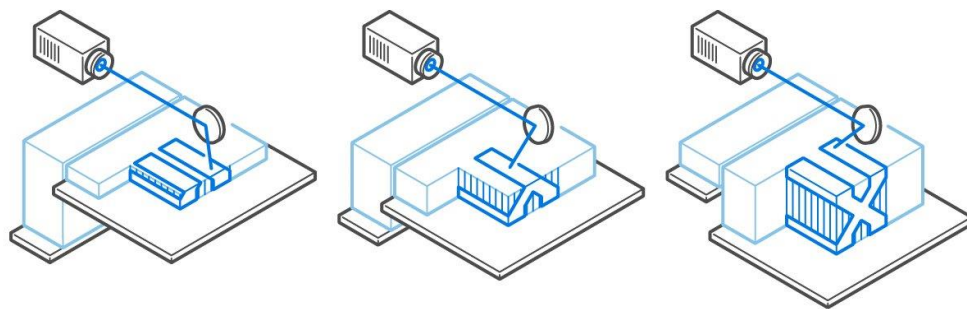


Figura 3-46: Técnica de impresión 3D por fusión en lecho de polvo. [23]

Otro proceso de impresión 3D es la fusión en lecho de polvo, que genera objetos sólidos utilizando una fuente térmica que induce la fusión entre las partículas de polvo de cada capa. Usualmente, en este tipo de impresión no se requiere de estructuras adicionales ya que al añadir polvo a medida que se construye el objeto, la pieza final queda encapsulada en el polvo sobrante.

Las variaciones en esta tecnología se deben a las diversas fuentes de energía utilizadas para la fusión, ya sean láser o haces de electrones. Cabe destacar que algunas de estas técnicas sólo son aplicables para materiales metálicos.

Tecnología de impresión 3D	Sinterizado selectivo por láser (SLS). Fusión selectiva por láser (SLM). (Sólo materiales metálicos). Fusión por haz de electrones (EBM). (Sólo materiales metálicos) Fusión por chorro múltiple o Multi-Jet Fusion (MJF).
Materiales	Polvos termoplásticos
Precisión dimensional	$\pm 0,1$ mm.
Aplicaciones comunes	Piezas metálicas funcionales para el sector aeroespacial y automovilístico. Piezas médicas y dentales.
Ventajas	Piezas funcionales más robustas. Geometrías complejas.

Tabla 3-3: Resumen de características de la técnica por fusión en lecho de polvo. [23]

Para comprender mejor el funcionamiento de estas máquinas, se describe a continuación la tecnología de SLS. Para ella, se parte de una capa delgada de polvo polimérico a temperatura justo por debajo del punto de fusión del polímero sobre una cama

de construcción. A continuación, un rayo láser comienza a escanear la superficie, sinteriza selectivamente el polvo y solidifica una sección transversal del objeto. Luego la plataforma de construcción se mueve hacia abajo una altura equivalente al espesor de una capa, se deposita una nueva capa de polvo sobre la superficie y se repite el paso de sinterización del polvo. De esta forma, se van repitiendo las operaciones capa por capa hasta dar lugar a la pieza a fabricar que queda rodeada de polvo sin sinterizar.

3.5.4. Inyección de material

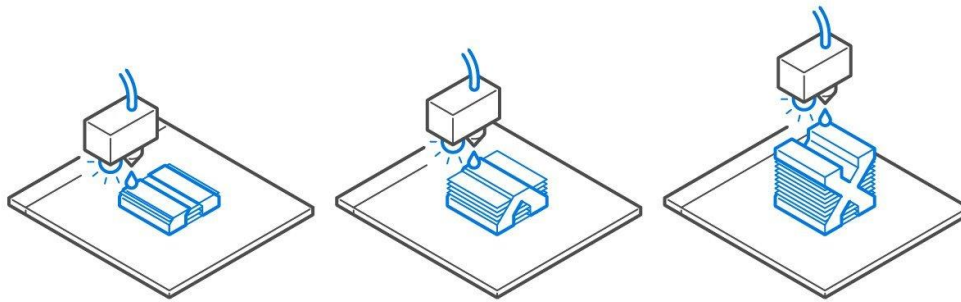


Figura 3-47: Técnica de impresión 3D por inyección de material. [23]

La inyección de material es un proceso de impresión 3D cuyo funcionamiento es similar al de una impresora de inyección de tinta estándar en donde la diferencia clave reside en que, en vez de imprimir una sola capa de tinta, se imprimen varias capas hasta conformar la pieza sólida.

En esta técnica, el cabezal inyecta cientos de gotitas de fotopolímero sobre la plataforma de construcción y luego se curan a través del uso de luz ultravioleta. Luego, la plataforma desciende una altura equivalente al espesor de una capa, dando lugar a la posibilidad de repetir las operaciones hasta la formación del objeto deseado.

Una ventaja de este sistema es que permite imprimir en diferentes materiales para el mismo objeto, por lo que para los materiales que requieren soportes, estos se pueden imprimir en un material soluble que se retira fácilmente en un procesamiento posterior. Sin embargo, posee como desventaja que las piezas son frágiles y no son adecuadas para la fabricación de piezas mecánicas.

Tecnología de impresión 3D	Inyección de material (MJ). Drop on Demand (DOD).
Materiales	Resina fotopolímera
Precisión dimensional	$\pm 0,1$ mm.
Aplicaciones comunes	Prototipos de productos a todo color. Prototipos similares a moldes de inyección. Moldes de inyección de poca tirada. Modelos médicos.
Ventajas	Acabado de superficie óptimo. Gama completa de colores. Múltiples materiales disponibles.

Tabla 3-4: Resumen de características de la técnica por inyección de material. [23]

3.5.5. Inyección de aglutinante

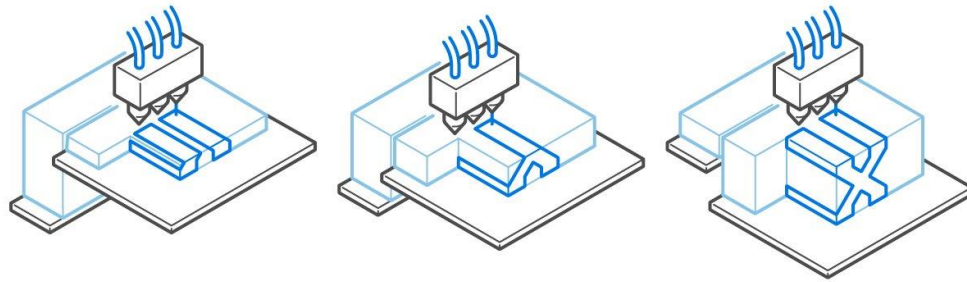


Figura 3-48: Técnica de impresión 3D por inyección de aglutinante. [23]

La inyección de aglutinantes es un proceso de impresión 3D similar al SLS en el que un aglutinante líquido une de manera selectiva, regiones de un lecho de polvo. Partiendo también de una capa inicial de polvo sobre la plataforma de construcción, se utiliza un cabezal que inyecta pequeñas gotas de aglutinante de aprox. 80 micrones sobre la superficie de polvo para generar la primera capa de la pieza, a diferencia de la técnica SLS que utiliza un láser para sinterizar el polvo. Luego, la plataforma desciende y se inserta una nueva capa de polvo para repetir la etapa anteriormente descrita capa por capa hasta alcanzar la figura buscada. Finalmente, el objeto se retira del lecho de polvo y se elimina el polvo no ligado con aire comprimido, pudiendo ser utilizado sin ningún otro procesamiento o aplicándosele un proceso posterior de relleno con otro material, curado, pulido o pintado.

Esta técnica permite crear geometrías grandes y complejas con un coste relativamente bajo, aunque las propiedades mecánicas obtenidas en las piezas no son tan buenas como aquellas realizadas por fusión en lecho de polvo.

Tecnología de impresión 3D	Inyección de aglutinante (BJ).
Materiales	Polímero.
Precisión dimensional	$\pm 0,2$ mm.
Aplicaciones comunes	Piezas funcionales. Modelos a todo color.
Ventajas	Bajo coste. Grandes espacios de construcción.

Tabla 3-5: Resumen de características de la técnica por inyección de aglutinante. [23]

3.5.6. Laminación en hojas

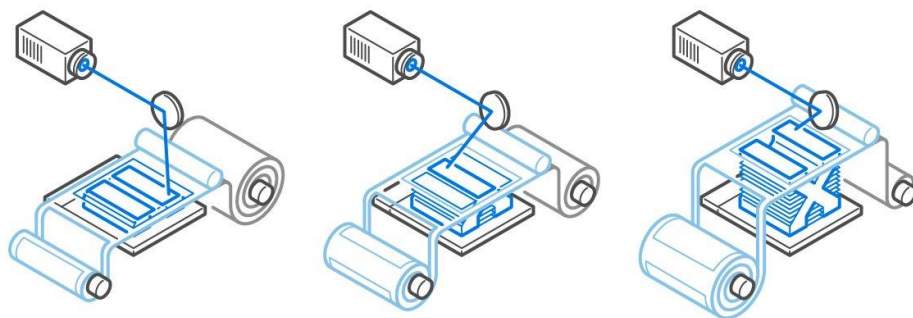


Figura 3-49: Técnica de impresión 3D por laminación en hojas. [23]

La laminación de hojas es un proceso de impresión 3D a través del cual se generan los objetos apilando y laminando hojas de material muy finos. La unión entre las capas de material se puede fusionar mediante calor o sonido, como los métodos comúnmente utilizados.

Esta tecnología es utilizada en la producción de prototipos no funcionales debido a su elevada velocidad de producción, como así también en la generación de piezas compuestas ya que permite alternar fácilmente la materia prima durante la impresión. Su baja precisión en comparación con otros métodos de impresión, su gran cantidad de desperdicio, la necesidad de una importante labor de procesamiento posterior y la baja resistencia de la pieza final, hacen que este método sea preferido para la fabricación de piezas estéticas y no de piezas funcionales.

Tecnología de impresión 3D	Fabricación mediante laminado de objetos (LOM). Consolidación por ultrasonidos (UC).
Materiales	Polímero.
Precisión dimensional	$\pm 0,1$ mm.
Aplicaciones comunes	Prototipos no funcionales. Impresiones multicolor. Moldes.
Ventajas	Bajo coste. Permite producir piezas con rapidez. Impresiones compuestas.

