



**Diseño y mejora de dispositivos de asistencia robóticos para personas con amputación de miembro superior.**

Laura María Muñoz Bravo

Informe de práctica presentado para optar al título de Bioingeniero

Asesores

Jonathan Gallego Londoño, M.Sc Biomedical Engineering

Hugo Esteban Rojas Muñoz, Bioingeniero

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Bioingeniería

Medellín, Antioquia, Colombia

2023

Cita	Muñoz Bravo [1]
<b>Referencia</b>	[1] L. Muñoz Bravo, “Diseño y mejora de dispositivos de asistencia robóticos para personas con amputación de miembro superior.”, Trabajo de grado profesional, Bioingeniería, Universidad de Antioquia, Medellín, Antioquia, Colombia, 2023.
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



Centro de Documentación de Ingeniería (CENDOI)

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

Universidad de Antioquia - [www.udea.edu.co](http://www.udea.edu.co)

**Rector:** John Jairo Arboleda Céspedes.

**Decano:** Julio César Saldarriaga.

**Jefe departamento:** John Fredy Ochoa Gómez.

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 a mis padres y hermanos que han sido mi más grande apoyo, a mi familia por su incondicional ayuda, a mi asesor de prácticas y a todo el equipo de Humanos 3D por brindarme sus conocimientos y confianza.

## **Agradecimientos**

A mis padres que son mi guía cada día, a mis hermanos, familia y amigos porque siempre me han apoyado.

Al profesor Jonathan Gallego por su disponibilidad, confianza y consejos para el desarrollo del presente trabajo.

A la Corporación Humanos 3D y a su director de operaciones Esteban Rojas por haberme permitido desarrollar las prácticas, aportar a la entrega de dispositivos de asistencia a personas con discapacidad y llevar a cabo el presente proyecto. A la coordinadora administrativa Alison Montoya por su gran esfuerzo, apoyo y acompañamiento continuo para con todo el equipo. A mis compañeros del equipo ingenieros Esteban Areiza y Juan Silva por ser mi soporte con sus conocimientos y enseñarme todo lo aprendido y a Laura Cárdenas practicante de Diseño Industrial por ser mi compañera y complementar mis conocimientos ingenieriles.

## TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN .....	8
ABSTRACT.....	9
I. INTRODUCCIÓN .....	10
II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	12
A. Antecedentes .....	12
III. OBJETIVOS .....	16
A. Objetivo general.....	16
B. Objetivos específicos .....	16
IV. MARCO TEÓRICO.....	17
Tipos de amputaciones de miembro superior: .....	18
Tipos de dispositivos de asistencia para amputaciones de miembro superior .....	19
1. Prótesis pasivas: .....	20
2. Prótesis mecánicas: .....	20
3. Prótesis mioeléctricas:.....	20
4. Prótesis híbridas: .....	21
Dispositivos empleados en la Corporación H3D:.....	21
Dispositivos mecánicos.....	21
Dispositivos robóticos:.....	22
V. METODOLOGÍA.....	24
1. Investigación de antecedentes:.....	24
1.1. Antecedentes bibliográficos: .....	24
1.2. Entendimiento del problema:.....	25
2. Levantamiento de requerimientos y planteamiento de posibles soluciones .....	25
3. Consideraciones del sistema electrónico .....	26
3.1. Definición de componentes empleados. ....	27
3.2. Elaboración de esquemático .....	29
3.3. Código para el funcionamiento del sistema.....	30
4. Funcionamiento.....	31
4.1. Pruebas aleatorias .....	31
4.2. Definición de movimientos de la mano .....	31
5. Evaluación de funcionalidad.....	32
VI. RESULTADOS.....	33
1. Evaluación del sistema de activación .....	33
2. Montaje inicial. ....	33

3. Funcionamiento.....	35
4. Evaluación de funcionalidad.....	38
VII. DISCUSIÓN .....	39
VIII. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO .....	43
REFERENCIAS.....	45

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Estado del arte de dispositivos de asistencia. ....	13
Tabla 2 Antecedentes de dispositivos de asistencia en Humanos 3D.....	14
Tabla 3 Dispositivos electrónicos desarrollados en H3D. ....	23
Tabla 4 Puntaje de importancia de las características del sistema de activación.....	25
Tabla 5 Evaluación por puntaje de posibles sistemas de activación.....	26
Tabla 6 Componentes electrónicos empleados .....	27
Tabla 7 Porcentaje del sistema de activación .....	33
Tabla 8 Funcionalidad de la mano con 3 posiciones. ....	37

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Niveles de amputación según la parte removida [21].	18
Figura 2 Tipos de amputación parcial de mano. A. Amputación transfalángica. B. Amputación transmetacarpiana distal. C. Amputación transmetacarpiana proximal.	18
Figura 3 Amputación transradial con muñón de 17 cm.	19
Figura 4 Desarticulación de codo [23].	19
Figura 5 Prótesis pasiva [20].	20
Figura 6 Dispositivo mioeléctrico [24].	21
Figura 7 Dispositivo híbrido [20].	21
Figura 8 Medallo Bionic Arm[28].	23
Figura 9 Robotic Arm V3[19].	23
Figura 10 ESP32	27
Figura 11 Servomotor Mg90s	27
Figura 12 Batería de litio	27
Figura 13 Regulador de voltaje.	28
Figura 14 Elevador de voltaje	28
Figura 15 Mikroe-1534. SpeakUp.	28
Figura 16 Interfaz gráfica de SpeakUp [34].	29
Figura 17 Esquemático del circuito	30
Figura 18 Esquema de la metodología.	33
Figura 19 Montaje inicial.	34
Figura 20 Montaje en la PCB.	35
Figura 21 Comunicación serial entre el módulo y el ESP32.	36
Figura 22 Void loop del código.	36
Figura 23 Mano abierta	37
Figura 24 Agarre de fuerza.	37
Figura 25 Agarre de pinza.	37
Figura 26 Fase de acople del sistema.	38

## SIGLAS, ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

<b>M.Sc.</b>	Magister Scientiae
<b>H3D</b>	Humanos 3D
<b>EMG</b>	Electromiografía
<b>EEG</b>	Electroencefalografía
<b>IA</b>	Inteligencia artificial

## RESUMEN

El presente trabajo es un proyecto de innovación realizado dentro de la organización Humanos 3D que busca desarrollar un sistema de activación electrónico de un dispositivo de asistencia que sirva como solución para amputaciones de desarticulación de codo o amputaciones transhumerales ya que dentro de la Corporación aún se encuentran en investigación de un diseño mecánico para este tipo de amputaciones. Para esto, se evalúan diferentes formas de activación de dispositivos de asistencia para miembro superior empleados en otros estudios o dentro de la misma Corporación con el fin de seleccionar uno que cumpla con unos requerimientos mínimos, seguidamente diseñar todo el sistema electrónico que incluya todos los componentes necesarios para activar el dispositivo y finalmente acomodar este sistema a un diseño mecánico ya existente dentro de Humanos 3D y poder evaluar su funcionalidad y mejoras necesarias tanto al sistema como al diseño.

Como resultado se obtiene un sistema electrónico que funciona de acuerdo con lo esperado, pues es innovador, asequible y de fácil implementación empleando un módulo de reconocimiento de voz denominado *mikroe-1534* pero que puede presentar mejoras tanto en el diseño circuital como en el mecánico, pues es necesario hacer un mayor análisis del consumo de corriente para permitir mayor velocidad de respuesta del dispositivo, y también adaptar el sistema de una forma más adecuada a todo el dispositivo de asistencia, finalmente poder hacer pruebas con un beneficiario para poder recibir su retroalimentación.

**Palabras clave — Dispositivo de asistencia, amputación, brazo robótico, sistema de activación, control por voz, inteligencia artificial, Mikroe-1534.**

## ABSTRACT

The present work is an innovation project carried out within the Humanos 3D organization that seeks to develop an electronic activation system for an assist device that serves as a solution for elbow disarticulation amputations or transhumeral amputations since within the Corporation there are still in investigation of a mechanical design for this type of amputations. So, different forms of activation of assistive devices for upper limb used in other studies or within the same corporation are evaluated to select one that meets minimum requirements. Then, it is designed the entire electronic system that includes all the necessary components to activate the device and finally this system is accommodated to an already existing mechanical design within Humanos 3D for testing its functionality and necessary improvements to both the system and the design.

As a result, an electronic system is obtained that works as expected, since it is innovative, affordable, and easy to implement using a voice recognition module called mikroe-1534 that can present improvements in both, the circuit and mechanical design. It is necessary to carry out a greater analysis of the current consumption to allow a greater response speed of the device and to adapt the system in a more appropriate way to the entire assistance device, to finally be able to do tests with a beneficiary in order to receive their feedback.

***Keywords*** — assist device, amputation, robotic arm, activation system, voice control, artificial intelligence, Mikroe-1534.

## I. INTRODUCCIÓN

Según el informe de personas con discapacidad elaborado por el Ministerio de Salud en diciembre de 2020, para agosto de ese año el 2.6% de la población nacional eran personas con discapacidad identificadas y localizadas en el registro oficial del Ministerio de Salud y Protección Social[1], y en el 2014, Colombia fue clasificado como el segundo país más afectado por las minas antipersona después de Afganistán [2]. Esto quiere decir que, aunque las personas con discapacidad son aquellas que presentan alguna deficiencia física, mental, intelectual o sensorial, existe un grupo de personas discapacitadas que han perdido total o parcialmente una extremidad de miembro inferior o superior debido a diferentes causas como el conflicto armado, defectos de nacimiento, accidentes de tránsito, laborales e incluso domésticos[3]. Es por esto que la Corporación Humanos 3D (H3D) se ha enfocado en la producción y distribución gratuita de dispositivos de asistencia para la población que presenta alguna discapacidad de miembro superior, gracias al uso de repositorios digitales de acceso libre y a las tecnologías de impresión 3D que permiten ahorrar costos y disminuir los tiempos de producción [2].

Actualmente, la Corporación cuenta principalmente con prototipos de dispositivos mecánicos para amputaciones parciales de dedo, mano y amputaciones transradiales. Entre los dispositivos más utilizados dentro de la ONG, se encuentran los denominados *Kinetic Hand* para amputaciones parciales de mano, *Unlimbited*, *Kwawu* y *ArmPo* para amputaciones transradiales [4]–[7], todos estos prototipos son diseños libres que se pueden ajustar a las necesidades específicas de cada beneficiario con un sistema de acción mecánico lo cual permite el movimiento y mayor libertad de agarre según el tipo de dispositivo adquirido.

