



UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS



ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

TESIS

**Diseño e Implementación de un Exoesqueleto para la Rehabilitación
Funcional de las manos en pacientes con enfermedades cerebrovasculares,
en el Hospital de Rehabilitación del Callao, 2025**

Para obtener el Título Profesional de Ingeniero Electrónico

Elaborada por:

Bach. Camizan Cabrera Leo Danny

Bach. Santa Cruz Prado Christian Maykol

Asesor:

Dr. Frank Richard Rodríguez Chirinos

LAMBAYEQUE – PERÚ

2026

Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo
Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas
Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica

**Diseño e Implementación de un Exoesqueleto para la Rehabilitación
Funcional de las manos en pacientes con enfermedades cerebrovasculares,
en el Hospital de Rehabilitación del Callao, 2025**

Autor:

Bach. Camizan Cabrera Leo Danny

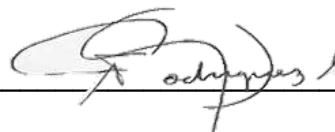


Bach. Santa Cruz Prado Christian Maykol



Asesor:

Dr. Frank Richard Rodríguez Chirinos



LAMBAYEQUE - PERÚ

Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo
Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas
Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica

**Diseño e Implementación de un Exoesqueleto para la Rehabilitación
Funcional de las manos en pacientes con enfermedades cerebrovasculares,
en el Hospital de Rehabilitación del Callao, 2025**

Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Electrónico

Sustentado y aprobado ante los siguientes miembros del jurado:


Mg. Manuel J. Ramirez Castro
Presidente


H.Sc. Ing. Hugo Javier Childea Pareda
Secretario


Dr. Ing. Carlos Leonardo Oblitas Vera
Vocal

Lambayeque - Perú

DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD

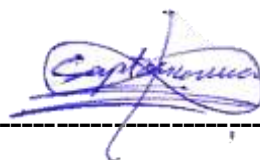
Yo, **Camizan Cabrera Leo Danny** y **Santa Cruz Prado Christian Maykol**, investigadores principales, y el **Dr. Frank Richard Rodríguez Chirinos** asesor de nuestro trabajo de investigación denominado **“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN EXOESQUELETO PARA LA REHABILITACIÓN FUNCIONAL DE LAS MANOS EN PACIENTES CON ENFERMEDADES CEREBROVASCULARES, EN EL HOSPITAL DE REHABILITACIÓN DEL CALLAO, 2025”**, declaramos que este trabajo no está plagiado y no contiene información falsa. Si se determina lo contrario, responsablemente cancelaremos este informe y procederemos a los trámites administrativos necesarios. Esto podrá dar lugar a la revocación de cualquier título o grado obtenido como consecuencia de este informe.

Lambayeque, 14 de mayo del 2026.

AUTOR:

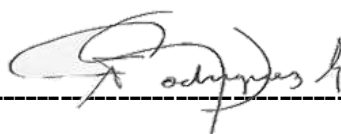


BACH. CAMIZAN CABRERA LEO DANNY



BACH. SANTA CRUZ PRADO CHRISTIAN MAYKOL

ASESOR:



DR. FRANK RICHARD RODRÍGUEZ CHIRINOS



UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO
FACULTAD DE CIENCIAS FISICAS Y MATEMATICAS
DECANATO

Ciudad Universitaria - Lambayeque

LICENCIADA - RESOLUCION DEL CONSEJO DIRECTIVO N° 015 - 2023-SUNEDU / CD



0108



ACTA DE SUSTENTACIÓN N° 067.-2026.-D/FACFyM

Siendo las 11:30 A.M. del día 18 de agosto del 2026, se reunieron los miembros del jurado evaluador de la Tesis titulada:

Diseño e implementación de un exoesqueleto para la rehabilitación funcional de las manos en pacientes con enfermedades cerebrovasculares, en el hospital de rehabilitación del Callao, 2025

Designados por Resolución N° 428 - 2025 - D/FACFyM de fecha 14 de mayo de 2025

Con la finalidad de evaluar y calificar la sustentación de la tesis antes mencionada, conformada por los siguientes docentes:

<u>Mg. Ing. Manuel Javier Ramirez Castro</u>	Presidente
<u>M.Sc. Ing. Hugo Javier Chidayo Podilla</u>	Secretario
<u>Dr. Ing. Carlos Leonardo Oblitas Vera</u>	Vocal

La tesis fue asesorada por (el) (la) Dr. Ing. Frank Richard Rodriguez Chirinos nombrado por Resolución N° 428 - 2025 - D/FACFyM de fecha 14 de mayo 2025

El Acto de Sustentación fue autorizado por Resolución N° 567 - 2026 D/FACFyM de fecha 04 de agosto de 2026

La Tesis fue presentada y sustentada por (el) (los) Bachiller (es): Camirán Cabrera Leo Danny y Santa Cruz Prado Christian Maykol y tuvo una duración de 30 minutos.

Después de la sustentación, y absueltas las preguntas y observaciones de los miembros del jurado se procedió a la calificación respectiva, otorgándole el Calificativo de dieciséis (16) en la escala vigesimal, mención (Bueno).

Por lo que queda(n) apto(s) para obtener el Título Profesional de Ingeniero Electrónico, de acuerdo con la Ley Universitaria 30220 y la normatividad vigente de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas y la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.

Siendo las 12:45 se dio por concluido el presente acto académico, dándose conformidad al presente acto con la firma de los miembros del jurado.

Mg. Manuel J. Ramirez Castro
Presidente

Dr. Ing. Carlos Leonardo Oblitas Vera
Vocal

M.Sc. Ing. Hugo Javier Chidayo Podilla
Secretario

Dr. Ing. Frank Richard Rodriguez Chirinos
Asesor

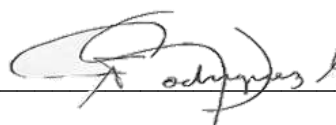
CONSTANCIA DE APROBACION DE ORIGINALIDAD DE TESIS

(Aprobado con Res N° 428-2025-D)

Yo, Frank Richard Rodríguez Chirinos, Asesor de tesis de: Bach. Camizan Cabrera Leo Danny y Bach. Santa Cruz Prado Christian Maykol, Titulada: “DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN EXOESQUELETO PARA LA REHABILITACIÓN FUNCIONAL DE LAS MANOS EN PACIENTES CON ENFERMEDADES CEREBROVASCULARES, EN EL HOSPITAL DE REHABILITACIÓN DEL CALLAO, 2025”, luego de la revisión exhaustiva del documento constato que la misma tiene un índice de similitud de 08% verificable en el reporte de similitud del programa Turnitin.

El suscrito analizo dicho reporte y concluyo que cada una de las coincidencias detectadas no constituyen plagio. A mi leal saber y entender de la tesis cumple con todas las normas para el uso de citas y referencias establecidas por la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.

Lambayeque, 19 de mayo de 2026.



Dr. Frank Richard Rodríguez Chirinos

Asesor

DNI 16734709

Adj.

1. Recibo Digital Turnitin firmado.

2. Vista actual con Informe de Originalidad Turnitin firmados.

3. Archivo procesado en Turnitin: INFORME FINAL DE TESIS_ Camizan Cabrera Leo Danny y Santa Cruz Prado Christian Maykol.docx

Diseño e Implementación de un Exoesqueleto para la Rehabilitación Funcional de las manos en pacientes con enfermedades cerebrovasculares, en el Hospital de Rehabilitación del Callao, 2025

INFORME DE ORIGINALIDAD

8%

INDICE DE SIMILITUD

7%

FUENTES DE INTERNET

2%

PUBLICACIONES

5%

TRABAJOS DEL
ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1

repositorio.unprg.edu.pe

Fuente de Internet

3%

2

Submitted to Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo

Trabajo del estudiante

1%

3

e-archivo.uc3m.es

Fuente de Internet

1%

4

hdl.handle.net

Fuente de Internet

1%

5

repositorio.unb.br

Fuente de Internet

<1%

6

Submitted to Universidad Tecnológica Centroamericana UNITEC

Trabajo del estudiante

<1%

7

Submitted to Universidad Politecnica Salesiana del Ecuador

<1%



Dr. Frank Richard Rodríguez Chirinos

Asesor

DNI 16734709

8	repositorio.unal.edu.co Fuente de Internet	<1 %
9	repositorio.upt.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
10	www.coursehero.com Fuente de Internet	<1 %
11	Submitted to Universidad Politecnica Salesiana del Ecuador Trabajo del estudiante	<1 %
12	www.dspace.uce.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
13	Submitted to Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente Trabajo del estudiante	<1 %
14	dspace.ups.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
15	es.unionpedia.org Fuente de Internet	<1 %
16	Submitted to Gimnasio Campestre San Rafael Trabajo del estudiante	<1 %
17	Submitted to Universidad Santo Tomas Trabajo del estudiante	<1 %

- 18 Angulo Niquén, Guillermo Manuel. "Diseño, implementación y validación de un goniómetro electrónico modular adaptable al eje de rotación para la medición del rango articular en la rodilla", Pontificia Universidad Católica del Perú (Peru)
Publicación <1 %
-
- 19 Submitted to Universidad Nacional de Colombia
Trabajo del estudiante <1 %
-
- 20 repositorio.unu.edu.pe
Fuente de Internet <1 %
-

Excluir citas

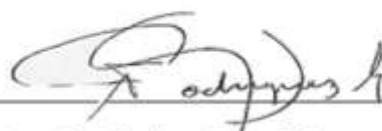
Activo

Excluir coincidencias

< 15 words

Excluir bibliografía

Activo



Dr. Frank Richard Rodríguez Chirinos

Asesor

DNI 16734709



Recibo digital

Este recibo confirma que su trabajo ha sido recibido por **Turnitin**. A continuación podrá ver la información del recibo con respecto a su entrega.

La primera página de tus entregas se muestra abajo.

Autor de la entrega: Camizan Cabrera Leo Danny Y Santa Cruz Prado Christian May...
Título del ejercicio: Quick Submit
Título de la entrega: Diseño e Implementación de un Exoesqueleto para la Rehabili...
Nombre del archivo: Tesis_final_18_05_26_Turnitin_V2.pdf
Tamaño del archivo: 3.29M
Total páginas: 91
Total de palabras: 11,961
Total de caracteres: 75,164
Fecha de entrega: 18-may-2026 08:00p. m. (UTC-0500)
Identificador de la entrega: 2964576874

UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

TESIS

"Diseño e Implementación de un Exoesqueleto para la Rehabilitación Funcional de las manos en pacientes con enfermedades cerebrovasculares, en el Hospital de Rehabilitación del Callao, 2025"

Para obtener el Título Profesional de Ingeniero Electrónico

Elaborada por:
Ruth Camizan Cabrera Leo Danny
Ruth Santa Cruz Prado Christian Mayol

Asesor:
Dr. Frank Richard Rodríguez Chirinos

LAMBAYEQUE - PERÚ
2026

Dr. Frank Richard Rodríguez Chirinos
Asesor
DNI 16734709

DEDICATORIA

Dedico este trabajo, ante todo, a Dios, por acompañarme en cada paso de este proceso, darme fortaleza en los momentos difíciles y permitirme culminar una etapa importante de mi vida profesional.

A mis padres, Florentino Camizan y Geovanni Cabrera, por su amor, esfuerzo y apoyo incondicional. Gracias por ser el ejemplo y la motivación que me impulsan a seguir adelante y alcanzar cada una de mis metas.

A mis hermanos, por estar presentes a lo largo de este camino, brindándome ánimo, comprensión y confianza en cada momento. Su compañía ha sido fundamental para continuar creciendo tanto en lo personal como en lo profesional.

Finalmente, agradezco a todas las personas que, de una u otra manera, contribuyeron con su apoyo y palabras de aliento para hacer posible la culminación de este proyecto.

Bach. Camizan Cabrera Leo Danny

Bachiller Ingeniería Electrónico

Lambayeque 2026

Dedico esta tesis, en primer lugar, a Dios por darme salud, fuerza y sobre todo sabiduría para lograr cumplir con todas mis metas a pesar de todas las limitaciones que la vida me puso.

A mis padres el Dr. Alden Aristides Santa Cruz Prado y a mi Madre María Magdalena Ramos Huaman quienes me incentivaron a estudiar la carrera que ahora ya profeso.

Finalmente dedico este trabajo también a un gran mentor siendo el Dr. Miguel Ángel Flores Miñano, quien a través de sus consejos he logrado obtener experiencia en la vida, así como la parte laboral.

Bach. Santa Cruz Prado Christian Maykol

Bachiller Ingeniería Electrónico

Lambayeque 2026

AGRADECIMIENTO

Expreso mi más profundo agradecimiento a todas las personas que, de distintas maneras, hicieron posible el desarrollo y culminación de esta tesis.

A mi familia, por acompañarme en cada etapa de mi formación, brindándome apoyo, comprensión y motivación constante para seguir adelante y no rendirme ante las dificultades.

Al Dr. Frank Rodríguez, asesor de esta investigación, por compartir sus conocimientos, orientarme con paciencia y aportar valiosas recomendaciones durante el desarrollo del presente trabajo académico.

Asimismo, agradezco a quienes me brindaron palabras de ánimo y confianza a lo largo de este proceso. Cada aporte y gesto de apoyo fue importante para alcanzar esta meta profesional.

