



Diseño y mejora de dispositivos de asistencia mecánicos y/o robóticos para personas con discapacidad, por medio de impresión 3D

Melissa Echavarría Guarín

Trabajo de grado presentado para optar al título de Bioingeniera

Asesor

Jonathan Gallego Londoño
M.Sc Biomedical Engineering

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Bioingeniería

Medellín

2022

Cita	Echavarría Guarín [1]
Referencia	[1] M. Echavarría Guarín, “Diseño y mejora de dispositivos de asistencia mecánicos y/o robóticos para personas con discapacidad, por medio de impresión 3D”, práctica social, Bioingeniería, Universidad de Antioquia, Medellín, 2022.

Estilo IEEE (2020)



Lugar de realización de prácticas: Humanos 3D

Asesor de prácticas interno: Jonathan Gallego Londoño

Asesor de prácticas externo corporación Humanos 3D: Esteban Rojas Muñoz



CENDOI – Centro de Documentación de Ingeniería

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes.

Decano/Director: Jesús Francisco Vargas Bonilla.

Jefe departamento: Juan Diego Lemos Duque.

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Dedicatoria

Este trabajo es dedicado primeramente a Dios, quien es el motor de mi vida, me ha guiado en cada paso de mi caminar y me ha dado fortaleza en todo momento.

A mis padres y hermana quienes siempre han estado conmigo, me han apoyado de forma incondicional, me han comprendido y estimulado constantemente.

También lo dedico a mi asesor de práctica, la organización Humanos 3D y sus integrantes por su disposición y apoyo en el desarrollo de este proyecto.

Agradecimientos

Agradezco a Dios y mi familia por ser los guías de mi proyecto de vida.

Al profesor Jonathan Gallego por estar siempre disponible al desarrollo del proyecto y aportar su conocimiento en cada etapa realizada.

A la organización Humanos 3D y su fundador Adam Armfield por permitir esta oportunidad de desarrollar un proyecto con finalidad social y así apostar a la continua mejora de las personas con discapacidad. Además, agradecer a Esteban Muñoz y Alison Montoya por su continuo acompañamiento y apoyo dentro de la fundación.

Finalmente, a mis compañeros de práctica Jhon Alexander Sossa, Sebastián Barbudo y Walter Gómez, quienes aportaron en el desarrollo del dispositivo y del presente trabajo.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	11
ABSTRACT	12
I. INTRODUCCIÓN	13
II. OBJETIVOS	15
1. Objetivo general	15
2. Objetivos específicos	15
III. MARCO TEÓRICO	16
1. Amputaciones de miembro superior	16
2. Consideraciones para dispositivos de asistencia	16
3. Dispositivos para amputación de miembro superior	17
4. Dispositivos mecánicos implementados en H3D	17
5. Versiones del brazo robótico de H3D	19
6. Dispositivos Transhumerales	20
7. Socket Ajustable	21
IV. METODOLOGÍA	22
1. Investigación de antecedentes	22
1.1. Requerimientos para un dispositivo de miembro superior	22
1.2. Casos de desarticulación de codo	22
1.3. Dispositivos mecánicos	22
1.4. Versiones del brazo robótico	22
2. Recopilación de requerimientos	23
2.1. Necesidades del beneficiario	23
2.2. Medidas y datos requeridos	23
2.3. Especificaciones del dispositivo:	23

3.	Análisis de posibles soluciones	23
3.1.	Determinación de criterios de evaluación	24
3.2.	Desarrollo de matriz de diseño	24
3.3.	Alternativas de solución	24
4.	Desarrollo de la solución	25
4.1.	Desarrollo de aplicativo para accionamiento de la mano	25
4.1.1.	Establecer el protocolo de comunicación	25
4.1.2.	Accionamiento del sistema con el ESP32	26
4.1.3.	Desarrollo del código para el aplicativo	26
4.2.	Diseño del sistema electrónico	27
4.2.1.	Consideraciones del sistema	27
4.2.2.	Definición de componentes electrónicos y actuadores	28
4.2.3.	Desarrollo de PCB basados en esquemático	30
4.2.4.	Montaje en protoboard	31
4.2.5.	Prueba preliminar	31
4.3.	Diseño del dispositivo de asistencia	31
4.3.1.	Ajuste de Hackberry Handbook	31
4.3.2.	Diseño del Socket	31
4.3.3.	Adaptación de antebrazo	31
4.3.4.	Acople para movimiento de codo	31
4.4.	Impresión 3D de partes del dispositivo	32
4.5.	Integración de la parte electrónica con el dispositivo	32
5.	Evaluación de funcionalidad	32
V.	RESULTADOS	33
1.	Matriz de diseño	33

2. Aplicativo web	34
3. Sistema electrónico	35
4. Dispositivo de asistencia	37
4.1. Socket ajustable	37
4.2. Antebrazo	38
4.3. Mano, muñeca y dedos	38
4.4. Piezas de acople para el sistema de codo	40
4.5. Integración del dispositivo con parte electrónica	40
5. Funcionalidad del dispositivo	42
VI. ANÁLISIS	43
1. Especificaciones del diseño	43
2. Matriz de diseño	43
3. Aplicativo web	46
4. Sistema electrónico	46
5. Dispositivo de asistencia	47
6. Funcionalidad del dispositivo	47
VII. CONCLUSIONES	48
REFERENCIAS	49

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: dispositivos mecánicos implementados por H3D	18
Tabla 2: dispositivos robóticos implementados por H3D	19
Tabla 3: dispositivos para amputación transhumeral y sus especificaciones	20
Tabla 4: componentes electrónicos y sus especificaciones	28
Tabla 5: matriz de diseño	33

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: amputaciones en el cuerpo humano	16
Figura 2: armPO v3	18
Figura 3: unlimbited Arm V2.1	18
Figura 4: kwawu Arm 2.0	18
Figura 5: kwawu Remix	18
Figura 6: primera versión del brazo robótico	19
Figura 7: segunda versión del brazo robótico	19
Figura 8: tercera versión del brazo robótico.....	19
Figura 9: brazo protésico antropomórfico	20
Figura 10: mano protésica Inmoov arm	20
Figura 11: brazo robótico RoboArm	20
Figura 12: dispositivo hackberry handbook	21
Figura 13: socket ajustable con sistema de suspensión.....	21
Figura 14: protocolo de comunicación WebSocket.	26
Figura 15: microcontrolador ESP32.....	28
Figura 16: baterías de Litio	29
Figura 17: módulo protector de carga	29
Figura 18: módulo step down.....	29
Figura 19: actuador lineal.....	29
Figura 20: servomotor pequeño.....	30
Figura 21: servomotor grande	30
Figura 22: esquemático de fase electrónica.....	30
Figura 23: proceso de impresión: a) Renderizado – b) Impresión – c) acabado	32
Figura 24: página para inicio de sesión en el aplicativo.	34
Figura 25: página para realizar los movimientos del brazo robótico	35
Figura 26: tarjeta PCB de componentes electrónicos con diferentes capas	35
Figura 27: plano de tierras de la PCB	36
Figura 28: montaje del sistema electrónico en protoboard	36
Figura 29: socket y ensamble: a) acople – b) socket – c) ensamble de acople y socket	37

Figura 30: partes del socket impresas: a) Socket – b) Enmallado con acople – c) Muñón con enmallado	37
Figura 31: archivos STL de antebrazo: a) electrónica visible – b) electrónica cubierta	38
Figura 32: pieza del antebrazo después de impresión 3D	38
Figura 33: archivos STL de la mano: a) Mano y motores – b) Mano visible el interior – c) Vista superior de mano - d) Vista inferior de mano	39
Figura 34: mano impresa y ensamblada: a) Vista posterior – b) Vista superior	39
Figura 35: piezas de acople: a) STL de acople de actuador lineal con antebrazo – b) STL de bisagras – c) Bisagras y actuador lineal	40
Figura 36: archivo STL de ensamble de todas las piezas.....	40
Figura 37: ensamble completo del dispositivo de asistencia – Vista lateral	41
Figura 38: ensamble completo del dispositivo de asistencia – Vista superior	41
Figura 39: dispositivo de asistencia con montaje electrónico	41
Figura 40: prueba 1 con el beneficiario.....	42
Figura 41: prueba 2 con el beneficiario.....	42
Figura 42: comparación de tipos de prótesis con tipos de actuación en estudio de revisión de prótesis con impresión 3D.....	43

SIGLAS, ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

MSc	Magister Scientiae
H3D	Humanos 3D
DANE	Departamento Administrativo Nacional de Estadística
UdeA	Universidad de Antioquia
RLCPD	Registro para la Localización y Caracterización de la Población con Discapacidad
EMG	Electromyography
CAD	Computer-aided design
HTML	Hypertext Markup Language
CSS	Cascading Style Sheets
JS	JavaScript
TCP	Transmission Control Protocol
IDE	Integrated Development Environment
SPIFFS	Serial Peripheral Interface Flash File System
SoC	System on a Chip
SoM	System on Module
USB	Universal Serial Bus
UART	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter
CPU	Central Processing Unit
PCB	Printed Circuit Board

RESUMEN

Este proyecto es una propuesta de innovación para la organización H3D que buscó desarrollar un dispositivo de asistencia para un beneficiario con desarticulación de codo mediante la integración de los dispositivos y prototipos electromecánicos que se implementan actualmente. Lo anterior, siguiendo una metodología que incluye una revisión bibliográfica, el análisis de posibles soluciones por medio de una matriz de diseño con ponderación cuantitativa, el desarrollo del brazo robótico contando con etapas para implementar un aplicativo web y el diseño de un sistema electrónico y de las diferentes partes del dispositivo, para finalizar con un ensamble de las piezas procedentes de la impresión 3D y la electrónica considerada, pudiendo de esta manera realizar una evaluación de funcionalidad con el beneficiario.

Como resultado de lo expuesto, se destaca el desarrollo funcional de un aplicativo web para el movimiento de mano y codo del dispositivo, junto con el diseño completo de socket ajustable, antebrazo y modificación de mano Hackberry Handbook, además del sistema electrónico que permitió el acondicionamiento de los diferentes componentes. Para finalizar, se concluye que el dispositivo de asistencia puede presentar mejoras tanto en el sistema electrónico, analizando mejor el consumo de corriente e implementando baterías con valores más elevados de capacidad energética, como en las diferentes piezas del diseño, en este caso el socket y antebrazo para garantizar una mejor estética, sujeción y tener presentes las necesidades del beneficiario.

***Palabras clave* — Brazo robótico, dispositivo de asistencia, desarticulación de codo, socket ajustable, actuador lineal, diseño CAD, impresión 3D, aplicativo web, protocolo WebSocket, portabilidad, sistema a baterías.**

ABSTRACT

This Project is an innovation proposal for the H3D organization that search for develop an assistance device for a recipient with elbow disarticulation by integrating the electromechanical devices and prototypes that are currently being implemented. This, following a methodology that includes a literature review, the analysis of possible solutions by means of a design matrix with quantitative weighting, the development of the robotic arm with stages for implementing a web application and the design of an electronic system and of the different parts of the device, to finalize with an assembly of the parts coming from the 3D printing and the considered electronics, thus being able to carry out a functionality evaluation with the beneficiary.

As a result, stands out the functional development of a web application for the movement of the hand and elbow of the device, together with the complete design of adjustable socket, forearm and the Hackberry Handbook hand modification, in addition to the electronic system that allowed the conditioning of the different components. Finally, it is concluded that the assistive device can present improvements both in the electronic system, better analyzing current consumption and implementing batteries with higher energy capacity values, as well as in the different parts of the design, in this case the socket and forearm to ensure better aesthetics, clamping and keep in mind the needs of the beneficiary.

***Keywords* — Robotic arm, assistance device, elbow disarticulation, adjustable socket, linear actuator, CAD design, 3D printing, web application, WebSocket protocol, portability, battery system.**

I. INTRODUCCIÓN

Las personas con discapacidad en Colombia representan el 19.4% del total de la población, según el censo nacional de población y vivienda realizado por el DANE en el 2018, cifra que aumentó considerablemente desde el censo general realizado por la misma organización en el 2005, donde se tenía una cantidad total de 2'624.898 personas con discapacidad y para el 2018 aumentó a un valor de 3'134.036 [1]; sin embargo, en informes más recientes del 2019 realizados por el Ministerio de Salud y Protección Social, las personas con discapacidad representan el 2,3% del total de la población, alcanzando la cifra de 1'298.738, cantidad que es inferior respecto a la presentada por el DANE. Esta variación en las cifras es debido a que la realizada por el Ministerio de Salud y Protección Social fue obtenida del RLCPD que aún no presenta una cobertura del total de la población pero se encuentra en constante actualización [2].