Uno de los principales desafíos que actualmente presenta H3D es la complejidad de las amputaciones que implican desarticulación de codo o por encima de este, debido a la necesidad de un codo mecánico y un sistema de arnés que permita el movimiento del dispositivo y que a su vez cuente con las principales características de los otros dispositivos como lo son ergonomía, peso liviano y que sea fácil de poner.

Puesto que aún no se cuenta con dispositivos que se encuentren en plataformas como *Thingiverse* para este tipo de amputaciones, la Corporación está continuamente estudiando el diseño de un dispositivo mecánico que cuente con las características anteriormente mencionadas, debido a que por cada Clínica Móvil que se realiza en H3D hay personas con amputación transhumeral que no han podido ser beneficiadas y que están en lista de espera de

un dispositivo; este es el caso de la clínica realizada en noviembre de 2022 en Granada, Meta cuya lista cuenta con 42 beneficiarios de los cuales 5 presentan amputaciones por encima del codo, o en casos externos donde aproximadamente el 28% de las personas cuenta con este tipo de amputación y están en lista de espera [8].

Por lo anteriormente mencionado, H3D ha optado por soluciones innovadoras que implican dispositivos asistidos electrónicamente acompañado del estudio del diseño mecánico que permita obtener un dispositivo completo con tecnologías que posibiliten tener comodidad, un buen sistema de agarre, libertad de movimiento y que en un futuro no sólo se acoplen a amputaciones transmurales o de desarticulación de codo sino también a cualquier tipo de amputación, ya sea transradial o parcial de mano.

Por consiguiente, una de las primeras soluciones evaluadas dentro de la ONG fue un dispositivo activado por señales de electromiografía (EMG) cuyo principal inconveniente es su alto costo, la dificultad en el procesamiento de la señal y el ruido generado por diferentes factores que impiden obtener una señal limpia. Posteriormente, otra solución adoptada fue un dispositivo activado por una aplicación web en el cual ya no era necesario la captura de señales, pero sí era necesario estar constantemente con el teléfono encendido para el uso de la aplicación, lo cual resultaba complicado para el usuario. Finalmente, otro método de activación evaluado fueron botones en el dispositivo lo cual era más sencillo para el usuario, pero implicaba emplear la otra mano para activarla. El siguiente punto es continuar con la evaluación de posibles sistemas de activación para los dispositivos por lo que el principal objetivo del presente trabajo es poder desarrollar un nuevo mecanismo de activación basado en el estudio de literatura encontrada en bases de datos y que no implique altos costos para finalmente evaluar su funcionalidad y viabilidad como método de activación para el desarrollo de un dispositivo de asistencia.

---

## II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las amputaciones de miembro superior son causadas por múltiples causas, por lo que existen diferentes estudios cuyo principal objetivo es desarrollar nuevas tecnologías que permitan innovar en los dispositivos de asistencia para que cuando sean utilizados por los usuarios puedan tener mayor libertad de movimiento y, a su vez sean cómodos y ergonómicos.

Una de las tecnologías más simples de los dispositivos de asistencia son las prótesis mecánicas, que utilizan la fuerza del mismo cuerpo para poder accionarse. Es el caso de dispositivos para amputaciones parciales de mano, que se activan gracias al movimiento de la articulación de la muñeca y de las amputaciones transradiales que lo hacen gracias a la flexión y extensión del codo.

En el caso de amputaciones transhumerales y de desarticulación de codo, debido a que se necesita de la presencia de un codo mecánico que proporcione la potencia del movimiento y por lo general necesita de un sistema de arnés que permita sostener la prótesis al cuerpo, no existen tantos prototipos de dispositivos de código abierto, imprimibles y de bajo costo que pudieran ser implementados por H3D para resolver el problema de desarticulación de codo o amputación transhumeral, a diferencia de los otros tipos de amputaciones de miembro superior.

Actualmente, se está estudiando el diseño de un dispositivo mecánico exclusivo para este tipo de amputaciones, pero aún se siguen presentando algunos inconvenientes como el peso del dispositivo, el ajuste del socket y el sistema de arnés lo cual resulta complicado para el usuario.

Por lo anteriormente dicho, dentro de la Corporación Humanos 3D se han desarrollado algunos prototipos de brazos asistidos electrónicamente para abordar el problema que presenta una amputación transhumeral acompañado del estudio del diseño mecánico con el fin de poder dar una solución viable para la Corporación y poder así abordar todos los casos de este tipo que están a la espera de un dispositivo.

### A. Antecedentes

En la Tabla 1 se especifican algunos estudios recientes de diferentes bases de datos que proporciona el sistema de Bibliotecas de la Universidad de Antioquia, donde se explica sobre el avance de dispositivos de asistencia o la implementación de estos por medio de diferentes

métodos de activación. Adicionalmente, en la Tabla 2 se encuentran los antecedentes de los dispositivos ya desarrollados dentro de la Corporación Humanos 3D.

Tabla 1 Estado del arte de dispositivos de asistencia.

	Base de datos	Título	Método de activación empleado
Revisión bibliográfica	IEEE	Prosthetic Arm Control Using Electromyography (EMG) Signal [9]	EMG
		Design and Development of EMG Based Prosthetic Arm [10]	EMG
		Development of a Hybrid Arm Prosthesis Controlled by EEG Signals [11]	Emotiv EEG Neuroheadset
		Vision enabled Smart Prosthetic Arm for Amputees [12]	Visión 3D Leap Motion
		Gesture Controlled Prosthetic Arm with Sensation Sensors [13]	Flex sensor que envía datos a servomotores.
		Model of Prosthetic Arm Finger using Neural Network [14]	Redes neuronales - control por voz- Neural Network Toolbox de MATLAB
	SSRN	Real Life Implementation of Object Detection and Classification Using Deep Learning and Robotic Arm [15]	Deep Learning aplicados a Arduino Uno.
	Science Direct	Developing and modeling of voice control system for prosthetic robot arm in medical systems [16]	Reconocimiento de voz

		The PRISMA Hand I: A novel underactuated design and EMG/voice-based multimodal control [17]	EMG/voice-based multimodal control
--	--	---------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------

Tabla 2 Antecedentes de dispositivos de asistencia en Humanos 3D.

Antecedentes	GitHub - Humanos3D	Desarrollo de una prótesis transhumeral asistida electrónicamente – Epiphany Hand 1.0 [18]	Aplicativo Web
		Robotic Arm Version 3: Wireless Arm [19]	EMG

En la Tabla 1, se nombran diferentes estudios que han desarrollado prótesis de brazo y también se especifica los métodos de activación que se emplean en cada uno de ellos. Raju Ahmed *et al.* [9] y Ashik Ali Abdul *et al.* [10] proponen en sus artículos prótesis cuyo método de activación se basa en señales EMG con electrodos de superficie como convencionalmente pasa en las prótesis biónicas. Harayashiki *et al.* [11], desarrolla una prótesis híbrida controlada por señales de electroencefalografía (EEG) por medio de un auricular que lee la actividad eléctrica del cerebro y posteriormente las envía a un microcontrolador que procesa las señales empleando electrodos de superficie colocados en el cuero cabelludo.

Otros estudios [12], [14, p. 6], [15], aplican diferentes técnicas de inteligencia artificial como métodos de activación de los dispositivos como algoritmos de Leap Motion para reconocimiento de objetos, redes neuronales y aprendizaje profundo; en el artículo “*Developing and modeling of voice control system for prosthetic robot arm in medical systems*” [16], se desarrolla un modelo matemático de reconocimiento de voz para accionar un brazo robótico a partir de sistemas de reconocimiento de voz utilizados en la literatura. Finalmente, también se pueden combinar métodos de activación como lo aplica Ficuciello *et al.* [17], donde se usa EMG y un módulo de reconocimiento de comandos de voz para cambiar distintas características de la apertura y cierre de la mano.

Por otro lado, dentro de los antecedentes de H3D (Tabla 2), se encuentra un dispositivo de asistencia para amputaciones transhumerales asistido electrónicamente basado en la mano

robótica Hackberry Hand, la cual es un proyecto de código abierto y empleando como método de activación un aplicativo web con el objetivo de que el usuario pueda interactuar con el producto [18]. Adicionalmente, el *Robotic Arm Version* [19] está basado en el diseño mecánico de un dispositivo denominado Kwawu Arm [6], empleando EMG como método de activación del dispositivo.

### III. OBJETIVOS

#### A. *Objetivo general*

Desarrollar y evaluar la funcionalidad de un sistema de activación electrónico para una nueva versión de un brazo robótico de la Corporación Humanos 3D para que sea empleado como dispositivo de asistencia a personas con desarticulación de codo.

#### B. *Objetivos específicos*

- Evaluar posibles métodos de activación de un brazo robótico para seleccionar el que mejor se adecue a un beneficiario con amputación transhumeral, basado en una revisión bibliográfica y en los antecedentes del dispositivo.
- Definir los materiales a utilizar mediante un levantamiento de requerimientos para el funcionamiento del dispositivo de asistencia, teniendo en cuenta las necesidades del beneficiario y una ponderación de características.
- Diseñar el sistema de activación del dispositivo de asistencia que permita libertad de movimiento en desarticulación de codo basado en el método previamente seleccionado.
- Evaluar la funcionalidad de un brazo robótico adaptado al sistema de activación diseñado, realizando diferentes pruebas de operación del dispositivo.

#### IV. MARCO TEÓRICO

Una amputación, es un procedimiento quirúrgico que conlleva como resultado final la pérdida total o parcial de una extremidad de miembro superior o inferior, este procedimiento se puede dar debido a diferentes causas como malformaciones genéticas, minas antipersona, o accidentes laborales y/o domésticos. Dentro de las causas más habituales que requieren de una amputación se encuentran:

- Vasculopatías diabéticas o no diabéticas.
- Traumatismos severos.
- Tumores.
- Enfermedades neuropáticas.
- Lesiones térmicas (por calor o por frío).
- Infecciones.
- Deformidades congénitas.