Bach. Camizan Cabrera Leo Danny
Bachiller Ingeniería Electrónica
Lambayeque 2026

Agradezco en gran manera a la Universidad, así como a la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, en especial a la Escuela de Ingeniería Electrónica, por darme todos los conocimientos que necesitaba para así enriquecerme en mi vida profesional.

De una manera especial agradezco a mi asesor por tomarse el tiempo de poder ayudarnos en esta tesis, siempre dispuesto a indicarnos nuestros errores mientras realizábamos el proyecto arduamente.

Bach. Santa Cruz Prado Christian Maykol
Bachiller Ingeniería Electrónica
Lambayeque 2026

INDICE GENERAL

I. INTRODUCCIÓN	22
1.1. Situación Problemática	22
1.2. Formulación del problema de investigación.....	22
1.3. Hipótesis	23
1.4. Objetivos.....	23
Objetivo general	23
Objetivos específicos.....	23
II. DISEÑO TEÓRICO.....	24
2.1 Antecedentes.....	24
2.2 Bases teóricas.....	26
2.2.1 La electromiografía (EMG).....	26
2.2.2 Amplificador de instrumentación AD8221	26
2.2.3 Rehabilitación.....	28
2.2.4 Estructura de la mano	29
Abductor corto del pulgar.....	30
Flector corto del pulgar.....	31
Oponente del pulgar.....	32
Extensor corto y largo del pulgar	33
Interóseos dorsales.....	34
Flectores.....	35
Músculos extensores comunes.....	36
2.2.5 Fisiología de la mano.....	37

Abducción y aducción.....	37
Flexión.....	38
Extensión.....	39
Oposición.....	40
2.2.6 Tipos de Agarre	41
Definición	42
Agarre pinza	43
Agarre gancho.....	44
Agarre de precisión.....	44
2.2.7 Métodos de rehabilitación	45
Terapia física	45
Electroterapia.....	46
Rehabilitación asistida por tecnología.....	46
Terapia con espejos	47
Terapia Bobath	47
2.2.8 Control y Automatización	48
Control y automatización del exoesqueleto de mano	48
2.2.9 Diseño del exoesqueleto	50
2.3 Bases Conceptuales.....	53
III. DISEÑO METODOLÓGICO	54
3.1. Diseño de contrastación de hipótesis	54
3.2. Población y muestra.....	54

3.2.1. Población:	54
3.2.2. Muestra:	54
3.3. Técnicas, instrumentos, equipos, materiales	54
3.3.1 Técnicas	54
a) Observación directa	55
b) Encuesta	55
c) Registro instrumental	56
3.3.2. Instrumentos	56
3.3.3. Equipos	57
3.3.4. Materiales	57
3.4. Sistema mioeléctrico	58
3.5. Ubicación de los electrodos	60
3.6. Sistema de alimentación	61
3.7. Procesamiento y análisis de la señal electromiográfica	61
3.8. Esquemático del proyecto	66
IV. RESULTADOS	68
V. DISCUSIÓN	75
VI. CONCLUSIONES	78
BIBLIOGRAFÍA	81
ANEXOS	84

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	: Categorización de variables.....	53
Tabla 2	: Etapas para el diseño de contrastación de hipótesis	54
Tabla 3	: Componentes y especificaciones técnicas	58
Tabla 4	: Conexión entre ESP32, sensor EMG v3, módulo DD1718PA y módulo TP4056	59
Tabla 5	: Resultados del cuestionario basado en QuickDASH.....	74

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1</i>	: Imagen del amplificador de instrumentación AD8221	27
<i>Figura 2</i>	: Ejecución de movimiento en la mano con respecto a los tipos de agarre .	30
<i>Figura 3</i>	: Movimiento muscular del pulgar de abajo hacia arriba en un ángulo de 70° 31	
<i>Figura 4</i>	: Movimiento del dedo pulgar hacia adentro con un ángulo de 50°	32
<i>Figura 5</i>	: Contracción del musculo del pulgar hacia la base de los otros dedos.....	33
<i>Figura 6</i>	: Musculo extensor corto y largo del pulgar	34
<i>Figura 7</i>	: Movimiento de los músculos interóseos dorsales	35
<i>Figura 8</i>	: Movimiento de los músculos flexores cortos y largos de la mano	36
<i>Figura 9</i>	: Visualización de músculos extensores comunes	37
<i>Figura 10</i>	: Movimiento de los músculos de los dedos hacia adentro y hacia afuera 38	
<i>Figura 11</i>	: Diferentes movimientos de flexión de la mano	39
<i>Figura 12</i>	: Diferentes movimientos de extensión de la mano	40
<i>Figura 13</i>	: oposición del dedo pulgar.....	41
<i>Figura 14</i>	: Tipos de agarre que puede realizar la mano	42
<i>Figura 15</i>	: Agarre de un lapicero con los dedos índice y medio con el pulgar.....	43
<i>Figura 16</i>	: Agarre de un objeto con los cuatro últimos dedos de la mano.....	44
<i>Figura 17</i>	: Agarre de precisión involucrando los cinco dedos la mano.....	45
<i>Figura 18</i>	: Aplicativo móvil para el control de ejercicios de terapia.	50

<i>Figura 19</i>	: Diseño 3D del exoesqueleto y del compartimento del sistema mioeléctrico.	51
<i>Figura 20</i>	: Diseño 3D del compartimento del sistema.....	52
<i>Figura 21</i>	: Ubicación de los electrodos en el brazo del paciente.....	60
<i>Figura 22</i>	: Señal muscular tomada durante la flexión y extinción de la mano de un paciente.	64
<i>Figura 23</i>	: Señal muscular tomada durante la flexión de la mano de un paciente por un periodo de tiempo.	65
<i>Figura 24</i>	: Diseño del esquemático de la tarjeta	66
<i>Figura 25</i>	: Diseño del circuito impreso de la tarjeta	67
<i>Figura 26</i>	: Exoesqueleto de mano y aplicativo móvil.....	69
<i>Figura 27</i>	: Diseño de una placa de circuito impreso (PCB).....	70
<i>Figura 28</i>	: Programación de código del sistema de control.....	71
<i>Figura 29</i>	: Diagrama de flujo del proceso operativo del exoesqueleto de la mano.	

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 01: Diseño de las Piezas e impresión de las mismas impresas en 3D del exoesqueleto para la mano.....	84
Anexo 02: Módulo dorsal de la mano	84
Anexo 03: Módulo dorsal del pulgar.....	85
Anexo 04: Brazos de servo motor	85
Anexo 05: Brazo actuador de falange.....	86
Anexo 06: Segmento de falange media	86
Anexo 07: Conector articulado de falange	87
Anexo 08: Articulador base – Brazo actuador.....	87
Anexo 09: Palanca de acoplamiento al servomotor.....	88
Anexo 10: Visor 3D del exoesqueleto.....	88
Anexo 11: Sistema de exoesqueleto	89
Anexo 12: Superación de umbral por señal muscular	89
Anexo 13: Código para ESP32 mostrando la lectura y filtrado de la señal EMG.....	90
Anexo 14: Diseño del esquemático de la PCB	90
Anexo 15: Compartimento 3D de los componentes	91
Anexo 16: Cuestionario que se le realizó a los pacientes.....	92

RESUMEN

En esta investigación de tesis tuvimos el objetivo de diseñar e implementar un exoesqueleto para la rehabilitación funcional de las manos en pacientes con enfermedades cerebrovasculares del Hospital de Rehabilitación del Callao, con el fin de mejorar la ejecución de los movimientos terapéuticos y apoyar el proceso de recuperación motora. El problema abordado se centra en las limitaciones funcionales de la mano generadas por estas patologías, las cuales afectan directamente la autonomía y el estilo de vida de los usuarios del hospital.

La metodología empleada fue de enfoque aplicado, con un diseño experimental de validación funcional. Se desarrolló un prototipo mecatrónico controlado mediante señales electromiográficas (EMG), utilizando un microcontrolador ESP32, servomotores y una estructura impresa en 3D. Se realizaron pruebas en una muestra de cuatro pacientes, evaluando la respuesta del sistema, la asistencia en los movimientos de flexión y extensión, y la aceptación del dispositivo durante las sesiones de rehabilitación.

Los resultados evidenciaron un funcionamiento estable del exoesqueleto y una adecuada sincronización entre la actividad muscular del paciente y la acción mecánica del dispositivo. Si bien el periodo de evaluación fue limitado, se observó una progresiva adaptación y control de los movimientos asistidos, así como una percepción positiva por parte de los usuarios en términos de comodidad y utilidad terapéutica. En conclusión, el prototipo demostró ser una herramienta viable como apoyo complementario en la rehabilitación funcional de la mano, evidenciando su potencial para futuras aplicaciones clínicas con mayores periodos de evaluación y optimización del diseño.

Palabras Claves: Exoesqueleto, Enfermedades cerebrovasculares, Electromiografía (EMG)

ABSTRACT

In this thesis research, we aimed to design and implement an exoskeleton for the functional rehabilitation of the hands in patients with cerebrovascular diseases at the Callao Rehabilitation Hospital, in order to improve the execution of therapeutic movements and support the motor recovery process. The problem addressed focuses on the functional limitations of the hand caused by these pathologies, which directly affect the autonomy and lifestyle of the hospital's users.

The methodology employed was applied research, with an experimental design for functional validation. A mechatronic prototype controlled by electromyographic (EMG) signals was developed using an ESP32 microcontroller, servomotors, and a 3D-printed structure. Tests were conducted on a sample of four patients, evaluating the system's response, assistance in flexion and extension movements, and the acceptance of the device during rehabilitation sessions.

The results demonstrated stable operation of the exoskeleton and adequate synchronization between the patient's muscle activity and the mechanical action of the device. Although the evaluation period was limited, progressive adaptation and control of assisted movements were observed, along with a positive user perception in terms of comfort and therapeutic utility. In conclusion, the prototype proved to be a viable tool as a complementary support in functional hand rehabilitation, demonstrating its potential for future clinical applications with longer evaluation periods and design optimization.

Keywords: Exoskeleton, Cerebrovascular diseases, Electromyography (EMG)

I. INTRODUCCIÓN

1.1. Situación Problemática

En este planeta contamos con mas de 40 millones de seres humanos que padecen deficiencias persistentes en las manos tras enfermedades cerebrovasculares, esto se asocia con la pérdida de sensibilidad, adormecimiento y dolor. El resultado es una pérdida importante de independencia y calidad de vida. El tratamiento y rehabilitación requiere tiempo y costo, y suelen ser proporcionados en centros médicos especializados y acreditados, además su tecnología empleada no es fácilmente accesible para toda la población. Los exoesqueletos robóticos de mano pueden compensar la pérdida de la función motora y ayudar en las tareas de rehabilitación. Varios prototipos recientes pueden proporcionar parcialmente esta asistencia. Sin embargo, sigue siendo difícil integrar la destreza necesaria para las tareas cotidianas en un diseño seguro y fácil de utilizar que sea aceptable para el uso diario en sujetos con deficiencias neuromotoras de la mano.

Por esta razón se propone un exoesqueleto para rehabilitación de pacientes con deterioro persistente en las manos provocado por enfermedades cerebrovasculares. Presentamos mecanismos para un módulo de mano que genera los tres tipos de agarre más utilizados, agarre tipo pinza, gancho y fuerza. La evaluación mecánica cubre la amplitud de movimiento y las fuerzas en la punta de los dedos necesarias para asistir a los usuarios en la mayoría de las actividades de agarre.

1.2. Formulación del problema de investigación

¿De qué manera el diseño e implementación de un exoesqueleto facilitará la rehabilitación funcional de las manos en pacientes con enfermedades cerebrovasculares, en el hospital de rehabilitación del callao en el año 2025?

1.3. Hipótesis

Con el diseño e implementación de un exoesqueleto se facilitará la rehabilitación funcional de las manos en pacientes con enfermedades cerebrovasculares, en el hospital de rehabilitación del Callao en el año 2025.

1.4. Objetivos

Objetivo general

Diseñar e implementar un exoesqueleto para la rehabilitación funcional de las manos en pacientes con enfermedades cerebrovasculares, en el hospital de rehabilitación del Callao.

Objetivos específicos

- Analizar los diferentes métodos de rehabilitación de la mano, con el objetivo de identificar las técnicas, los enfoques y los fundamentos teóricos que servirán de referencia para el desarrollo del exoesqueleto propuesto.
- Diseñar el modelo 3D del exoesqueleto utilizando el software SketchUp, para establecer la estructura, la ergonomía y las características funcionales necesarias.
- Desarrollar una placa de control basada en ESP32 y una placa de circuito impreso (PCB) que concentre los componentes electrónicos, con el fin de unificar las funciones de control, detección y accionamiento del exoesqueleto.
- Programar el código fuente de la placa ESP32, integrando rutinas de control de movimiento para adaptarlo al dispositivo y ejecutarlo en las necesidades que los pacientes tengan específicamente.
- Realizar pruebas del prototipo de exoesqueleto con pacientes del hospital de rehabilitación del Callao, con el propósito evaluar su rendimiento, funcionalidad y aceptación por parte de los usuarios.