Tabla 3-6: Resumen de características de la técnica por laminación en hojas. [23]

3.5.7. Resumen

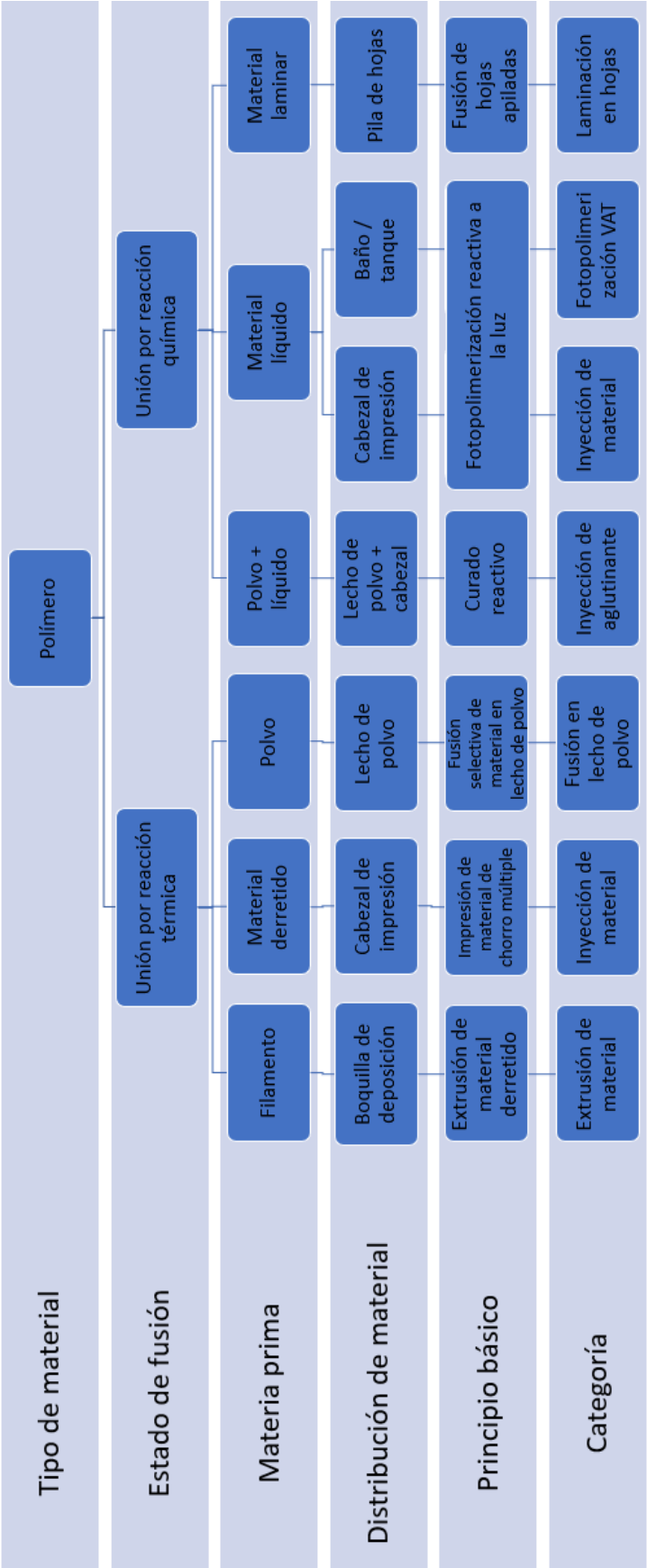


Figura 3-50: Esquema que resume las diferentes técnicas de impresión 3D para los polímeros. [36]

3.5.8. Selección de tecnología

Dentro de las tecnologías anteriormente descriptas se trabajará con el método de extrusión de material, especialmente el modelado por deposición fundida (FDM), que es el más económico y la máquina que tiene una mayor disponibilidad y oferta en Argentina.

De acuerdo con las propiedades del material de las piezas a imprimir, se deberá prestar especial atención a algunas características especiales del equipo a seleccionar, como pueden ser la cama caliente, refrigeración de las piezas o gabinete cerrado.

3.6. Material de impresión 3D

Generalmente derivado de productos petroquímicos, un plástico es un material fabricado de compuestos sintéticos o semisintéticos con la propiedad de ser maleable, es decir, tiene la capacidad de cambiar de forma. Su baja densidad y coste, su facilidad de fabricación y versatilidad, hacen de este un material elegido para una gran variedad de productos y sectores.

Según sea el método de impresión 3D seleccionado, diferente será la materia prima que se requiere en la fabricación de una pieza. Es por eso que al tratarse de la técnica FDM se realizará a continuación una breve descripción sólo de aquellos termoplásticos que están disponibles en el mercado en forma de filamentos.

3.6.1. ABS

El Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS) es uno de los filamentos más utilizados en la impresión 3D en aplicaciones como carrocería de automóviles, electrodomésticos y fundas de teléfonos móviles. Dentro de sus puntos positivos se encuentra que es un material reciclable, resistente a los golpes, mecanizable y que se puede soldar con procesos químicos. Como aspectos negativos se puede mencionar que no es biodegradable y se contrae en contacto con el aire, por lo que se requiere de cierta experiencia para realizar impresiones de calidad. Además, se recomienda utilizar una impresora 3D de cámara cerrada para limitar las emisiones de partículas al imprimir con este material.

Tensión de rotura	40 MPa
Rigidez	
Durabilidad⁶	
Temperatura máxima de servicio	98°C
Densidad	1,04 g/cm ³
Precio por Kg	10 – 40 U\$D
Imprimibilidad⁷	
Temperatura del extrusor	220 – 250 °C
Temperatura de la cama	95 – 110 °C
Características principales	Resistente a impactos Resistente al calor

Tabla 3-7: Características generales del ABS. [24]

⁶ Durabilidad entendida como una combinación de calor, fatiga, agua, UV y resistencia química.

⁷ Cuán fácil es imprimir con un material en función de su deformación, su supuración, la obstrucción de la boquilla, etc.

3.6.2. PLA

Fabricado en base a materias primas renovables como el almidón de maíz, el ácido poliláctico o PLA es un material biodegradable y fácil de imprimir, aunque tiende a reducirse ligeramente después de la impresión. Como la temperatura de impresión es relativamente baja y no requiere una cama caliente, es uno de los materiales más elegidos para la impresión FDM. Además, es de bajo coste y se puede encontrar en una amplia gama de colores y texturas de acabado. Sin embargo, es un material difícil de manipular debido a su alta velocidad de enfriamiento y solidificación. Es importante mencionar también que los modelos pueden deteriorarse cuando entran en contacto con el agua, o cuando están expuestos durante varias horas a los rayos UV, ya que se comienzan a deformar a los 55°C. Generalmente es elegido para piezas estéticas con pocos requerimientos mecánicos, aunque existen unas variantes del PLA que son considerablemente más resistentes.

Tensión de rotura	65 MPa
Rigidez	
Durabilidad	
Temperatura máxima de servicio	52 °C
Densidad	1,24 g/cm ³
Precio por Kg	10 – 40 U\$D
Imprimibilidad	
Temperatura del extrusor	190 – 220 °C
Temperatura de la cama	Opcional: 45 – 60 °C
Características principales	No requiere cama caliente

Tabla 3-8: Características generales del PLA. [24]

3.6.3. HIPS

El poliestireno de alto impacto, mayormente conocido como HIPS, es uno de los materiales solubles que se utilizan para imprimir soportes en las piezas con la intención de disolverlas en una etapa futura en el proceso de fabricación. Generalmente se lo asocia al ABS y puede ser disuelto con limoneno. Su capacidad de ser utilizado como soporte hace que sea utilizado en máquinas de extrusión dual. De todas formas, también puede ser utilizado en otras aplicaciones, no sólo como soporte, ya que es más liviano y tiene una mayor estabilidad dimensional que el ABS, convirtiéndose así en una opción para piezas que terminarán desgastadas.

Tensión de rotura	32 MPa
Rigidez	
Durabilidad	
Temperatura máxima de servicio	100 °C
Densidad	1,04 g/cm ³
Precio por Kg	24 – 32 U\$D
Imprimibilidad	
Temperatura del extrusor	230 – 245 °C
Temperatura de la cama	100 – 115 °C
Características principales	Resistente al impacto Disoluble Resistente al calor

Tabla 3-9: Características generales del HIPS. [24]

Fuera de la impresión 3D, el HIPS se utiliza para envases de alimentos, vasos de bebidas frías y calientes, carcasas de computadoras, juguetes, partes de televisores, entre otras. Su amplia gama de aplicaciones se debe a que es un plástico barato y fácil de fabricar, con una excelente resistencia al impacto, maquinabilidad, facilidad para ser moldeado, pintado y pegado.

3.6.4. PVA

Otro filamento soluble comúnmente utilizado en la impresión 3D con extrusora doble es el acetato de polivinilo, conocido por sus siglas PVA. A diferencia del HIPS, el PVA está asociado con el PLA y puede disolverse utilizando solo agua. Este material se utiliza también para proporcionar una estructura soporte de una pieza compleja con varios voladizos, permitiendo disolver el material en una etapa futura de fabricación sin necesidad de un postproceso elaborado.

Tensión de rotura	78 MPa
Rigidez	
Durabilidad	
Temperatura máxima de servicio	75 °C
Densidad	1,23 g/cm ³
Precio por Kg	40 – 110 U\$D
Imprimibilidad	
Temperatura del extrusor	185 – 200 °C
Temperatura de la cama	45 – 60 °C
Características principales	Flexible Suave Disoluble Resistente a la fatiga

Tabla 3-10: Características generales del PVA. [24]

Este material es un polímero suave y biodegradable, aunque muy sensible a la humedad. Es por ello que se deberá almacenar al filamento en una caja o recipiente cerrado para evitar que la humedad ambiente lo deteriore.

3.6.5. Material flexible

Tensión de rotura	26 – 43 MPa
Rigidez	
Durabilidad	
Temperatura máxima de servicio	60 – 74 °C
Densidad	1,19 g/cm ³
Precio por Kg	30 – 70 U\$D
Imprimibilidad	
Temperatura del extrusor	225 – 245 °C
Temperatura de la cama	Opcional: 45 – 60 °C
Características principales	Flexible Elástico Suave Resistente a la fatiga

Tabla 3-11: Características generales del material flexible. [24]

El material flexible, conocido como FLEX, es un nuevo tipo de filamento generalmente fabricado de TPE o TPU que, como su nombre lo indica, tiene la capacidad de deformarse y luego recuperar su forma, variando su flexibilidad de acuerdo al porcentaje de llenado con el que se fabrique la pieza. Es un material biodegradable, antiadherente y con suaves acabados, aunque no tiene una buena resistencia al calor. Se recomienda imprimir en baja velocidad y utilizar el tipo de boquilla de impresión que mejor se adapte para evitar taponamientos.

3.6.6. PETG

El PETG es una versión modificada con glicol del tereftalato de polietileno (PET), siendo este último el utilizado en la fabricación de las botellas plásticas desechables. Buena resistencia química, 100% reciclable, baja contracción, resistencia a la luz solar, durabilidad y no desprender olor durante la impresión son algunas de las características de estos materiales. El agregado del glicol en el PETG reduce la fragilidad del material por lo que gana en resistencia. De hecho, este material se está convirtiendo en uno de los más utilizados para la impresión 3D en piezas con requerimientos de resistencia al impacto.

Tensión de rotura	53 MPa
Rigidez	
Durabilidad	
Temperatura máxima de servicio	73 °C
Densidad	1,23 g/cm ³
Precio por Kg	20 – 60 U\$D
Imprimibilidad	
Temperatura del extrusor	230 – 260 °C
Temperatura de la cama	75 – 90 °C
Características principales	Resistente al agua Resistente químicamente Resistente a la fatiga

Tabla 3-12: Características generales del PETG. [24]

3.6.7. Nylon

Tensión de rotura	45 – 80 MPa
Rigidez	
Durabilidad	
Temperatura máxima de servicio	80 – 95 °C
Densidad	1,1 g/cm ³
Precio por Kg	25 – 65 U\$D
Imprimibilidad	
Temperatura del extrusor	220 – 270 °C
Temperatura de la cama	70 – 90 °C
Características principales	Flexible Resistente al impacto Resistente al calor Resistente a la fatiga

Tabla 3-13: Características generales del Nylon. [24]

El nylon es un material hecho por poliamidas constituidas por estructuras semicristalinas, lo que lo otorga al material un buen equilibrio de características químicas y mecánicas ofreciéndole buena estabilidad, rigidez, flexibilidad y resistencia a los golpes. Estas ventajas, sumadas a un buen acabado superficial y un alto nivel de detalle, hacen que el nylon se utilice en la fabricación de engranajes, piezas para el mercado aeroespacial, automotriz, robótica, prótesis médicas y moldes de inyección. Además, su biocompatibilidad permite que los objetos de este material entren en contacto con alimentos, exceptuando a aquellos que contienen alcohol. Una dificultad que se presenta es que los filamentos de nylon son higroscópicos, es decir, que absorben fácilmente la humedad de su entorno, lo que puede generar problemas en la calidad de impresión. Es por ello que su almacenamiento en un lugar seco es muy importante.