Existen diferentes niveles de amputación dependiendo del lugar de corte respecto a una extremidad inferior o superior, tal como se muestra en la siguiente figura. Debido a los diferentes inconvenientes que genera tener una amputación de cualquier tipo, a lo largo de la historia se han desarrollado alternativas para poder permitir a las personas con ausencia de una extremidad cierto grado de movimiento e independencia al momento de realizar las actividades cotidianas. Estas alternativas son conocidas como prótesis o dispositivos de asistencia dependiendo del contexto, y pueden tener diferentes modos de acción para su funcionamiento. Como se puede observar en la Figura 1 Niveles de amputación según la parte removida [21]., la desarticulación de codo es una amputación por encima del codo, pudiéndose denominar también como amputación transhumeral, por lo que una prótesis para este tipo requiere de un codo mecánico cuyo movimiento de flexión necesita de la potencia de todo el cuerpo y del control mioeléctrico del dispositivo terminal [20].

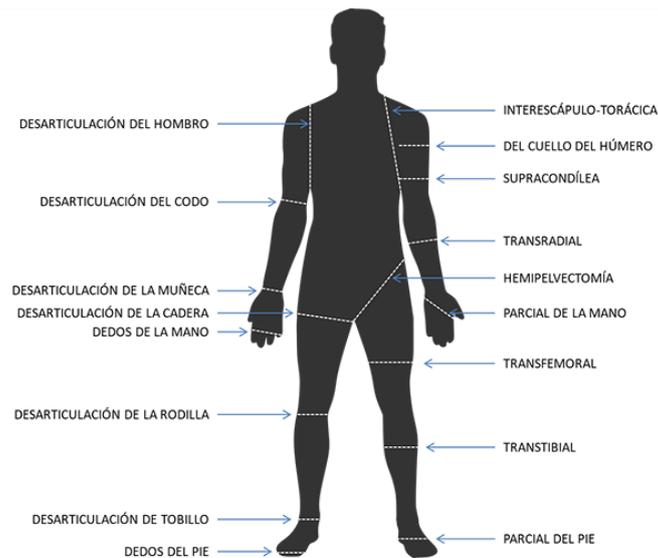


Figura 1 Niveles de amputación según la parte removida [21].

### *Tipos de amputaciones de miembro superior:*

A continuación, se especifica con mayor detalle cada una de las amputaciones de miembro superior [22]:

- Amputación parcial de mano: se refiere a cualquier amputación que incluye los huesos carpianos o metacarpianos, sin afectar los movimientos de la muñeca. Se conocen 4 niveles de este tipo de amputación que se pueden observar en la Figura 2:
  - Transfalángica: cuando hay amputación de uno o múltiples dedos.
  - Tenar, parcial o completa: amputación que involucra el dedo pulgar.
  - Transmetacarpiana distal, incluyendo o no el pulgar: cuyo corte es a través de la palma.
  - Transmetacarpiana proximal, incluyendo o no el pulgar: amputación muy cercana a la muñeca.

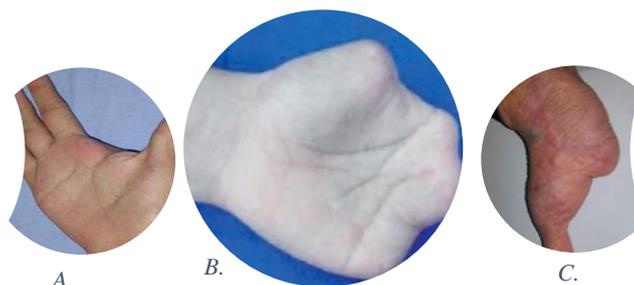


Figura 2 Tipos de amputación parcial de mano. A. Amputación transfalángica. B. Amputación transmetacarpiana distal. C. Amputación transmetacarpiana proximal.

- La amputación transradial (Figura 3) hace referencia a una amputación por debajo del codo, por consiguiente, el movimiento de esta articulación no se ve afectado.



*Figura 3 Amputación transradial con muñón de 17 cm.*

- Articulación de codo: amputación del antebrazo a la altura del codo, tratando de mantener el brazo en su totalidad como se puede notar en la Figura 4 [3].



*Figura 4 Desarticulación de codo [23].*

- Amputación transhumeral: amputación por encima de la articulación del codo y antes de la articulación del hombro.

### *Tipos de dispositivos de asistencia para amputaciones 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 [24]:

### 1. *Prótesis pasivas:*

También conocida como prótesis estética, puede ayudar al equilibrio, estabilización de objetos o actividades recreativas.

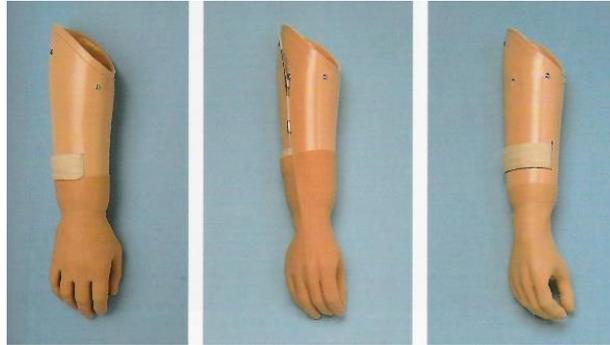


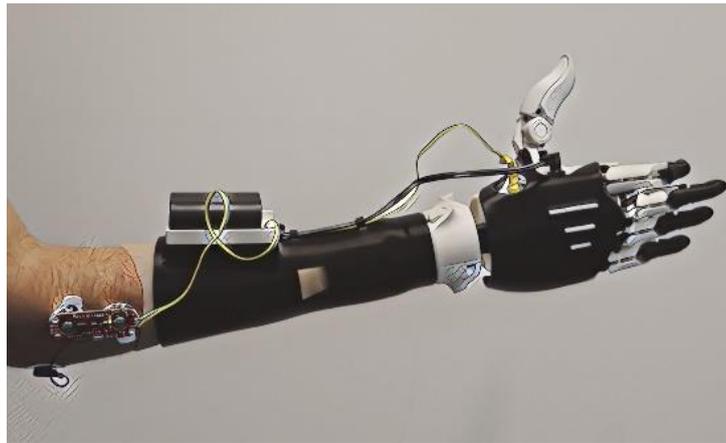
Figura 5 Prótesis pasiva [20].

### 2. *Prótesis mecánicas:*

Dispositivos impulsados por el cuerpo que trasladan el movimiento de un segmento del cuerpo al movimiento de un efector final a través de un cable con ayuda de un arnés que suspende el dispositivo para capturar el movimiento escapular o humeral y finalmente operar la articulación de la mano o el codo.

### 3. *Prótesis mioeléctricas:*

Dispositivos alimentados externamente por medio de baterías que permiten movimientos activos de las manos y las articulaciones por medio de sensores que detectan el movimiento muscular (EMG) del miembro residual o la parte superior del cuerpo que envían datos a un microcontrolador encargado de accionar los movimientos de diferentes servomotores. En la Figura 6 se tiene un dispositivo de este tipo para una amputación transradial.



*Figura 6 Dispositivo mioeléctrico [24].*

#### *4. Prótesis híbridas:*

Dispositivos que combinan características específicas de los dispositivos biomecánicos y de los mioeléctricos empleando dispositivos mecánicos, eléctricos y electrónicos tal como se muestra en la Figura 7 [20].



*Figura 7 Dispositivo híbrido [20].*

#### *Dispositivos empleados en la Corporación H3D:*

##### *Dispositivos mecánicos*

Para amputaciones de miembro superior se utilizan principalmente dispositivos mecánicos, debido a que su mecanismo de acción consiste en la apertura y cierre mediante cables y cintas de sujeción unidos al cuerpo realizando el movimiento por la tracción ejercida por el tensor[25]. La Corporación Humanos 3D, maneja este tipo de dispositivos mecánicos para entregar a sus beneficiarios y son provenientes de repositorios digitales obtenidos de

plataformas como Thingiverse principalmente. Dentro de algunos dispositivos que se manejan se encuentran:

- ArmPo3 v3: dispositivo usado para personas con amputación transradial, específicamente, para personas que tienen todo el antebrazo sin rotación de muñeca y permite la flexión de los dedos gracias a un mecanismo de hilos; en la corporación es usado principalmente para personas con muñón entre 11 y 24 cm [7].
- Unlimbited Arm v2.1: puede ser adaptado y renderizado acorde a las medidas del usuario y el nivel de amputación transradial o desarticulación de la muñeca; es un dispositivo sencillo de adaptar debido a que sólo se necesita la longitud de la mano, longitud del antebrazo, y circunferencia del bíceps. Dentro de H3D, es empleado para personas con muñón mayor a 18 cm o entre 9 y 11 cm generalmente [5].
- Kwawu Arm: con aspecto más funcional y estético destinado a personas con muñones de antebrazo corto, en la corporación es empleado para personas con un muñón menor a 10 cm [6].

#### *Dispositivos robóticos:*

Otros tipos de dispositivos de asistencia, que se han querido implementar en H3D para brindar mayor comodidad y libertad a los beneficiarios, son los dispositivos electrónicos y robóticos, que basan su funcionamiento en señales EMG, y son captadas cuando se produce contracción o relajación del músculo; son un gran avance, puesto que presentan mayor precisión de agarre y naturalidad del movimiento [26].

La ONG ha ido estudiando diferentes tipos de dispositivos empleando componentes electrónicos y eléctricos con el fin de desarrollar posibles soluciones para obtener dispositivos que más se acoplen a las necesidades del usuario teniendo en cuenta costos y consideraciones de este. En la siguiente tabla [27], se muestran los tipos de dispositivos electrónicos que se han desarrollado en Humanos 3D.

*Tabla 3 Dispositivos electrónicos desarrollados en H3D.*

Dispositivo	Características
<p style="text-align: center;">El Medallo MK 1 - Bionic Arm</p>  <p style="text-align: center;"><i>Figura 8 Medallo Bionic Arm[28].</i></p>	<p>Dispositivo de código abierto con agarre de pellizco y agarre de potencia activados por señales EMG por medio de 2 servomotores que controlan los dedos [28].</p>
<p style="text-align: center;">Robotic Arm Version 3</p>  <p style="text-align: center;"><i>Figura 9 Robotic Arm V3[19].</i></p>	<p>A diferencia del Medallo Bionic, este dispositivo permite un agarre completo por medio de un servomotor en su interior [19].</p>

Por otro lado, una de las principales dificultades que ha presentado Humanos 3D, es que aún no cuenta con un dispositivo ni mecánico ni electrónico para amputaciones transmurales debido a que como se ha mencionado anteriormente, son dispositivos que requieren un codo mecánico y generalmente emplean la potencia del cuerpo para poder realizar el movimiento de flexión [20].