II. DISEÑO TEÓRICO

2.1 Antecedentes

La Universidad Mariana en el año 2022 logró desarrollar un exoesqueleto mecatrónico para restaurar la función de agarre en personas con lesiones medulares. El dispositivo captura señales electromiográficas para controlar un prototipo de ortesis que imita los movimientos de la mano. A través de un estudio de caso con un paciente, se evalúa la eficacia del exoesqueleto utilizando la batería de Jebsen-Taylor, con el apoyo de estudiantes de Terapia Ocupacional. (Araujo Moran et al., 2022)

En un estudio que se realizó en esta Facultad de Ingenierías y Ciencias Aplicadas de la Universidad Internacional SEK de Ecuador en el año 2022 menciona que se diseñó y fabricó un prototipo de exoesqueleto electromecánico para la mano derecha que necesitaba rehabilitación, utilizando la técnica de manufactura aditiva FMD. Se seleccionaron las medidas antropométricas que se usaron para la mano basadas en recopilación de base de datos nacionales, y se adaptaron al caso específico del investigador. El exoesqueleto, con 20 grados de libertad, permitió una amplia gama de movimientos de los dedos. Se utilizó un modelo CAD para diseñar las piezas, las cuales fueron impresas en 3D utilizando PLA y TPU. Los resultados preliminares mostraron un prototipo funcional y de bajo costo. Sin embargo, se requieren estudios adicionales para evaluar su eficacia en una población más amplia de pacientes y explorar mejoras en su diseño y funcionalidad. (Silva Quintero, 2022)

Ante la creciente falta de soluciones para que los pacientes se rehabiliten que presentan accidentes cerebrovasculares en Sudamérica, el Bachiller Junior Davis Morales Cahuana de la Facultad de Ingeniería Mecatrónica de la Universidad Tecnológica de Ucayali - Perú en el año 2024, desarrolló un exoesqueleto de mano altamente personalizado, fabricado mediante tecnología de impresión 3D. Este dispositivo,

controlado por un motor DC y equipado con sensores de fuerza, proporciona un movimiento asistido y adaptable a las necesidades individuales de cada paciente. Gracias a su diseño modular y a la flexibilidad de la impresión 3D, el exoesqueleto puede ser fácilmente ajustado para adaptarse a diferentes tamaños de mano y niveles de discapacidad. Los resultados lograron dar una significativa mejora en lo que es movilidad de los dedos y en la calidad de vida de los pacientes. En todo el proceso, se espera que esta tecnología contribuya a reducir los costos asociados a la rehabilitación y a mejorar la autonomía de las personas con secuelas de ACV. (Morales Cahuana, 2024)

Un estudio que realizó los Bachilleres Crhistian Edgar Huaman Laura y Mario Daymler Ccucho Aguilar de la Escuela Académico Profesional de Ingeniería Mecatrónica de la Universidad Continental de Huancayo-Perú en el año 2024, se centró en el diseño y ejecución de un exoesqueleto para la mano, fabricado mediante técnicas de impresión 3D, como una herramienta de rehabilitación para pacientes con secuelas de accidentes cerebrovasculares. El dispositivo está diseñado para asistir los movimientos de los dedos, mejorando la movilidad de la mano y facilitando el estilo de vida diario. (Huaman Laura and Ccucho Aguilar, 2024)

Una investigación del Bach. Pizarro Gamarra José Jesús Emanuel de la Escuela Profesional de ingeniería Mecánica Eléctrica de la Facultad de ingeniería, Arquitectura y Urbanismo de la Universidad Señor de Sipan-Perú, en el año 2024, diseñó un exoesqueleto propuesto que representaba un avance significativo en el campo de la rehabilitación de la mano. Al utilizar un mecanismo neumático simple y eficiente, la solución es económica y fácil de fabricar. Los movimientos personalizados basados en análisis biomecánicos detallados garantizan que dicha investigación se logró adaptar a las necesidades de cada paciente. Además, el uso de materiales biodegradables y la posibilidad de utilizar impresión 3D para la producción hacen de este dispositivo una

opción asequible y sostenible. Los resultados obtenidos en este estudio demuestran el rendimiento y eficiencia del diseño, abriendo nuevas posibilidades para la rehabilitación de pacientes con discapacidad en la mano. (Pizarro Gamarra, 2024)

2.2 Bases teóricas

2.2.1 La electromiografía (EMG)

La electromiografía (EMG) es una técnica experimental no invasiva que se utiliza para desarrollar, registrar y analizar señales mioeléctrica. Estas señales representan la ejecución de las actividades de fibras musculares eléctricamente hablando durante los procesos de despolarización y repolarización de sus membranas plasmáticas, lo cual se detecta a través de la señal electromiográfica. Entre los parámetros más utilizados para evaluar esta actividad se encuentra la raíz cuadrada media (RMS) de la señal electromiográfica, que refleja tanto los cambios en la frecuencia de disparo como en la actividad muscular. Un mayor valor RMS indica una actividad eléctrica muscular más intensa y un rango de acción más amplio. (Wolf et al., 2005)

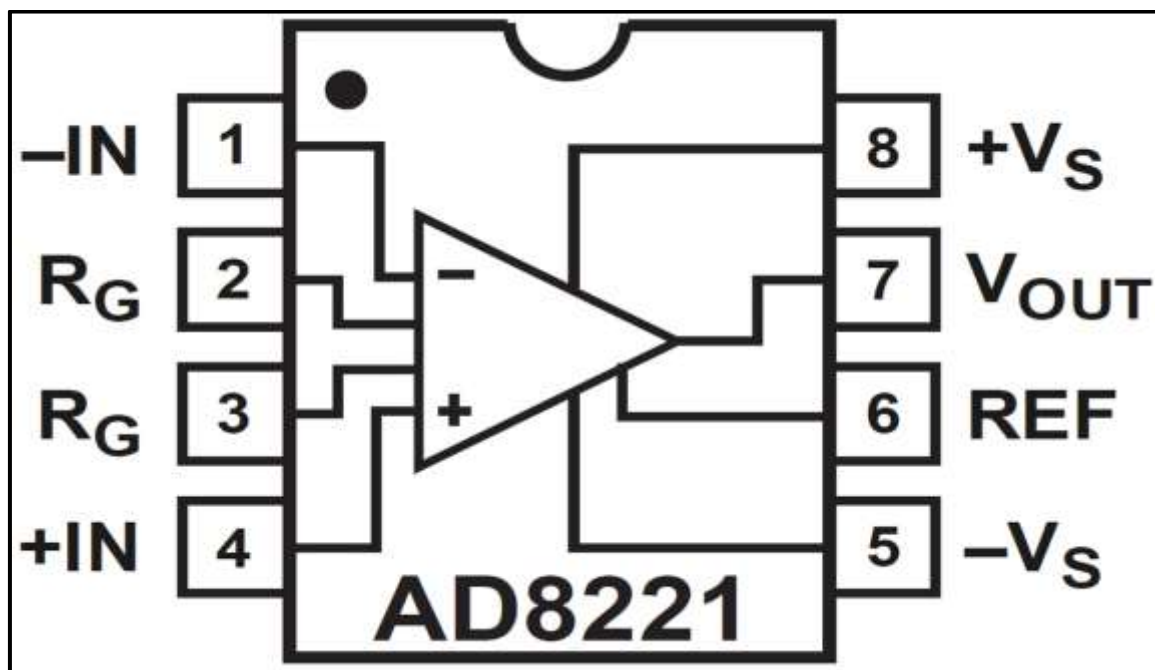
2.2.2 Amplificador de instrumentación AD8221

El amplificador de instrumentación AD8221, diseñado por Analog Devices, es un componente clave del sensor mioeléctrico EMG Muscle Sensor v3 de Advancer Technologies, utilizado para medir señales de electromiografía (EMG). Este amplificador es utilizado en aplicaciones industriales, controles de procesos, amplificadores puente, instrumentación médica, adquisición de datos portátil y sistemas multicanal. Entre sus características técnicas, cuenta con un rango de ganancia ajustable de 1 a 1000 mediante una resistencia externa, capacidad para funcionar con alimentación simples o duales en un rango de $\pm 2,3$ V a ± 18 V y admite voltajes de entrada de hasta ± 10 V. Entre sus

principales características técnicas se incluyen un alto rechazo en modo común (CMRR mínimo de 80 dB a 10 kHz, $G = 1$), bajo ruido de entrada de $8 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ a 1 kHz, bajo voltaje de compensación máximo de $25 \text{ }\mu\text{V}$, baja deriva térmica de $0,3 \text{ }\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ y una corriente de polarización de entrada máxima de $0,4$. Estas propiedades, lo hacen ideal para amplificar las débiles señales eléctricas generadas por los músculos. El sensor EMG v3 procesa estas señales, filtrándolas, rectificándolas y amplificándolas para producir una salida analógica legible por microcontroladores. (“AD8221 Datasheet and Product Info | Analog Devices,” 2026)

Figura 1

Imagen del amplificador de instrumentación AD8221



Nota. Esta figura fue extraída de (“AD8221 Datasheet and Product Info | Analog Devices,” 2026)

2.2.3 Rehabilitación

La rehabilitación pretende mejorar y mantener la función y la movilidad del paciente, prevenir deformidades y fomentar su independencia para facilitar su plena integración social. Este proceso requiere un equipo que sea conformado por especialistas de distintas disciplinas, que vienen hacer enfermeras, médicos, terapeutas, orientadores de relación social así como psicólogos, cuyo objetivo es diseñar un plan de tratamiento personalizado. Las intervenciones pueden incluir estiramientos, corrección quirúrgica de deformidades y contracturas de la columna, así como el uso de soportes para las piernas, que ayudan a potenciar la capacidad de andar y ejecutar el funcionamiento de las extremidades.

La debilidad que presentan los músculos esqueléticos son un gran reto en estos pacientes, como resultado se ha hecho múltiples investigaciones que se han evaluado los efectos del ejercicio en las enfermedades neuromusculares de progresión lenta. Dichas investigaciones han logrado demostrar que un protocolo de ejercicios de resistencia de nivel moderado, utilizando el 30 % de la fuerza isométrica máxima, aplicado durante doce semanas consecutivas, puede aumentar la fuerza entre un 4% y un 20% sin efectos adversos. Sin embargo, los programas de alta resistencia no ofrecen beneficios proporcionales y, en algunos casos, el esfuerzo excesivo ha provocado un mayor debilitamiento. (“Distrofia muscular de Duchenne – Infogen,” n.d.)

Tras una lesión cerebral no mortal, el cerebro puede reorganizarse y adaptar sus funciones para compensar la pérdida. Esta capacidad de adaptación, conocida como plasticidad cerebral, permite al sistema nervioso minimizar los efectos de una lesión estructural o psicológica introduciendo cambios en su propia organización estructural y funcional. (Rebolledo, 2003)

La plasticidad cerebral influye en la recuperación a largo plazo de los pacientes al permitir que el cerebro se reorganice mediante técnicas de rehabilitación. Mediante este proceso, las neuronas sanas asumen las funciones de las dañadas. Los estudios de neuroimagen funcional demuestran que en los pacientes que mejoran sus habilidades funcionales mediante el entrenamiento se observan cambios evolutivos en la actividad cerebral de ambos hemisferios. (Álvaro Moyano V, 2010)

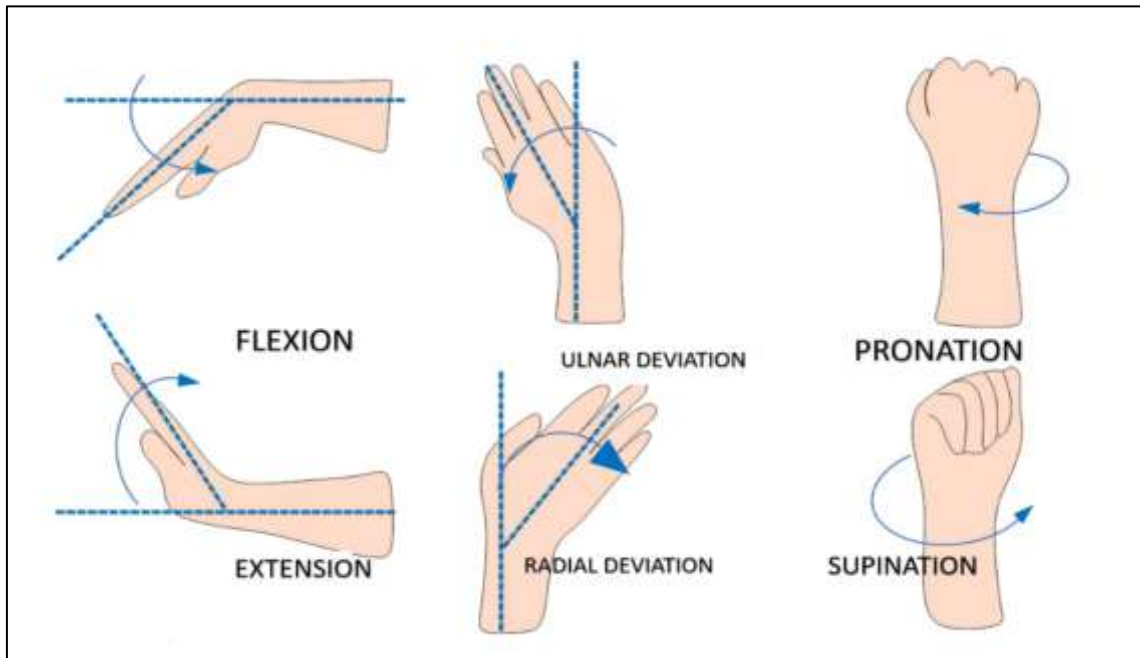
La evaluación de las deficiencias de la mano se basa en tres ejercicios fundamentales. El primero consiste en cerrar lentamente la mano en un puño, para evaluar la movilidad general. El segundo consiste en realizar un pellizco de precisión con los dedos índice y pulgar, un movimiento clave para manipular objetos. El último ejercicio consiste en realizar una presión en «gancho», en la que los dedos deben flexionarse adecuadamente y el pulgar se coloca en abducción para ejercer fuerza. Estos movimientos permiten comprobar la movilidad de todas las articulaciones y la funcionalidad de los controles nerviosos necesarios. (Cailliet, 1994)

2.2.4 Estructura de la mano

Para desarrollar una prótesis de mano eficaz, es fundamental comprender la compleja anatomía y biomecánica de la mano humana. La mano, un órgano altamente especializado, permite una amplia gama de movimientos gracias a su intrincada red de huesos, músculos y tendones. La dificultad radica en identificar y delimitar cada componente muscular y tendinoso debido a su compleja interconexión.