3.6.8. ASA

Conocido por su sigla ASA, el acrilonitrilo estireno acrilato es un material con propiedades semejantes a la del ABS, con una mayor resistencia a los rayos UV. Es por ello que este material es elegido para aplicaciones de exterior, con exposición a variadas condiciones climáticas y rayos ultravioleta. Es conocido también por su resistencia al impacto, mayor resistencia a la temperatura y mayor dificultad para la impresión. Es importante aclarar que durante la impresión se emiten gases de peligrosos debido al estireno, por lo que se debe mantener una ventilación cruzada y tenerse sumo cuidado si se imprime en una cámara cerrada.

Tensión de rotura	55 MPa
Rigidez	
Durabilidad	
Temperatura máxima de servicio	95 °C
Densidad	1,07 g/cm ³
Precio por Kg	38 – 40 U\$D
Imprimibilidad	
Temperatura del extrusor	235 – 255 °C
Temperatura de la cama	90 – 110 °C
Características principales	Resistente al impacto Resistente a rayos UV Resistente al calor

Tabla 3-14: Características generales del ASA. [24]

3.6.9. Policarbonato

El policarbonato (PC) es un material de alta resistencia diseñado para aplicaciones de ingeniería y entornos difíciles. Resistencia al impacto, capacidad de doblarse sin romperse y resistencia a alta temperatura son algunas de las características de este material. Es valorado en el mercado gracias a su solidez, transparencia y densidad menor a la del vidrio, siendo útil para diseñar piezas ópticas, pantallas protectoras u objetos decorativos.

Al igual que otros materiales, el PC es higroscópico, por lo que hay que tener extremo cuidado durante la impresión debido a que absorberá la humedad del aire, como así también debe ser almacenado en contenedores herméticos.

Tensión de rotura	72 MPa
Rigidez	
Durabilidad	
Temperatura máxima de servicio	121 °C
Densidad	1,2 g/cm ³
Precio por Kg	40 – 75 U\$D
Imprimibilidad	
Temperatura del extrusor	260 – 310 °C
Temperatura de la cama	80 – 120 °C
Características principales	Resistente al impacto Resistente al calor Resistente a la fatiga

Tabla 3-15: Características generales del policarbonato. [24]

3.6.10. Polipropileno

El polipropileno (PP) es un polímero termoplástico conocido por su muy alta resistencia química, impermeable, duradero, resistencia mecánica, resistencia a la fatiga, apto para el contacto con alimentos y extremadamente ligero. Sin embargo, una de sus desventajas es que son muy sensibles a los rayos UV que pueden causar su expansión. Es por ello que se desarrollaron algunos tipos alternativos de PP con una mayor resistencia mecánica.

Se pueden mencionar como aplicaciones de este material: recipientes que tengan que contener líquido, envases de agentes químicos dañinos, envases para microondas o congelador, piezas cuya función consista en doblarse repetidas veces como son las bisagras, entre otras.

Tensión de rotura	32 MPa
Rigidez	
Durabilidad	
Temperatura máxima de servicio	100 °C
Densidad	0,9 g/cm ³
Precio por Kg	60 – 120 U\$D
Imprimibilidad	
Temperatura del extrusor	220 – 250 °C
Temperatura de la cama	85 – 100 °C
Características principales	Flexible Suave Resistente al agua Resistente al calor Resistente a la fatiga

Tabla 3-16: Características generales del polipropileno. [24]

3.6.11. Relleno de fibra de carbono

El material relleno de fibra de carbono es básicamente un material compuesto donde el filamento contiene fibras diminutas de carbono que se infunden en un material base, aumentando así las propiedades de este último. Tanto el PLA, PETG, ABS, Nylon y policarbonato pueden ser utilizados como material base.

Las fibras de carbono son extremadamente fuertes, por lo que hacen que el filamento aumente en fuerza y en rigidez, pudiendo generar así piezas más livianas y dimensionalmente más estables, ya que la fibra evita el encogimiento que se da con algunos plásticos cuando se enfrían.

Si bien las variables de impresión serán muy similares a los ajustes normales del material base, será necesario contar con una boquilla de acero endurecido o acero inoxidable debido a la abrasividad que poseen las fibras añadidas.

Tensión de rotura	45 MPa
Rigidez	
Durabilidad	
Temperatura máxima de servicio	52 °C
Densidad	1,3 g/cm ³
Precio por Kg	30 – 80 U\$D
Imprimibilidad	
Temperatura del extrusor	200 – 230 °C
Temperatura de la cama	Opcional: 45 – 60 °C
Características principales	Compuesto

Tabla 3-17: Características generales del material relleno de fibra de carbono. [24]

3.6.12. Relleno de metal

Los filamentos rellenos de metal son materiales compuestos que se fabrican mezclando un material base con un polvo metálico fino, como cobre, bronce, latón o acero inoxidable. La presencia de metal en el filamento genera que el objeto a fabricar termine siendo mucho más pesado que con los plásticos estándar, con un acabado metálico único y atractivo. A su vez, es necesario asegurar que la boquilla sea capaz de resistir al desgaste que generan estos tipos de materiales.

Tensión de rotura	20 – 30 MPa
Rigidez	
Durabilidad	
Temperatura máxima de servicio	52 °C
Densidad	2 – 4 g/cm ³
Precio por Kg	50 – 120 U\$D
Imprimibilidad	
Temperatura del extrusor	190 – 220 °C
Temperatura de la cama	Opcional: 45 – 60 °C
Características principales	Compuesto

Tabla 3-18: Características generales del material relleno de metal. [24]

3.6.13. Relleno de madera

Otro material compuesto que puede encontrarse en el mercado es el filamento relleno de madera, que combina un material base PLA con polvo de madera, corcho y/u otros derivados de la madera. La presencia de madera en el material genera que los objetos que se obtienen de la impresión 3D tengan una estética y una sensación al tacto de madera real. Otro aspecto positivo es que se obtiene un olor aromático y agradable. Este tipo de material compuesto, debido a que las partículas de madera son más suaves que las de los

mencionados anteriormente, no requiere de boquillas resistentes al desgaste, aunque sí puede requerir boquillas de mayor diámetro para evitar la obstrucción de la misma.

Tensión de rotura	46 MPa
Rigidez	
Durabilidad	
Temperatura máxima de servicio	52 °C
Densidad	1,2 g/cm ³
Precio por Kg	25 – 55 U\$D
Imprimibilidad	
Temperatura del extrusor	190 – 220 °C
Temperatura de la cama	Opcional: 45 – 60 °C
Características principales	Compuesto

Tabla 3-19: Características generales del material relleno de madera. [24]

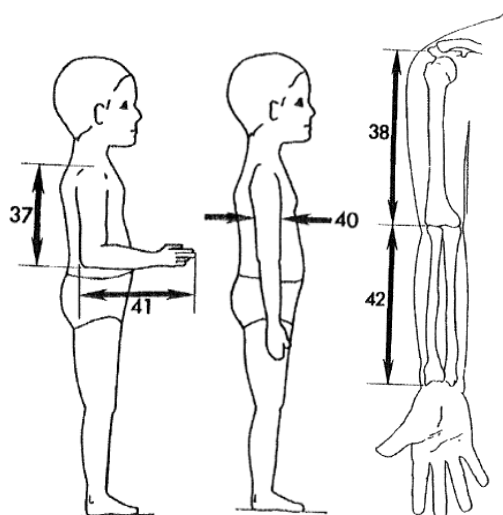
3.6.14. Selección de materiales

Teniendo en cuenta las características anteriormente descritas, se seleccionará un material para las diferentes piezas de acuerdo con los requerimientos de las mismas, con la prima de que la misma impresora 3D debe ser capaz de fabricar la totalidad de las piezas no comerciales.

4. Diseño

4.1. Antropometría de la mano

A continuación, se muestran una sucesión de tablas e imágenes con un rango de dimensiones de las partes del miembro superior de los niños. Los datos fueron obtenidos por un estudio realizado en Estados Unidos por la Universidad de Michigan, a niños de entre 2 y 18 años de edad. Los valores representan los resultados del estudio medidos en centímetros. Vale aclarar también que las cotas que no incluyen flechas indican que se trata de la longitud de una circunferencia.



	Medida Edad	37	38	40	41	42
Niñas	9,5 – 10,5	28,5	25,0	6,4	36,6	19,9
	10,5 – 11,5	29,9	26,3	6,6	38,2	20,7
	11,5 – 12,5	31,1	27,1	6,7	39,9	21,8
Niños	9,5 – 10,5	28,7	26,2	6,4	36,8	20,7
	10,5 – 11,5	29,7	26,9	6,0	38,2	21,4
	11,5 – 12,5	31,0	28,5	6,7	40,0	22,8

Tabla 4-1: Medidas de la Figura 4-1 de acuerdo a la edad de los niños en centímetros. [25]

Figura 4-1: Representación de un niño con las cotas de las medidas estudiadas. [25]

	Medida Edad	58	59	60
Niñas	9,5 – 10,5	21,5	7,1	6,3
	10,5 – 11,5	22,4	7,3	6,7
	11,5 – 12,5	23,0	7,6	6,8
Niños	9,5 – 10,5	21,9	7,4	6,7
	10,5 – 11,5	23,1	7,9	6,8
	11,5 – 12,5	23,2	7,9	7,0

Tabla 4-2: Medidas de la Figura 4-1 de acuerdo a la edad de los niños en centímetros. [25]

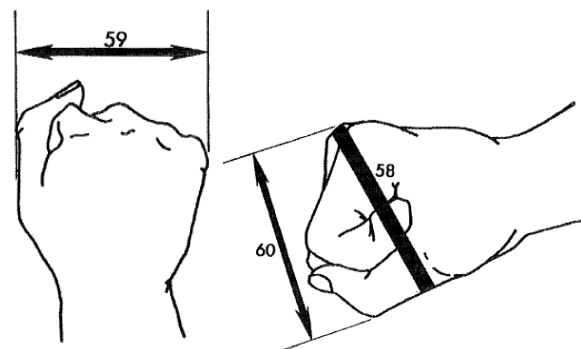


Figura 4-2: Representación de partes de un miembro superior de un niño con las cotas de las medidas estudiadas. [25]