## V. METODOLOGÍA

Debido a que el principal objetivo del presente trabajo es desarrollar y evaluar la funcionalidad de un sistema de activación electrónico para el brazo robótico de la Corporación Humanos 3D, la primera actividad que se tuvo en cuenta para iniciar fue la investigación de antecedentes dentro de la fundación con el fin de apoyar procesos de innovación con sentido social, cuyo enfoque siempre sea beneficiar al usuario teniendo en cuenta sus necesidades y requerimientos; enseguida, se realizó el levantamiento de requisitos según las necesidades encontradas para posteriormente nombrar las principales consideraciones electrónicas y componentes empleados en el dispositivo y finalmente realizar el código que hizo que el microcontrolador activara los servos con el fin de revisar el funcionamiento y funcionalidad del sistema. Con este objetivo, se planteó la siguiente secuencia de actividades:

### *1. Investigación de antecedentes:*

En esta primera etapa, se realizó un estado del arte en diferentes bases de datos proporcionadas por la Universidad de Antioquia para conocer y entender diferentes métodos de activación de dispositivos de asistencia para amputaciones de miembro superior, principalmente para amputaciones transradiales y transhumerales; posteriormente se realizó el estado del arte con los dispositivos desarrollados en la ONG tratando de comprender principalmente cuáles habían sido los métodos de activación anteriormente empleados, sus beneficios, fallas y consideraciones del usuario.

#### *1.1. Antecedentes bibliográficos:*

Se realizó una revisión bibliográfica para poder estudiar cuáles son los principales aspectos que se deben tener en cuenta en un dispositivo de asistencia de miembro superior, con el fin de obtener las características relevantes dentro de una matriz de diseño. Adicionalmente, dentro de esta revisión bibliográfica se sintetizaron cuáles eran los métodos de activación más comunes y los que se pudieran acoplar a las posibilidades de la fundación como se puede observar en la Tabla 1.

*1.2. Entendimiento del problema:*

En el desarrollo de esta actividad se tuvo en cuenta cuáles eran las necesidades de la Corporación Humanos 3D con el objetivo de entender el problema principal y cuáles soluciones se habían abordado anteriormente (ver Tabla 2) con el fin de plantear posibles nuevas soluciones o continuar con el desarrollo de lo anteriormente abordado y poder mejorarlo.

*2. Levantamiento de requerimientos y planteamiento de posibles soluciones*

A continuación, el paso a seguir fue estimar cuáles son las posibles soluciones que se pueden tener en cuenta para el desarrollo del mecanismo de activación considerando algunas características principales como asequibilidad, implementación, funcionalidad, innovación y ligereza; estas características se seleccionaron de acuerdo a los objetivos del proyecto, debido a que se requiere que sea un dispositivo de bajo costo ya que es el objetivo final es que en un futuro pueda ser un dispositivo donado; además había un límite de tiempo para el desarrollo del proyecto lo cual requería la facilidad de implementación; era necesario que el dispositivo funcionara de acuerdo a lo esperado y finalmente la Corporación esperaba algo innovador que sea cómo pensando en un usuario final. Para esto, se estableció un cuadro donde se evalúe la importancia de las características principales que puede aportar el sistema de activación al dispositivo dándole un porcentaje a cada característica para un total de 100% como se muestra a continuación en la siguiente tabla:

*Tabla 4 Puntaje de importancia de las características del sistema de activación.*

<b>Asequibilidad</b>	<b>Facilidad de implementación</b>	<b>Funcionalidad</b>	<b>Innovación</b>	<b>Ligereza y comodidad</b>	<b>Total</b>
15%	25%	15%	20%	25%	100%

En la anterior tabla se muestran las características que son relevantes para el sistema de activación, pues son las que se consideran imprescindibles en el levantamiento de requerimientos.

Posteriormente, en la Tabla 5 se observa que por cada método de activación que se consideró como posible solución en el presente trabajo se califican las características con un

porcentaje no superior al dado anteriormente para obtener un porcentaje total y dar una calificación global.

*Tabla 5 Evaluación por puntaje de posibles sistemas de activación*

<b>Método</b>	<b>Asequibilidad</b>	<b>Facilidad de implementación</b>	<b>Funcionalidad</b>	<b>Innovación</b>	<b>Ligereza</b>	<b>Total</b>
EMG	10%	15%	8%	5%	20%	58%
EEG	10%	5%	7%	10%	10%	42%
Flex Sensor	12%	15%	5%	7%	20%	59%
Control por voz	8%	15%	10%	15%	20%	68%
Inteligencia artificial (IA)	10%	7%	15%	20%	20%	72%

Se debe tener en cuenta que los porcentajes dados en las anteriores dos tablas provienen de una evaluación de criterio propio la cual fue basada en el estado del arte mostrada en la Tabla 1 y en la Tabla 2, además de la retroalimentación de los integrantes del equipo de Humanos 3D.

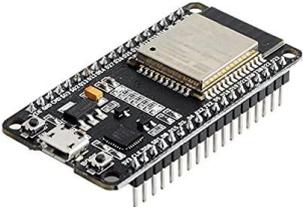
### *3. Consideraciones del sistema electrónico*

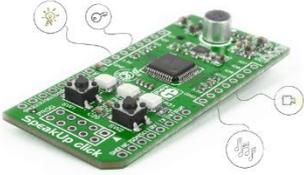
Independientemente del sistema de activación, dentro de H3D ya había antecedentes de un dispositivo asistido electrónicamente, por lo que la idea en este punto fue aprovechar los componentes electrónicos ya empleados anteriormente con el fin de poder reducir costos y poder realizar el montaje del circuito electrónico considerando requerimientos de consumo de corriente, implicaciones de potencia y actuadores del sistema.

### 3.1. Definición de componentes empleados.

A continuación, se muestran cuáles son los componentes que hacen parte del sistema de activación del dispositivo.

Tabla 6 Componentes electrónicos empleados

<p style="text-align: center;">ESP32 DEVKIT V1 [29]</p>  <p style="text-align: center;">Figura 10 ESP32</p>	<p>Voltaje de Alimentación (USB): 5V DC Voltaje de Entradas/Salidas: 3.3V                  SoC: ESP32 (ESP32-D0WDQ6)                  CPU: Dual core Tensilica Xtensa LX6 (32 bit)                  Frecuencia de Reloj: hasta 240Mhz                  Wifi: 802.11 (2.4 GHz hasta 150 Mbit/s)                  Bluetooth: v4.2 BR/EDR and Bluetooth Low Energy (BLE)                  Memoria: 448 KByte ROM 520 KByte SRAM 16 KByte SRAM in RTC QSPI Flash/SRAM, 4 Mbytes                  Pines Digitales GPIO: 24                  Pines PWM: 16                  Pines Analógicos ADC: 18 (3.3V, 12bit: 4095, tipo SAR, ganancia programable) Conversor Digital a Analógico DAC: 2 (8bit)                  UART: 2                  Cantidad: 1.</p>
<p style="text-align: center;">Servomotor Mg90s [30]</p>  <p style="text-align: center;">Figura 11 Servomotor Mg90s</p>	<p>Voltaje de operación: 4.8 V a 6 V                  Velocidad de operación: 0.1 s/60° (4.8 V), 0.08 s/60° (6 V)                  Torque detenido: 1.8 kgf·cm (4.8 V), 2.2 kgf·cm (6 V)                  Banda muerta: 5 μs Peso ligero: 13.4 g                  Dimensiones compactas: Largo 22.5 mm, ancho 12 mm, altura 35.5 mm aprox.                  Largo del cable: 25 cm aprox.                  Incluye 3 brazos o cuernos (horns) y su tornillo de sujeción, 2 tornillos para montaje del servo y cable de conexión con conector.                  Cantidad: 3.</p>
<p style="text-align: center;">Batería litio polímero 1000mAh 3.7V [31]</p>  <p style="text-align: center;">Figura 12 Batería de litio</p>	<p>Voltaje de salida: 3.7 V                  Corriente nominal: 1000mAh                  2C descarga continua                  Conector JST PH de dos pines 2mm de separación                  Protección contra sobre voltaje, sobre corriente y voltaje mínimo                  Dimensiones: 52x34x5mm                  Peso: 20g                  Cantidad: 1.</p>

<p>Regulador de voltaje 3.3V ~ 100mA Low Drop (LDO). Encap: TO-92 [32]</p>  <p><i>Figura 13 Regulador de voltaje</i></p>	<p>Precisión: 0,5%                  Regulación de línea: 1%                  Regulación de carga: 1%                  Temperaturas de operación: -40°C a 125°C                  Encapsulado: TO-92                  Cantidad: 1.</p>
<p>Elevador de Voltaje DC-DC 5A 4V ~ 30V [33]</p>  <p><i>Figura 14 Elevador de voltaje</i></p>	<p>Voltaje de entrada: 3.4V ~ 30V                  Voltaje de salida: 4V ~ 30V                  Corriente máxima de entrada: 5A                  Corriente máxima continua de salida: 3A (con buenas condiciones de aireación)                  Chip de regulación: LM2587                  Cantidad: 1.</p>
<p>Speak Up. Módulo de reconocimiento de voz [34].</p>  <p><i>Figura 15 Mikroe-1534. SpeakUp.</i></p>	<p>Aplicaciones: Robots controlados por voz, dispositivos domóticos o cualquier interfaz hombre-máquina                  MCU incorporado controla directamente los dispositivos externos usando 12 GPIO programables por el usuario o, envía el índice del comando de voz coincidente a una interfaz seleccionable: USB o UART.                  Interfaz: I2C, PWM, SPI, UART, USB                  Compatibilidad: mikroBUS                  Tamaño: 57,15 x 25,4 mm                  Voltaje de entrada: 3,3 V</p>

Por cuestión de practicidad, el sistema elegido es el control por voz, por lo que haciendo una revisión a los antecedentes bibliográficos (Tabla 1) se conoce que existen módulos de reconocimiento de voz ya entrenados que son capaces de reconocer palabras pregrabadas para finalmente poder realizar cualquier acción programada en el microcontrolador.

Al tener la capacidad de comunicación UART, el módulo elegido es el que se observa en la Figura 15, el cual se puede conectar con el microcontrolador ESP32 después de pre grabar los comandos correspondientes con ayuda del software “*SpeakUp*” el cual es una interfaz (Figura 16) que puede ser instalada en el PC y configurar el dispositivo [34].