Por otra parte, la Asociación Colombiana de Medicina Física y Rehabilitación estima que la incidencia de amputación en el país es de 200 a 300 personas por cada 100.000 habitantes, cifra que se calcula considerando la población con discapacidad de aproximadamente el 10% del total de los colombianos, entre los cuales entre el 5 y 10% representa a los discapacitados con amputación [3]. Como consecuencia de este contexto social, distintas organizaciones actualmente pretenden abordar las dificultades que presenta la población discapacitada para la realización de diversas actividades diarias y así poder contribuir a la mejora de su calidad de vida. Una de estas organizaciones es H3D, la cual es una organización sin ánimo de lucro fundada en mayo de 2017 con la finalidad de proveer dispositivos de asistencia personalizadas sin costo, mediante el uso de la tecnología de impresión 3D para ayudar a las víctimas de las minas terrestres y demás personas que necesiten el apoyo [4].

Actualmente, la fundación entrega los dispositivos de asistencia a personas con amputación de miembro superior con la finalidad de contribuir a la recuperación de la independencia de las personas con discapacidad y apoyar en la mejora de su autoestima e integración a la sociedad. Estos dispositivos son implementados según el nivel de la amputación, entre los cuales se encuentra la amputación transradial y transhumeral, la desarticulación de muñeca, de hombro y de codo.

Para la amputación transradial, se han implementado en la fundación dispositivos con diseños libres de organizaciones como PO Paraguay y Team Unlimbited, con la ArmPO V3 y The Unlimbited Arm V2.1 respectivamente. Ambos dispositivos tienen mecanismo de acción mecánico

y facilitan el agarre de diferentes objetos mediante el movimiento del codo [5], [6]. Por otra parte, dentro de la fundación se han desarrollado 3 versiones del brazo robótico, los cuales han sido enfocados en amputación transradial y han permitido el movimiento de agarre en la mano mediante la detección de señales electromiográficas; estos últimos sin ser evaluados en beneficiarios y que se encuentran aún en pruebas de funcionamiento [7].

Ahora bien, para casos como la amputación transhumeral y la desarticulación de codo la organización se encuentra en este momento en continua investigación y desarrollo de distintas soluciones con las cuales se pueda abordar la problemática. Es dentro de esta temática que se encuentra enmarcado el presente proyecto buscando aportar al desarrollo de dispositivos de asistencia en H3D mediante el diseño de un nuevo dispositivo para personas con desarticulación de codo basado en los actualmente implementados e incluyendo la integración de un sistema electrónico, el cual permita la movilidad de la mano y el codo, todo lo anterior teniendo presente los avances que se han obtenido en la organización frente al desarrollo de un brazo robótico.

Esta solución planteada se desarrolló mediante el método de análisis y solución de problemas, el cual establece un adecuado control de los procesos y permite una mejor planificación del trabajo facilitando la priorización de los problemas [8]. Esta metodología, incluyó una revisión bibliográfica para determinar los antecedentes de dispositivos transhumerales y desarrollados con impresión 3D, previendo las necesidades del usuario y los requerimientos específicos; para así posteriormente analizar las posibles soluciones y determinar la mejor según una matriz de diseño con ponderación cuantitativa; teniendo esta solución escogida, se realizó el desarrollo del brazo robótico en diferentes etapas que incluyeron el desarrollo de un aplicativo web, el diseño de un sistema electrónico y el dispositivo de asistencia y la integración de lo anterior; todo esto para finalmente evaluar su funcionalidad con el respectivo beneficiario.

Dentro de los resultados obtenidos, se destaca el desarrollo de una página web por medio del lenguaje de programación HTML, CSS, JS y C/C++ para accionar movimientos como el agarre de pinza y de fuerza, los cuales son movimientos que debería garantizar todo dispositivo de miembro superior, la implementación de la Hackberry Handbook que permitió el movimiento independiente de índice y pulgar, el diseño de un socket ajustable con sistema de acople, el cual permitió una mejor sujeción al muñón, y de un antebrazo que permitió tener un espacio para una tarjeta electrónica y además un correcto acople con la muñeca y el socket.

II. OBJETIVOS

1. *Objetivo general*

Diseñar una nueva versión de brazo robótico de la fundación Humanos 3D que pueda ser usado como un dispositivo de asistencia para un beneficiario con desarticulación de codo mediante la integración de los dispositivos y prototipos electromecánicos que implementa actualmente la fundación.

2. *Objetivos específicos*

- Seleccionar un diseño del dispositivo de asistencia para desarticulación de codo que pueda ajustarse a uno de los beneficiarios de la fundación, mediante la evaluación de posibles soluciones electromecánicas en el uso de los dispositivos para amputación de miembro superior implementados por la fundación.
- Desarrollar un prototipo electrónico funcional del dispositivo de asistencia para desarticulación de codo que permita realizar un control funcional de las partes móviles del dispositivo basado en señales o estímulos provenientes del beneficiario.
- Adaptar un dispositivo mecánico que se acomode adecuadamente a los requerimientos de diseño y al beneficiario y permita una posterior integración con el sistema electrónico.
- Evaluar la funcionalidad y usabilidad del dispositivo mediante pruebas con el beneficiario.

III. MARCO TEÓRICO

1. Amputaciones de miembro superior

La amputación se define como la separación de un hueso en tejido sano o de una parte del cuerpo en una articulación. Existen varios niveles de amputación [9]:

- ❖ Amputación de dedo/pulgar
- ❖ Amputación parcial de mano
- ❖ Amputación transcarpiana/carpiana
- ❖ Desarticulación de la mano
- ❖ Amputación transradial
- ❖ Desarticulación de codo
- ❖ Amputación transhumeral
- ❖ Desarticulación del hombro y amputación interescapulotorácica

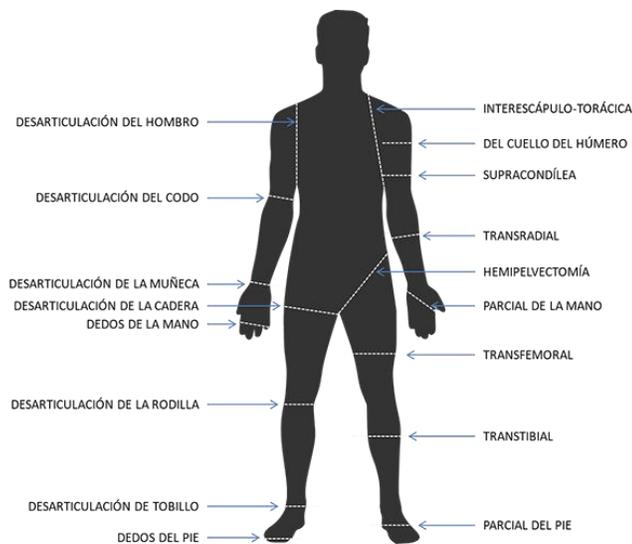


Figura 1: amputaciones en el cuerpo humano

2. Consideraciones para dispositivos de asistencia

Partiendo del proceso para diseño conceptual, en el cual se plantea una solución para un problema teniendo presentes especificaciones, requisitos y necesidades planteadas [10], se pueden enunciar diferentes consideraciones a tener en cuenta al momento de seleccionar un diseño para un dispositivo de asistencia. Algunas de estas enunciadas por Abhilash *et al.* [11] comprenden la comodidad para el usuario, la facilidad para ponerla y removerla, la duración, estética, el peso, el buen funcionamiento mecánico y el mantenimiento razonable que se le pueda dar; otro estudio de

revisión en prótesis de miembro superior [12], indica que todo dispositivo debe satisfacer las demandas básicas del usuario buscando aumentar su usabilidad y teniendo como prioridad la estética, comodidad, control y funcionalidad de la prótesis.

Complementando lo anterior, se deben incluir los componentes técnicos con los cuales se desarrollará el dispositivo en cuestión, los cuales incluyen desde el sistema de suspensión, encaje y articulación hasta las unidades terminales que pueden favorecer el movimiento parcial de la articulación de hombro, codo y muñeca [13].

3. Dispositivos para amputación de miembro superior

Los dispositivos representan un conjunto de elementos que permiten realizar funciones determinadas. Para el caso de amputación de miembro superior se encuentran dispositivos que permiten reemplazar el movimiento natural de las partes del cuerpo mediante la ejecución de movimientos generados por una combinación de mecanismos y piezas simples, entre ellos se encuentran [14]:

- Impulsados por el cuerpo: dispositivos mecánicos que trasladan el movimiento de un segmento del cuerpo al movimiento de un efector final a través de un cable.
- Mioeléctricos: son externamente energizados (baterías) y controlados mediante señales EMG de superficie registradas desde el muñón, las cuales envían datos a un respectivo microcontrolador encargado de accionar los movimientos de diferentes servomotores.
- Híbridos: combina componentes eléctricos, mecánicos y electrónicos para controlar múltiples articulaciones.

4. Dispositivos mecánicos implementados en H3D

En la fundación H3D se implementan diferentes dispositivos mecánicos que han sido obtenidos de repositorios digitales en plataformas como GitHub y Thingiverse, los cuales permiten la facilidad de impresión 3D y ya han sido implementados por otras organizaciones en diferentes usuarios. Algunos de los dispositivos para amputaciones transradiales y transhumerales se enlistan en la Tabla 1.

Tabla 1: dispositivos mecánicos implementados por H3D

Dispositivo	Descripción
<p>ArmPo3 v3 [5]</p>  <p>Figura 2: armPO v3</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ Específico para personas con amputación transradial y presentan la mayoría del antebrazo sin rotación de muñeca ○ Permite la flexión de los dedos gracias a un mecanismo de hilos
<p>Unlimbited Arm v2.1 [6]</p>  <p>Figura 3: unlimbited Arm V2.1</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ Este puede ser adaptado y renderizado dependiendo las medidas del usuario y el nivel de amputación ○ Es generalmente aplicado para amputación transradial y desarticulación de muñeca ○ Accionamiento del movimiento por mecanismo de hilos
<p>Kwawu Arm 2.0 [15]</p>  <p>Figura 4: kwawu Arm 2.0</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ Es especial para amputaciones transradiales que presentan extremidades residuales cortas en antebrazo ○ Esta facilita el agarre de objetos pequeños y es accionada por un mecanismo de hilos
<p>Niop Modular Arm System [16]</p>  <p>Figura 5: kwawu Remix</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ Diseño basado en la Kwawu Arm 2.0 ○ Específica para amputaciones transhumerales ○ Impulsada por el cuerpo ○ Mecanismo de bloqueo externo para codo

5. Versiones del brazo robótico de H3D

Dentro de la fundación H3D se han desarrollado 3 dispositivos de asistencia electromecánicos que no han sido evaluados en beneficiarios pero que si han tenido pruebas de funcionalidad. Estas versiones son enunciadas brevemente en la Tabla 2 y se encuentran disponible en el repositorio de GitHub [7].