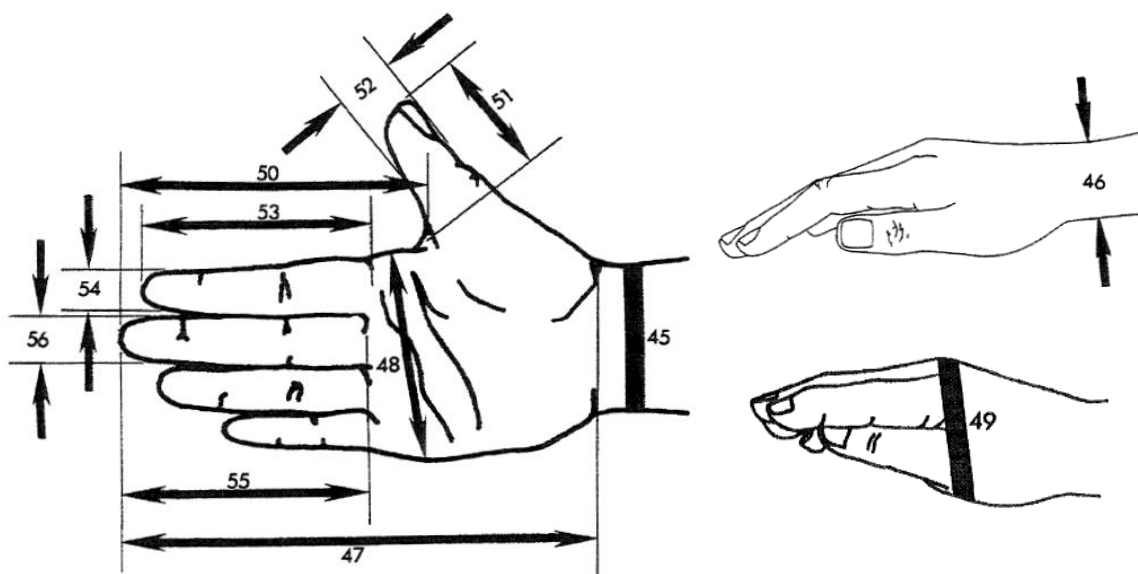


Figura 4-3: Representación de partes de un miembro superior de un niño con las cotas de las medidas estudiadas. [25]

	Medida Edad	45	46	47	48	Ø49	50	51	Ø52	53	Ø54	55	Ø56
Niñas	9,5 – 10,5	13,5	3,4	15,0	6,7	5,60	10,3	5,4	1,57	5,9	1,24	6,5	1,27
	10,5 – 11,5	13,6	3,5	15,7	7,0	5,82	10,7	5,6	1,62	6,2	1,28	6,8	1,31
	11,5 – 12,5	14,1	3,6	16,3	7,2	5,94	11,2	5,7	1,68	6,4	1,30	7,1	1,33
Niños	9,5 – 10,5	13,5	3,4	15,1	7,0	5,63	10,8	5,3	1,62	5,9	1,28	6,5	1,31
	10,5 – 11,5	13,4	3,4	15,5	7,2	5,88	11,2	5,5	1,68	6,0	1,32	6,7	1,34
	11,5 – 12,5	14,3	3,6	16,2	7,4	5,95	11,4	5,7	1,72	6,3	1,35	6,9	1,37

Tabla 4-3: Medidas de la Figura 4-3 de acuerdo a la edad de los niños en centímetros. [25]

4.2. Recomendaciones de diseño

Tomando como referencia las opciones propuestas en el diseño básico, se fueron seleccionado las más recomendadas para el diseño definitivo de la prótesis, de acuerdo con el cumplimiento de los objetivos del proyecto.

4.2.1. Brazo

El brazo en este tipo de prótesis es el punto de sujeción de la misma al niño, por lo que debe ser cómodo y resistente. Se selecciona la opción de utilizar un brazo que rodee el bíceps del niño donde la media caña inferior es impresa en material flexible, y luego se cierra la circunferencia mediante el uso de cintas de velcro.

Para otorgar la resistencia requerida, además del material flexible, se posee unas vainas o estructuras (en verde en Figura 4-4) impresas en el material elegido para la prótesis, de mayor dureza, que le otorgarán la rigidez necesaria para el correcto funcionamiento del dispositivo de asistencia para los niños.

La media caña de material flexible (en azul en Figura 4-4) no necesita ser completamente continua, sino que se pueden realizar cortes o dibujos para reducir la cantidad de material

de impresión y así también disminuir la superficie de contacto niño-prótesis y así reducir la transpiración que puede generar el niño por esa área de contacto. Asimismo, la suavidad que posee material hace que el contacto con el mismo sea cómodo para el niño.

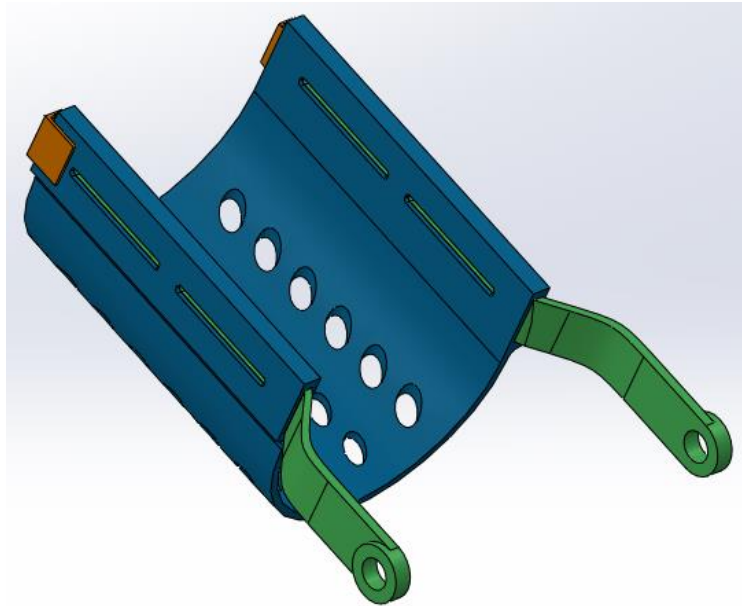


Figura 4-4: Representación de la recomendación para el diseño del brazo.

Las piezas que se aprecian en naranja en la Figura 4-4 son unas piezas montadas con relación de apriete a ambas posiciones para permitir que no se desplacen las medias cañas con las vainas. De todas formas, en la imagen faltan las cintas de velcro que también aportan a la función descrita anteriormente.

4.2.2. Antebrazo

Para el desarrollo del antebrazo, se debe considerar que tanto el brazo como la muñeca irán conectados al mismo a través de pernos de tipo clip que fueron descriptos durante el diseño básico. Además, se debe tener en cuenta que es necesario dejar un espacio para que el niño coloque su muñón y que este también tome contacto con la prótesis. Para este espacio se propone recubrirlo de goma Eva, material económico en comparación con los demás, que le permitirá al niño acceder a un mayor confort en esta interfaz de contacto.

Esta pieza tiene que ser capaz de contener en su interior a la batería que se seleccione para la prótesis ya que probablemente en el interior de la palma de la mano sea imposible incluir a la totalidad de los componentes electrónicos. Para ello, como se aprecia en la Figura 4-5 hay una tapa que albergará en su interior a la batería. En el diseño se deberá tener en cuenta que sea una pieza con bisagra, que se abra sólo y que tenga un agujero por donde deba salir el cable que va desde la batería hasta la placa Arduino.

Más allá de los alojamientos anteriormente mencionados, el resto de los espacios deben no ser sólidos, y mantener un espesor de pared de 3mm.

La forma final de la pieza debe adaptarse a una geometría similar a la de un niño. Su longitud no superará los 250mm para poder ser impresa en cualquier tipo de impresora 3D de deposición fundida.



Figura 4-5: Representación de la recomendación para el diseño del antebrazo.

4.2.3. Muñeca

Entre todas las combinaciones descritas en el diseño básico, es aquella de la rótula la que se recomienda como opción más viable de funcionamiento para el desarrollo de la articulación de la muñeca.

La misma estará comprendida por al menos 7 componentes:

- Media rótula 1: se trata de la rótula propiamente dicha que está compuesta por una media esfera que rotará sobre otra pieza y que, cuando la fricción lo permita, quedará quieta en una posición determinada. Esta pieza se unirá también a la muñeca y es la representada en naranja en la Figura 4-6.
- Media rótula 2: es igual a la pieza mencionada anteriormente, salvo que se fabrica en dos piezas para poder obtener mejores propiedades a través de la impresión 3D.
- Pieza intermedia de fricción: es quien tiene contacto con la rótula para que al presionar sobre ella se obtenga el roce suficiente como para evitar el movimiento. Está representada en color rosa en la Figura 4-6.
- Tornillo de regulación: es aquella pieza, que, si bien no se aprecia en la figura, generará el movimiento de elevación de la pieza intermedia anteriormente descrita.
- Cubierta de muñeca parte 1: fabricada en dos partes, la misma funciona como superficie de contacto para la parte de forma esférica de la rótula, como tope para la rótula también y como contención y cerramiento de la pieza intermedia. Es la representada en gris claro en la Figura 4-6.
- Cubierta de muñeca parte 2: es la segunda parte de la pieza descrita anteriormente. Se diferencia únicamente por la dimensión que posee el alojamiento del pin perno en su exterior. En la Figura 4-6 está representada con transparencia para que se pueda apreciar el interior.

- Perno tipo clip de unión: es la pieza que une el antebrazo con las dos partes impresas de las cubiertas de la muñeca.

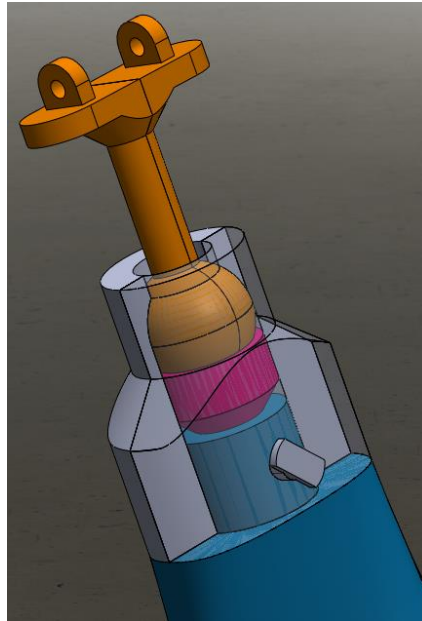


Figura 4-6: Representación de la recomendación para el diseño de la muñeca. Las dimensiones no están ajustadas en la imagen.

4.2.4. Dedos

De las opciones propuestas para los dedos, es necesario tener en consideración, en primer lugar, que los mismos podrán realizar el movimiento de flexo-extensión gracias a un sistema de cables y de bandas elásticas igual al que posee la mano mecánica de e-Nable actual. En ella, los cables generan la flexión, uniéndose en la parte palmar de los dedos, mientras que los elásticos dentales unen a las falanges en la parte dorsal asegurando la extensión de los dedos.

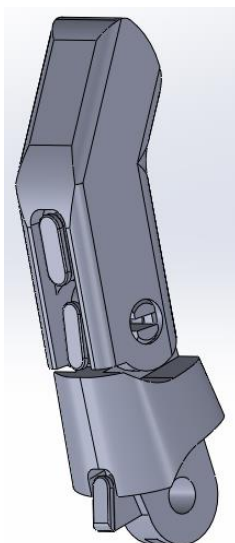


Figura 4-7: Representación de la recomendación para el diseño de los dedos meñique, anular, medio e índice.