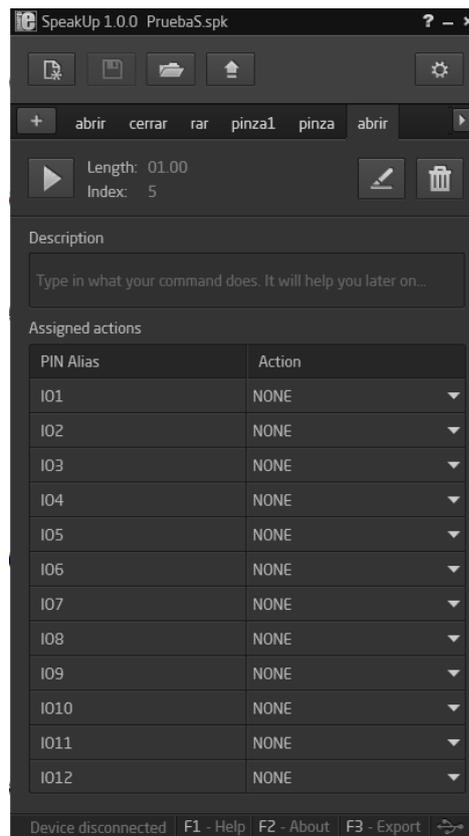


Figura 16 Interfaz gráfica de SpeakUp [34].

### 3.2. Elaboración de esquemático

Después saber cuáles eran los componentes electrónicos que se iban a utilizar y el mecanismo de activación a emplear, el cual se aclara más adelante en la sección de resultados (en el numeral 1), se procedió a realizar el esquemático con ayuda del software *EasyEDA* [35] (Figura 17 Esquemático del circuito), para posteriormente poder realizar el montaje del circuito y verificar su funcionamiento.

En este punto, se tuvo en cuenta el protocolo de comunicación entre el dispositivo seleccionado para el sistema de activación y el microcontrolador ESP32.

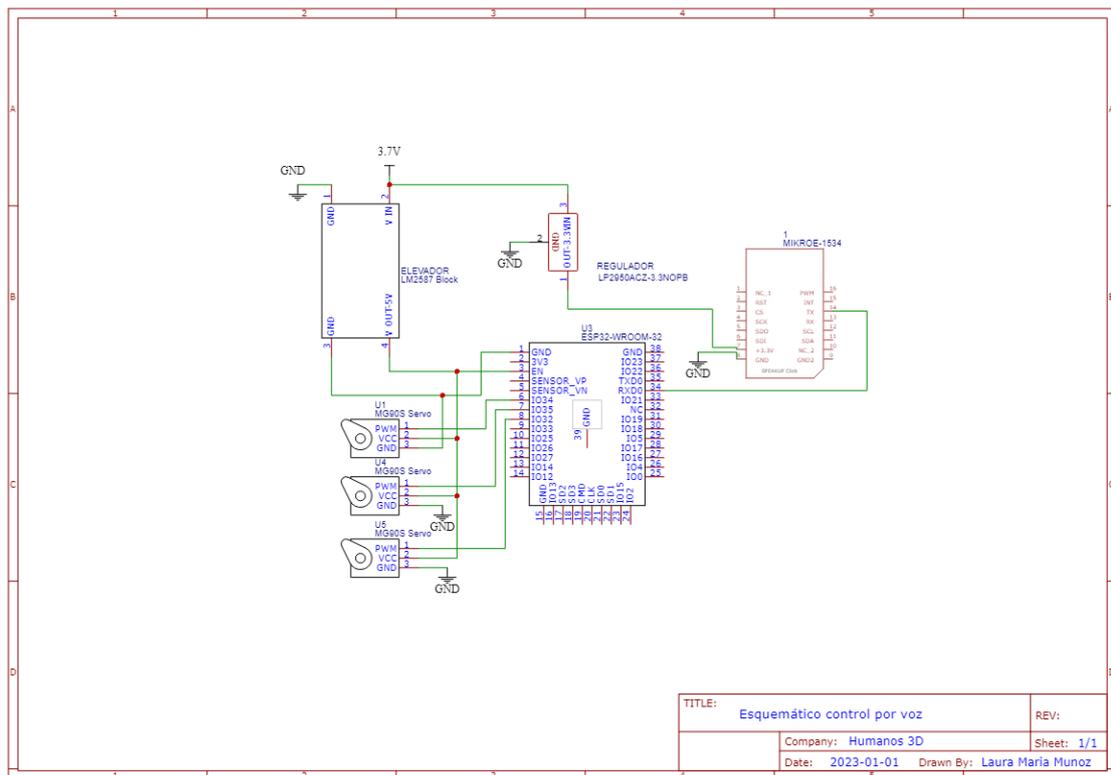


Figura 17 Esquemático del circuito

En la Figura 17 se observa que la fuente principal de voltaje es de 3.7V que va conectado a 2 componentes, el primero es un elevador de voltaje del cual se pueden obtener 5 voltios para poder alimentar el microcontrolador ESP32 del cual se conectan los 3 servomotores que se observan en la parte inferior izquierda del esquemático, que a su vez están alimentados gracias a los 5V obtenidos del elevador y a la tierra del microcontrolador. El otro componente al que está conectado los 3.7V iniciales es un regulador de voltaje 3.3V con el fin de poder alimentar el módulo de reconocimiento de voz que a su vez se conecta por el pin de TX al pin de RX del ESP32.

### 3.3. Código para el funcionamiento del sistema.

Después de haber seleccionado los componentes, se procedió a realizar el código en C/C++ con ayuda del editor de código de Arduino, *Arduino IDE* para poder enviar los datos de comunicación al ESP32 gracias a su capacidad de comunicación UART y a su interacción con los servomotores por medio de estructuras lógicas e instrucciones específicas.

Así pues, la principal librería empleada para realizar el código es “*ESP32Servo.h*” para poder realizar los diferentes movimientos, adicionalmente se pueden emplear los comandos de comunicación serial para poder activar los comandos de voz.

#### 4. *Funcionamiento*

Una vez establecida la conexión de todos los elementos, se procedió a realizar una primera prueba para verificar que el sistema funciona, luego se definen los movimientos que puede tener la mano para poder realizar la conexión del montaje final.

##### 4.1. *Pruebas aleatorias*

El primer paso antes de emplear el módulo de reconocimiento de voz como sistema de activación, es entender cómo funciona. En este punto, se consideró necesario realizar pruebas del sistema elegido antes de realizar todo el montaje circuital. Fue necesario primero emplear uno de los 12 GPIO disponibles en el Mikroe-1537 y grabar un comando aleatorio cualquiera, en este caso se grabó un “hola” para poder realizar la prueba y observar que efectivamente funcionaba. El siguiente paso es poder conectar el módulo al ESP32 por medio de comunicación UART, para esto se procedió a conectar el pin *RX* del primero al pin *TX* del segundo y encender un led conectado a un GPIO del ESP32 por medio del mismo comando grabado anteriormente; con esto, se pudo comprobar que existía una conexión entre el mikroe-1534 y el microcontrolador.

##### 4.2. *Definición de movimientos de la mano*

Antes de realizar todo el montaje, también se tuvo que decidir cuáles serían los movimientos que realizaría la mano para poder establecer los rangos de movimiento y luego poder realizar el montaje final.

Las posiciones de la mano que se eligieron fueron las siguientes:

- Posición en reposo: consiste en tener todos los dedos de la mano a 90° inicialmente antes de decir cualquier comando como si se tratara de la posición anatómica.
- Mano abierta: esta posición consiste en tener todos los dedos completamente extendidos.

- Agarre de fuerza: posición que permite sostener objetos, por lo que todos los dedos están completamente cerrados.
- Agarre de pinza: el dedo índice y el pulgar se cierran mientras que los otros tres dedos están extendidos con el fin de poder agarrar algo pequeño.

Las posiciones mencionadas se eligieron porque a lo largo de la experiencia en la Corporación, la principal necesidad de los beneficiarios que se observa es poder agarrar objetos grandes como un vaso u objetos más pequeños que requieren de más precisión; extender la mano para poder recibir objetos o simplemente estar en reposo.

Teniendo en cuenta lo anterior, se procedió a grabar los comandos en el módulo por medio del software SpeakUp previamente instalado, este proceso es gracias a que el mismo software permite grabar hasta 200 comandos diferentes por medio del micrófono integrado en el módulo, entonces fue necesario un comando diferente para obtener cada posición. Aquí, también se tuvo en cuenta que un mismo comando se podía grabar varias veces para tener diferentes niveles de ruido y frecuencia. Luego, según el número de palabras grabadas, se le asocia un índice o número a cada comando como si fueran las posiciones de un dato tipo lista, así como se observa en la Figura 16 en la cual está seleccionado el comando “abrir” que es la sexta palabra grabada, pero el índice asociado es el número cinco debido a que el primer comando grabado tiene asociado el número cero.

Resumiendo, después de que Speak Up reconoce una palabra, en este caso los comandos asociados a cada posición de la mano (que se muestran más adelante), se envía cierto número de bits al ESP32 por medio de comunicación serial pero que se puede obtener como el *Index* de cada comando como una variable y luego, haciendo uso de esta variable se pueden emplear condicionales para limitar el movimiento de los servos según este dato.

##### 5. *Evaluación de funcionalidad*

Después de tener el montaje circuital en la PCB, se adaptó el sistema a un brazo mecánico impreso anteriormente en la Corporación, diseñado para contener una tarjeta electrónica que pudiera contener el sistema. En este punto, se tuvieron en cuenta diferentes puntos de vista con el fin de evaluar la funcionalidad del sistema y analizar su usabilidad como brazo robótico y posible solución a amputación transhumeral o desarticulación de codo.

En la siguiente figura se puede observar resumidamente cuáles fueron los principales puntos en la metodología del presente trabajo.

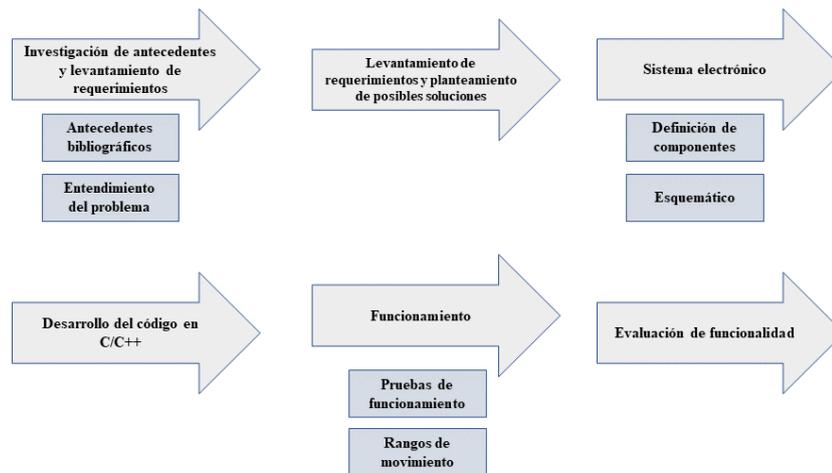


Figura 18 Esquema de la metodología.