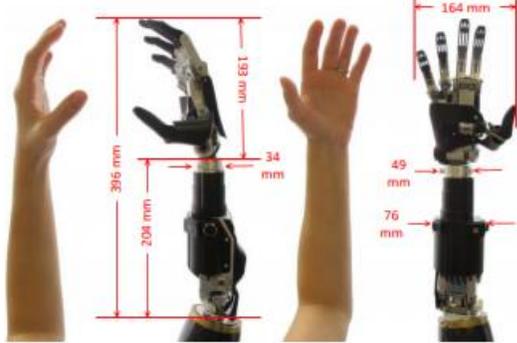
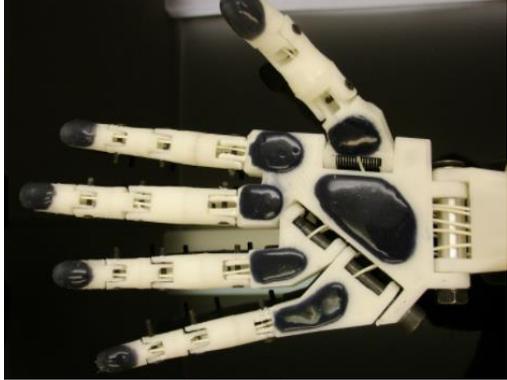
Tabla 2: dispositivos robóticos implementados por H3D

Dispositivo	Descripción
<p data-bbox="199 613 638 646">El Medallo Bionic Prosthetic v1.0</p>  <p data-bbox="199 930 673 963">Figura 6: primera versión del brazo robótico</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li data-bbox="824 613 1424 678">○ Desarrollado en mayo de 2019 con base en el diseño de la Kwawu Arm <li data-bbox="824 684 1424 749">○ Cuenta con dos movimientos diferentes, el agarre de pinza y de fuerza <li data-bbox="824 756 1424 863">○ Ambos movimientos son activados por señales EMG mediante dos contracciones musculares únicas <li data-bbox="824 869 1424 934">○ Sus movimientos son facilitados por la acción de dos servomotores
<p data-bbox="199 980 410 1014">Robotic Arm v2</p>  <p data-bbox="199 1392 678 1425">Figura 7: segunda versión del brazo robótico</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li data-bbox="824 980 1424 1129">○ Este dispositivo es una adaptación del Medallo Bionic e incluye un servomotor en su interior que permite el accionamiento de un agarre completo.
<p data-bbox="199 1442 410 1476">Robotic Arm v3</p>  <p data-bbox="199 1866 662 1900">Figura 8: tercera versión del brazo robótico</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li data-bbox="824 1442 1424 1591">○ Este diseño es una adaptación del brazo robótico versión 2 que tiene principalmente un diseño integrado con sistema inalámbrico

6. Dispositivos Transhumerales

Dentro de la bibliografía se encuentran diferentes dispositivos desarrollados con tecnología 3D que han optado en su mayoría por generar el movimiento por medio de la señal EMG o de diferentes componentes electrónicos que permiten la movilidad de la mano, la muñeca y el codo. Algunos de estos se enuncian brevemente en la Tabla 3

Tabla 3: dispositivos para amputación transhumeral y sus especificaciones

Dispositivo	Descripción
<p data-bbox="199 613 670 646">Brazo protésico antropomórfico [17]</p>  <p data-bbox="199 999 643 1031">Figura 9: brazo protésico antropomórfico</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ Desarrollado por el Instituto de Rehabilitación de Chicago (RIC) ○ Desarrollado con un control de reconocimiento de patrones personalizados ○ Presenta un socket de suspensión con sujeción por medio de arnés ○ Genera el movimiento por señales EMG ○ Tiene un sistema de codo y muñeca de transmisión por engranajes ○ Presenta un peso de 1518g
<p data-bbox="199 1047 427 1081">Inmoov Arm [18]</p>  <p data-bbox="199 1467 618 1499">Figura 10: mano protésica Inmoov arm</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ Realizado por el francés Gaël Langevin ○ Es la primera mano protésica de código abierto ○ Este brazo es desarrollado para un robot de tamaño natural impreso en 3D ○ Sistema de socket rígido ○ Presenta un sistema de tendones artificiales simulados por cables. ○ Activa los movimientos de la mano por protocolo de voz ○ Fabricado con PLA, ABS y PETG
<p data-bbox="199 1516 391 1549">RoboArm [19]</p>  <p data-bbox="199 1860 586 1892">Figura 11: brazo robótico RoboArm</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ Desarrollado por Unlimited Tomorrow ○ La activación de su movimiento es por medio de encefalografía ○ El movimiento del codo y la muñeca se da por transmisión de engranajes ○ Contiene un sistema de tendones artificiales simulados por cables. ○ Presenta un peso de 2kg ○ Fabricado con PLA

Hackberry Handbook [20]



Figura 12: dispositivo hackberry handbook

- Dispositivo electromecánico desarrollado por exii Co. Ltda.
- Este dispositivo es de código abierto y disponible para realizar con impresión 3D
- Funciona por medio de señales EMG
- Realiza el movimiento de los dedos por medio de tres servomotores, uno permite el movimiento del índice, otro el del pulgar y el último el de los dedos restantes
- Fue desarrollada para amputaciones transradiales pero tiene una adaptación para transhumerales
- Fabricado con PLA

7. *Socket Ajustable*

Al plantear el desarrollo de un dispositivo de asistencia, es más que necesario establecer los factores de mayor relevancia para el usuario y diseñador, ya que, se centrara un esfuerzo considerable a dicho aspecto. Tal es el caso del socket a desarrollar, el cual podrá ofrecer seguridad, comodidad y funcionalidad para el beneficiario, además del ajuste que debe permitir con em muñón para evitar el rechazo de los dispositivos.

Resultados publicados por Diaz *et al.* y U. México [21], [22], señalan el desarrollo de un socket ajustable junto con el sistema de suspensión, el cual presenta una innovación en su principio de funcionamiento, aprovechando un mallado en diagonal que modifica sus dimensiones radiales al someterla a esfuerzos longitudinales contrario a los sockets rígidos; según los autores este sistema presenta grandes ventajas como lo son: aumentar la ventilación dentro del muñón, permitir una constricción modular para intercambiar o reemplazar componentes, no limitar articulación del hombro permitiendo mayor movilidad y poder permitir la sustitución del arnés para evitar lesiones de espalda y hombros. Por último, este diseño (Figura 13) permite que el sistema de suspensión siempre aplique la misma fuerza sobre el órgano residual, sin depender de la carga que se tenga en el socket.

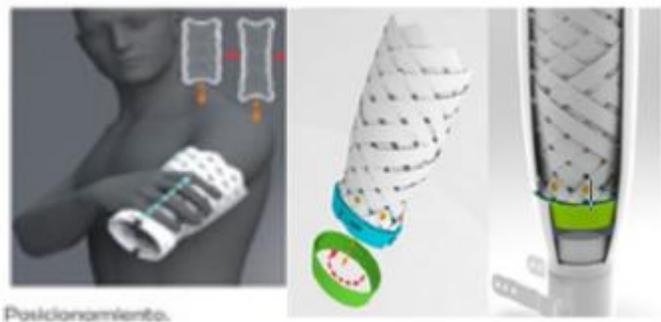


Figura 13: socket ajustable con sistema de suspensión

IV. METODOLOGÍA

Para el desarrollo del dispositivo de asistencia se tuvo presente el método de análisis y solución de problemas con la finalidad de apoyar los procesos de innovación de la organización con un objetivo social y con un enfoque en el beneficiario; en consecuencia, se planteó la siguiente secuencia de acciones para el correcto cumplimiento de objetivos.

1. Investigación de antecedentes

En esta etapa inicial se realizó un estado del arte del dispositivo que se desarrolló, en el cual se tuvieron presentes tanto los dispositivos realizados por la fundación como los avances que se tenían respecto al tema de desarticulación de codo, comprendiendo especialmente aquellos que han sido desarrollados para implementarse con impresión 3D.

1.1.Requerimientos para un dispositivo de miembro superior

Se realizó una revisión bibliográfica de los diferentes aspectos que son tenidos en cuenta al momento de desarrollar un dispositivo de asistencia para personas con amputaciones de miembro superior, teniendo presente no solo aspectos técnicos relevantes sino las implicaciones significativas para los beneficiarios.

1.2.Casos de desarticulación de codo

Al haber tenido claridad del problema a trabajar, se abordaron los diferentes dispositivos desarrollados por la fundación, específicamente en el caso de dispositivos transhumerales o de desarticulación de codo, y a su vez se evaluaron las soluciones que han sido aplicadas por otras organizaciones o diferentes trabajos investigativos.

1.3.Dispositivos mecánicos

En este caso se realizó un reconocimiento de los diferentes dispositivos que han sido implementados por la fundación para las amputaciones de miembro superior. Adicional a esto, se lleva a cabo una investigación de dispositivos que puedan ser adaptados o mejorados para el enfoque de desarticulación de codo.

1.4.Versiones del brazo robótico

Para culminar esta etapa se hizo una revisión de las versiones desarrolladas en la fundación sobre el sistema electrónico que se ha trabajado; teniendo presente los sensores, tarjetas de desarrollo y actuadores que han sido utilizados. Para esto, se tuvo en cuenta el repositorio de

GitHub donde se encontró la documentación de los dispositivos implementados por la organización Humanos 3D.

2. *Recopilación de requerimientos*

En esta etapa del proceso se analizaron las características del problema y por ende se generó una lista de requerimientos que se tuvieron presentes durante el desarrollo del dispositivo.

2.1. *Necesidades del beneficiario*

Por medio de un encuentro con el beneficiario se determinaron las características imprescindibles para su uso cotidiano y comodidad.

2.2. *Medidas y datos requeridos*

En concordancia con el paso anterior se realizó una toma de medidas del miembro superior con y sin amputación, además de un molde en yeso del brazo amputado. Adicionalmente, se obtuvieron datos iniciales de las señales electromiográficas provenientes del muñón con el sensor Gravity de OYMotion y el código desarrollado por la fundación para adquisición de dichas señales.

2.3. *Especificaciones del dispositivo:*

Para terminar de recopilar los requerimientos se tuvieron en cuenta los dispositivos ya implementados en la fundación para establecer rangos de movilidad, movimientos que debían ser emulados y demás características.

3. *Análisis de posibles soluciones*

Después de haber determinado los requerimientos y tener en cuenta los antecedentes se analizaron las soluciones que podían aplicarse al caso específico del beneficiario, implementando una matriz de diseño que permitió realizar una conexión entre los elementos del problema y posteriormente una ponderación cuantitativa para definir cuál era la opción más conveniente. Los elementos específicos definidos para la comparación tenidos en cuenta para la matriz se listan a continuación

Especificaciones del diseño

- ✓ Peso - Liviano - Carga a la cual se somete el muñón - Distribución de carga
- ✓ Estabilidad del dispositivo
- ✓ Confort - Comodidad
- ✓ Encaje - Socket - Ajuste

-
- ✓ Sistema de sujeción
 - ✓ Movilidad de codo y mano
 - ✓ Funcionalidad – Control o manejo
 - ✓ Usabilidad
 - ✓ Costo - Accesibilidad
 - ✓ Utilidad del dispositivo
 - ✓ Fuerza - Resistencia
 - ✓ Estética - Realismo - Natural
 - ✓ Fabricación – Impresión 3D

Con una mayor claridad de las especificaciones del diseño a continuación se enuncian los pasos implementados para un correcto análisis de soluciones.

3.1.Determinación de criterios de evaluación

Se realizó un análisis de los requerimientos determinados por el usuario y obtenidos en la literatura con la finalidad de definir una lista detallada de las especificaciones del dispositivo y así poder identificar ventajas y desventajas.

3.2.Desarrollo de matriz de diseño

Habiendo tenido presente la lista de especificaciones desarrollada en el ítem anterior, se desarrolló una matriz de diseño para comparar las diferentes posibilidades de diseño que tenían cada una de las necesidades identificadas. En esta, se tiene una característica específica que puede tener más de un criterio para ser considerado, a cada uno de estos criterios se da un porcentaje de importancia y a su vez a estos se le asignan diferentes opciones. Cada uno de los tres diseños planteados va a contener diferentes opciones que van a ser calificadas en un rango de uno a cinco dependiendo el criterio.

3.3.Alternativas de solución

Para finalizar con esta etapa, se contemplaron diferentes alternativas para el dispositivo teniendo presente las características definidas para el diseño en el ítem anterior. Partiendo de esto, se escogió una solución para el diseño teniendo en cuenta las consideraciones del equipo de trabajo en la organización Humanos 3D.

4. *Desarrollo de la solución*

Teniendo clara la solución que mejor se adaptó a las necesidades se desarrolló el siguiente plan de acción para diseñar el artefacto.

4.1. *Desarrollo de aplicativo para accionamiento de la mano*

Dado que la solución escogida para el desarrollo del dispositivo incluyó una activación de los movimientos de la mano mediante un aplicativo, se procedió a experimentar las diferentes posibilidades para realizarlo teniendo en consideración lo siguiente:

- Se escogió en la anterior etapa la mano de la Hackberry Handbook [20] para el desarrollo del dispositivo.
- El microcontrolador para captura de señales externas e interpretación de las mismas en movimientos concretos fue la placa ESP32 DEVKIT V1, que contiene el SoC (System on a Chip) ESP32 como núcleo central para el procesamiento de tareas en el sistema, dado que cumple con los siguientes requerimientos:
 - ✓ Liviano
 - ✓ Portable
 - ✓ Asequible
 - ✓ Bajo costo
 - ✓ Voltaje de alimentación (5V-GND)
 - ✓ Protocolo de comunicación inalámbrica: Wifi – Bluetooth
 - ✓ Posibilidad de habilitar un web server o implementar protocolo WebSocket.
 - ✓ Pines de entrada y salida para implementación de servomotores
 - ✓ Lenguaje de programación: basado en C/C++ (análogo al lenguaje de Arduino)
 - ✓ Posibilidad de alimentación con baterías de litio.
- Se tuvieron en cuenta diferentes protocolos de comunicación para el desarrollo del aplicativo.
- Accesibilidad del usuario para la interacción con el brazo robótico

Al tener claras las consideraciones, se establece la siguiente línea de trabajo.