Figura 2

Ejecución de movimiento en la mano con respecto a los tipos de agarre



Nota. Imagen tomada de (Puttasakul et al., 2018)

Debido a varias restricciones tecnológicas, así como complejidad de la mano humana, el objetivo principal de esta prótesis es proporcionar una funcionalidad básica. Se priorizarán los movimientos esenciales para desempeñar actividades básicas de la vida diaria, como sostener y manipular objetos de distintas configuraciones y dimensiones. La sensibilidad táctil, aunque importante, quedará fuera del alcance de este proyecto.

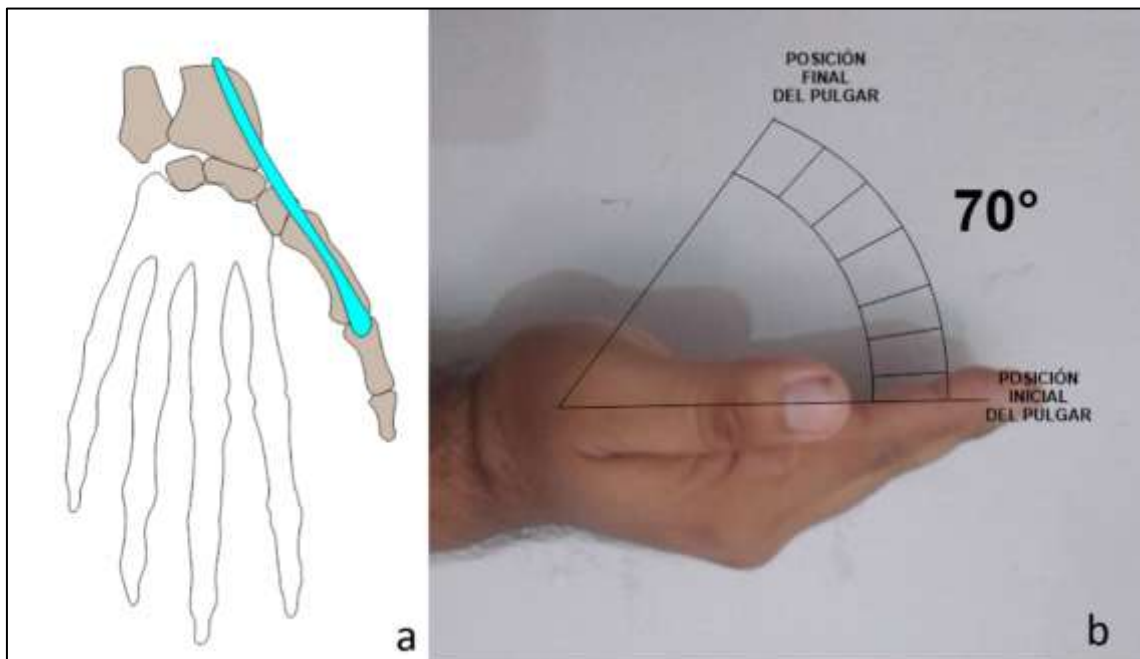
Abductor corto del pulgar

El músculo en cuestión, visualizado en la Figura 3, se extiende justo en el hueso del carpo hasta la primera falange del pulgar. En colaboración con el abductor largo del

pulgar, facilita principalmente la abducción del pulgar, un movimiento perpendicular a la palma de la mano. Este movimiento tiene un rango promedio de 70°.

Figura 3

Movimiento muscular del pulgar de abajo hacia arriba en un ángulo de 70°



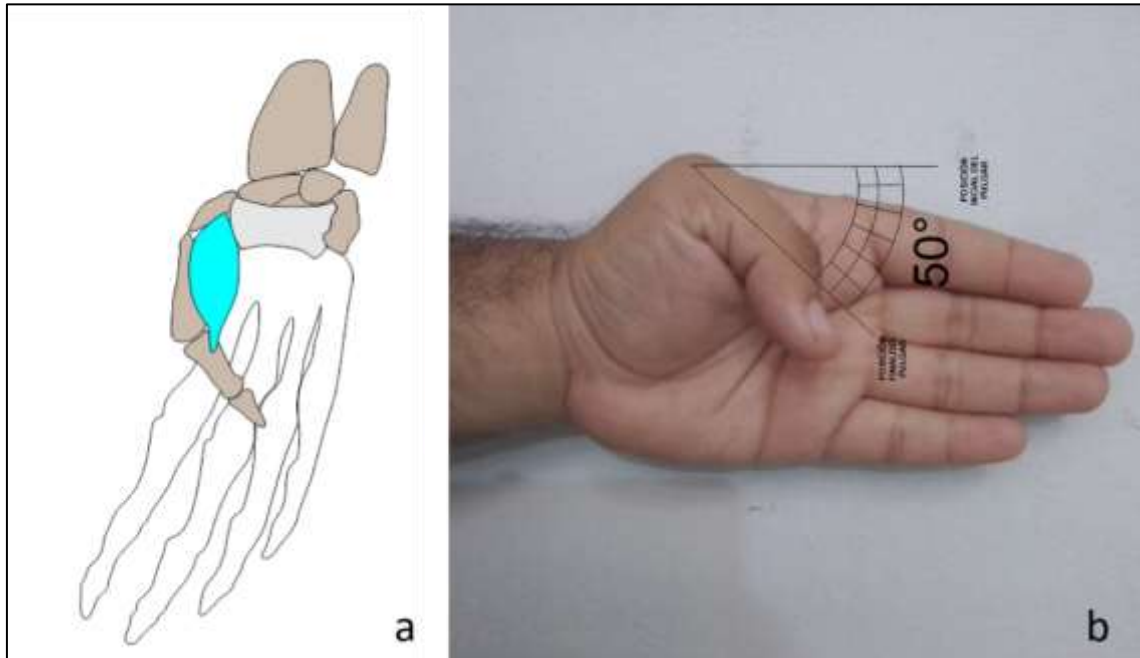
Nota. Elaboración propia

Flector corto del pulgar.

Este músculo, situado en la base del pulgar, consta de dos partes: una superficial, ubicada junto al músculo que separa el pulgar de los demás dedos, y otra profunda, que se encuentra por debajo de esta. Su función principal, junto con otro músculo más profundo, es doblar la primera falange del pulgar hacia la palma de la mano (b). Este movimiento permite un ángulo de flexión de alrededor de 50°.

Figura 4

Movimiento del dedo pulgar hacia adentro con un ángulo de 50°



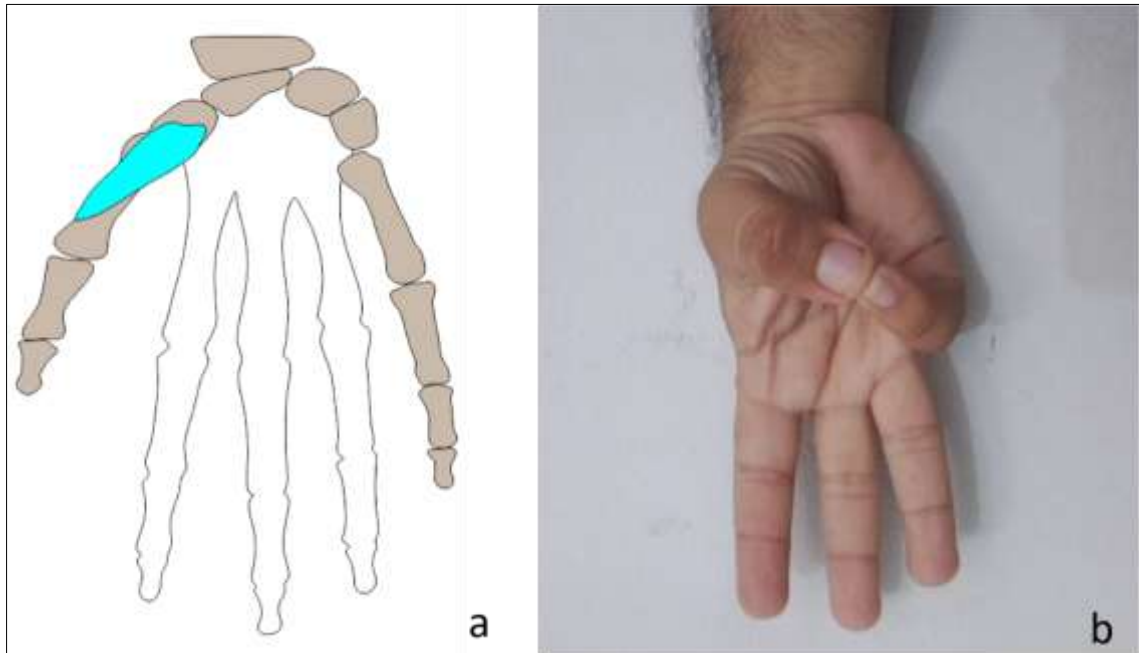
Nota. Elaboración Propia

Oponente del pulgar

Este pequeño músculo, de forma cuadrangular, se localiza en una capa más profunda de la mano, específicamente en la región del pulgar. Si observamos la Figura 5 (a), podemos apreciar su posición relativa a otros músculos. Su función principal es la oposición del pulgar, correspondiente en este caso del respectivo movimiento que consiste en llevar la punta del pulgar hacia la base de los otros dedos, permitiendo así la prensión de objetos, se muestra el movimiento en la Figura 5 (b).

Figura 5

Contracción del musculo del pulgar hacia la base de los otros dedos



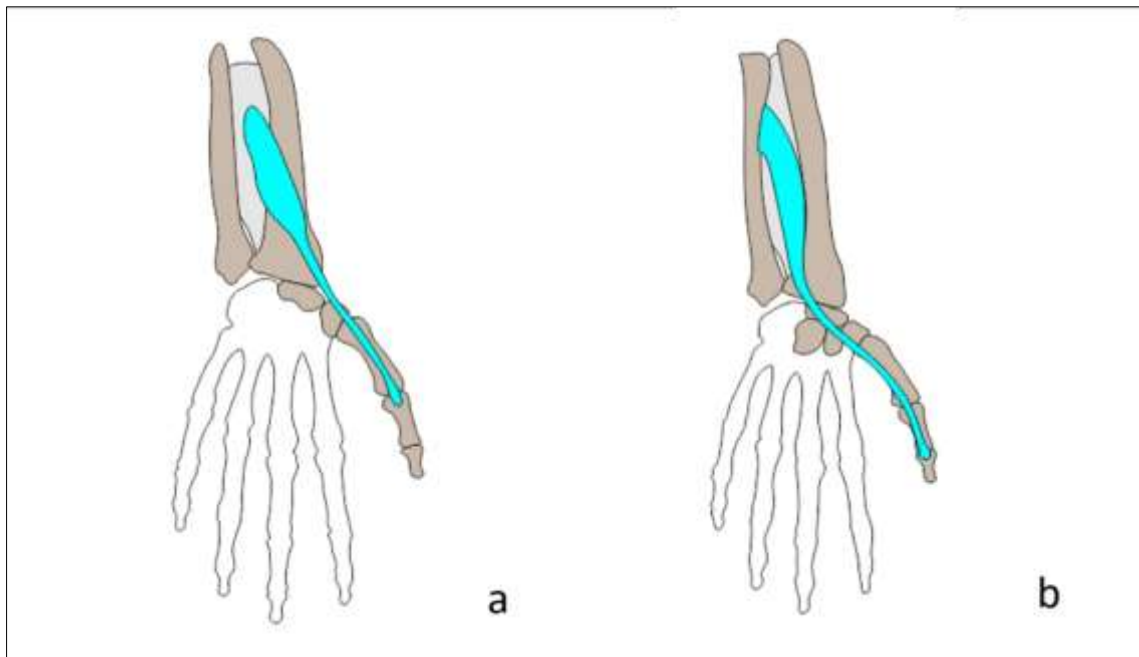
Nota. Elaboración Propia

Extensor corto y largo del pulgar

El pulgar cuenta con el extensor corto el cual está ubicado profundo al extensor común en el dorso del antebrazo, se relaciona con el abductor largo del pulgar Figura 6. El musculo extensor largo del pulgar, que es fusiforme más profundo, se sitúa inferior y medialmente al anterior. Ambos músculos trabajan sinérgicamente para extender la articulación metacarpo falángica del mismo.