## VI. RESULTADOS

### 1. Evaluación del sistema de activación

De la Tabla 5 se puede observar que los mecanismos con puntajes más altos son control por voz e inteligencia artificial, esto basado en la importancia que se les da a las características consideradas como requerimientos del sistema de activación, finalmente no se elige método con el puntaje más alto, sino el que permite obtener un sistema empleando el módulo de reconocimiento de voz mencionado anteriormente.

Tabla 7 Porcentaje del sistema de activación

Sistema de activación evaluado	Porcentaje con respecto al puntaje total
Control por voz	68%
Inteligencia artificial	72%

### 2. Montaje inicial.

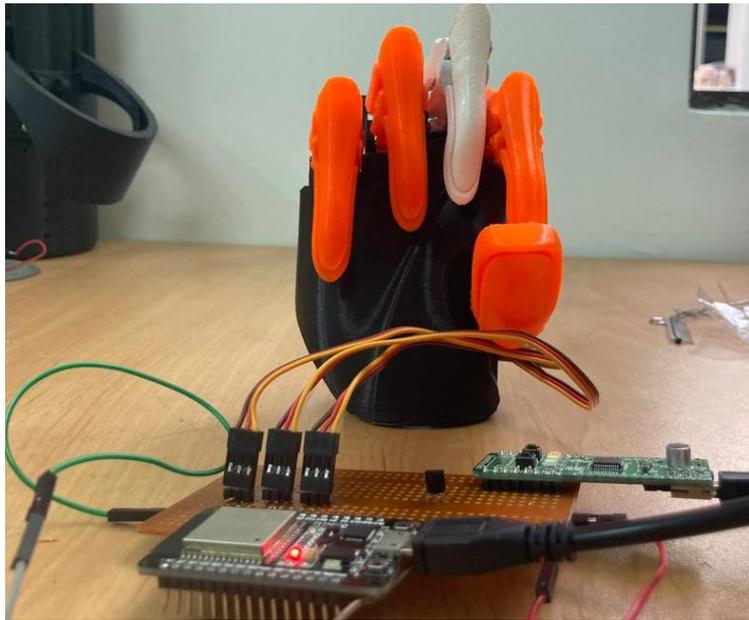
Basados en el esquemático de la Figura 17 y en las especificaciones de los componentes de la Tabla 6 se obtiene un montaje inicial en la protoboard como se muestra a continuación.



*Figura 19 Montaje inicial.*

En la Figura 19, se observa la conexión entre el ESP32 y el módulo de reconocimiento de voz empleando dos protoboards y que son alimentados inicialmente por conexión USB en el computador; también se observan dos pilas conectadas en serie que permiten obtener 7.4V por lo que se conectan a un regulador de 5V para alimentar los servos de la mano que se conectan a los pines de salida del ESP32 definidos en el código, esto con el fin de probar que el código funcionaba al generar los comandos grabados

Posteriormente, en una PCB que ya tiene definido el plano de tierras y fuentes se organizan los elementos electrónicos con el fin de poder acoplarlo al diseño mecánico. Además, antes de acoplar tanto el microcontrolador como el módulo de reconocimiento de voz, es necesario cargar los códigos correspondientes a los dos dispositivos para empezar a realizar pruebas de funcionamiento.



*Figura 20 Montaje en la PCB*

En la mano mostrada en la Figura 20 ya se encuentran instalados los 3 servomotores empleados para mover los 5 dedos de la mano de la siguiente manera:

- El primer servomotor es para el dedo pulgar.
- El segundo es para el dedo índice.
- El tercero es para mover los dedos medio, anular y meñique.

También se observa que todos los componentes empleados ya fueron soldados a la PCB para poder realizar la conexión de los componentes del esquemático de la Figura 17.

### *3. Funcionamiento*

En las Figura 21 y Figura 22, se leen respectivamente las líneas de código que permiten la comunicación serial entre el módulo y el microcontrolador, y el void loop del código en el cual está la variable *incomingByte* que hace referencia al índice de cada comando grabado y guardado en SpeakUp; esta variable, es la que se incluye en los tres condicionales que ejecutan el movimiento de los servos. Además, se puede leer cuáles son los ángulos de los servos para cada posición.

Se debe tener en cuenta que para la posición de mano abierta se tienen el comando cero y el cinco, para el agarre de fuerza el uno y el dos y para el agarre de pinza el tres y el cuatro.

```
Serial.begin(115200);  
Serial2.begin(115200, SERIAL_8N1, RX0);
```

Figura 21 Comunicación serial entre el módulo y el ESP32.

```
void loop() {  
  // put your main code here, to run repeatedly:  
  if (Serial2.available() > 0) {  
    incomingByte = Serial2.read();  
    incomingByte1 = Serial2.read();  
    Serial.print ("Received data = ");  
    Serial.print(incomingByte ,DEC);  
  
    if (incomingByte == 0 || incomingByte == 5){ // Mano abierta  
      Serial.println ("Command: Abrir");  
      miServo.write(130); //Meñique, anular y medio. También para ángulo inicial.  
      miServo1.write(130);  
      miServo2.write(150);  
    }  
    if (incomingByte == 1 || incomingByte == 2){ // Agarre de fuerza  
      Serial.println ("Command: Cerrar");  
      miServo.write(10);  
      miServo1.write(25); //Index  
      miServo2.write(10); //Thumb  
    }  
    if (incomingByte == 3 || incomingByte == 4){ // Agarre de pinza  
      Serial.println ("Command: PickUp");  
      miServo.write(130);  
      miServo1.write(40); //Index  
      miServo2.write(10); //Thumb  
    }  
  }  
}
```

Figura 22 Void loop del código.

En la Tabla 8 se puede observar tres movimientos de la mano definidos anteriormente gracias a los comandos de voz grabados en *Speak Up* y que después de reconocerlos pueden ser entendidos por el ESP32 gracias a la comunicación UART para que, por medio del código mostrado, se puedan realizar los diferentes movimientos programados y activados por los tres servomotores empleados.

Tabla 8 Funcionalidad de la mano con 3 posiciones.

 <p>Figura 23 Mano abierta</p>	<p>Mano abierta Comando de voz: Abrir.</p>
 <p>Figura 24 Agarre de fuerza.</p>	<p>Agarre de fuerza. Comando de voz: Cerrar.</p>
 <p>Figura 25 Agarre de pinza.</p>	<p>Agarre de pinza. Comando de voz: Pick Up.</p>

#### 4. Evaluación de funcionalidad

Finalmente, se muestra en la Figura 26 cómo se acopla lo que se denomina el brazo robótico, pues en el resultado final se encuentra adaptado el sistema electrónico al brazo mecánico anteriormente impreso.

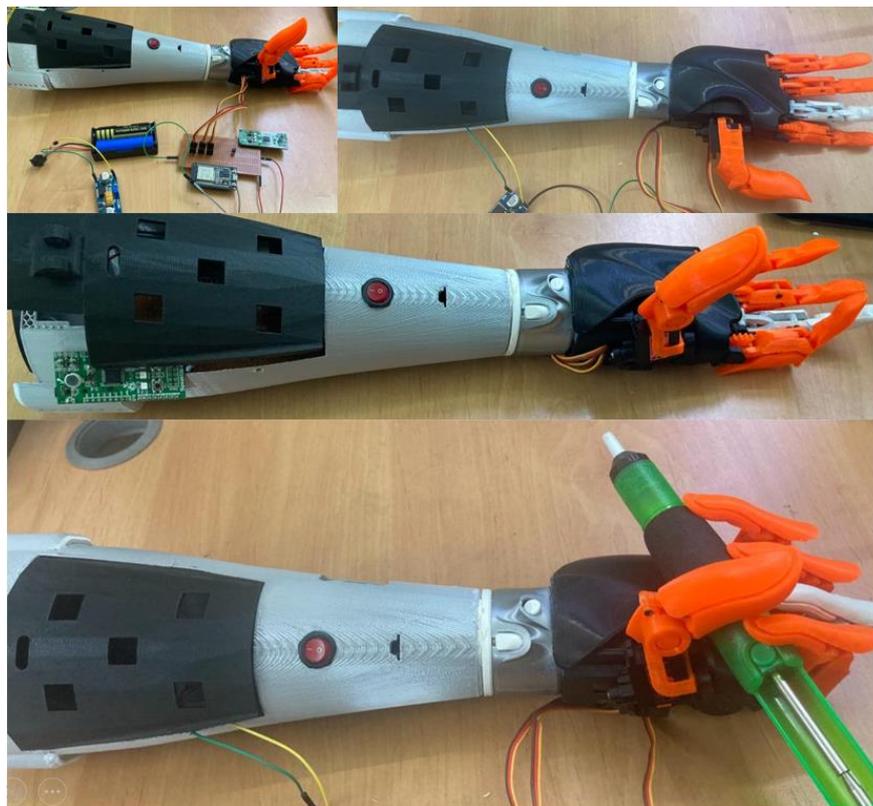


Figura 26 Fase de acople del sistema.

Aquí, se observa una serie de imágenes que muestran cómo se acopla todo el sistema al brazo, dejando el módulo lo más destapado posible para que se puedan captar los comandos grabados.

## VII. DISCUSIÓN

Como se ha podido comprender a lo largo del presente trabajo, H3D es una ONG que tiene la capacidad de entregar dispositivos mecánicos para personas con amputaciones transradiales y está en continua investigación para poder obtener un diseño para amputaciones transhumerales. Dentro de esta continua investigación se han podido ir evaluando soluciones dentro de las que destaca un dispositivo activado electrónicamente para obtener como producto final un brazo robótico; es por esto, que el objetivo del presente trabajo es estudiar antecedentes de este tipo de dispositivos para posteriormente seleccionar un método de activación que se adecue a las posibilidades de la Corporación y que además sea innovador y funcional para el usuario.