4.1.1. *Establecer el protocolo de comunicación*

Se evaluaron los protocolos de comunicación bluetooth, Wifi y WebSocket para realizar el movimiento de un servomotor, el cual posteriormente sirvió para ejecutar los movimientos de la

mano robótica, por medio de un aplicativo web sencillo que tradujo órdenes para el movimiento del mismo.

4.1.2. Accionamiento del sistema con el ESP32

Teniendo presente el microcontrolador que se implementó, se realizó el accionamiento de tres servomotores y un actuador lineal. En este se tuvo presente la facilidad del ESP32 para funcionar como servidor web y así poder construir una página web que permita el control del brazo robótico de manera remota y desde cualquier dispositivo con acceso a red Wifi. Para esto, se implementaron los lenguajes para desarrollo web HTML5, CSS, JS y C/C++.

4.1.3. Desarrollo del código para el aplicativo

A continuación, se enuncian los diferentes segmentos que componen en su totalidad el aplicativo web desarrollado.

- ❖ **Protocolo de comunicación:** para construir el servidor web con el ESP32 se usó el protocolo WebSocket que permite una conexión persistente entre un cliente y el servidor, el cual permite una comunicación bidireccional entre ambas partes usando conexión TCP [23]. Lo anterior indica que se pueden enviar datos desde el cliente al servidor y desde el servidor al cliente en cualquier momento, tal y como se observa en la Figura 14.

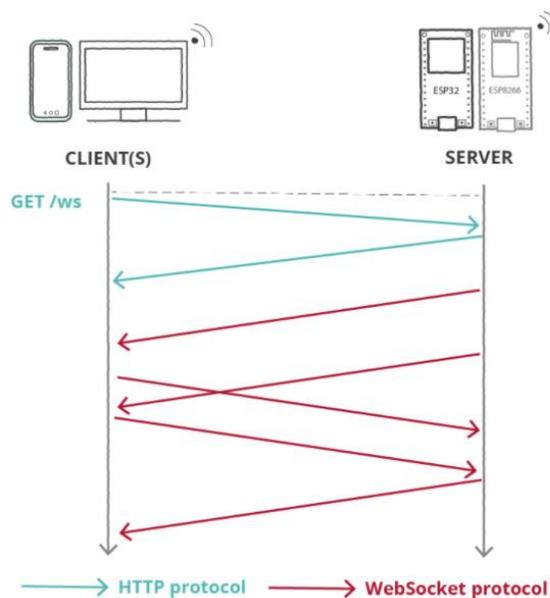


Figura 14: protocolo de comunicación WebSocket.

- ❖ Sistema de archivos: el ESP32 contiene una interfaz periférica serial para el sistema de archivos en la memoria flash (SPIFFS – Serial Peripheral Interface Flash File System) que permite fácilmente subir archivos al ESP32 usando un complemento de Arduino IDE. Esta herramienta permitió guardar los archivos de HTML, CSS y JS desarrollados para construir el servidor web.
- ❖ Código HTML: con el lenguaje de marcado de hipertexto se estructuró el contenido de la página web que se desarrolló, siendo está compuesta por dos pestañas; la primera de ellas contiene un inicio de sesión por parte del usuario y la segunda los diferentes botones y controles deslizantes que permiten interactuar de manera remota con el brazo robótico.
- ❖ Código JS: este lenguaje de programación permitió desarrollar los algoritmos para la comunicación WebSocket y las diferentes funciones que están ligadas a cada componente de la página web, en adición a esto, permitió el envío y recepción de datos desde el aplicativo web al ESP32.
- ❖ Código CSS: las estructuras desarrolladas con este lenguaje de estilos permitieron estructurar la presentación de la página web; de esta manera se pudo definir los diferentes colores, alineaciones de texto, fuentes, tamaños, espaciados, capas, bordes, entre otros, que dieron estilo a la página web.
- ❖ Código C/C++ - Arduino: este último segmento desarrollado para la página web contiene el algoritmo que permite la comunicación WebSocket, la habilitación del servidor y la activación de los diferentes actuadores del sistema. A parte de que permite enviar datos al aplicativo web y recibirlos para el ESP32, facilita la interacción del microcontrolador con los servomotores y el actuador por medio de estructuras lógicas e instrucciones específicas.

4.2. Diseño del sistema electrónico

Para acondicionar el microcontrolador y los diferentes actuadores se tuvo en cuenta la siguiente secuencia.

4.2.1. Consideraciones del sistema

Para el desarrollo del circuito electrónico se tuvieron presentes las siguientes consideraciones:

- a) Consumo de corriente del sistema
- b) Implicaciones de potencia
- c) Costo de los componentes
- d) Tamaño de los actuadores para ajuste adecuado con la mano
- e) Sistema alimentado con baterías de litio
- f) Protección de carga y descarga del dispositivo
- g) Voltajes de alimentación para los diferentes componentes
- h) Acondicionamiento específico de cada componente

4.2.2. Definición de componentes electrónicos y actuadores

Teniendo claras las consideraciones del sistema se determinaron los componentes que se ajustaran a los requerimientos. Estos se listan en la Tabla 4 con sus respectivas características.

Tabla 4: componentes electrónicos y sus especificaciones

Componente	Especificaciones
ESP32 DEVKIT V1 [24]  Figura 15: microcontrolador ESP32	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Voltaje de Alimentación (USB): 5V DC ✓ Voltaje de Entradas/Salidas: 3.3V DC ✓ Placa: ESP32 DEVKIT V1 (Espressif) ✓ SoM: ESP-WROOM-32 (Espressif) ✓ SoC: ESP32 (ESP32-D0WDQ6) ✓ CPU: Dual core Tensilica Xtensa LX6 (32 bit) ✓ Frecuencia de Reloj: hasta 240Mhz ✓ Desempeño: Hasta 600 DMIPS ✓ Wifi: 802.11 b/g/n/e/i (802.11n @ 2.4 GHz hasta 150 Mbit/s) ✓ Bluetooth: v4.2 BR/EDR and Bluetooth Low Energy (BLE) ✓ Memoria: <ul style="list-style-type: none"> 448 KByte ROM 520 KByte SRAM 16 KByte SRAM in RTC QSPI Flash/SRAM, 4 MBytes ✓ Pines Digitales GPIO: 24 (Algunos pines solo como entrada) ✓ Pines PWM: 16 ✓ Pines Analógicos ADC: 18 (3.3V, 12bit: 4095, tipo SAR, ganancia programable) ✓ Conversor Digital a Analógico DAC: 2 (8bit) ✓ UART: 2 ✓ Chip USB-Serial: CP2102

<p>Baterías de litio NCR18650B [25]</p>  <p>Figura 16: baterías de Litio</p>	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Voltaje: 3,6V ❖ Capacidad nominal: 3300-3400mAh ❖ Peso: 48,5g ❖ Tiempos de ciclos: 800 veces ❖ Voltaje de corte de carga: 4,2V ❖ Voltaje de corte de descarga: 2,5V
<p>TP4056 [26]</p>  <p>Figura 17: módulo protector de carga</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ Protección de baterías LiPo o Li-ion ○ Corriente de 1A ajustable ○ Vin: 4,5V-5.5V ○ V carga full: 4,2V ○ Micro USB ○ Protección de carga, descarga y sobrecarga
<p>StepDown XL4015 [27]</p>  <p>Figura 18: módulo step down</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Módulo DC-DC variable en voltaje ▪ Corriente de salida: 5A ▪ Voltaje de alimentación: 6-38 V ▪ Voltaje de salida: 1.25-36V ajustable ▪ Potencia de salida: 75W ▪ Eficiencia: 96%
<p>Actuador lineal Actuonix L16-50-150-6-R [28]</p>  <p>Figura 19: actuador lineal</p>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Voltaje nominal: 6V ✓ Serie: L16 ✓ Torsión: 50000 mNm ✓ Longitud carrera: 50mm

 <p>Figura 20: servomotor pequeño</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Peso: 13.4 g • Torque: 1.8 kgf*cm (4.8V) – 2.2 kgf*cm (6 V) • Velocidad de operación: 0.1 s/60° (4.8V) – 0.08 s/60° (6V) • Vop: 4.8V – 6.0V • Iop: 2.7mA (Inactiva) – 400mA (Carga) – 70mA (Sin carga) → 5V
 <p>Figura 21: servomotor grande</p>	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Peso: 62 g ❖ Torque: 17.2 kgf*cm (4.8V) – 20.3 kgf*cm (6 V) ❖ Velocidad de operación: 0.16 s/60° (6V) ❖ Vop: 4.8V – 6.0V ❖ Iop: 470mA (Inactiva – 4.8V), 650mA (Inactiva – 6.0V)– 750mA (Carga – 4.8V), 950mA (Carga – 6.0V)

4.2.3. Desarrollo de PCB basados en esquemático

En esta etapa se realizó la distribución del circuito y la ubicación de los componentes en el acondicionamiento del sistema con ayuda del software easyEDA y basados en el esquemático que se presenta en la Figura 22.

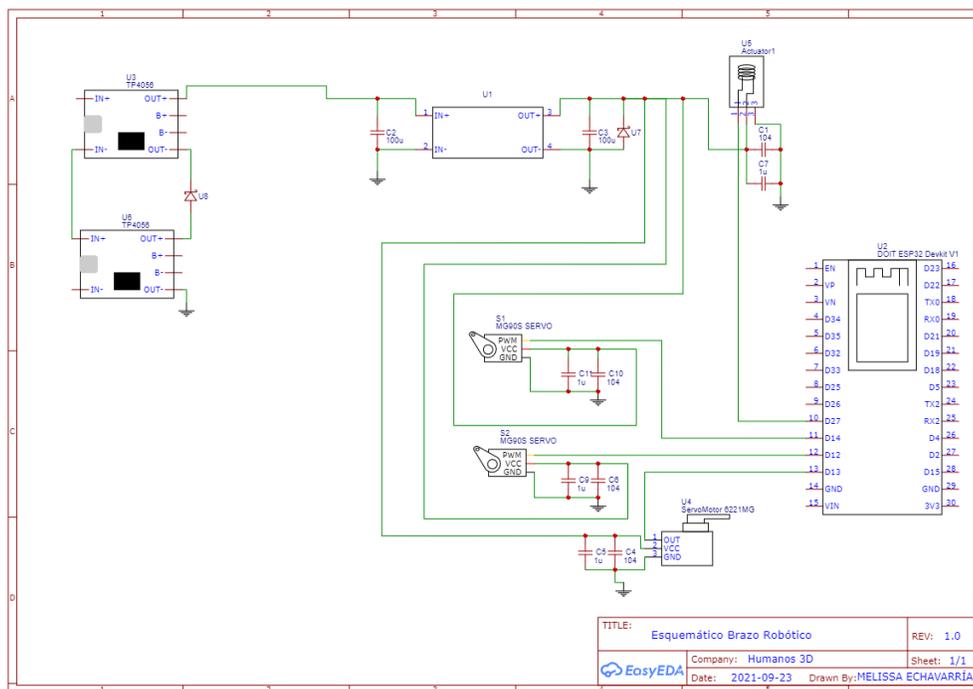


Figura 22: esquemático de fase electrónica

4.2.4. Montaje en protoboard

Basados en el esquemático desarrollado se realizó un montaje de los componentes para observar su funcionamiento y comprobar los valores de corriente y voltaje requeridos en el sistema.

4.2.5. Prueba preliminar

Teniendo un montaje funcional se realizaron las pruebas de calibración para el brazo robótico contemplando los diferentes movimientos que debía realizar.

4.3. Diseño del dispositivo de asistencia

Esta etapa se desarrolló en simultaneo con la anterior y se centró en todo el modelado CAD del dispositivo con el programa Inventor y Fusion 360. Además, también incluye el desarrollo del sistema para movimiento de codo el cual fue parte fundamental del dispositivo. Todo lo anterior a través del siguiente proceso.

4.3.1. Ajuste de Hackberry Handbook

Contemplando el uso del dispositivo desarrollado por la organización Exii, se realizaron pequeños ajustes en los archivos STL provenientes de su repositorio en GitHub que facilitaron la adaptación de la electrónica que se implementó y a su vez adaptando el diseño para las medidas del beneficiario Javier Valderrama.

4.3.2. Diseño del Socket

Basados en el socket ajustable presentado en el marco teórico y posteriormente escogido como solución para el brazo robótico, se procedió a diseñar un socket que permitió el acople del enmallado, el cual se encontraba en contacto con el muñón del beneficiario, y del antebrazo que posteriormente fue diseñado.