Figura 6

Musculo extensor corto y largo del pulgar



Nota. Elaboración Propia

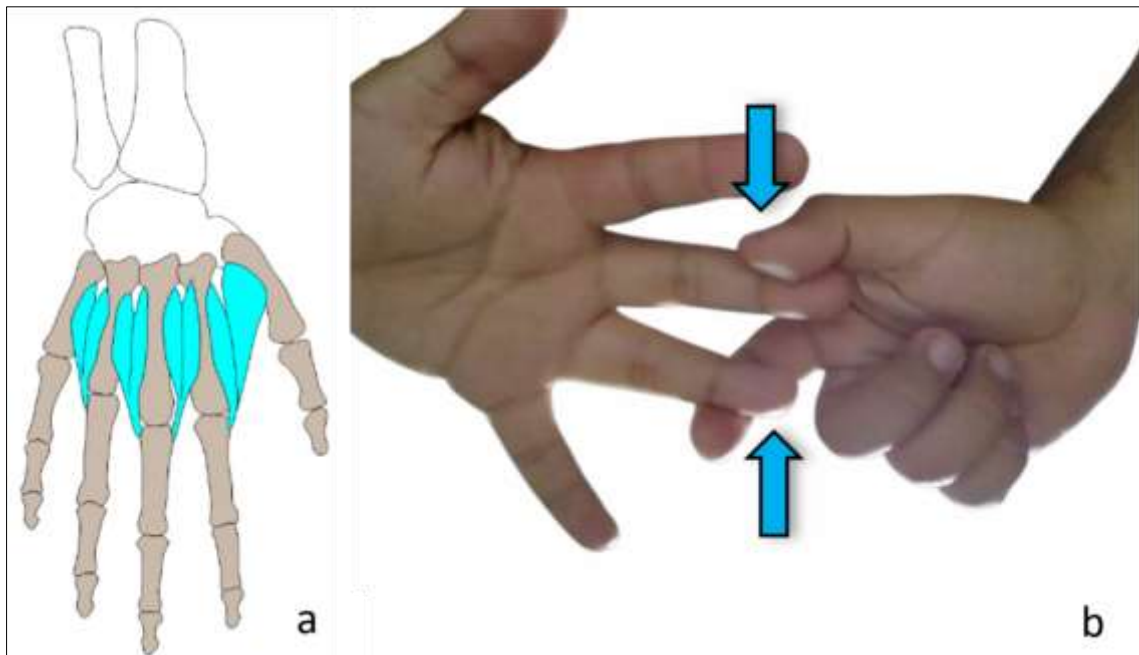
A diferencia del pulgar, que posee una amplia gama de movimiento, los demás dedos presentan una movilidad más restringida, lo cual se correlaciona con una menor cantidad de estructuras musculares y tendinosas dedicadas a su movimiento. Los principales son los siguientes:

Interóseos dorsales

Los músculos interóseos se localizan en ambas caras de los dedos, con excepción del dedo meñique, donde se encuentran únicamente en la cara palmar Figura 7(a). Su principal objetivo viene hacer la abducción de los diferentes dedos, es decir, separarlos como se muestra en la Figura 7(b). Suelen tener un rango de hasta 30°.

Figura 7

Movimiento de los músculos interóseos dorsales



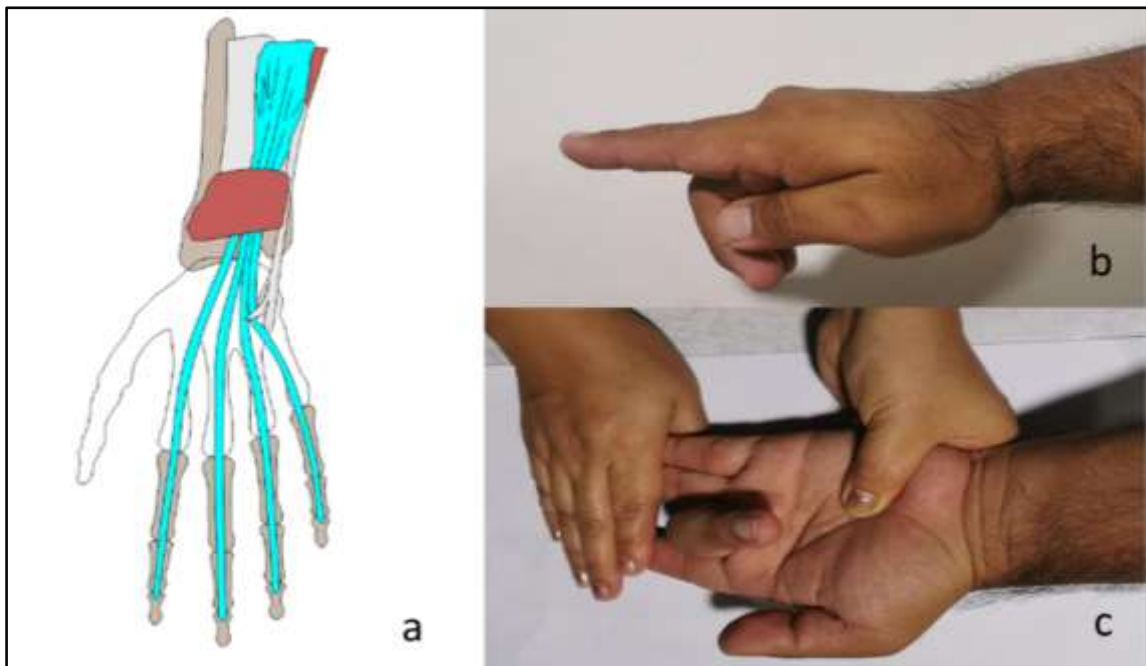
Nota. Elaboración Propia

Flectores

La flexión de los dedos está asegurada por dos grupos musculares: los flexores cortos y los largos Figura 8(a). Los flexores largos, situados en el antebrazo, vienen hacer los que ejecutan el movimiento de flexión profunda de cada uno de los dedos en un plano perpendicular a la palma Figura 8 (b). El rango es usualmente de 90°.

Figura 8

Movimiento de los músculos flectores cortos y largos de la mano



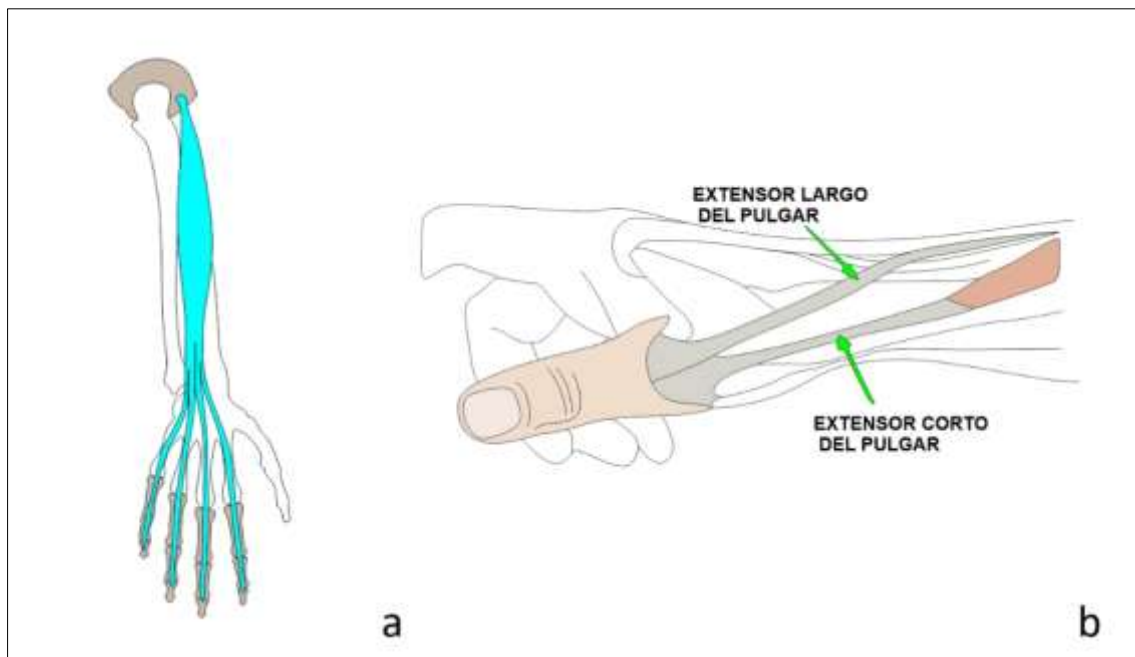
Nota. Elaboración Propia

Músculos extensores comunes

La musculatura extensora de los dedos está formada por pares de músculos largos y cortos que se entrelazan en el antebrazo (Figura 9). Su acción principal consiste en la extensión de las falanges, movimiento opuesto a la flexión.

Figura 9

Visualización de músculos extensores comunes



Nota. Elaboración Propia

2.2.5 Fisiología de la mano

La mano puede realizar dos categorías de movimientos, los cuales tienen una correlación directa con las terapias físicas aplicadas a pacientes que sufren accidentes cerebrovasculares.

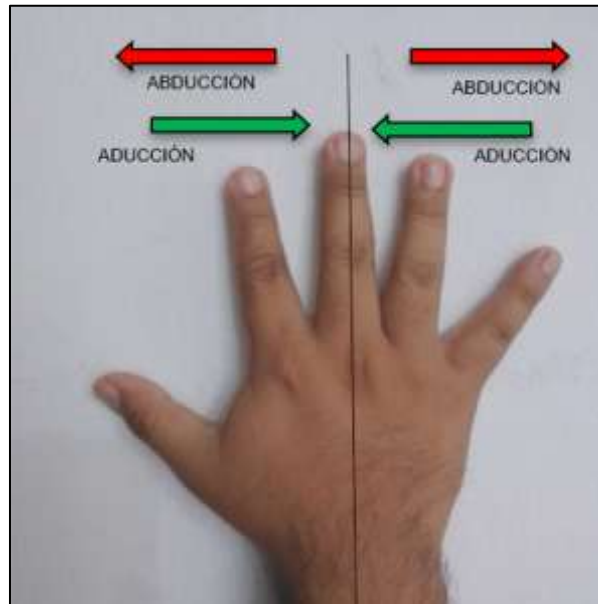
Tenemos:

Abducción y aducción

El desplazamiento se encuentra en la parte interior de la mano y se enfoca en el medio del dedo. La abducción se refiere a los movimientos que se dirigen hacia afuera de los dedos, como separarlos, mientras que la aducción son los movimientos que se dirigen hacia adentro de los dedos, como acercarlos.

Figura 10

Movimiento de los músculos de los dedos hacia adentro y hacia afuera



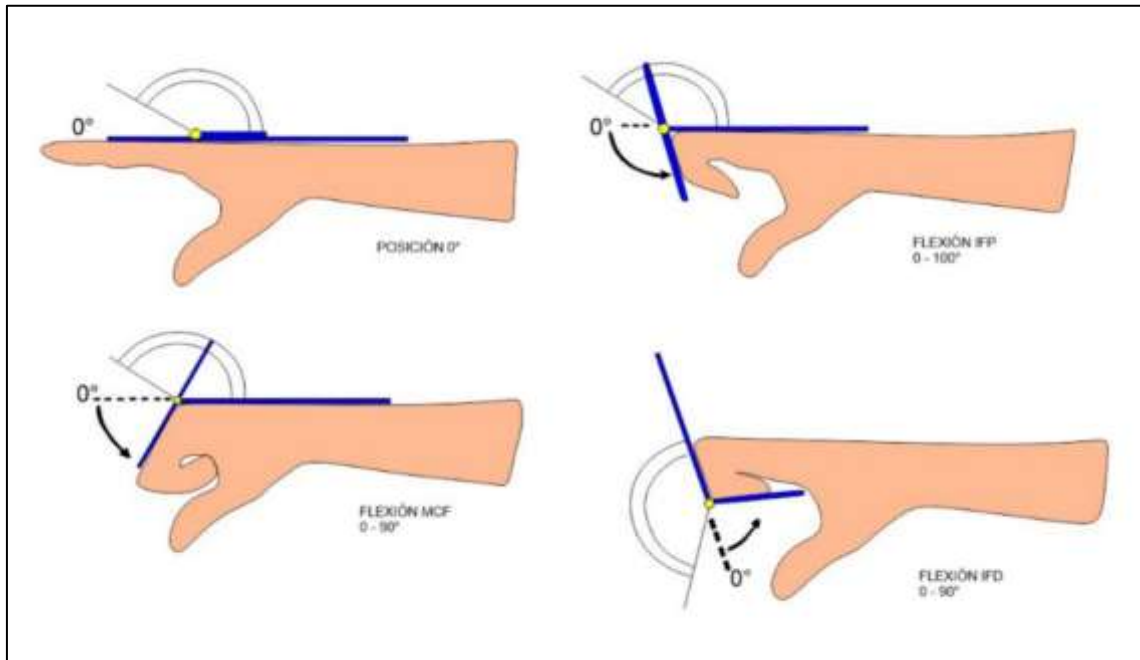
Nota. Elaboración Propia

Flexión

Estos movimientos se ejecutan en la mano en dirección hacia la parte frontal del cuerpo, en posición anatómica, y se miden en ángulos con respecto a una posición de 0 grados.