En la Tabla 4 se califica con un porcentaje de importancia a las principales características para evaluar el sistema de activación y a continuación, se explica cada una:

- **Asequibilidad:** cualquiera que sea el sistema de activación, debe tener un costo mínimo, con el objetivo de que la Corporación pueda reducir costos para que en caso de convertirse en un dispositivo que pueda ser donado y ayudar al mayor número de personas. Adicionalmente, se trata de emplear elementos ya disponibles en H3D o de fácil adquisición.
- **Fácil implementación:** a pesar de que se evalúan sistemas como el de IA, este es complejo al momento de implementar debido a que implica un conocimiento previo que desgasta tiempo, y ya existen dispositivos que permiten las mismas aplicaciones.
- **Funcionalidad:** esta característica es importante porque se busca lograr un sistema que funcione convenientemente a las necesidades del usuario.
- **Innovación:** con esta característica, se busca encontrar un sistema de activación que pueda ser innovador para la Corporación.
- **Ligereza:** se debe tener en cuenta que el sistema no aporte mucho peso al dispositivo, debido a que el peso es una de las razones por las que los beneficiarios rechazan el dispositivo.

En la Tabla 5 están los puntajes que las características aportan a cada sistema basándose en las características explicadas anteriormente, y en la Tabla 7 se muestran los dos sistemas con mayor puntaje y los que tienen mayor consideración en el presente trabajo.

Hoy en día, el procesamiento y acondicionamiento de señales fisiológicas, el uso de sensores y la inteligencia artificial permiten obtener dispositivos de asistencia con mayor movimiento con el fin de mejorar los rangos de movimiento y las capacidades de agarre del dispositivo; por esto se puede observar en la Tabla 1 que uno de los principales sistemas de activación empleado para una prótesis robótica es gracias a señales EMG o EEG; dentro de la Corporación uno de los sistemas de activación que ha sido utilizado es con señales EMG que se descarta en este trabajo porque como se ha podido evidenciar en otros estudios, las prótesis mioeléctricas no presentan larga durabilidad, tienen velocidad de respuesta lenta, no hay retroalimentación sensorial y el control de la prótesis es complejo[24] y a pesar de que con un buen procesamiento de la señal se puede obtener un sistema de activación adecuado, no era innovador dentro de la ONG, adicionalmente por retroalimentación de los integrantes del equipo de la misma resulta complejo debido a que se necesitan sensores de buena calidad que podrían resultar costosos y es necesario realizar el procesamiento de la señal que incluye la limpieza del ruido generado por la piel y otros factores que hacen complicado este sistema. Así mismo, se descartan las señales EEG debido a que su obtención y procesamiento es más complejo; finalmente utilizar flex sensor también se descarta porque se limita el rango de movimiento sentido.

En este orden de ideas, la inteligencia artificial ha permitido que los dispositivos aprendan secuencias de movimiento mediante el reconocimiento de patrones [36], lo cual también resulta complicado de realizar porque se necesitan conocimientos de redes neuronales, Machine Learning o Deep Learning y adicionalmente realizar el entrenamiento de datos implica tiempo y memoria de un buen microcontrolador para procesar los datos. Pero hoy en día, existen aplicaciones gracias a un sistema denominado “Internet de las cosas” el cual permite el procesamiento del lenguaje natural obteniendo como resultado dispositivos como Alexa y Siri que tienen la capacidad de reconocimiento de voz para realizar actividades domésticas [37]. Por tal razón, y después de encontrar que existen módulos de reconocimiento de voz que ya han sido empleados en prótesis robóticas [16], se decide emplear el módulo de reconocimiento de voz “Mikroe-1534” como alternativa diferente para el sistema de activación gracias a que es asequible, capaz de reconocer 200 comandos de voz [34], sencillo de configurar y adicionalmente tiene la capacidad de comunicarse con el ESP32 que recibe los datos enviados por el módulo y los procesa para accionar los servomotores que facilitan el movimiento de la mano.

Después comprender que el módulo mencionado anteriormente es una solución para un sistema de activación de un brazo robótico se procede a incluirlo dentro del circuito de activación de la mano como se observa en la Figura 17; este esquemático permite tener en cuenta consideraciones importantes dentro de una aplicación electrónica, como por ejemplo voltaje de alimentación de ambos dispositivos empleados, debido a que el del ESP32 es de 5.5V y el del Mikroe-1534 es de 3.3V, por lo que es necesario usar un elevador de voltaje para el primero y un regulador para el segundo porque el voltaje de alimentación de todo el circuito es de 3.7V. Además, la batería empleada permite tener una corriente adecuada para el funcionamiento de los tres servomotores, debido a que uno de los problemas detectados anteriormente dentro de la Corporación era que al emplear dos baterías que entregaban un voltaje más alto no se obtenía la corriente necesaria para todo el sistema de movimiento, lo cual pudo ser comprobado en un montaje inicial observado en la Figura 19.

Con la batería litio polímero se mejora la activación de los tres servos, aunque se percibe que el movimiento del servo que activa el dedo meñique, anular y medio y del servo del dedo índice, se retrasa un poco con respecto al del dedo pulgar lo cual puede basarse en el mismo problema mencionado anteriormente, pudiéndose solucionar analizando cuál es el consumo de corriente del sistema.

Por otro lado, emplear un servo para el dedo pulgar y otro para el índice es útil porque permiten el movimiento independiente de los dos dedos, lo cual es relevante para ciertos agarres como el agarre de pinza, además son los dedos que más se emplean para poder hacer movimientos de agarre según la experiencia de los dispositivos mecánicos.

En la Tabla 8 se observan las tres posiciones elegidas para activar la mano cada una de ellas por medio de un comando de voz. En este punto, para que el dispositivo funcione adecuadamente y sea capaz de activarse con el comando correcto y con el menor porcentaje de error, es necesario grabar mínimo dos veces el mismo comando tal como se lee en la Figura 22 debido a que depende del ruido que exista en el momento, de la frecuencia de la voz de la persona que es diferente entre hombres y mujeres. Además, gracias a la capacidad que tiene el módulo de reconocer 200 comandos, se pueden grabar distintas palabras según las necesidades de agarre, pero se debe tener en cuenta que implica mayor gasto computacional y en el código, pues implica más condicionales que permitan el movimiento en diferentes ángulos de los servos.

Finalmente, para ver qué tan funcional resulta el sistema se pudo acoplarlo al brazo impreso anteriormente por integrantes de Humanos 3D (Figura 26); aquí, se pudo observar que

al introducir el módulo Mikroe-1534 dentro del espacio disponible para el sistema electrónico, se perdía la capacidad de que este entendiera los comandos de voz, lo que se soluciona dejando el micrófono afuera e idealmente lo más cercano posible a la voz.

Adicionalmente, para evaluar la funcionalidad del sistema se tiene en cuenta la retroalimentación de los miembros de la Corporación, destacando los siguientes puntos:

Es un sistema de fácil implementación que no aporta peso liviano y funciona bien cuando el ambiente es silencioso pero que genera ciertas complicaciones cuando existe mucho ruido medioambiental.

Se debe pensar que al momento de activar el brazo con los comandos en lugares públicos puede resultar incómodo.

El micrófono del módulo no debe estar tapado dentro del espacio del brazo disponible para la tarjeta electrónica y debe estar cercano a la voz del usuario para que este entienda los comandos, en ocasiones hay que acercarse mucho lo cual puede resultar incómodo.

El dispositivo funciona como se esperaba, pero se debe buscar la manera de tener más comandos que permitan más agarres o movimientos sin afectar el funcionamiento del dispositivo.

Se deben hacer pruebas con un usuario con el objetivo de obtener una retroalimentación de su parte.

## VIII. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

El resultado final es un sistema de activación para un brazo activado electrónicamente mediante comandos de voz empleando un módulo de reconocimiento de voz el cual es un dispositivo útil debido a su fácil implementación que permite conectarse con un ESP32 mediante comunicación UART y posteriormente por código C/C++, con las librerías adecuadas poder mover tres servos insertados en una mano impresa en 3D permitiendo diferentes posiciones o agarres.

Tras considerar los diferentes sistemas de activación que se han utilizado en dispositivos de asistencia tanto en artículos publicados en bases de datos como también dentro de la Corporación Humanos 3D, se destacan características relevantes que debe aportar el sistema de activación elegido (Tabla 4), para luego evaluar las formas de activación consideradas para el desarrollo del presente trabajo (Tabla 5), obteniendo que los sistemas de inteligencia artificial y control por voz son los que resultan con mayor porcentaje de evaluación y de los cuales se decide utilizar el segundo por practicidad y fácil implementación.

Teniendo en cuenta los requerimientos que debe tener un sistema de activación de un dispositivo de asistencia activado electrónicamente como peso ligero, bajo consumo de energía y respuesta rápida, se concluye que es necesario realizar un análisis del consumo de corriente para así utilizar la batería adecuada con mayor capacidad energética y mayor eficiencia para aportar la corriente necesaria a todos los componentes del circuito y activar los tres servomotores correctamente y con rápida respuesta de movimiento ya que son el actuador final del dispositivo.

Los componentes seleccionados mostrados en la Tabla 6 permiten diseñar un sistema de activación electrónico empleando también el módulo Mikroe-1535 [34], concluyendo que es un sistema electrónico que permite sólo el movimiento de la mano y no de las otras partes del dispositivo, como el antebrazo.

Finalmente, la evaluación de la funcionalidad del sistema y la retroalimentación por parte de los integrantes del equipo permite concluir que son necesarias algunas modificaciones en el circuito para la correcta actuación de los servos y una rápida respuesta, además de ser importantes mayores posibilidades de agarre y movimientos, por ejemplo poder reemplazar la fuente por una batería de mayor capacidad y con la corriente adecuada para activar todos los componentes; acoplar el módulo para que quede cercano a la voz del usuario y grabar más comandos para definir otras posiciones de la mano.

Por otro lado, a manera de trabajo futuro se destaca poder emplear la otra forma de activación con porcentaje más alto dentro de la evaluación de requerimientos que implica técnicas de inteligencia artificial, debido al ser un sistema entrenado propiamente puede solucionar los problemas que presenta el módulo con respecto al ruido externo y las fallas de reconocimiento de los comandos cuando el micrófono está muy lejos; también, se pueden explorar otros módulos de reconocimiento de voz como el *EasyVR Plus Shield 3.0* [38], el cual tiene mayor capacidad y puede no presentar los mismos errores que el módulo empleado en el presente trabajo.