4.3.3. Adaptación de antebrazo

Para esta etapa se tuvo en cuenta la electrónica que se utilizó y las medidas del beneficiario para modelar el antebrazo, además de tener en cuenta el acople que debía facilitar con la muñeca de la Hackberry Handbook y el socket ajustable.

4.3.4. Acople para movimiento de codo

Para finalizar esta etapa, se diseña una pieza que permita ajustar el antebrazo con el socket por medio del actuador lineal. En adición a esto, se modelan las bisagras que van a facilitar la movilidad del movimiento de codo y a su vez otorga estabilidad al dispositivo.

4.4. Impresión 3D de partes del dispositivo

Contando con los diferentes archivos STL de cada parte del dispositivo, se procedió a realizar la impresión 3D de cada una por medio de la tecnología FDM (Modelado por Deposición Fundida). El proceso para impresión incluye: renderizado de la pieza en formato STL en el software de la respectiva impresora, cambio de filamento según color deseado, proceso de impresión y por último remoción de soportes si la pieza lo requiere. En la Figura 23 se muestra brevemente este proceso.

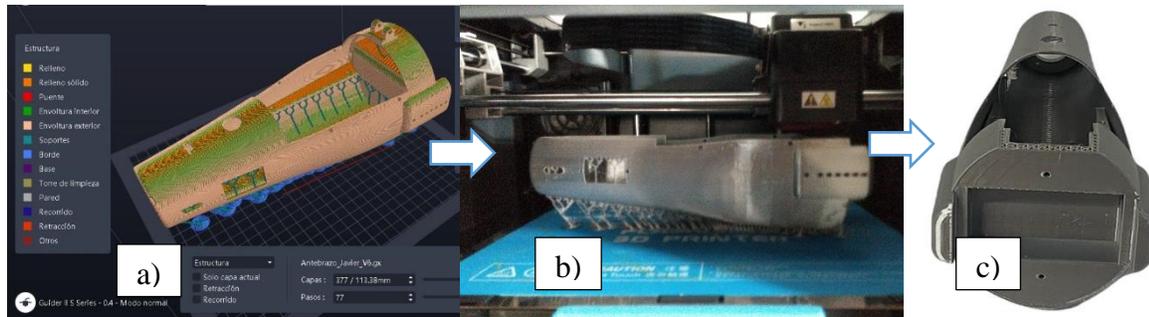


Figura 23: proceso de impresión: a) Renderizado – b) Impresión – c) acabado

cket, bisagras, actuador lineal, antebrazo, muñeca y mano; para posteriormente acoplar la electrónica teniéndola en la protoboard y así validar su funcionamiento.

5. Evaluación de funcionalidad

Contando con el desarrollo completo del dispositivo se corroboraron las medidas y se ajustaron las debidas piezas, se verificaron los movimientos que debía realizar el dispositivo y se entregó al beneficiario para realizar las primeras pruebas y evaluar la adaptación del dispositivo al muñón y su respectiva movilidad implementando el aplicativo. Por otra parte, se evaluaron las fallas y recomendaciones del usuario para que así en un trabajo futuro se puedan realizar las respectivas correcciones sean concernientes al diseño electrónico o mecánico.

V. RESULTADOS

1. Matriz de diseño

En la Tabla 5 se muestra el esquema de la matriz con su respectiva ponderación.

Tabla 5: matriz de diseño

Característica	Criterios	Importancia	Opciones	Diseño 1	Diseño 2	Diseño 3
Funcionalidad	Generación de movimiento	5%	Impulsada por el cuerpo	Impulsada por el cuerpo (2)	Dispositivo mioeléctrico (3)	Prótesis híbrida (5)
			Dispositivo mioeléctrico			
			Prótesis Híbrida			
Material	Peso (liviano) - comodidad	10%	Inferior a 500g	Inferior a 500g (5)	Entre 500g y 1 kg (4)	Entre 500g y 1 kg (4)
			Entre 500g y 1 kg			
	Resistencia	5%	PLA: Tracción 3309Mpa; Flexión 485 kg/m ² ; Impacto 20 kJ/m ²	PETG (5)	PLA (4)	PLA (4)
			PETG: Tracción 50 MPA; Flexión 700 Kg/m ² ; Impacto 105 kJ/m ²			
Socket	Estabilidad del sistema de suspensión	20%	Socket Ajustable	Socket de encaje (3)	Socket ajustable (5)	Socket ajustable (5)
			Socket Encaje			
	Comodidad en el ajuste o sujeción	10%	Autoajustable	Ajuste con Arnés (3)	Autoajustable (5)	Autoajustable (5)
			Ajuste con Arnés			
Movimiento Flexión y extensión del codo	Facilidad de movimiento	20%	Bisagras de bloqueo exteriores	Bisagras de bloqueo exteriores (3)	Sistema de engranajes (2)	Actuador lineal (4)
			Sistema de engranajes			
			Actuador lineal - Pistón eléctrico			
Rango de movimiento (ROM) de la muñeca	Necesidad del usuario	5%	Posición neutral estable	Posición neutral estable (4)	Posición neutral estable (4)	Pronación y supinación (5)
			Flexión y extensión			
			Pronación y supinación			

Movimiento de la mano	Rangos de movimiento	10%	Agarre completo de fuerza y precisión	Agarre completo de fuerza y precisión (4)	Flexión y extensión de cada dedo + Agarre de fuerza (5)	Flexión y extensión de cada dedo + Agarre de fuerza (5)
			Flexión y extensión de cada dedo + Agarre de fuerza			
Diseño	Estética	7%	Impresión 3D	Impresión 3D + Recubrimiento (4)	Impresión 3D (5)	Impresión 3D (5)
			Impresión 3D + Recubrimiento			
Costo	Rango	8%	1'000.000 - 1'500.000 (COP)	1'000.000 - 1'500.000 (COP) (5)	1'500.000 - 2'500.000 (COP) (3)	1'500.000 - 2'500.000 (COP) (3)
			1'500.000 - 2'500.000 (COP)			
Total		100,00%		3.63	3.94	4.49

2. Aplicativo web

En la Figura 24 se muestra el menú inicial que requiere los datos de autenticación del usuario para validar el ingreso a la manipulación del brazo robótico y la Figura 25 presenta la página desarrollada para accionar determinados movimientos.

Figura 24: página para inicio de sesión en el aplicativo.



Figura 25: página para realizar los movimientos del brazo robótico

3. Sistema electrónico

A continuación, se presenta la PCB donde se muestra la posible organización de una tarjeta electrónica con sus diferentes capas y el plano de tierras correspondiente (Figura 26 y Figura 27).

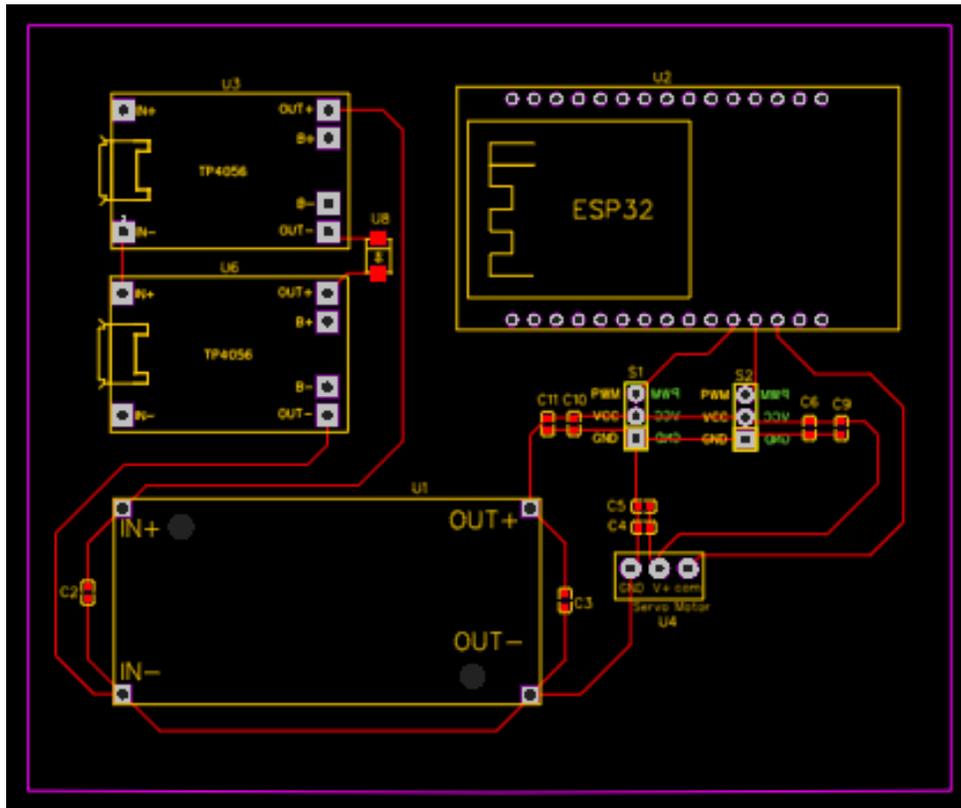


Figura 26: tarjeta PCB de componentes electrónicos con diferentes capas

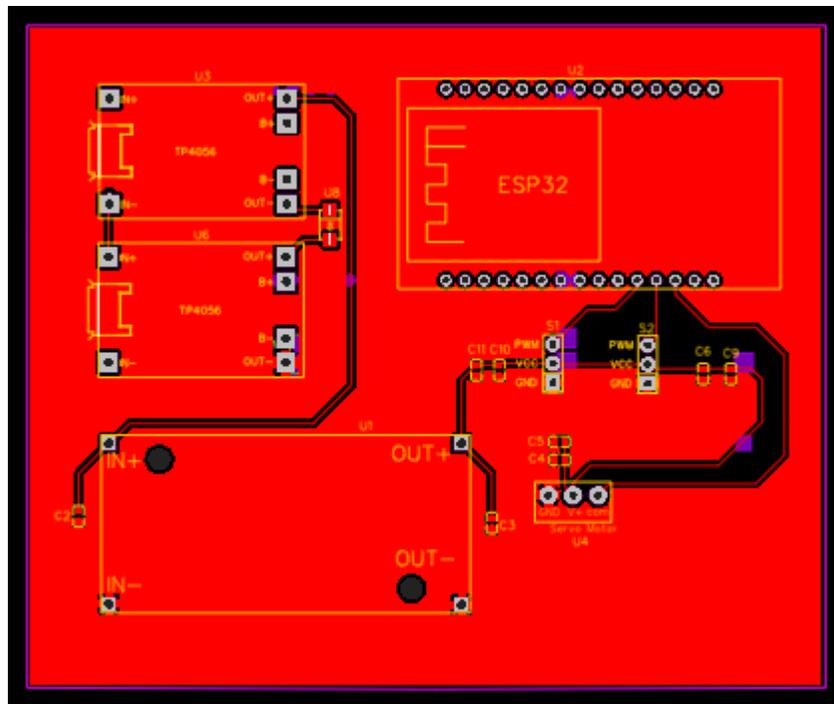


Figura 27: plano de tierras de la PCB

En la Figura 28 se muestra el esquemático anterior al ser implementado en protoboard

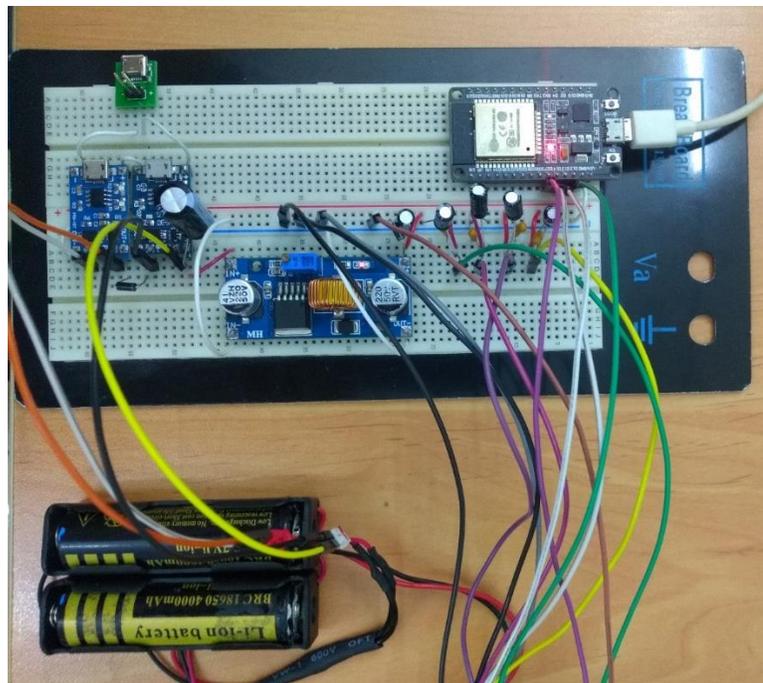


Figura 28: montaje del sistema electrónico en protoboard

4. Dispositivo de asistencia

4.1. Socket ajustable

En la Figura 29 se pueden observar los archivos STL del socket desarrollado, el cual consta del enmallado y la pieza rígida de PLA que permite su acople, y en la Figura 30 una fotografía de la pieza después de la impresión 3D.