Figura 11

Diferentes movimientos de flexión de la mano



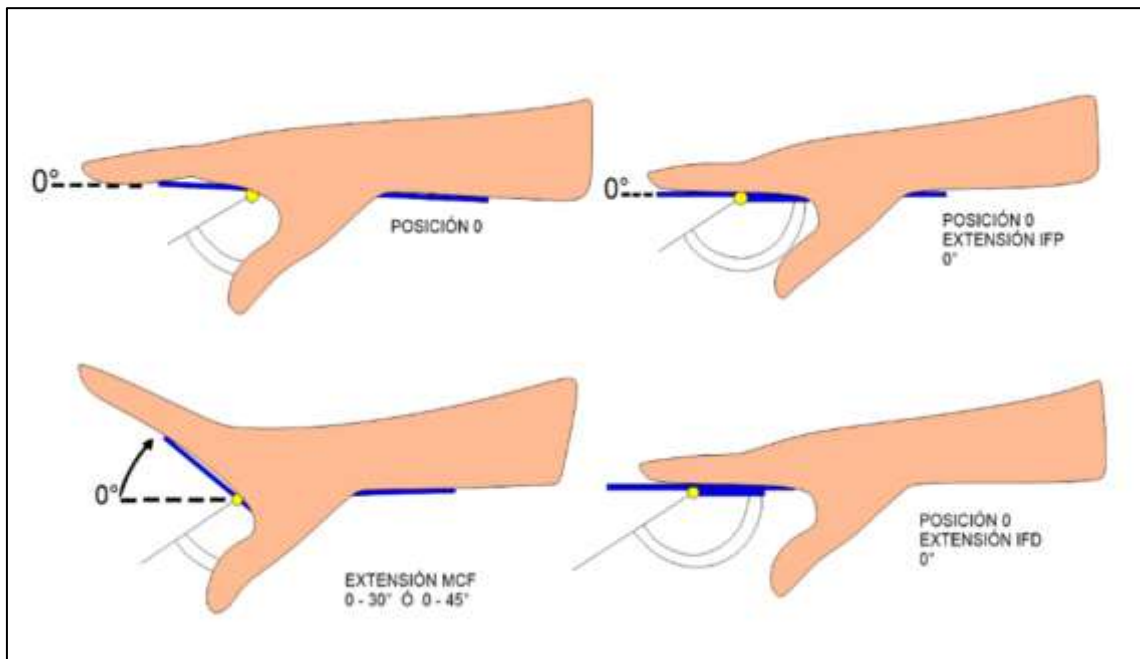
Nota. Elaboración Propia

Extensión

Estos movimientos se llevan a cabo en la mano hacia la parte trasera del cuerpo en la posición anatómica, y se registran en ángulos que se forman desde la posición 0 hasta la posición final.

Figura 12

Diferentes movimientos de extensión de la mano



Nota. Elaboración Propia

Oposición

El movimiento en cuestión es bastante complejo, ya que implica alcanzar con el pulgar la base del dedo meñique. Para medirlo, se utiliza una regla que mide las distancia opuestas en la medida específica como el centímetro la cual es desde la punta del dedo, el cual es el pulgar y la parte mas baja y basica del quinto dedo, en lugar de medirse en grados de ángulo.

Figura 13

Movimiento de oposición del dedo pulgar



Nota. Elaboración Propia

2.2.6 Tipos de Agarre

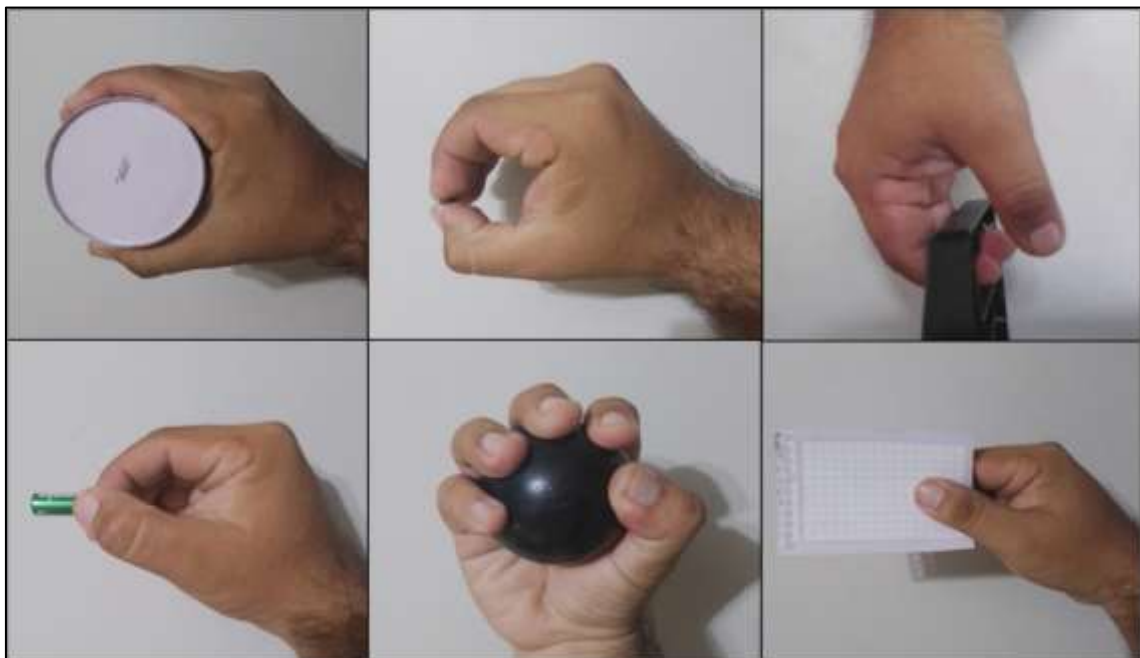
La diversidad y los patrones de movimiento de la mano están directamente relacionados con su compleja estructura de músculos y articulaciones. La coordinación y destreza de estos movimientos están gestionadas por extensas áreas de la corteza cerebral, responsables tanto del control motor como de las sensaciones táctiles de la mano. En concreto, la superficie de la corteza motora dedicada a las manos es aproximadamente igual a la suma de las áreas dedicadas a los brazos, el tronco y las piernas, lo que garantiza una gran capacidad de coordinación de movimientos y el aprendizaje de nuevas habilidades. Del mismo modo, las extensas áreas sensoriales permiten funciones avanzadas como la estereognosis, la capacidad de reconocer la forma de un objeto al sostenerlo. La elevada sensibilidad táctil de la mano se debe en gran medida a la densidad

de órganos sensoriales presentes, que facilita una percepción táctil precisa y detallada.
(Taylor and Schwarz, 1955)

Sdlesinger presento una estructura de clasificatoria en el año de 1919 sobre la destreza de la mano humana, organizando las estrategias de prensión en seis categorías principales: agarre cilíndrico, agarre de precisión, agarre en gancho, agarre en pinza, agarre esférico y agarre lateral. Esta taxonomía ha sido fundamental para muchas investigaciones posteriores de cómo el movimiento de cada mano logra realizar diversas tareas como prensión y manipulación.

Figura 14

Tipos de agarre que puede realizar la mano



Nota. Elaboración Propia

Definición

Es toda postura estática de la mano con la que se puede sujetar un objeto de forma segura, garantizando estabilidad de agarre independientemente de la dirección relativa de la

fuerza entre la mano y el objeto. Específicamente, esto significa que el agarre puede soportar fuerzas en todas las direcciones con una magnitud mayor que cero.

Agarre pinza

El agarre pinza se refiere a un tipo de agarre moderado que se genera desde la punta del pulgar hasta las puntas del dedo índice y del corazón. Este movimiento implica la participación de dichos músculos flexores ubicados en la superficie de los dedos índice y corazón, junto con los músculos de la eminencia tenar, que ayudan a mantener estables las falanges media y proximal del pulgar en posición flexionada. Este tipo de prensión está presente en aproximadamente el 60% de las tareas cotidianas, como sujetar un lápiz para escribir. (Shaheen et al., 2021)

Figura 15

Agarre de un lapicero con los dedos índice y medio con el pulgar.



Nota. Elaboración Propia

Agarre gancho

Es lograr la palma de la mano en oposición con los últimos 4 dedos que presentan. Un objeto cuya medida de su diámetro puede ser comprendida entre de un centímetro hasta 5 centímetros, lográndose así mantenerlo entre los dedos que están flexionados así como el lado palmar de la mano. Los músculos implicados, flexor superficiales y flexor profundo de los dedos y sobre todo los músculos interóseos para la flexión potente de la primera falange de los dedos. Todos los músculos de la eminencia tenar sobre todos los músculos cortos del dedo pulgar así como flexor muscular largo del dedo pulgar bloquean la presa gracias a la flexión de la falange segunda. (Adalbert Kapandji, 2019)

Figura 16

Agarre de un objeto con los cuatro últimos dedos de la mano.



Nota. Elaboración Propia

Agarre de precisión

También conocido como agarre de fuerza. El desarrollo que presenta la mano se da de acuerdo con la forma cilíndrica del objeto. La palma se adapta a la forma del objeto. Los

músculos involucrados que son flexor superficiales y flexor profundo de cada dedo y los músculos interóseos cuya flexión es potente en las falanges. De tal forma que los músculos de la eminencia tenar estarían encima de los músculos cortos del pulgar y el músculo flexor largo del pulgar cumpliría la función de lograr un bloqueo a la presa gracias a la flexión de la segunda falange. (Kang & Ikeuchi, 1992)

Figura 17

Agarre de precisión involucrando los cinco dedos la mano.



Nota. Elaboración Propia

2.2.7 Métodos de rehabilitación

Terapia física

La terapia física es muy importante sobre todo en el tratamiento de personas con enfermedades cerebrovasculares, ya que se busca que el paciente no pierda la fuerza muscular y conserve el rango de los movimientos, de tal manera se pueda evitar la rigidez que se da en la misma enfermedad. En la realización de ejercicios físicos de rehabilitación en manos, se resalta la importancia de seguir una rutina específica para las articulaciones

de la mano, ya que esto ayuda en la reducción del dolor, sensibilidad y rigidez en dichas articulaciones. Además, utilizar cada mano en actividades diarias se da como consecuencia la prevención del declive así como el bajo estrés que son consecuencias del ejercicio continuo. (Alessandro et al., 2020)

Electroterapia

La electroterapia es una intervención complementaria importante en la rehabilitación para individuos con afectaciones cerebrovasculares. Mediante la aplicación de estímulos eléctricos los respectivos músculos que presentan las manos así como sus muñecas, reduce las contracciones musculares promoviendo la recuperación del movimiento voluntario y la fuerza muscular. Durante la rehabilitación de la mano, la electroterapia se aplica sistemáticamente a los flexores musculares y extensores de cada dedo, reforzando cada patrón motor que están adecuados y previniendo la rigidez articular. Además, el uso de la electroterapia durante las actividades funcionales de la mano promueve la reorganización cortical y la neuroplasticidad. Esta técnica es especialmente beneficiosa en pacientes con debilidad muscular moderada o grave, ya que facilita la ejecución de movimientos que el paciente no puede realizar voluntariamente en las etapas iniciales de la rehabilitación. (Langhorne et al., 2011)

Rehabilitación asistida por tecnología

Es una modalidad avanzada de rehabilitación utilizada en sujetos con alteraciones cerebrovasculares. Su objetivo es mejorar la actividad motora en las manos mediante el mecánicos dispositivos y sistemas robóticos que asisten, guían o resisten el movimiento. La rehabilitación asistida por tecnología permite la ejecución de movimientos repetitivos, controlados y precisos. El entrenamiento asistido por dispositivos electromecánicos y

robóticos aplicados a la extremidad superior contribuye a mejorar la fuerza, el rango de movimiento y la capacidad funcional cuando se integra con la terapia convencional. Estos sistemas permiten trabajar los momentos de flexión y extensión de cada dedo, oposición que presenta el pulgar así como los patrones de prensión, ajustando el nivel de asistencia según las capacidades del paciente. (Mehrholz et al., 2015)

Terapia con espejos

La terapia con espejos es una técnica de rehabilitación neurológica utilizada en pacientes con accidente cerebrovascular para una función mejorada con respecto a la parte motora de las manos a través de la retroalimentación visual. Esta terapia se basa en observar la mano que no está afectada reflejada en un espejo, generando un movimiento reflejado normal en la mano afectada, lo que estimula las áreas corticales directamente con el control motor. La terapia con espejos activa las regiones motoras y premotoras del cerebro a través de mecanismos de simulación motora y observación de la acción, lo que promueve la reorganización cortical después de un accidente cerebrovascular. En la rehabilitación de la mano, esta técnica mejora la coordinación, la destreza manual y el control voluntario del movimiento, especialmente en pacientes con movilidad limitada. (Deconinck et al., 2015)

Terapia Bobath

También conocida como tratamiento del desarrollo neurológico (NDT), es un enfoque de rehabilitación neurológica utilizado en pacientes que presentan enfermedades cerebrovasculares con secuelas, así como otras lesiones del sistema nervioso central. Esto se desarrolló en los años 40 por los investigadores Karel Bobath y Berta, este enfoque está centrado en dar facilidades a los movimientos que es normal en cada ser humano y a

la vez disminuir los patrones anormales, aprovechando la neuroplasticidad del cerebro para mejorar el control motor y funcional. El terapeuta emplea técnicas manuales guiadas y actividades funcionales adaptadas a las capacidades del paciente, con el objetivo de optimizar la función motora y la calidad del movimiento. Este enfoque se utiliza en muchos centros de rehabilitación neurológica para tratar la hemiparesia y las deficiencias motoras tras un accidente cerebrovascular. Aunque su evidencia científica no es concluyente en comparación con otras terapias específicas, sigue siendo uno de los métodos más tradicionales practicados por fisioterapeutas especializados. (Paci, 2003)

2.2.8 Control y Automatización

La automatización es un sistema diseñado para realizar tareas de forma autónoma según instrucciones precisas. Al optimizar los procesos y reducir la intervención humana, mejorando la seguridad, la calidad y productividad, permitiendo un seguimiento más eficaz de los equipos involucrados.