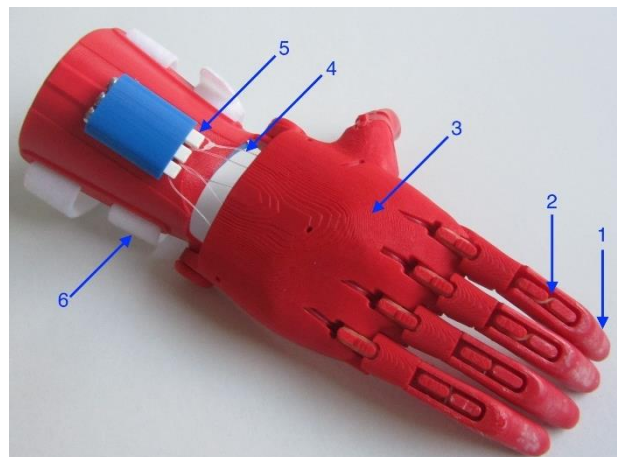


Figura 4-8: Mano de e-Nable donde el componente 2 son los elásticos dentales y el 4 el sistema de cables. [19]

El sistema de cables, que se asemeja a los tendones de una mano real que dan lugar a la flexión, puede ser realizado con un hilo de nylon con entre 0,4 y 0,6 mm de diámetro que se encuentra en cualquier ferretería, tienda de pesca o de manualidades para realizar accesorios femeninos. De hecho, para la fabricación de pulseras existen unas cuentas que se aplastan para retener a dichos hilos, en lugar de hacerle un nudo que puede resultar más difícil. En relación a los elásticos dentales utilizados para las ortodoncias, los mismos se encuentran disponibles en cualquier clínica dental del mundo. Se recomienda tener preferencia por aquellos con diámetros desde 3/8" a 1/4" con la mayor resistencia que se encuentre disponible en la tienda.

En segundo lugar, es necesario definir como se realizarán los movimientos de los dedos. Para ello se define utilizar una variación de los mecanismos diferenciales en la cual una especie de cigüeñal unido a un servomotor, generará la flexión al girar ya que el eje estará unido a los cables de los dedos. Para que se trate de un mecanismo diferencial, se plantea utilizar un mismo cable para los dedos meñique y anular, y otro para los dedos medio e índice. La siguiente figura representa de manera esquemática la idea descrita, donde en azul se representan los cables que conectan con los dedos y el punto fijo se encuentra en la palma de la mano.

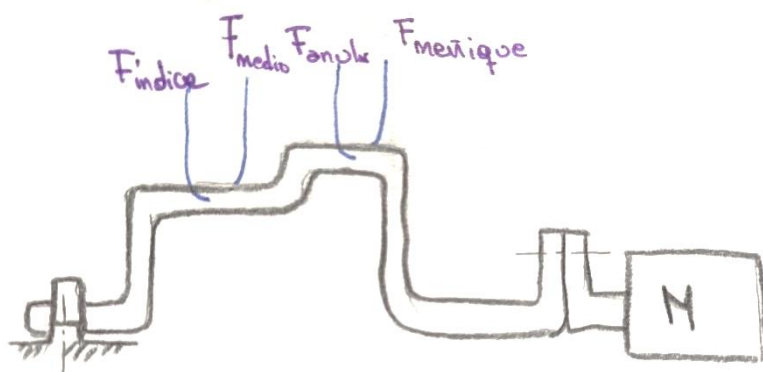


Figura 4-9: Croquis de la propuesta de accionamiento y comando para los dedos.

Por último, es necesario considerar el agarre que proporcionan los dedos. Desafortunadamente, la mayoría de los materiales plásticos utilizados en la impresión 3D no garantizan la adherencia a los objetos a sujetar. Para hacer frente a esta situación se propone fabricar dedales de material flexible o silicona que copien la geometría de los dedos y los recubra, dándole una mayor adherencia gracias al material cuando tome contacto con el objeto que el niño querrá desplazar.

Pulgar

Si se toma como ejemplo la solución que utiliza Exii para el pulgar en su mano Hackberry, se puede observar que incluir el servomotor en el interior del pulgar, y adosarle un sistema con bloqueos manuales para la flexo-extensión genera que las dimensiones del mismo estén fuera del estándar de las dimensiones de un pulgar real en un niño.

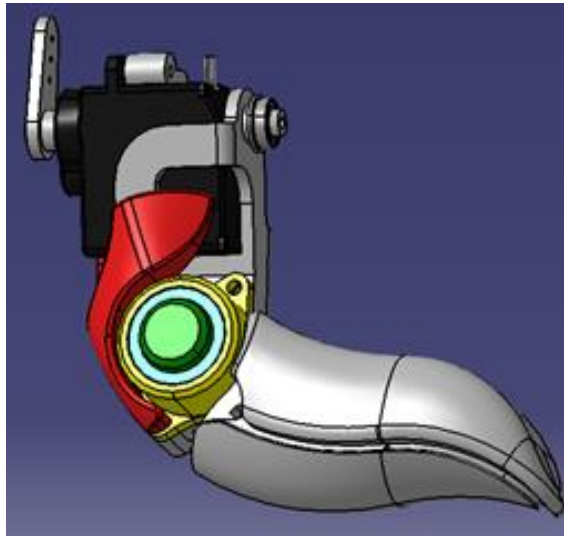


Figura 4-10: Recorte del archivo CAD del subconjunto del pulgar de la mano Hackberry.

De esta manera, se propone mantener la oposición del pulgar para la sujeción de los objetos instalando el servomotor en la palma de la mano. Al ser el dedo tan pequeño en relación a los demás, el mismo puede ser diseñado en una sola pieza, en una posición cuyo ángulo de flexo-extensión permita la sujeción de objetos como puede ser un vaso de agua. Para realizar la presa tipo pinza, es suficiente con que el extremo de pulgar pueda tomar contacto con el dedo índice.

El accionamiento de este motor puede venir comandado por un sensor mioeléctrico, pero es un botón el que se debe añadir para decidir si este movimiento se deba activar o no. En el caso de los movimientos de tipo presas se puede programar que sea primero el pulgar el que se accione y luego el resto de los dedos, accionada la secuencia por la señal que recibe el sensor mioeléctrico. Sin embargo, en el caso de los movimientos de tipo gestuales como un saludo, donde el pulgar no actúa, un botón deberá dar la orden de que, en ese caso, el sensor mioeléctrico active sólo el movimiento del resto de los dedos.

4.2.5. Palma de la mano

La palma de la mano es la pieza más compleja y crítica en el diseño de este proyecto debido a que interactúa con los cinco dedos y la muñeca y alberga en su interior a la mayor parte de los componentes electrónicos. Esta interacción con tantas otras piezas la convierten en la última a desarrollar.

Se puede mantener para el diseño la esencia de la mano Hackberry. Las falanges de los cuatro dedos estarán posicionadas de manera similar a dicha mano, a diferencia del pulgar, cuyo motor ahora se instalará en donde antes se encontraba el motor que comandaba al dedo índice.

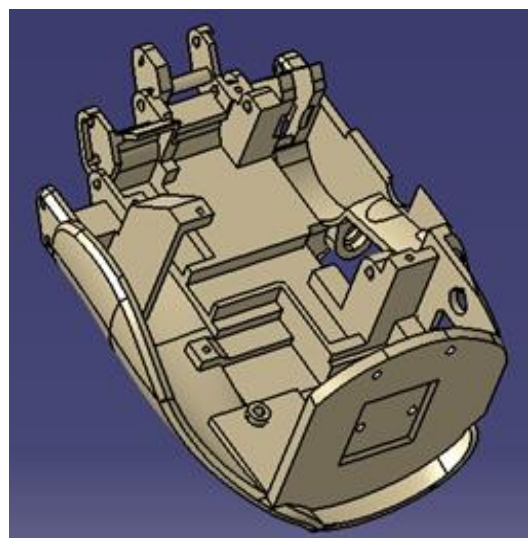


Figura 4-11: Recorte del archivo CAD del subconjunto del pulgar de la mano Hackberry.

En su interior se van a incluir los dos servomotores que comandan el pulgar y el resto de los dedos como así también la tarjeta Arduino y la placa base que corresponda. Esto generará que dimensionalmente, sobre todo en su espesor, la misma sea un poco mayor a lo que realmente suelen ser las manos de los niños.

Como idea básica, la palma de la mano estará fabricada en dos piezas principales unidas entre sí a través de cuatro tornillos. La pieza que contiene la cara dorsal de la mano, será sobre la cual se monten y fijen todos los componentes y las uniones anteriormente descritas, mientras que la cara palmar servirá solamente como tapa de contención para los componentes. En su desarrollo hay que considerar además que, al girar el pulgar, puede interferir con una cara por lo cual será necesario realizar un recorte, como así también considerar agujeros para el ingreso de los cables del sensor mioeléctrico y de la batería.

Finalmente, se recomienda que comenzar con un diseño básico rectangular sobre el cual se vayan presentando cómo quedarán los diferentes equipos, para luego, mediante operaciones de superficie en SolidWorks se pueda adaptar su estética a una pieza fácilmente imprimible con una geometría similar a la mano real de un niño.

4.2.6. Validación con el usuario

Una vez terminado el diseño mecánico, incluyendo los colores que se van a utilizar en la prótesis, es necesario validar el estilo con el usuario, que en este caso será un niño, previo a la fabricación.

Al tratarse de una prótesis personalizable, el niño tendrá la capacidad de elegir el estilo y los componentes adicionales que quiera, colores, y demás características estéticas o visibles del dispositivo de asistencia. Para ello, se recomienda que en el diseño CAD ya estén incluidos todas estas características para que, previo a la impresión, el infante pueda validarlas y así estar contento con su prótesis realizada a su gusto y medida. En la Figura 4-12 se pueden apreciar algunas ideas de caracterización y estética visual que fueron ejecutadas por la asociación e-Nable en sus diversos modelos de prótesis mecánicas.



Figura 4-12: Diseños disponibles de las diversos modelos de prótesis ofrecidas por e-Nable. [19]

Una vez validado el diseño con el niño y previo a su fabricación, se pueden agregar también entre las piezas a imprimir y a entregar al niño, algunos elementos decorativos que combinen con el diseño realizado como se observa en la Figura 4-13. De esta forma el niño estará más feliz y tendrá accesorios para combinar con su nueva prótesis robótica.



Figura 4-13: Prótesis mecánicas y otros elementos entregados a una niña por la asociación e-Nable. [19]

4.3. Diseño electrónico

Teniendo en consideración lo descrito en el diseño básico, se seleccionaron los componentes electrónicos necesarios para el correcto funcionamiento de la prótesis y el cumplimiento de los objetivos.

4.3.1. Selección de componentes

Microcontrolador y placa base

Dentro de los microcontroladores disponibles en el mercado, la Arduino Nano es la más pequeña que se adapta a las necesidades del proyecto. La misma posee varias versiones que se pueden explorar que van desde ser sólo un microcontrolador hasta aquellas que tienen la posibilidad de trabajar con IoT⁸ con accesos a Wi-Fi, a la nube o Bluetooth, como así también versiones con sensores de presión temperatura, humedad entre otras cosas.

En este proyecto, se utilizará una tarjeta Arduino Nano Every con pines, económica y fácil de programar que cumple con los requerimientos necesario para el proyecto de la mano, y que es una versión superadora y con mayor procesador que su antecesora, la Arduino Nano. Para que sea más sencillo el conexionado y el manejo de los pines de entrada y de salida, es necesario anexarle una placa base o Shield⁹ de expansión con borneras compatible con dicha tarjeta cuyas dimensiones no superen los 70mm x 50mm.

⁸ IoT: Internet of Things. En español: internet de las cosas.

⁹ Del inglés: escudo.