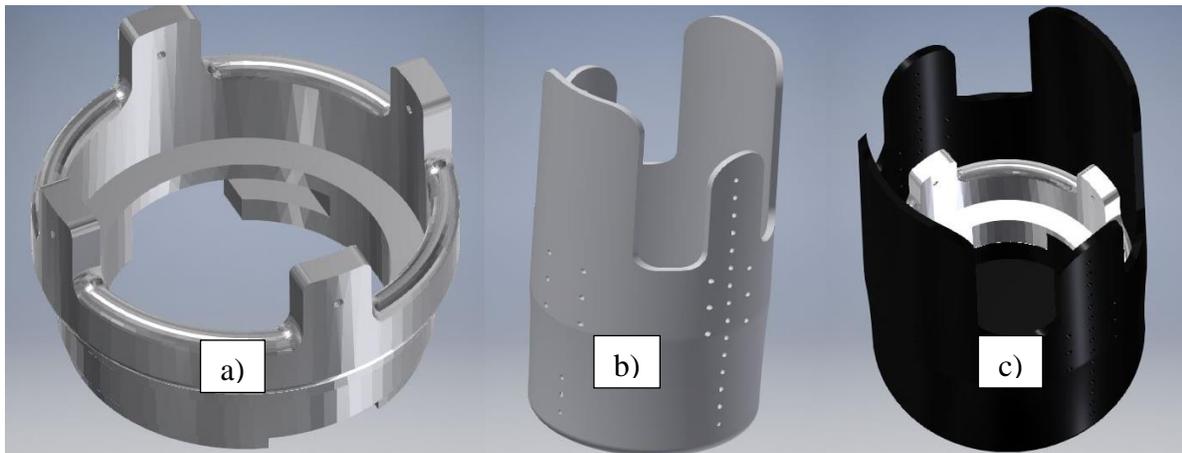


Figura 29: socket y ensamble: a) acople – b) socket – c) ensamble de acople y socket

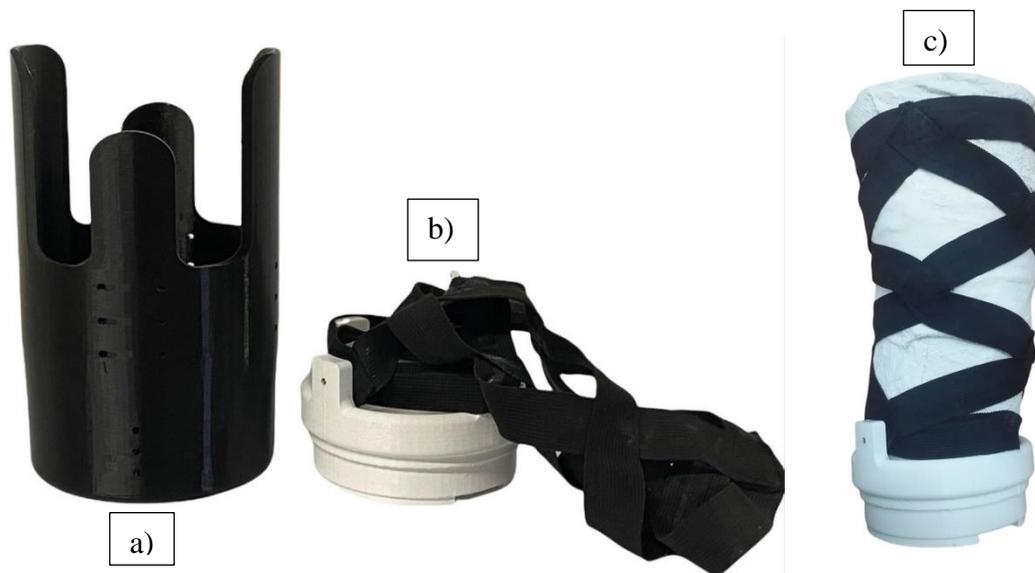


Figura 30: partes del socket impresas: a) Socket – b) Enmallado con acople – c) Muñón con enmallado

4.2. Antebrazo

En la Figura 31 se pueden observar los archivos STL del antebrazo desarrollado, en la cual se incluye también una vista del dispositivo teniendo ensamblada una tarjeta electrónica y en la Figura 32 una fotografía de la pieza después de la impresión 3D.



Figura 31: archivos STL de antebrazo: a) electrónica visible – b) electrónica cubierta



Figura 32: pieza del antebrazo después de impresión 3D

4.3. Mano, muñeca y dedos

En la Figura 33 se pueden observar los archivos STL de mano, muñeca y dedos en un ensamble con los servomotores y en la Figura 34 una fotografía de la pieza después del proceso de impresión y ensamble de todas las partes que contienen la mano.

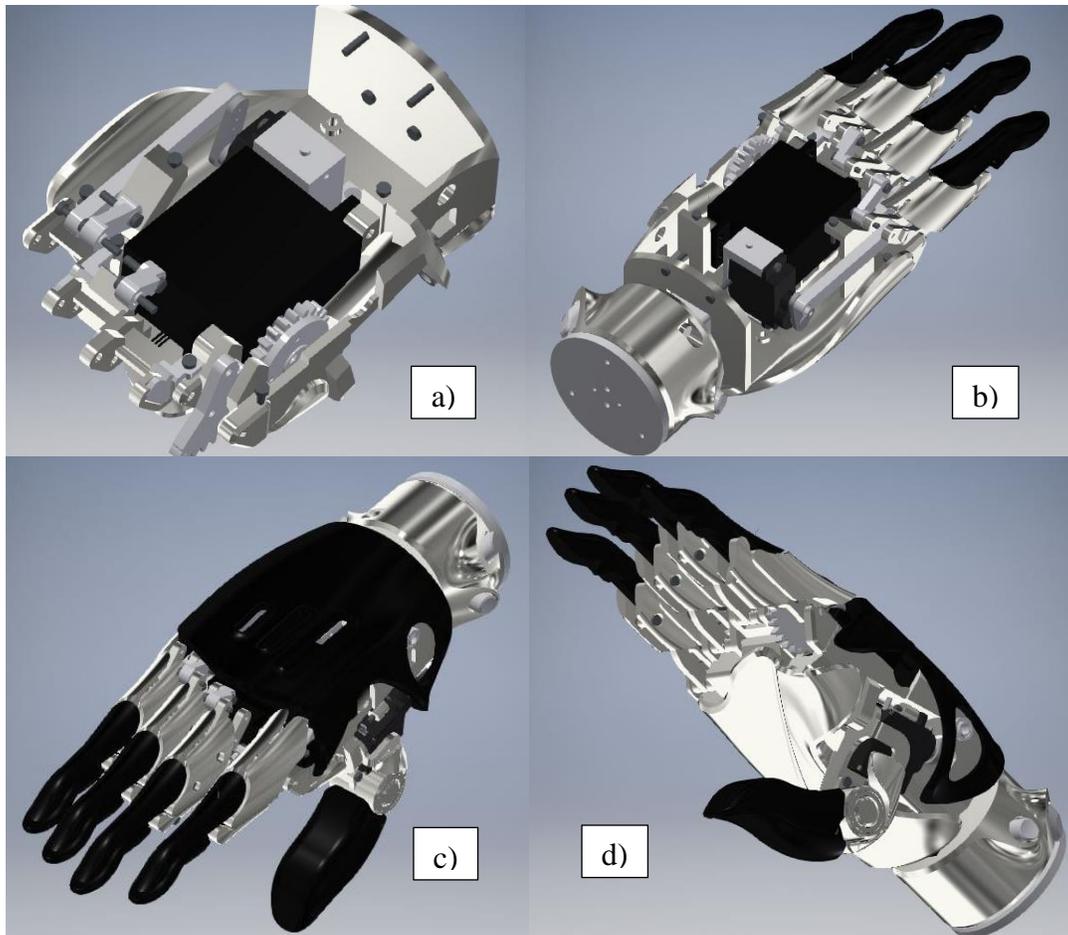


Figura 33: archivos STL de la mano: a) Mano y motores – b) Mano visible el interior – c) Vista superior de mano - d) Vista inferior de mano

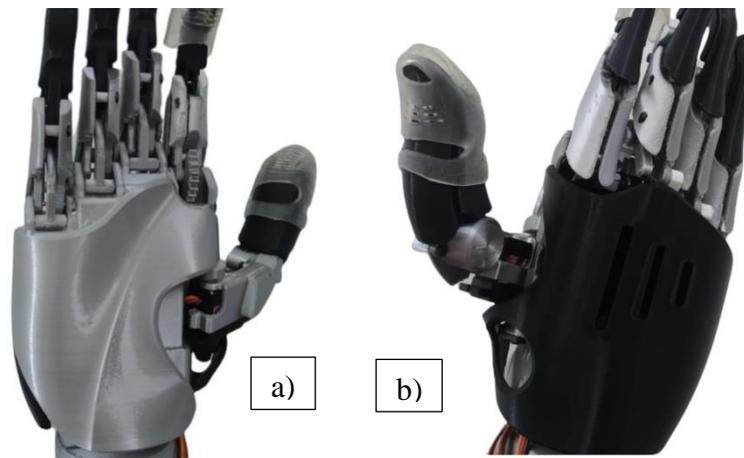


Figura 34: mano impresa y ensamblada: a) Vista posterior – b) Vista superior

4.4. Piezas de acople para el sistema de codo

A continuación, se presenta en la Figura 35 la pieza para acoplar el antebrazo con el pistón en conjunto con las bisagras que permiten la unión entre el socket y el antebrazo, además de presentarse una imagen de las bisagras después de la impresión junto con el actuador lineal implementado.

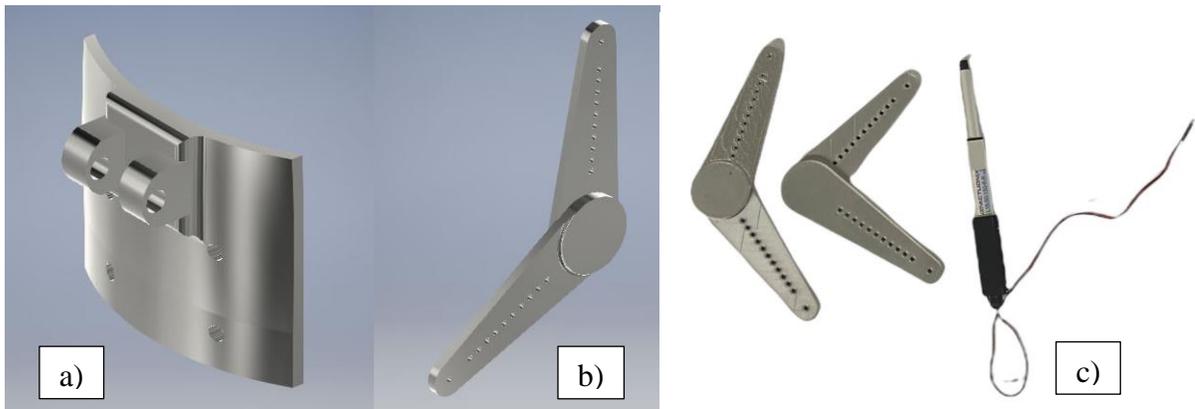


Figura 35: piezas de acople: a) STL de acople de actuador lineal con antebrazo – b) STL de bisagras – c) Bisagras y actuador lineal

4.5. Integración del dispositivo con parte electrónica

En las siguientes imágenes se presenta el dispositivo de asistencia terminado, teniendo respectivamente su ensamble en el software Inventor (Figura 36), la vista lateral y superior del dispositivo realizado con impresión 3D (Figura 37 y Figura 38), además del montaje electrónica con el dispositivo de asistencia (Figura 39).