Aunque el sistema se acopló a un diseño mecánico impreso anteriormente con el objetivo de disminuir costos, se puede acoplar este sistema a otro diseño que permita tener el micrófono más cerca de la voz de un usuario; para esto es necesario acoplarlo a un diseño que contenga un socket ajustable al hombro y las piezas de acople para el codo mecánico y anotar los ajustes necesarios para acomodar el sistema electrónico.

Al mismo tiempo, se deben realizar pruebas con el beneficiario para obtener su retroalimentación acerca del sistema electrónico y poder definir los movimientos o agarres deseados, además de poder grabar los comandos con su propia voz con el objetivo de obtener la frecuencia adecuada para la activación del módulo.

## REFERENCIAS

- [1] "Discapacidad". <https://www.minsalud.gov.co/proteccionsocial/promocion-social/Discapacidad/Paginas/discapacidad.aspx>.
- [2] "About us | Humanos3D". <https://humanos3d.org/en/about-us/>.
- [3] "Discapacidad - OPS/OMS. Organización Panamericana de la Salud". <https://www.paho.org/es/temas/discapacidad>.
- [4] Thingiverse.com, "Kinetic Hand by MatBowtell". <https://www.thingiverse.com/thing:4618922>.
- [5] "ARMS", *Team UnLimbited*. <https://www.teamunlimbited.org/arms>.
- [6] Thingiverse.com, "Kwawu Arm 2.0 - Prosthetic - Socket Version by JacquinBuchanan". <https://www.thingiverse.com/thing:2841281>.
- [7] Thingiverse.com, "ArmPO v3 by poparaguay". <https://www.thingiverse.com/thing:2803120>.
- [8] "01\_Recipients 2022.xlsx", *Google Docs*. [https://docs.google.com/spreadsheets/d/1SAZkvhNohZIRavVWZvcIg08s4aS6E4VT/edit?usp=drive\\_web&oid=104395698616172027289&dls=true&usp=embed\\_facebook](https://docs.google.com/spreadsheets/d/1SAZkvhNohZIRavVWZvcIg08s4aS6E4VT/edit?usp=drive_web&oid=104395698616172027289&dls=true&usp=embed_facebook).
- [9] R. Ahmed, R. Halder, M. Uddin, P. Ch. Mondal, y A. K. Karmaker, "Prosthetic Arm Control Using Electromyography (EMG) Signal", en *2018 International Conference on Advancement in Electrical and Electronic Engineering (ICAEED)*, Gazipur, Bangladesh, nov. 2018, pp. 1-4. doi: 10.1109/ICAEED.2018.8642968.
- [10] A. A. Abdhul, D. Subramani, J. Ganesan, S. Subramaniam, y K. G. Dharani, "Design and Development of EMG Based Prosthetic Arm", en *2020 6th International Conference on Advanced Computing and Communication Systems (ICACCS)*, Coimbatore, India, mar. 2020, pp. 502-504. doi: 10.1109/ICACCS48705.2020.9074206.
- [11] A. H. Moreira, F. S. M. Barbosa, G. H. A. Ikeda, G. de M. Carvalho, F. S. Madani, y L. G. Trabasso, "Development of a Hybrid Arm Prosthesis Controlled by EEG Signals", en *2017 2nd International Conference on Cybernetics, Robotics and Control (CRC)*, Chengdu, jul. 2017, pp. 203-207. doi: 10.1109/CRC.2017.47.
- [12] A. Subramanian, S. C. Sethuraman, R. Badola, P. Sahoo, y N. K. Kumaravelu, "Vision enabled Smart Prosthetic Arm for Amputees", en *2021 IEEE International Symposium on Smart Electronic Systems (iSES)*, Jaipur, India, dic. 2021, pp. 230-235. doi: 10.1109/iSES52644.2021.00060.
- [13] M. F. Saqib, A. Islam, M. L. A. Bari, M. S. Ahmed, y Md. A. A. Samy, "Gesture Controlled Prosthetic Arm with Sensation Sensors", en *2018 3rd International Conference for Convergence in Technology (I2CT)*, Pune, abr. 2018, pp. 1-5. doi: 10.1109/I2CT.2018.8529343.
- [14] M. Varghese, E. R. Samuel, y R. A. Koshy, "Model of Prosthetic Arm Finger using Neural Network", en *2018 IEEE International Conference on Cyborg and Bionic Systems (CBS)*, Shenzhen, oct. 2018, pp. 36-41. doi: 10.1109/CBS.2018.8612223.
- [15] Y. Kakde, N. Bothe, y A. Paul, "Real Life Implementation of Object Detection and Classification Using Deep Learning and Robotic Arm", *SSRN Electron. J.*, 2019, doi: 10.2139/ssrn.3372199.
- [16] K. Gundogdu, S. Bayrakdar, y I. Yucedag, "Developing and modeling of voice control system for prosthetic robot arm in medical systems", *J. King Saud Univ. - Comput. Inf. Sci.*, vol. 30, n.º 2, pp. 198-205, abr. 2018, doi: 10.1016/j.jksuci.2017.04.005.
- [17] F. Ficuciello, G. Pisani, S. Marcellini, y B. Siciliano, "The PRISMA Hand I: A novel underactuated design and EMG/voice-based multimodal control", *Eng. Appl. Artif. Intell.*, vol. 93, p. 103698, ago. 2020, doi: 10.1016/j.engappai.2020.103698.

- [18] "Epiphany-Arm-V1/Trabajo\_grado\_Jhon Sossa.pdf at master · Humanos3D/Epiphany-Arm-V1", *GitHub*. <https://github.com/Humanos3D/Epiphany-Arm-V1>.
- [19] "Home · Humanos3D/RoboticArmV3 Wiki · GitHub". <https://github.com/Humanos3D/RoboticArmV3/wiki> (accedido 11 de diciembre de 2022).
- [20] "Opciones para las prótesis de los miembros - Temas especiales", *Manual MSD versión para profesionales*. <https://www.msmanuals.com/es/professional/temas-especiales/miembro-prot%C3%A9sico/opciones-para-las-pr%C3%B3tesis-de-los-miembros?query=Opciones%20para%20las%20pr%C3%B3tesis%20de%20los%20miembros>.
- [21] P. R. Miguel, "Todo lo que debes saber sobre amputaciones", *MBA blog*, 23 de marzo de 2021. <https://www.mba.eu/blog/todo-lo-que-debes-saber-sobre-amputaciones/>.
- [22] I. Hernández Pretel, C. Cuenca González, L. Monleón Llorente, y L. Vaamonde Lorenzo, "Soluciones protésicas para una amputación parcial de la mano: a propósito de un caso", *Rehabilitación*, vol. 52, n.º 2, pp. 137-141, abr. 2018, doi: 10.1016/j.rh.2018.02.001.
- [23] "Artroplastia del codo: MedlinePlus enciclopedia médica". <https://medlineplus.gov/spanish/ency/article/007258.htm>.
- [24] D. H. Gates, S. M. Engdahl, y A. Davis, «Recommendations for the Successful Implementation of Upper Limb Prosthetic Technology», *Hand Clin.*, vol. 37, n.º 3, pp. 457-466, ago. 2021, doi: 10.1016/j.hcl.2021.05.007.
- [25] "Prótesis mecánicas e híbridas. Ortopedia Jens Muller". <http://ortopediajensmuller.com/servicio-de-fabricacion/protesis-de-miembro-superior/protesis-mecanicas-e-hibridas/>.
- [26] EsMachina, "Las prótesis de mano en la actualidad. Tipos, modelos y precios", *EsMachina*, 27 de enero de 2020. <https://www.esmachina.com/que-es-protesis-de-mano-tipos-y-precios/>.
- [27] «Humanos3D», *GitHub*. <https://github.com/Humanos3D> (accedido 11 de diciembre de 2022).
- [28] "Home · Humanos3D/ElMedalloBionicArm Wiki · GitHub". <https://github.com/Humanos3D/ElMedalloBionicArm/wiki>.
- [29] "ESP32 Wi-Fi+Bluetooth Datasheet pdf - 2.4GHz Wi-Fi+Bluetooth. Equivalent, Catalog". <https://datasheetspdf.com/pdf/1097467/EspressifSystems/ESP32/1>.
- [30] "Servo motor MG90S". <https://osakaelectronicsltda.com/motores/servo-motores/servo-motor-mg90s.html> (accedido 1 de enero de 2023).
- [31] "3.7 V: Batería litio polímero 1000mAh 3.7V". <https://www.didacticaselectronicas.com/index.php/baterias-cargadores/recargables-1/tipo-lipo-1/3-7v/bateria-litio-polimero-1000mah-3-7v-baterias-pilas-de-litio-polimero-lipo-de-3-7v-1s-recargables-pila-1s-li-po-bater%C3%ADas-detail>.
- [32] "Reguladores 3.3V: Regulador de voltaje 3.3V ~ 100mA Low Drop (LDO). Encap: TO-92". <https://www.didacticaselectronicas.com/index.php/semiconductores/reguladores/reguladores-33v/regulador-de-voltaje-33v-100ma-low-drop-ldo-reguladores-de-voltaje-3-3v-encap-to-92-to92-detail>.
- [33] "Elevador de Voltaje DC-DC 5A 4V ~ 30V-BOOSTER, ELEVADOR, STEP UP". <https://www.didacticaselectronicas.com/index.php/fuentes-adaptadores/dc-dc/fuentes-variables/elevador-de-voltaje-dc-dc-5a-4v-30v-tar-lm2587-fuentes-elevadores-step-up-bost-de-alimentaci%C3%B3n-voltaje-poder-variables-lm2587-detail>.
- [34] "SpeakUp Click - MikroElektronika", *MIKROE*. <http://www.mikroe.com/speakup-click>.

- [35] "EasyEDA – Simulador de circuitos y diseño de circuitos impresos online". <https://easyeda.com/>.
- [36] "*Prótesis inteligentes, ¿cómo funcionan?*", (16 de marzo de 2021). [En línea Video]. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=JuZVqwprE4>
- [37] «What is the Internet of Things (IoT)?» <https://www.oracle.com/internet-of-things/what-is-iot/> (accedido 12 de enero de 2023).
- [38] "Varios: EasyVR Plus Shield 3.0-Reconocimiento de voz". <https://www.didacticaselectronicas.com/index.php/sistemas-de-desarrollo/compatibles-con-arduino/shields-para-arduino/variados/easyvr-plus-shield-3-0-reconocimiento-de-voz-shield-de-reconocimiento-de-voz-reconocimiento-voz-reproductores-de-audio-sonido-detail>.