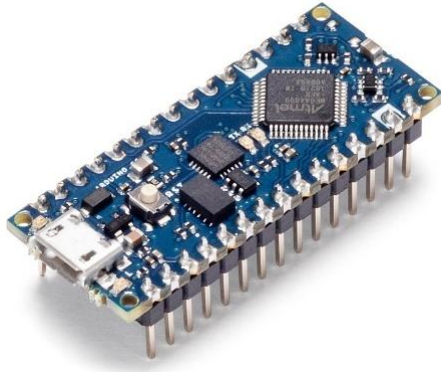


Figura 4-14: Imagen representativa de la tarjeta Arduino Nano Every. [22]

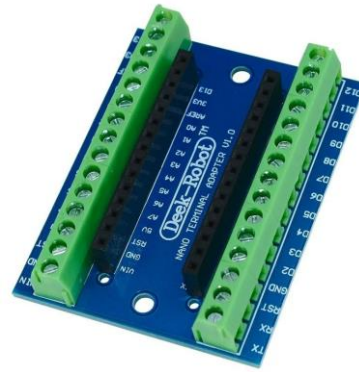


Figura 4-15: Imagen representativa de la Shield compatible con Arduino Nano Every. [26]

La siguiente tabla resume las especificaciones técnicas de la placa seleccionada.

Microcontrolador	ATMega4809
Tensión de trabajo	5V
Corriente CC por pin de E/S	20mA
Pines Digitales	14 (5 PWM)
Pines Analógicos	8
Velocidad de reloj	20MHz
Memoria FLASH	48KB
Memoria EEPROM	256 bytes
Memoria SRAM	6 KB

Tabla 4-4: Resumen de las características principales de la tarjeta Arduino Nano Every. [22]

Motores

Debido a su mayor torque y al diseño planteado, se utilizarán motores del tipo servomotor. Dentro de los disponibles en el mercado, se selecciona el servomotor SG90 marca Tower Pro cuyas características se detallan en la Tabla 4-5 . Si bien se selecciona este modelo para la prótesis, se puede seleccionar un servomotor con las mismas características.



Figura 4-16: Imagen representativa del servomotor SG90 marca Tower Pro. [27]

Voltaje de operación	3.0 – 7.2V
Velocidad	0.1seg / 60 grados
Torque	1.3Kg x cm (4.8V), 1.6Kg (6.0V)
Ángulo de rotación	180°
Peso	9g
Engranajes	Nylon
Dimensiones	22 * 11.5 * 27 mm
Cables	Marrón = tierra (GND) Rojo = VCC (5V) Naranja = señal de control (PWM)

Tabla 4-5: Resumen de características principales del servomotor SG90. [27]

Sensor de comando

Las señales de los músculos se pueden obtener mediante el uso de sensores de presión, por la fuerza que hace el músculo contra este último. También existen los sensores mioeléctricos que captan la señal eléctrica que produce el músculo al contraerse.

Los sensores de presión simples trabajan variando su resistencia de acuerdo con la cantidad de presión que se le esté siendo aplicada en la zona de presión. Cuanto mayor sea la fuerza, menor será la resistencia. Dependiendo del mecanismo del mismo, son capaces de medir en un intervalo de entre 100gr y 10Kgs. Si bien estos sensores son fáciles de instalar, de bajos niveles de ruido, de bajo costo y excelentes para detectar la presión, no son muy precisos como para usarlos en mediciones tan finas como las que se requieren para el funcionamiento de las prótesis.

Por otra parte, los sensores mioeléctricos miden la actividad muscular a través del potencial eléctrico del músculo, usualmente denominado como electromiografía de superficie (EMG). Cuando una persona mueve un músculo, las señales eléctricas emitidas por el cerebro se transmiten al músculo a través de los nervios, estas señales alcanzan ligeramente la superficie de la piel, y corresponde a la señal observada por los electrodos adheridos a la superficie de la piel conectados a los sensores. Cuanto mayor sea la fuerza realizada, mayor será también la actividad eléctrica en los músculos. De esta forma, este sensor tiene una mayor precisión en las mediciones obtenidas, por lo que se pueden realizar diversas acciones de acuerdo con los valores obtenidos en las salidas.

Por lo tanto, se decide utilizar un sensor mioeléctrico para el control de la prótesis. Dentro de los disponibles en el mercado, se selecciona el sensor MyoWare 2.0 en su última versión como el que aparece en la Figura 4-17, aunque si se encuentran en el mercado, las versiones anteriores también son posibles de utilizar. El mismo da la posibilidad de trabajar con 3 tipos de salidas: sin procesar (RAW), rectificada (RECT) y envolvente (ENV).

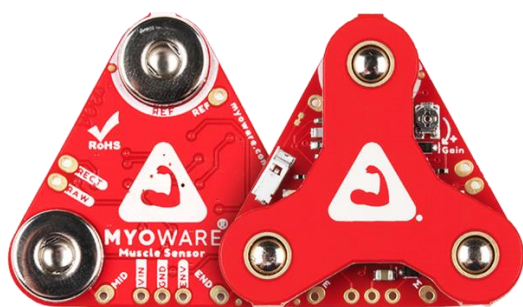


Figura 4-17: Sensor mioeléctrico MyoWare con su cobertura para proteger la electrónica. [28]



Figura 4-18: SMyoWare® 2.0 Link Shield o escudo de enlace. [29]

Es posible agregar al componente MyoWare 2.0 Link Shield que es el escudo que permite el fácil enlace entre la tarjeta Arduino y el sensor mioeléctrico (ver Figura 4-18). Por el costo adicional que el mismo representa no se tendrá en cuenta en el desarrollo del proyecto, pero puede ser considerado como un agregado adicional en caso de poderse incluir en el precio.

Los componentes que sí son necesarios son los electrodos como los de la Figura 4-19, que van adosados directamente al sensor en los 3 conectores hembra del lado trasero de la placa, llamados toma de presión. Los mismos se pueden conseguir en cualquier lugar ya que son iguales a los utilizados en medicina. Es importante verificar que sean compatibles con señales EMG. En la página web de MyoWare figura un proyecto de electrodos de tejido conductor que no es desechable, que se le puede compartir a los usuarios si tienen interés en fabricarlo o que podrían implementarse como mejoras en el futuro e incluirse en el pack de entrega de la organización. En este proyecto se trabajará con los electrodos desechables.



Figura 4-19: Electrodo desechables para sensores biomédicos. [29]

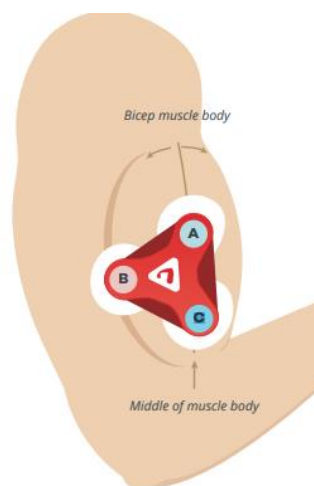


Figura 4-20: Correcto posicionamiento de los electrodos donde A corresponde a MID, C a END y B a REF. [28]

La colocación y la orientación correctas de los electrodos son esenciales para adquirir señales de calidad con MyoWare. Cada toma de presión del sensor evalúa un valor diferente y debe estar puesto de determinada forma sobre el músculo. Uno corresponde a la toma de presión del electrodo de referencia (REF), otro al electrodo de músculo medio (MID) y otro al electrodo del músculo final (END). Los electrodos MID y END deben formar una línea longitudinalmente paralela a las fibras musculares. Esto asegura que las

superficies de detección se cruzan con las mismas fibras musculares creando una mejor señal superpuesta.

Batería

Existen diversos tipos de baterías en el mercado, desde baterías similares a las de las cámaras de fotos hasta conjuntos de pilas recargables. La solución elegida para este proyecto es similar a esta última que es de la de más bajo costo. Se trata de la Batería Blomiky 1905 6V 2200mAh, constituida por 5 pilas AA recargables que incluye un conector de 2pines y un cable para cargar USB, que se puede conectar a la red con cualquier adaptador similar al que utilizan os nuevos celulares con pin de carga USB-C.



Figura 4-21: Batería Blomiky 1905. [30]

Se trata de baterías de NiMh (Níquel-metalhidruro) con una densidad de energía media-alta, manteniendo un peso moderado. Son las más adecuadas para proyectos medianos y grandes, que requieren una gran capacidad y corrientes medias. Sus 6V las convierten en la solución idónea para cuando se emplean servomotores o motores DC.

4.3.2. Recomendaciones para la construcción

Para el montaje y conexionado de los componentes electrónicos será necesario considerar unos mínimos pasos importantes en el proceso de construcción:

- Empalmar los cables que van desde la batería hacia el resto de los componentes ya que todos llevan energía.
- El cableado al sensor mioeléctrico deberá tener en un extremo un conector de 3 pines hembra, con algún pegamento para evitar su desconexión, o directamente, soldarse a la placa.
- Los cables de señal deben trenzarse en todo su recorrido como se observa en la Figura 4-22. Esto se debe a que, para los cables de baja señal, es decir, tensión pequeña, el trenzado evita el ruido diferencial por efecto “antena”.



Figura 4-22: Imagen de dos cables trenzados. [31]

4.3.3. Autonomía

El niño debe ser capaz de transportar su prótesis y utilizarla a lo largo del día sin importar donde se encuentre. Es por ello que es importante calcular el tiempo que la prótesis podrá funcionar, teniendo en cuenta la capacidad de la batería y el consumo del conjunto electrónico y servos.

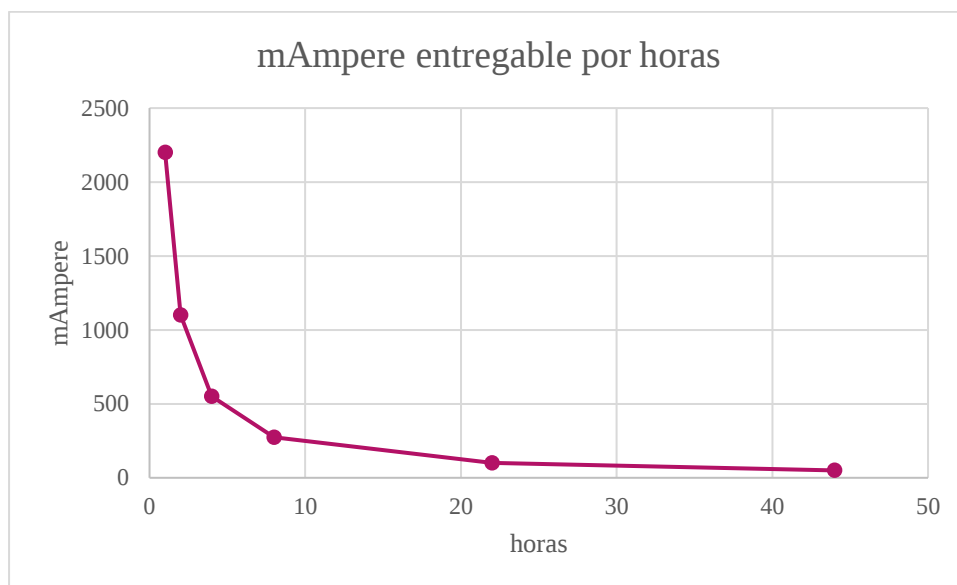


Figura 4-23: Gráfico de mAmperes entregables en el tiempo.

En la gráfica se puede apreciar que cuanto más tiempo se desea que la mano funcione, menor es la cantidad de ampere que deberá entregar la batería. Por ejemplo, si se desea que la batería funcione 20 horas, como máximo podrá entregar aproximadamente 100 mA.