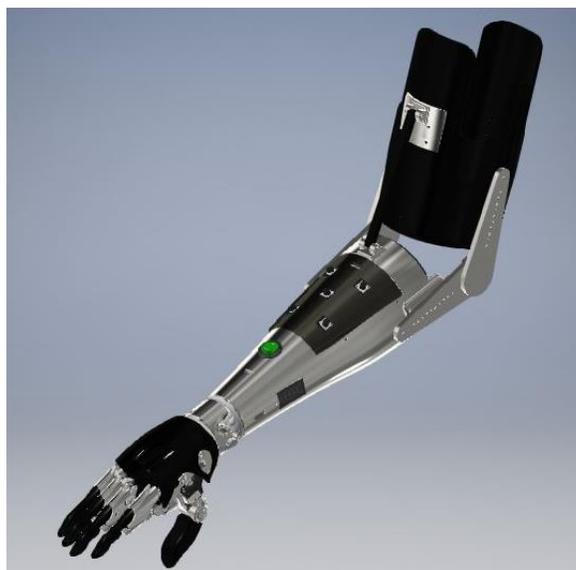


Figura 36: archivo STL de ensamble de todas las piezas



Figura 37: ensamble completo del dispositivo de asistencia – Vista lateral



Figura 38: ensamble completo del dispositivo de asistencia – Vista superior

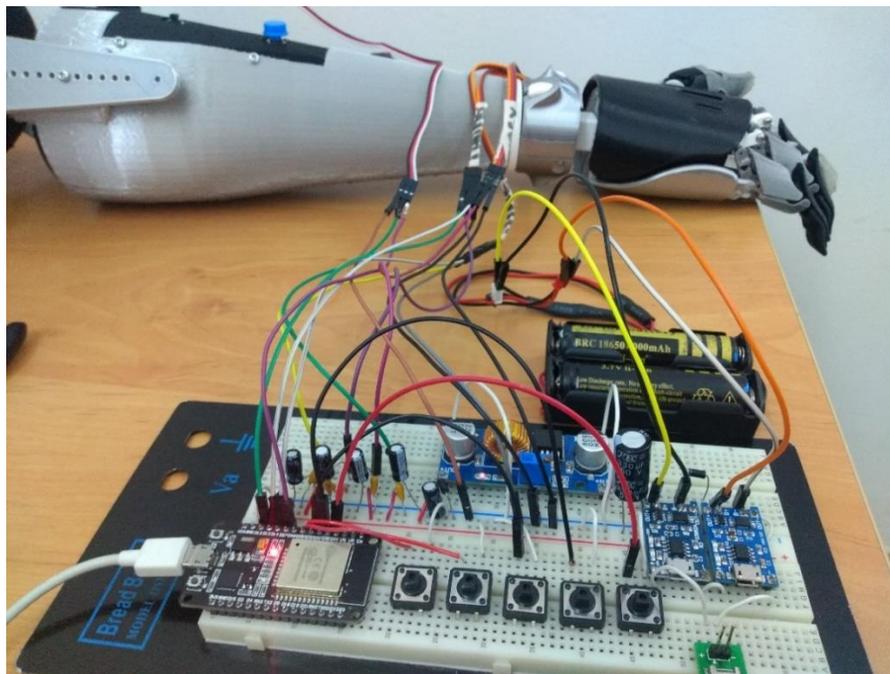


Figura 39: dispositivo de asistencia con montaje electrónico

5. *Funcionalidad del dispositivo*

Por último, se presentan fotografías del beneficiario utilizando el dispositivo de asistencia terminado (Figura 40 y Figura 41)

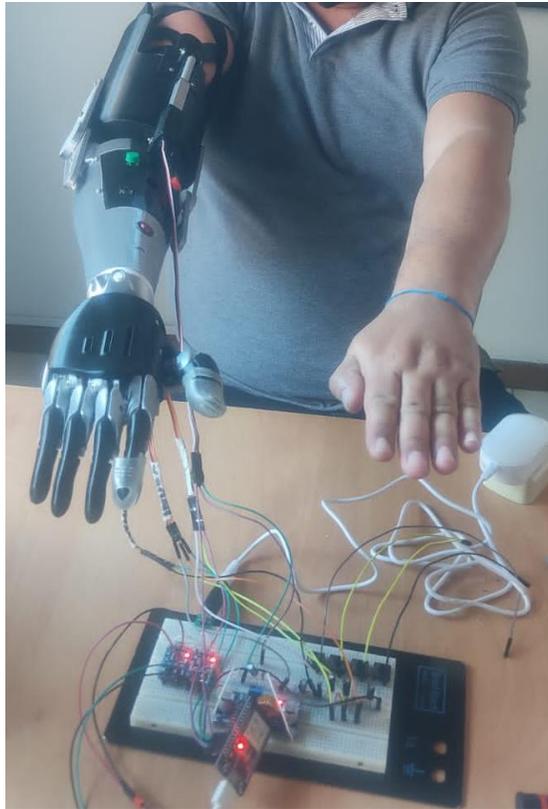


Figura 40: prueba 1 con el beneficiario

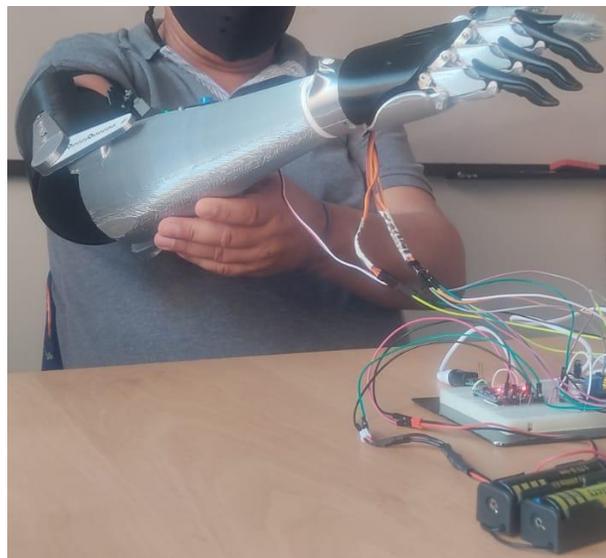


Figura 41: prueba 2 con el beneficiario

VI. ANÁLISIS

1. Especificaciones del diseño

El listado de requerimientos determinado para el diseño del dispositivo incluyó tanto las necesidades del usuario como aspectos importantes tomados de la literatura que son cruciales al momento de rechazar un dispositivo de asistencia. Cabe aclarar que no se incluyeron algunos requerimientos del usuario como tener el dispositivo para practicar un deporte como el béisbol, dado que en la organización H3D todavía se encuentran en desarrollo los dispositivos para actividades diferentes a las cotidianas que no impliquen impactos grandes ni superen cargas mayores a 1kg.

2. Matriz de diseño

Se puede evidenciar en la Tabla 5 que el mejor diseño es el número tres con un valor de 4.49 sobre el diseño uno y dos con valores de 3.63 y 3.94 respectivamente. Esto se debe a que los factores con mayor importancia en el diseño tres presentan una alta calificación, lo cual representa una ventaja considerable con respecto a los otros. A continuación, se hablará de cada uno de los criterios y el porqué de su respectiva evaluación.

✓ Generación de movimiento

Dentro de la característica de funcionalidad una de las opciones más acertadas para el diseño es la prótesis híbrida, esto teniendo en cuenta las desventajas que presentan los dispositivos mioeléctricos dado que fallan en la durabilidad, velocidad de respuesta, presentan falta de retroalimentación sensorial y dificultades al momento de controlar el dispositivo por parte de los beneficiarios [14], y también las desventajas de las que son impulsadas por el cuerpo, enumerando la falta de comodidad, dificultades para su control y las fallas causadas por el rompimiento de cables.

Para complementar lo anterior en un estudio de revisión bibliográfica [12], se concluyó que las prótesis de miembro superior con amputación por encima del codo son en su mayoría alimentadas externamente, siendo éstas normalmente mioeléctricas o híbridas (Figura 42)

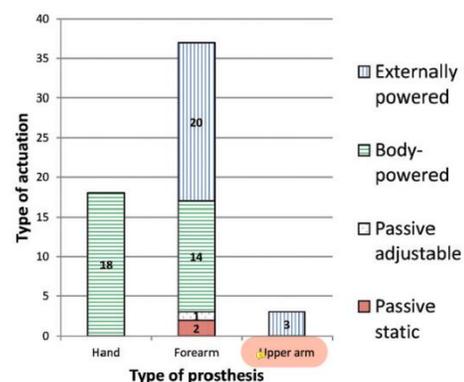


Figura 42: comparación de tipos de prótesis con tipos de actuación en estudio de revisión de prótesis con impresión

✓ Peso (liviano) – Comodidad

Al momento de evaluar este criterio se tuvo presente la comodidad del usuario, dando incluso una mayor importancia a este aspecto, teniendo presente que es uno de los factores por los cuales el usuario rechaza con mayor facilidad el dispositivo de asistencia. Además, con base en la revisión de prótesis de miembro superior [12], el dispositivo más liviano realizado con impresión 3D es de 71g y el más pesado es de 2000g, siendo este último robótico y alimentado externamente, el resto de dispositivos se encuentran entre el rango de 240g y 450g, incluyendo los dispositivos implementados por la organización H3D.

✓ Resistencia

Este criterio se evaluó específicamente con el tipo de material, incluyendo dentro de estos solamente el PLA y PETG por facilidad de procesos en H3D. Entre estos dos, el PETG es el que presenta mejores propiedades mecánicas, teniendo así mayor resistencia a flexión e impacto, siendo esta última característica importante dado que define la facilidad de la pieza para romperse en caso de que se caiga o debo soportar algún golpe; mientras que para la tracción es mejor el PLA [31].

✓ Estabilidad del sistema de suspensión

Siendo uno de los factores que mayor importancia tiene en el proceso de diseño, se analizó fundamentalmente la seguridad, comodidad y funcionalidad que ofrece al beneficiario, contemplando también la ayuda que representa este sistema al momento de aliviar el peso de la prótesis teniendo una carga más directa en el hueso residual. Por lo tanto, el socket ajustable que ya se ha mencionado en el marco teórico presenta ventajas con respecto a los socket de encaje, los cuales pueden presentar problemas con los sistemas de suspensión y al momento de la transferencia de energía eficiente del miembro residual al dispositivo protésico [21], [22].

✓ Comodidad en el ajuste o sujeción

Para determinar la mejor opción se tuvo en cuenta la dependencia directa de este factor con el peso y el buen ajuste. Por lo tanto, mientras un dispositivo presente un peso similar al de la mano humano, que es aproximadamente de 400g (+/- 90), generará una mayor sujeción, dado que, se menciona nuevamente, el peso excesivo es una de las causas de rechazo de una prótesis.

Por otra parte, se consideró la ventaja de un sistema autoajutable que permitirá mayor libertad de movimiento en el hombro a comparación de los sistemas de ajuste con arnés.

✓ Facilidad de movimiento

Para determinar la calificación de esta opción se consideró el hecho de que un sistema con actuador lineal puede presentar una gran ventaja sobre las bisagras de bloqueo exterior y el sistema de engranajes debido al caso que se tiene en consideración de desarticulación de codo.

Complementando lo anterior, el criterio incluye la capacidad de realizar un agarre seguro, el cual incluye una combinación de un tipo de agarre y fuerza aplicada.

✓ Necesidad del usuario

En este aspecto solo se tuvo presente la facilidad que presenta tener un dispositivo con un rango de movimiento en la muñeca limitado, ya que facilitar todos los rangos de movimiento en la muñeca puede adicionar peso y complejidad al dispositivo debido a la adición de piezas mecánicas o electrónicas para accionar dicho movimiento.

✓ Rango de movimiento

Teniendo una importancia significativa en el diseño, se tuvo en consideración que el dispositivo pueda tener los movimientos básicos que una persona necesita para el desempeño de tareas cotidianas, como lo son el agarre de fuerza y precisión, siendo aún mayor el desempeño de un dispositivo si presenta independencia en cada dedo de la mano.

✓ Estética

Después de los factores funcionales, la apariencia es uno de los más importantes en el rechazo de una prótesis, por lo tanto, en este criterio se evaluó la capacidad de un dispositivo para imitar los aspectos generales de la mano humana, como la forma, el tamaño y color, en otras palabras, el dispositivo debía ser antropomórfico.

Con lo anterior, se puede concluir que la impresión 3D puede presentar diseños muy similares a la mano, aunque presenta una mayor ventaja tener recubrimientos siliconados que asemejen la forma, textura y color de la mano, pero esta última limita considerablemente el movimiento de dispositivos electrónicos.

✓ Rango – Costo

Para este último criterio de evaluación solo se contempló el tener un costo como mínimo de 1'000.000 COP y máximo 2'500.000 COP, presenta una considerable ventaja el que conlleve un menor costo en todo el proceso de producción.