Control y automatización del exoesqueleto de mano

El sistema de control del exoesqueleto de mano se diseñó con un enfoque de automatización, integrando componentes de hardware y software para una ejecución controlada de movimientos terapéuticos.

El sistema incorpora un aplicativo móvil que sirve como interfaz de control, permitiendo al usuario o al terapeuta configurar los parámetros de funcionamiento. A través de esta interfaz es posible controlar el tipo de agarre, la velocidad de ejecución, el número de repeticiones y el cambio de interacción entre el modo Bluetooth y el modo EMG. La comunicación inalámbrica se realiza mediante tecnología Bluetooth. Esta

arquitectura de comunicación contribuye a mejorar la comodidad de uso y la flexibilidad operativa durante las sesiones de rehabilitación.

a) Modo de control por Bluetooth

En este modo, el exoesqueleto se controla directamente desde la aplicación móvil. El terapeuta o el usuario pueden programar el número de repeticiones, la velocidad de ejecución y el tipo de agarre que se va a utilizar. El sistema permite tres patrones de agarre funcionales: agarre de fuerza, agarre de pinza y agarre en gancho. Este modo resulta especialmente útil en las fases iniciales de la rehabilitación, cuando el paciente aún tiene una activación muscular voluntaria limitada y necesita movimientos asistidos predefinidos.

b) Modo de control por EMG

En este modo, la aplicación permite cambiar el sistema a un esquema de control basado exclusivamente en señales electromiográficas. El exoesqueleto detecta la actividad muscular del antebrazo y, cada vez que la señal EMG supera el umbral previamente calibrado para el paciente, se interpreta como una activación válida y se ejecuta una repetición del movimiento programado. En la versión actual, este movimiento corresponde a un agarre de fuerza o agarre de prensión, que implica la flexión coordinada de todos los dedos. Este modo está destinado a pacientes que han mostrado una recuperación progresiva y son capaces de generar contracciones musculares voluntarias detectables por el sistema.

Figura 18

Aplicativo móvil para el control de ejercicios de terapia.



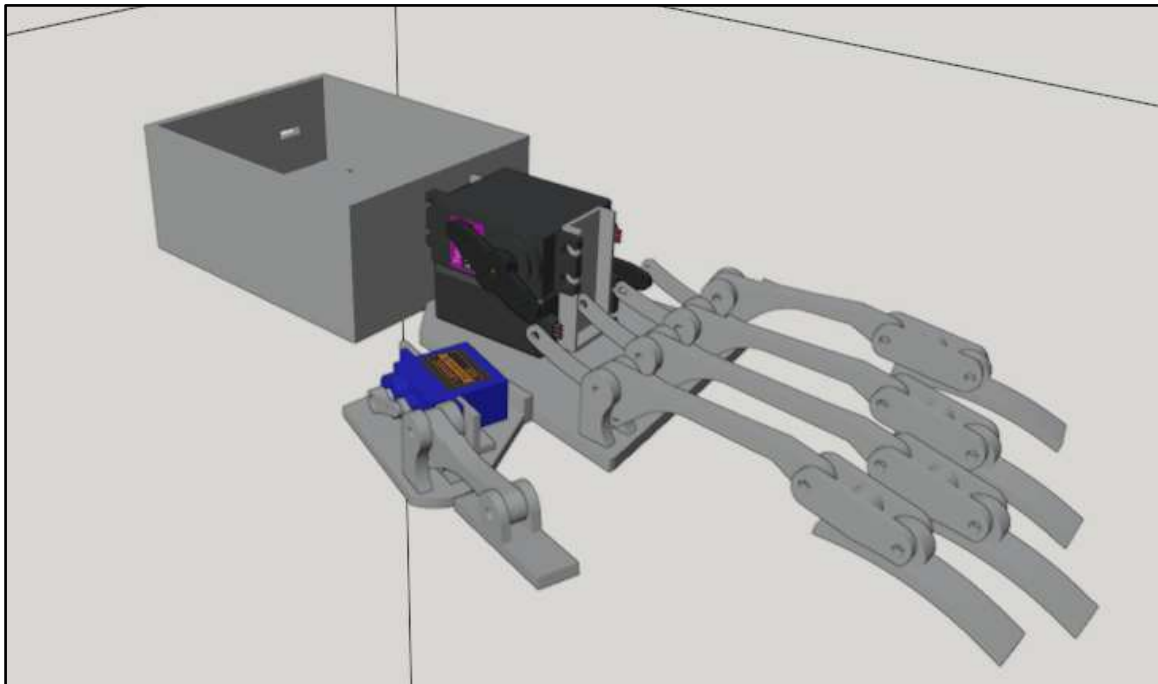
Nota. Elaboración Propia

2.2.9 Diseño del exoesqueleto

Para el modelado 3D fue necesario programar y diseñar un gráfico y modelado en 3D en SketchUp, donde se realizó el diseño de las estructuras correspondientes al soporte que rodea la mano y los mecanismos encargados de movilizar cada dedo, así como el compartimento destinado a alojar los componentes electrónicos, incluidos el sistema de control, la batería y el sensor mioeléctrico.

Figura 19

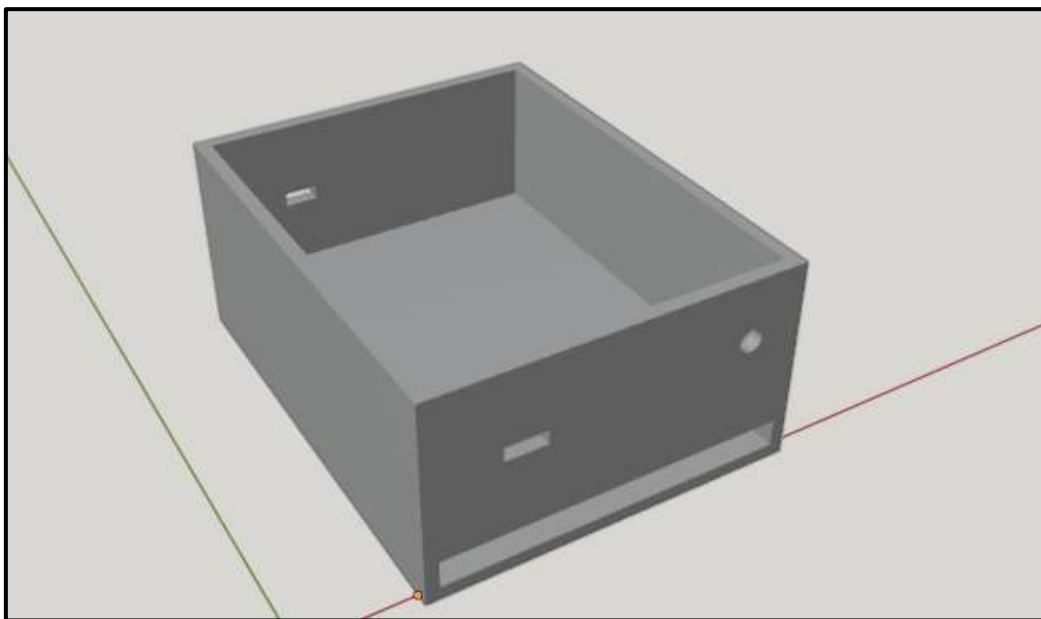
Diseño 3D del exoesqueleto y del compartimento del sistema mioeléctrico.



Nota. Elaboración Propia

Figura 20

Diseño 3D del compartimento del sistema.



Nota. Elaboración Propia

2.3 Bases Conceptuales

A continuación se visualiza la matriz de operacionalización de variables junto con sus respectivas dimensiones e indicadores.

Tabla 1
Categorización de variables

Variable	Definición Conceptual	Definición Operacional	Dimensiones	Indicadores
Independiente: Diseño e implementación de Exoesqueleto.	Tecnología en 3D cuya principal característica es lograr obtener el contacto entre el hombre y la máquina permitiendo transferir potencia mecánica y señales de información.	Con la recolección de datos obtenidos por los sensores mioeléctricos se ejecuta el funcionamiento de los ejercicios de rehabilitación.	Peso	300-500 gr
			Ergonomía	Interacción cómoda y segura en relación humano-máquina.
Dependiente: Rehabilitación funcional de las manos en pacientes con enfermedades cerebrovasculares.	El éxito de una terapia de rehabilitación depende de la intensidad, continuidad y repetición de los movimientos. Para una mejor eficiencia, el terapeuta se apoya de herramientas mecánicas que le ayudan a realizar los diversos ejercicios físicos.	Con la recopilación de información obtenida a partir de los ejercicios se logra regular el funcionamiento para cada paciente hasta llegar a un movimiento aceptable	Tipo de agarre	Agarre pinza
				Agarre gancho
				Agarre fuerza
			Nivel de Velocidad	Contiene 5 niveles de velocidad, según el estado o progreso del paciente.

Fuente: Elaboración propia

III. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Diseño de contrastación de hipótesis

Tabla 2

Etapas para el diseño de contrastación de hipótesis

Etapas	Descripción
Recolección y análisis de información	Se recopiló información científica, artículos, tesis y manuales técnicos relacionados con exoesqueletos, rehabilitación motora, enfermedades cerebrovasculares, biomecánica de la mano, electromiografía (EMG) y control mecatrónico. Se revisaron métodos terapéuticos aplicados en centros de rehabilitación y lineamientos clínicos para pacientes con secuelas neurológicas.
Definición de la estrategia de diseño	Se seleccionaron las herramientas de software necesarias para el diseño del exoesqueleto: modelado 3D para la estructura mecánica, simuladores electrónicos para el diseño del sistema de control basado en ESP32, módulos de adquisición de señal EMG y entorno de desarrollo para la aplicación móvil.
Desarrollo del prototipo integrado	Se realizó la fabricación de la estructura mecánica mediante impresión 3D, ensamblaje de servomotores y configuración del sistema electrónico. Se elaboraron los diagramas de interconexiones, programación del microcontrolador, pruebas de activación de servos y calibración de la señal EMG para sincronizar el movimiento asistido.
Implementación del sistema de control y la aplicación móvil	Se desarrolló una aplicación móvil con funciones de selección de velocidad (5 niveles), tipos de agarre (3 modalidades), número de repeticiones y dos modos de operación. Se validó su conectividad via Bluetooth con el sistema de control.
Pruebas funcionales con usuarios	Se efectuaron pruebas del exoesqueleto con pacientes del Hospital de Rehabilitación del Callao, evaluando la respuesta del sistema ante diferentes niveles de velocidad, repeticiones y tipos de agarre. Asimismo, se analizó la comodidad y el grado de aceptación del dispositivo por parte de los usuarios.
Contrastación de la hipótesis	La contrastación de la hipótesis se realizó a partir del análisis de los resultados obtenidos durante la fase de pruebas del prototipo. Los datos generados permitieron validar si el exoesqueleto contribuye de manera significativa a la rehabilitación funcional de la mano.

Fuente: Elaboración propia

3.2. Población y muestra

3.2.1. Población:

Personas con afectación de movimiento de las manos debido a enfermedades cerebrovasculares

3.2.2. Muestra:

4 pacientes del área neuronal del hospital de rehabilitación del Callao.

3.3. Técnicas, instrumentos, equipos, materiales.

3.3.1 Técnicas

En esta investigación se utilizaron técnicas de recopilación de datos para evaluar el rendimiento funcional del exoesqueleto, así como la respuesta de los pacientes durante su uso en un entorno controlado. Estas técnicas permitieron recopilar información tanto

objetiva como subjetiva relacionada con la relación que se da entre la persona así como el software sistemático propuesto.

a) Observación directa

Se utilizó la observación directa para analizar el comportamiento de los pacientes durante los ejercicios con el exoesqueleto en las sesiones de rehabilitación. La muestra fue de cuatro pacientes con limitaciones de movilidad en las manos derivadas de una enfermedad cerebrovascular, en condiciones controladas y bajo supervisión profesional.