Si se incrementa la capacidad de la batería, la autonomía también, pero también el tamaño y el peso de la prótesis. Se deberá adoptar un valor de compromiso

Considerando un consumo estimado de:

- 20 mA para el controlador.
- Un ciclo de trabajo de 1/10 del servo, con 200 mA de consumo por ciclo, lo que daría un consumo promedio de cada servo de 20mA, es decir, para 2 servos, 40 mA.
- Un consumo de 30 mA del sensor mioeléctrico, y pérdidas.

Se obtiene que la corriente consumida total es de 70 mA, de acuerdo con la siguiente operación matemática:

$$20\text{ mA} + 40\text{ mA} + 10\text{ mA} = 70\text{ mA}^{10}$$

De lo comentado previamente, se concluye que en estos valores de uso normal, con una batería de 2200 mAh, debería tolerar 22 hs de funcionamiento. Este valor supera ampliamente el valor objetivo por lo que, en caso de que las dimensiones lo requieran, se podrá seleccionar una batería menor.

4.4. Fabricación

Para fabricar la prótesis robotizada para niños se utilizará una impresora 3D de deposición fundida (FDM) que deberá ser capaz de imprimir con filamentos plásticos de material flexible y PLA, este último utilizado en la mayor parte de las piezas gracias a su disponibilidad en variedad de colores, su resistencia, y que no necesita una cama caliente para su impresión. En caso de que el fabricante desee cambiar el material PLA por otro como puede ser el ABS, deberá tomar las consideraciones pertinentes para poder realizar el trabajo.

La mayor parte de las impresoras 3D FDM disponibles en el mercado son capaces de imprimir las piezas descritas en este proyecto. Por ejemplo, en la Figura 4-24 se puede apreciar el modelo típico de impresora en el que actualmente se realizan la mayor parte de las prótesis que ofrece la asociación e-Nable, cuya característica principal es que posee una cama que permite imprimir piezas de hasta 300 x 200 mm.



Figura 4-24: Ejemplo de impresora 3D utilizada por e-Nable para la fabricación de sus prótesis. [19]

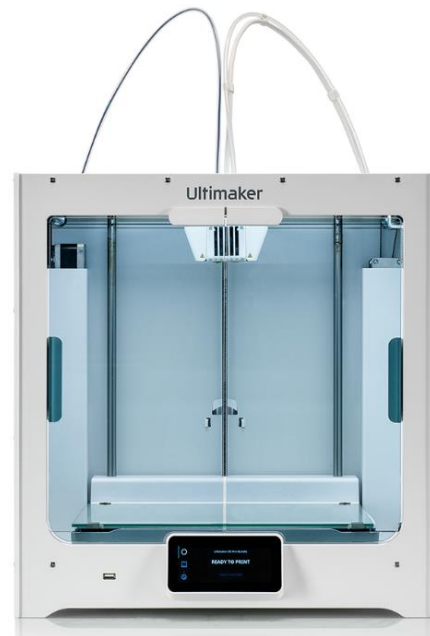


Figura 4-25: Imagen de la impresora Ultimaker S5. [32]

En este caso, dentro de las posibilidades, se seleccionará para la impresión 3D el modelo de impresora Ultimaker S5, una impresora de escritorio que es fácil de usar y que permite realizar piezas precisas de calidad industrial. Dentro de las características principales de la misma se puede mencionar:

¹⁰ Los valores utilizados para el cálculo de la autonomía son aproximados y pueden contener errores. Se deberá realizar un cálculo más preciso en caso de que se lo requiera.

- Volumen de construcción 330 x 240 x 300 mm.
- Extrusión dual lista para inclusive materiales compuestos.
- Nivelación automática avanzada de la cama.
- Compatible con más de 200 materiales.
- Dispone de cama caliente y conexión de red.

Se puede apreciar que la impresora seleccionada posee tecnología de punta que generará una mejor calidad de los productos. El volumen de construcción permite imprimir en simultáneo varias piezas al mismo tiempo ahorrando tiempo de fabricación. Además, el cerramiento hace que la temperatura en el interior de la cabina se mantenga estable, pudiendo así obtener una mejor calidad de impresión. Asimismo, el cabezal dual permite imprimir material flexible y PLA a la vez, o inclusive, utilizar estructuras de soporte que sean solubles para que sea más fácil el postproceso.

4.4.1. Software

Para poder trabajar con este tipo de máquinas es necesario contar con un software que permita presentar las piezas en el interior de la impresora y decidir cuáles son las variables de impresión necesarias para obtener el objeto deseado.

En este caso, se decide optar por el software Ultimaker Cura, que está disponible de forma gratuita en la página de Ultimaker y es compatible con una gran variedad de impresoras 3D de diferentes compañías.

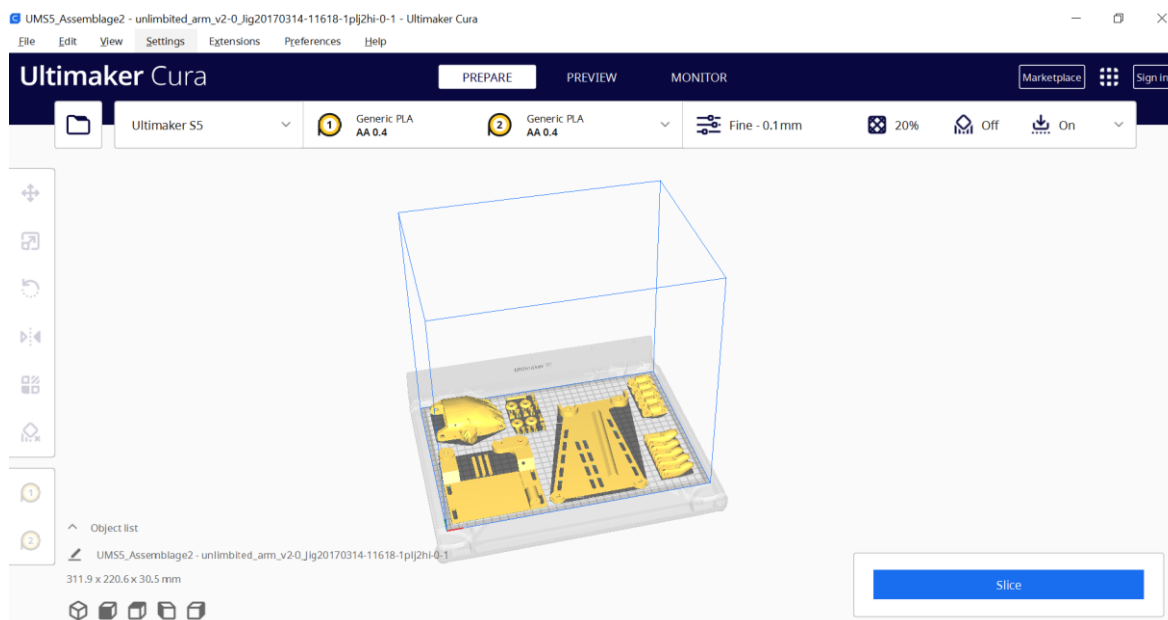


Figura 4-26: Captura de pantalla del software Ultimaker Cura con las piezas de la actual mano de Téó.

El programa debe ser alimentado mediante archivos en formato .stl, que se obtienen a partir del CAD de las piezas al guardar, por ejemplo, un archivo en SolidWorks con la extensión .stl. Se pueden insertar varias piezas, como se aprecia en la Figura 4-26, para imprimirlas en simultáneo, teniendo en consideración que todas van a tener programados los mismos parámetros.

4.4.2. Recomendaciones de impresión

Orientación de las piezas

A la hora de posicionar las piezas en la cama de impresión, es necesario tener en consideración dos aspectos principales. Por un lado, si se trata de piezas estéticas o no sometidas a esfuerzos, se debe intentar imprimir en la dirección que requiere menor cantidad de material de soporte. Por el otro lado, para los materiales que son sometidos a esfuerzos se debe orientar la fibra de manera tal que los esfuerzos de flexión tiendan a comprimir o flexionar las fibras siempre que sea posible.

Asimismo, de acuerdo a la geometría de las piezas, la orientación puede ser determinante en el acabado superficial de las mismas. Se puede apreciar en las imágenes a continuación como una variación en la orientación de las piezas conllevó a una diferencia sustancial en los acabados superficiales de las prótesis.



Figura 4-27: Prótesis Phoenix de e-Nable con incorrecta selección de orientación de las falanges de los dedos. [19]



Figura 4-28: Prótesis Phoenix de e-Nable con incorrecta selección de orientación de las falanges de los dedos. [19]

Es clave esta etapa de orientación de las piezas ya que el pensamiento crítico, el estudio y el sentido común harán que se ahorre una considerable cantidad de tiempo de impresión, cantidad de material soporte y tiempo de postproceso y montaje.

Variables de impresión

En primer lugar, para el material PLA la temperatura de impresión deberá estar entre los 190 y los 210°C.

En segundo lugar, para una boquilla de 0,4mm se debe considerar una altura recomendada de capa de 0,12 mm, pudiendo alcanzar como máximo los 0,2 mm. Esto se debe a que el acabado superficial será mejor cuanto menor sea la resistencia de la pieza.

En último lugar, el espesor de la pieza y el porcentaje de relleno variarán de acuerdo a los requerimientos de cada pieza. Para las piezas que no están sometidas a esfuerzos se recomienda un 35% de relleno. Se deberá analizar el caso particular de cada pieza

sometida a esfuerzos ya que aumentar el espesor de pared aumenta la resistencia de la pieza, pero también el costo de la misma.

4.4.3. Postproceso

Con todos los materiales plásticos, para mejorar el acabado superficial del producto, se debe realizar un pulido, limpieza, y, eventualmente, pintura. En el caso particular del PLA, existe la posibilidad de trabajar con algunos agentes químicos capaces de pulir las superficies.

La acetona o algunos productos disponibles en el mercado basados en alcohol isopropílico pueden ser utilizados con una pequeña porción de algodón o un hisopo para mejorar el acabado de las superficies. Esto se debe a que el PLA es soluble en dichas sustancias. También es posible utilizar vapor de cloruro de metileno, aunque es un proceso que es más peligroso que el mencionado anteriormente.



Figura 4-29: Diferencias entre el acabado superficial de la impresión 3D (izquierda) y el obtenido luego del postproceso con baño de acetona (derecha). [23]

4.5. Análisis económico

La realidad de las prótesis robóticas es que poseen un precio muy elevado en el mercado, convirtiéndose en dispositivos accesibles sólo para personas privilegiadas. Una de las prótesis más modernas, con varios grados de libertad, puede llegar a costar hasta más de U\$D 10.000. El caso de la prótesis de mano para adultos Hackberry es un caso de bajo costo, alcanzando alrededor de los U\$D 400. Mientras tanto, las prótesis mecánicas que provee e-Nable a los niños pueden alcanzar un costo de hasta U\$D 100.

De acuerdo con los precios de los componentes electrónicos seleccionados, y realizando una estimación del costo de la impresión 3D de las piezas, se puede concluir que una prótesis robotizada para niños de acuerdo a la solución propuesta alcanzará aproximadamente los U\$D 200, precio accesible en relación a los valores que suele manejar la sociedad e-Nable.

5. Conclusiones y recomendaciones

5.1. Conclusiones

En primer lugar, se puede concluir que el miembro superior del cuerpo humano es una estructura extremadamente compleja que posee una gran variedad de funcionalidades. Esto lo convierte en una extremidad muy difícil de reemplazar, y, en consecuencia, en diseñar una prótesis que sustituye algunas de sus funciones. Diseñar una prótesis robotizada para niños le suma un grado de dificultad, ya que los niños son más sensibles y físicamente más pequeños.