3. *Aplicativo web*

Se desarrolló una página web que permitió el accionamiento de 6 diferentes movimientos en el brazo robótico (Figura 25), los cuales incluyen los agarres comunes que debe tener un dispositivo de asistencia, además de facilitar el movimiento independiente del índice, el pulgar y los otros dedos por medio de sliders, en los que se consideraron los valores límites que permitían su libre movimiento. Aunque la página web fue funcional y cumplió con su objetivo, su implementación puede ser replanteada dado que es mucho más fácil el manejo del usuario con otro tipo de mecanismo que no involucre todo el tiempo el uso de la mano que no se encuentra amputada. Por lo tanto, se recomienda en este caso cambiar por sistemas de activación como componentes electrónicos (botones, potenciómetros, etc), señales EMG, protocolo de voz, entre otros.

4. *Sistema electrónico*

En el desarrollo de la tarjeta electrónica se tuvieron limitantes principalmente con las consideraciones de corriente del sistema, ya que no se disponía de la medición real de la misma y solo se realizó un estimativo con el consumo de cada dispositivo electrónico implementado. Por lo tanto, al momento de generar los movimientos de la mano, no se daban constantes y fluidos y adicionalmente no se lograba una correcta activación de todos los componentes (servomotores, actuador lineal, microcontrolador). Además, al tener este limitante de corriente el ESP32 no lograba montar el servidor web para acceder correctamente al aplicativo web, generando como consecuencia la búsqueda de una alternativa para accionar el movimiento con componentes electrónicos, por ello en la Figura 39 se muestra el montaje electrónico con botones.

Los problemas de corriente mencionados, pueden deberse al tipo de baterías utilizadas, las cuales no entregan la corriente requerida por el sistema, o la corriente de suministro del conversor de voltaje DC-DC, por lo tanto, se puede solucionar implementando otro tipo de batería, realizando un análisis del consumo de corriente total del sistema y evaluando la posibilidad de disminuir los componentes implementados en el desarrollo del dispositivo.

5. *Dispositivo de asistencia*

Se logró desarrollar un antebrazo y socket desde cero teniendo en cuenta todas las consideraciones del sistema y las medidas del usuario, acoplándose adecuadamente el sistema con la mano de hackberry handbook y los determinados acoples para el sistema de codo y muñeca, permitiendo así movimientos como pronación y supinación y flexión y extensión de codo. La principal limitante en este aspecto es la limitada extensión que permite tener el actuador lineal, que puede mejorarse realizando una extensión del mismo.

6. *Funcionalidad del dispositivo*

El dispositivo de asistencia se evaluó con el beneficiario, concluyendo los siguientes factores para la retroalimentación del desarrollo del dispositivo

- ✓ El peso es un factor que debe mejorarse dado que no es soportable por largos periodos de tiempo
- ✓ La estabilidad del socket puede mejorarse con otro tipo de diseño que permita mayor ventilación para el muñón y mejor ajuste al sistema de enmallado
- ✓ En la Figura 40 se evidencia como el brazo diseñado es más largo que el normal, por lo tanto, debe considerarse disminuir la medida del antebrazo
- ✓ Para el usuario es mejor la activación por medio de botones en comparación con el aplicativo web, por facilidad para el desempeño de sus actividades cotidianas
- ✓ Tener presente las molestias que presentó el usuario debido a la sensibilidad que presenta el muñón.

VII. CONCLUSIONES

Tras el análisis realizado en la matriz de diseño presente en la Tabla 5 se obtiene como mejor diseño el número tres con un valor de 4.49 en comparación con el diseño uno y dos que presentan valores de 3.63 y 3.94 respectivamente. En este diseño son de marcada importancia las opciones para el sistema de suspensión por medio del socket ajustable y la comodidad en el ajuste sin dependencia del arnés; resalta también el movimiento de flexión y extensión de codo por medio del actuador lineal, además del rango de movimiento en la mano garantizando un agarre de fuerza y precisión indispensables para las tareas cotidianas.

Por otro lado, la implementación del aplicativo web es funcional pero no facilita el uso del dispositivo para el usuario, por lo tanto, se recomienda buscar otros sistemas de activación para el movimiento de la mano, desde protocolo de voz hasta lectura de señales EMG.

Asimismo, considerando que se pudo implementar el montaje en protoboard y realizar pruebas con el beneficiario, aun teniendo como limitante la alimentación del sistema y el consumo de corriente de los componentes, razón por la cual no se alcanzó a desarrollar una tarjeta electrónica, se recomienda buscar alternativas para su diseño, el análisis de consumo de corriente y la implementación de baterías que tengan valores más elevados de capacidad energética y mayores porcentajes de eficiencia de carga/descarga.

Finalmente, se determinó con la evaluación de funcionalidad la modificación pertinente que se debe realizar al socket para mayor estabilidad y ajuste, el respectivo cambio de medidas para el antebrazo y así garantizar una longitud similar al brazo bueno del beneficiario, considerar factores que puedan disminuir el peso del dispositivo y así pueda ser más liviano y se mejore la sujeción, y por último tener más presente las necesidades y especificaciones del beneficiario junto con su participación en la retroalimentación del proceso de diseño.

REFERENCIAS

- [1] DANE, “Funcionamiento humano- Censo Nacional de Población y Vivienda,” *Dep. Nac. Planeación*, 2019.
- [2] Ministerio de salud y protección social and O. de P. Social, “Sala situacional de Personas con Discapacidad Nacional Ministerio de Salud y Protección Social,” p. 56, 2015.
- [3] C. Cardona, O. Ceballos, M. Guerra, and F. Monsalve, “Prevalencia de alteraciones sensitivas y factores asociados en pacientes con amputaciones que consultan en una empresa de medicina física de la ciudad de Medellín,” p. 43, 2011.
- [4] “Sobre Nosotros | Humanos3D.” [Online]. Available: <https://humanos3d.org/es/sobre-nosotros/>. [Accessed: 23-Jun-2021].
- [5] PO Paraguay, “ArmPO v3,” 2018. [Online]. Available: <https://www.thingiverse.com/thing:2803120>. [Accessed: 23-Jun-2021].
- [6] Team Unlimbited, “The UnLimbited Arm v2.1 - Alfie Edition,” 2016. [Online]. Available: <https://www.thingiverse.com/thing:1672381>. [Accessed: 23-Jun-2021].
- [7] Humanos 3D, “Humanos3D · GitHub.” [Online]. Available: <https://github.com/humanos3d>. [Accessed: 23-Jun-2021].
- [8] Jeison, “MASP (Método de análisis y solución de problemas) - parte 1 - Blog de la Calidad,” 13-Jun-2018. [Online]. Available: <https://blogdelacalidad.com/masp-metodo-de-analisis-y-solucion-de-problemas-parte-1/>. [Accessed: 23-Jun-2021].
- [9] “Vocabulario técnico de miembro superior | Ottobock ES.” [Online]. Available: <https://www.ottobock.es/protésica/informacion-para-amputados/terminologia-tecnica/terminologia-tecnica-miembro-inferior/index-2.html>. [Accessed: 23-Jun-2021].
- [10] K. T. Ulrich and S. D. Eppinger, *Diseño y desarrollo de productos*, vol. 5, no. 1. 2017.
- [11] K. P. Abhilash and M. V. Puneeth Kumar, “Design and development of elbow disarticulation unit using advance interlocking mechanism,” *Int. J. Sci. Technol. Res.*, vol. 8, no. 11, pp. 894–906, 2019.
- [12] J. ten Kate, G. Smit, and P. Breedveld, “3D-printed upper limb prostheses: a review,” *Disabil. Rehabil. Assist. Technol.*, vol. 12, no. 3, pp. 300–314, 2017, doi: 10.1080/17483107.2016.1253117.
- [13] A. T. Generales and A. D. General, “PRÓTESIS MIEMBRO SUPERIOR.”

-
- [14] D. H. Gates, S. M. Engdahl, and A. Davis, “Recommendations for the Successful Implementation of Upper Limb Prosthetic Technology,” *Hand Clin.*, vol. 37, no. 3, pp. 457–466, 2021, doi: 10.1016/j.hcl.2021.05.007.
- [15] J. Buchanan, “Kwawu Arm 2.0 - Prosthetic - Socket Version,” 26-Mar-2018. [Online]. Available: <https://www.thingiverse.com/thing:2841281>. [Accessed: 23-Jun-2021].
- [16] E-NABLE, “NIOP - e-NABLE.” [Online]. Available: <https://hub.e-nable.org/s/niop-no-insurance-optimized-prosthetics/wiki/page/view?title=NIOP+Project>. [Accessed: 23-Jun-2021].
- [17] T. Lenzi, J. Lipsey, and J. W. Sensinger, “The RIC Arm - A Small Anthropomorphic Transhumeral Prosthesis,” *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 21, no. 6, pp. 2660–2671, 2016, doi: 10.1109/TMECH.2016.2596104.
- [18] Langevin Gaël, “InMoov – open-source 3D printed life-size robot.” [Online]. Available: <https://inmoov.fr/>. [Accessed: 21-Jan-2022].
- [19] Unlimited Tomorrow, “The Robo Arm.” [Online]. Available: <http://theroboarm.com/>. [Accessed: 21-Jan-2022].
- [20] exii, “Hackberry Handbook,” 2018. [Online]. Available: <https://github.com/mission-arm/HACKberry>. [Accessed: 21-Jan-2022].
- [21] M. Del, X. V. I. Congreso, I. Anual, and D. E. L. A. Somim, “DISEÑO DE UN SOCKET DE MIEMBRO SUPERIOR CON SUSPENSIÓN Derechos Reservados © 2010 , SOMIM,” 2010.
- [22] U. N. A. de México, “Medicina y Ciencias de la Salud Socket ajustable para prótesis de miembro superior.”
- [23] R. Santos, “ESP32 WebSocket Server: Control Outputs (Arduino IDE) | Random Nerd Tutorials.” [Online]. Available: <https://randomnerdtutorials.com/esp32-websocket-server-arduino/>. [Accessed: 21-Jan-2022].
- [24] “ESP32 Series Datasheet Including,” 2021.
- [25] “Batería 18650 Panasonic Ncr18650b.” [Online]. Available: https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-607936979-bateria-18650-panasonic-ncr18650b-liitokala-polo-plano-_JM?matt_tool=51823563&matt_word=&matt_source=google&matt_campaign_id=14637134825&matt_ad_group_id=125898517174&matt_match_type=&matt_network=g&matt

- _device=c&matt_creative=545548942487&matt_keyword=&matt_ad_position=&matt_ad_type=pla&matt_merchant_id=435905676&matt_product_id=MCO607936979&matt_product_partition_id=1414445038999&matt_target_id=pla-1414445038999. [Accessed: 21-Jan-2022].
- [26] Electronilab, “Módulo Cargador Batería de LiPo 1A Micro Usb 5V - TP4056 .” [Online]. Available: <https://electronilab.co/tienda/modulo-cargador-bateria-de-lipo-1a-micro-usb-5v/>. [Accessed: 21-Jan-2022].
- [27] “Fuente Regulable Dc Dc Step Down Xl4015 5 Amperios .” [Online]. Available: https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-512621318-fuente-regulable-dc-dc-step-down-xl4015-5-amperios-_JM?matt_tool=97749113&matt_word=&matt_source=google&matt_campaign_id=14634237773&matt_ad_group_id=122266243330&matt_match_type=&matt_network=g&matt_device=c&matt_creative=545507349308&matt_keyword=&matt_ad_position=&matt_ad_type=pla&matt_merchant_id=367595938&matt_product_id=MCO512621318&matt_product_partition_id=1404886571218&matt_target_id=pla-1404886571218. [Accessed: 21-Jan-2022].
- [28] A. M. Devices, “Miniature Linear Motion Series · L16.”
- [29] “Servo motor MG90S.” [Online]. Available: <https://osakaelectronicsltda.com/motores/servo-motores/servo-motor-mg90s.html>. [Accessed: 21-Jan-2022].
- [30] Amazon, “JX pdi-6221mg 20 kg Digital Grande Torque Coreless Servo para RC Modelo.” [Online]. Available: <https://www.amazon.com/-/es/pdi-6221mg-Digital-Grande-Torque-Coreless/dp/B00WBK22JO>. [Accessed: 21-Jan-2022].
- [31] ABAX, “PLA y PETG: características, diferencias y aplicaciones.” [Online]. Available: <https://abax3dtech.com/2020/12/15/pla-y-petg-caracteristicas-diferencias-y-aplicaciones/>. [Accessed: 21-Jan-2022].