En segundo lugar, el diseño propuesto cumple con los requerimientos planteados al inicio del proyecto, con un precio no tan elevado, sobre todo comparado con las prótesis robotizadas que se pueden encontrar en el mercado.

En tercer lugar, es necesario comprender que el desarrollo de un nuevo producto es un proceso que, para realizarse perfecto, requiere de mucho tiempo, investigación y dedicación. Para que sea un producto capaz de ser ofrecido en el mercado quedan pendientes varias etapas, como es el desarrollo de los planos detalle o la impresión de la prótesis propiamente dicha.

En cuarto lugar, a nivel de gestión de proyectos, se utilizó demasiado tiempo en estudiar en profundidad el tema ya que varios de los conceptos eran nuevos, sobre todo lo relacionado con la anatomía física y funcional de la mano.

Finalmente, es importante resaltar que se aprendieron una gran variedad de conceptos a lo largo de este proyecto. Estudios relacionados a la bioingeniería, técnicas de impresión 3D, materiales plásticos, señales mioeléctricas son algunos ejemplos del valor académico agregado. Sin embargo, también existió un gran valor social de que mediante la ingeniería mecánica podemos aportar directamente en el impacto positivo de la vida de las personas.

5.2. Recomendaciones

A la hora de emprender un proyecto similar, se propone:

- Determinar un alcance del proyecto realizable en un tiempo acotado.
- Realizar un diagrama de Gantt del proyecto que abarque todas las tareas necesarias para su correcto desarrollo y que sea efectivamente posible de efectuar de acuerdo con los recursos que se tengan disponibles.
- Comenzar por el estudio de una mano real y tener algún caso de estudio para analizar el funcionamiento de una prótesis robotizada.

- Analizar cuál es el mejor software de diseño CAD para las piezas que se van a realizar.
- Diseñar primero un esquema básico funcional con todas las piezas y luego embellecerlo estéticamente.
- Tener conocimiento previo en impresión 3D.
- Tener conocimiento previo en electrónica.

Asimismo, la amplitud de la temática seleccionada para el proyecto deriva en la existencia de otros tipos de estudios o análisis adicionales que se pueden realizar aumentando el alcance del proyecto:

- Estudio dinámico de los movimientos de la mano de acuerdo a las dimensiones, por ejemplo, mediante el uso de Matlab.
- Escaneo 3D de un brazo de un niño para poder implantar la prótesis y diseñar con mayor facilidad el espacio para el muñón del niño.
- Determinar variables estándar editables para que el diseño de la prótesis pueda ser adaptado fácilmente a la anatomía de otro niño y a su deseo de personalización.
- Cálculo de los esfuerzos reales que se generan en el interior del brazo a la hora de sujetar diversos objetos.
- Prototipo de algunas piezas o de la totalidad de la prótesis para encontrar las probabilidades de falla.
- Hacer entrega de la prótesis a un niño que así la requiera para que pueda presentar los problemas inherentes al funcionamiento o la estética.
- Mejoras en el diseño 3D y estudio cinemático del mismo a través de software CAD.
- Programación de la lógica para la ejecución de los movimientos con Arduino.
- Diseño de una placa base o Shield que sea adaptada a las necesidades del proyecto.

6. Fuentes bibliográficas

A continuación, se listan todas las fuentes documentales consultadas para sustentar este trabajo.

- [1] «Enabling the future,» [En línea]. Available: <https://enablingthefuture.org/>. [Último acceso: Junio 2022].
- [2] «e-Nable France,» [En línea]. Available: <https://e-nable.fr/>. [Último acceso: Junio 2022].
- [3] «Le Lorrain,» [En línea]. Available: <https://www.le-lorrain.fr/blog/2017/09/02/lorrains-offrent-prothese-imprimee-3d-teo/>. [Último acceso: Junio 2022].
- [4] OMS, «Sitio web de Organización Mundial de la Salud,» [En línea]. Available: <https://www.who.int/topics/disabilities/es/>. [Último acceso: 2020].
- [5] OMS - Organización Mundial de la Salud, Informe Mundial sobre la Discapacidad, Malta, 2011.
- [6] OMS - Organización Mundial de la Salud, Clasificación Internacional del Funcionamiento, de la Discapacidad y de la Salud, Suiza, 2001.
- [7] ONU - Organización de las Naciones Unidas, *Convención Internacional sobre los Derechos de las Personas con Discapacidad*, New York, 2008.
- [8] INDEC - instituto Nacional de estadística y Censos, Estudio Nacional sobre el Perfil de las Personas con Discapacidad, CABA, 2018.
- [9] Ortopedia Jens Müller, «Ortopedia Jens Müller,» [En línea]. Available: <http://ortopediajensmuller.com/>. [Último acceso: Junio 2022].
- [10] Ottobock, «Ottobock,» [En línea]. Available: <https://www.ottobock.com/es-ar/inicio>. [Último acceso: Junio 2022].

- [11] Shadow Robot Company, «Shadow Robot,» [En línea]. Available: <https://www.shadowrobot.com/>. [Último acceso: Junio 2022].
- [12] Össur, «Össur,» [En línea]. Available: <https://www.ossur.com/en-us>. [Último acceso: Junio 2022].
- [13] RAE - Real Academia Española, «Definición de Anatomía,» [En línea]. Available: <https://dle.rae.es/anatom%C3%ADa>. [Último acceso: 2022 Junio].
- [14] A. I. Kapandji, Fisiología Articular. Tomo I. 6ta Edición, París: Editorial Médica Panamericana, 2006.
- [15] E. Amos, «Wikipedia,» [En línea]. Available: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/32/Human-Hands-Front-Back.jpg>. [Último acceso: Junio 2022].
- [16] H. Rouvière, Compendio de Anatomía y Disección. 3ra Edición., Barcelona: Salvat Editoriales S.A., 1976.
- [17] H. Rouvière y A. Delmas, Anatomía humana descriptiva, topográfica y funcional. Tomo 3: Miembros. 11va Edición., Barcelona: Masson, 2005.
- [18] D. Persaud, «Semantic Scholar,» 7 Febrero 2015. [En línea]. Available: <https://www.semanticscholar.org/paper/7-2-2015-Fibonacci-Series-%2C-Golden-Proportions-%2C-Persaud/df6c9738d1885a93b37d9e908083307524b24e4a>. [Último acceso: Junio 2022].
- [19] E-Nable, «Hub E-Nable,» [En línea]. Available: <https://hub.e-nable.org/s/e-nable-devices/wiki/e-NABLE+Phoenix+Hand+v3>. [Último acceso: Junio 2022].
- [20] «Team Unlimbited,» [En línea]. Available: <https://www.teamunlimbited.org/arms>. [Último acceso: Junio 2022].
- [21] Exii, «Hackberry,» [En línea]. Available: <http://exiii-hackberry.com/>. [Último acceso: Junio 2022].
- [22] «Arduino,» [En línea]. Available: <https://www.arduino.cc/>. [Último acceso: Agosto 2022].

-
- [23] All3DP, «All3DP,» 16 Febrero 2022. [En línea]. Available: <https://all3dp.com/es/>. [Último acceso: Agosto 2022].
- [24] Simplify 3D, «Simplify 3D,» [En línea]. Available: <https://www.simplify3d.com/>. [Último acceso: Septiembre 2022].
- [25] R. G. Snyder, L. W. Schneider, C. L. Owings, H. M. Reynolds, H. Golomb y A. Schork, «Anthropometry of infants, children and youths to age 18 for product safety design,» Universidad de Michigan, Michigan, 1977.
- [26] Uno electro, «Uno electro,» [En línea]. Available: https://www.unoelectro.com.ar/MLA-861207538-shield-de-expansion-con-borneras-arduino-nano-unoelectro-_JM#position=23&search_layout=grid&type=item&tracking_id=beb1f319-79e8-45d2-957c-b5391884aa82. [Último acceso: Julio 2022].
- [27] Murkyrobot, [En línea]. Available: <https://www.murkyrobot.com/catalogo/servo-motor-sg90-1-5kg>. [Último acceso: Julio 2022].
- [28] Advancer Technologies, «MyoWare,» [En línea]. Available: <https://myoware.com/>. [Último acceso: Julio 2022].
- [29] SparkFun Electronics, «SparkFun,» [En línea]. Available: <https://www.sparkfun.com/>. [Último acceso: Julio 2022].
- [30] «Mercado Libre,» [En línea]. Available: https://articulo.mercadolibre.com.ar/MLA-1108029811-bateria-recargable-6v-2200mah-ni-mh-5-aa-una-unidad-_JM?matt_tool=73015101&matt_word=&matt_source=google&matt_campaign_id=14508401210&matt_ad_group_id=127259817112&matt_match_type=&matt_network=g&matt_de. [Último acceso: Julio 2022].
- [31] Cable Cel, «Cable Cel,» [En línea]. Available: <https://www.cablecel.com/productos/cables-coaxiales-electricidad-seguridad-y-bus/cables-de-audio/trenzado-2x1-rojo-negro-lshz/>. [Último acceso: Agosto 2022].
- [32] Ultimaker, «Ultimaker,» [En línea]. Available: <https://ultimaker.com/es/>. [Último acceso: Octubre 2022].

-
- [33] Universidad Nacional de Misiones, «Facultad de Humanidades y Ciencias Sociales,» [En línea]. Available: <https://www.fhyics.unam.edu.ar/portada/discapacidad-una-cuestion-de-definir/>. [Último acceso: Junio 2022].
- [34] M. T. Muñoa-Ubis, *La discapacidad*, Navarra: Tesis Final de Grado en Pedagogía - Universidad de Navarra, 2015.
- [35] OMS - Organización Mundial de la Salud, *El desarrollo del niño en la primera infancia y la discapacidad: Un documento debate*, Malta, 2013.
- [36] «Discapacidad Motriz - Comunidad / Información / Recursos,» Octubre 2019. [En línea]. Available: <https://discapacidadmotriz.org/tema/ortesis-y-protesis>. [Último acceso: Junio 2022].
- [37] «American Cancer Society,» Febrero 2020. [En línea]. Available: <https://www.cancer.org/es/tratamiento/tratamientos-y-efectos-secundarios/efectos-secundarios-fisicos/protesis.html>. [Último acceso: Junio 2022].
- [38] J. L. Loaiza y N. Arzola, «SciELO Colombia - Scientific Electronic Librerly Online,» Agosto 2011. [En línea]. Available: <http://www.scielo.org.co/pdf/dyna/v78n169/a22v78n169.pdf>. [Último acceso: Junio 2022].
- [39] L. Llamas, «Luis Llamas,» [En línea]. Available: <https://www.luisllamas.es/tipos-motores-rotativos-proyectos-arduino/>. [Último acceso: Julio 2022].
- [40] Solelectroshop, «Solelectroshop,» [En línea]. Available: <https://solectroshop.com/es/blog/todo-lo-que-necesitas-saber-sobre-el-uso-de-motores-en-los-proyectos-de-arduino-n12>. [Último acceso: Julio 2022].
- [41] ISO/ASTM, «Norma ISO/ASTM 52900:2015,» Suiza, 2015.
- [42] 3Dnatives, «3Dnatives,» [En línea]. Available: <https://www.3dnatives.com/es/>. [Último acceso: Agosto 2022].
- [43] K. Xu, H. Liu, Z. Liu, Y. Du y X. Zhu, «A Single-Actuator Prosthetic Hand Using a Continuum Differential Mechanism,» ICRA - International Conference on Robotics and Automation, Seattle, 2015.