Esta técnica permitió evaluar el movimiento de cada mano, siendo extensión, flexión y los diferentes tipos de prensión (fuerza, pinza y gancho), así como la interacción del usuario con el dispositivo en términos de coordinación, control y adaptación.

Además, durante las pruebas se utilizaron electrodos de superficie para capturar señales electromiográficas (EMG) del antebrazo, que fueron procesadas por una unidad informática que actuaba como interfaz de control del sistema. En este contexto, se observó una buena correlación entre la señal mioeléctrica capturada y la respuesta mecánica del exoesqueleto, lo que demostró un funcionamiento coherente del sistema.

b) Encuesta

Para obtener una base de datos respecto a opiniones se tuvo que realizar una encuesta centrándose en el exoesqueleto. Se empleó un cuestionario estructurado basado en el QuickDASH, adaptado al contexto del estudio.

Esta técnica permitió evaluar aspectos como la función de la mano, la facilidad de uso del dispositivo, la comodidad durante el uso y la experiencia general del paciente. La encuesta se realizó de forma individual al final de las sesiones de prueba, asegurando la correcta comprensión de las preguntas.

c) Registro instrumental

Se utilizó el registro instrumental para adquirir señales electromiográficas (EMG) del antebrazo del paciente mediante el sensor mioeléctrico.

Esta técnica permitió analizar la activación muscular durante la ejecución de movimientos asistidos por el exoesqueleto, así como su relación con el sistema de control implementado. Los datos obtenidos se utilizaron para evaluar el comportamiento de la señal EMG y su influencia en la activación del dispositivo.

3.3.2. Instrumentos

Como instrumento de evaluación se empleó un cuestionario basado en el QuickDASH, adaptado al contexto de este estudio, como herramienta de evaluación para valorar la ejecución de movimiento de la mano y como el paciente lo podía percibir durante el uso del exoesqueleto. El cuestionario se diseñó para recabar información relevante sobre el rendimiento funcional de la extremidad superior y la relación directa con el usuario que tiene el dispositivo, teniendo en cuenta tanto los aspectos físicos como los perceptivos durante las sesiones de rehabilitación.

El cuestionario se administró de forma individual a cada paciente al finalizar las sesiones con el exoesqueleto, con el fin de evaluar su percepción de la ejecución de movimiento en cada mano y su interacción con el mismo durante las actividades propuestas. El cuestionario se administró bajo supervisión para garantizar que el paciente comprendiera cada pregunta y seleccionara las respuestas correctas.

La puntuación se obtuvo sumando las respuestas a los 11 ítems. Las puntuaciones que resultan ser muy altas indican un nivel de mayor dificultad o limitación funcional percibido por el paciente durante las actividades evaluadas. Los resultados obtenidos

representan una evaluación funcional y perceptiva del rendimiento del paciente en el contexto de la prueba.

La puntuación final se calculó utilizando la siguiente fórmula:

$$Puntaje\ Final = \left(\frac{\text{suma de } n \text{ respuestas}}{n} \right) - 1 \times 25;$$

Donde n es igual al número de respuestas completadas.

Este cálculo permite normalizar los resultados en una escala porcentual, lo que facilita la interpretación del nivel de dificultad percibido y lo que sintió el usuario durante el tiempo que usó el exoesqueleto.

3.3.3. Equipos

Como equipo de apoyo, se utilizó un ordenador HP que fue portátil con 16 GB de memoria RAM, empleado para la programación del microcontrolador, el almacenamiento de los datos experimentales y el análisis de las señales electromiográficas registradas durante las pruebas del sistema.

3.3.4. Materiales

En cuanto a los materiales, se empleará un conjunto de componentes electrónicos, eléctricos y mecánicos que conforman el sistema mecatrónico del exoesqueleto.

Tabla 3

Componentes y especificaciones técnicas

Componentes	Especificaciones técnicas
Impresión 3D	Tecnología común: FDM, Material: PLA, Precisión: 0.1–0.2 mm, Temperatura boquilla: 180–230 °C, Temperatura cama: 0–80 °C, Velocidad de impresión: 40–60 mm/s.
ESP32	Arquitectura: Dual-core 32-bit (Xtensa), Frecuencia: 240 MHz, Memoria: 520 KB RAM / 4 MB Flash, Conectividad: Wi-Fi 2.4 GHz, Bluetooth/BLE, Voltaje de operación: 3.0–3.3 V, Entradas/Salidas: ~34 GPIO, ADC/DAC: ADC 12-bit / DAC 8-bit, Interfaces: UART, SPI, I2C, PWM.
Servomotor MG996	Voltaje: 4.8–6.6 V, Torque: 9–11 kg·cm (a 6 V), Rotación: ~180°, Engranajes: Metálicos, Peso: 55 g, Corriente: ~500–900 mA (pico), Control: PWM.
Micro servomotor MG90S	Voltaje: 3.0–7.2 V, Torque: 2.5 kg·cm, Rotación: ~180°, Dimensiones: 22 × 11.5 × 27 mm, Engranajes: Metal, Control: PWM.
Batería de 3.7 v	Voltaje nominal: 3.7 V, Tipo común: Litio/lithium-ion (Li-ion 3.7–4.2 V), Capacidad: 2500mAh, Temperatura de funcionamiento: -10°C a máx. 45°C.
Placa PCB	Tipo: PCB de dos capas, Material: FR4 (fibra de vidrio), Grosor: 1.6 mm, Cobre: 1 oz (35 µm), Acabado: HASL, Trazos mínimos: 0.3–0.5 mm.
Jumpers	Tipo: Cables Dupont (M–M, M–H, H–H), Longitud: 10–30 cm, Calibre: AWG 26–28, Conector: Terminal Dupont 2.54 mm.
Velcro Adhesivo	Tipo: Cinta autoadherente, Ancho típico: 1–3 cm, Adhesivo: Base acrílica, Fuerza de sujeción: Media–alta.
Modulo simétrico DD1718PA	Tipo: Convertidor DC-DC elevador / inductor, Voltaje de entrada: 3.0 – 11.0 V, Voltaje de salida típico: ± 9 V, ± 12 V, Corriente de salida (aprox.): + Vo: ~700 mA a 1 A, - Vo: ~150–200 mA, Corriente de reposo: ~3–4 mA.
Sensor EMG v3	Tipo: EMG superficial, Amplificador de instrumentación AD8221, Alimentación: ±3.7 – ±9 V, Salida: Señal analógica (mV), Procesamiento: Amplificación + filtrado, Electrodo: Superficiales.
Modulo MT 3608	Tipo: Convertidor DC-DC "boost", Voltaje de entrada: 2 V a 24 V DC, Voltaje de salida (ajustable): 5 V a 28 V DC, Corriente de salida máx.: ~2 A, Frecuencia de conmutación: 1.2 MHz.
Módulo TP4056	Cargador para baterías Li-ion / Li-Po, Control de carga CC/CV, Voltaje de entrada: 4.5 - 5.5 V DC, Voltaje de carga de salida: 4.2 V DC ±1.5 %, Corriente de carga máx.: ~1 A (ajustable).
Electrodos descartables	Tipo: Superficiales adhesivos (gel conductor), Material: Ag/AgCl, Impedancia: Baja (mV), Fijación: Adhesivo hipoalergénico.

Nota: elaboración propia

3.4. Sistema mioeléctrico.

El sistema mioeléctrico se implementó utilizando el sensor muscular EMG v3, que incorpora el amplificador de instrumentación AD8226, diseñado para ofrecer alta precisión y rechazo de modo común, características esenciales para la adquisición de señales biopotenciales de baja amplitud.

Se utilizó el Arduino IDE para el proceso como la monitorización de las señales musculares, además de la programación, la compilación y la transmisión de datos a la placa de control principal.

Se seleccionó el módulo ESP-WROOM-32 como unidad de procesamiento. Este módulo opera a 3,3 V que puede conectarse con Wi-Fi y Bluetooth, permitiendo una comunicación inalámbrica eficiente con otros dispositivos. Dispone de 30 pines GPIO (Entrada/Salida de Propósito General), así como pines dedicados para alimentación, tierra y comunicación serial, e interfaces SPI e I²C. También ofrece 18 canales ADC cada una con 12 bits y 2 canales DAC de 8 bits, junto con otras ejecuciones periféricas que dan como una definición ideal de una plataforma versátil para el proceso de señales electromiográficas.

Tabla 4

Conexión entre ESP32, sensor EMG v3, módulo DD1718PA y módulo TP4056

Pin ESP32	Sensor EMG V3	Modulo DD1718PA	Modulo TP4056
GPIO 34	SIG		
GND	GND		
	+Vs	+Vs	
	GND	GND	
	-Vs	-Vs	
		GND	OUT+
		VIN	OUT-

Fuente: Elaboración propia

3.5. Ubicación de los electrodos

Los electrodos de EMG se ubicaron en tres puntos del brazo. Dos electrodos en la posición directa de las fibras musculares específicamente siendo el músculo flexor largo del pulgar, esto debido a su alta actividad mioeléctrica durante los movimientos de flexión de la mano. El tercer electrodo se colocó en una zona ósea del codo, sirviendo como punto de referencia o neutro, ya que las zonas sin masa muscular minimizan la captación de potenciales eléctricos. Esta disposición sigue las recomendaciones para registros de superficie, que indican alinear los electrodos con las fibras musculares y mantener una distancia interelectródica adecuada (entre 2 y 4 cm) para evitar la superposición de señales de los músculos adyacentes. (Hermens et al., 1999; Luca, 1997)

Figura 21

Ubicación de los electrodos en el brazo del paciente.



Nota. Elaboración Propia

3.6. Sistema de alimentación

El sistema de alimentación está compuesto por una batería recargable de 3.7 V 2500 mAh, un módulo de carga TP4056, un elevador de voltaje MT3608 y un módulo simétrico DD1718PA, los cuales en conjunto garantizan un suministro estable de energía a los diferentes componentes del sistema.

La batería de 3.7 V constituye la energía principal, proporcionando la tensión necesaria para la ejecución general del dispositivo. Esta batería se recarga mediante un módulo TP4056, el cual regula la corriente y el voltaje durante el proceso de carga, evitando sobrecargas y protegiendo la celda.

El módulo de voltaje MT3608 se encarga de aumentar la tensión proveniente de la batería de 3.3v hasta el nivel de 5v requerido por la placa ESP32.

Posteriormente, el módulo simétrico DD1718PA recibe el suministro de 3.3v y genera las tensiones positivas y negativas de $\pm 9v$ necesarias para alimentar el sensor EMG

3.7. Procesamiento y análisis de la señal electromiográfica

Las señales electromiográficas, por su propia naturaleza, contienen ruido e interferencias, lo que dificulta su procesamiento directo. Por lo tanto, este proyecto incorpora un filtro digital de media móvil exponencial (EMA) para obtener una señal más estable y adecuada para el sistema de control. Tras realizar pruebas experimentales, se determinó un valor óptimo para el parámetro $\alpha = 0,12$ del filtro EMA, lo que dio como resultado una señal filtrada con menos picos y variaciones abruptas. Esta estrategia ayuda a evitar activaciones no deseadas, protegiendo tanto el sistema de control como la integridad mecánica del exoesqueleto.

$$A_n = \alpha M + (1 - \alpha)A_{n-1}, \text{ donde:}$$

$A_n = \text{Valor Filtrado}$

A_{n-1} = Valor Filtrado Anterior

M = Valor muestreado de la señal para filtrar

α = Factor que va de 0 a 1

Dado que cada persona presenta una señal muscular diferente, se realiza una calibración preliminar evaluando la actividad electromiográfica de cada usuario. Este procedimiento implica dos tipos de pruebas: en la primero, la mano se mantiene en reposo mientras se registran las señales de la zona muscular, mientras que, en la segundo, se pide al usuario que mantener la mano flexionada. A partir de estos datos obtenidos en ambas condiciones, se determina un umbral personalizado para su incorporación al código principal del sistema.

Una vez establecido el umbral, se define la lógica de control del exoesqueleto. Cuando la señal electromiográfica del usuario permanece por debajo del umbral definido, los servomotores se mantienen en reposo. Por el contrario, cuando la señal muscular se activa como resultado de la flexión de la mano y supera el umbral, el sistema se activa, generando el movimiento de los servomotores dentro de los rangos predefinidos.

La figura 22 muestra las señales electromiográficas adquiridas en el antebrazo mediante electrodos de superficie tipo parche, correspondientes a actividades de flexión y extensión de la mano. La señal sin procesar, mostrada en color verde, presenta fluctuaciones abruptas y picos irregulares, característicos de una señal ruidosa. También se muestra la señal filtrada, representada en color naranja, obtenida mediante la incorporación del filtro EMA, lo que demuestra una reducción significativa del ruido presente en la señal original.

La figura 23 identifica el periodo mediante el cual el usuario mantiene la flexión de la mano durante un intervalo de tiempo específico. Esta representación valida el

correcto funcionamiento del proceso de filtrado y la detección efectiva de la activación muscular.

Figura 22

Señal muscular tomada durante la flexión y extinción de la mano de un paciente.



Nota. Elaboración Propia

Figura 23

Señal muscular tomada durante la flexión de la mano de un paciente por un periodo de tiempo.



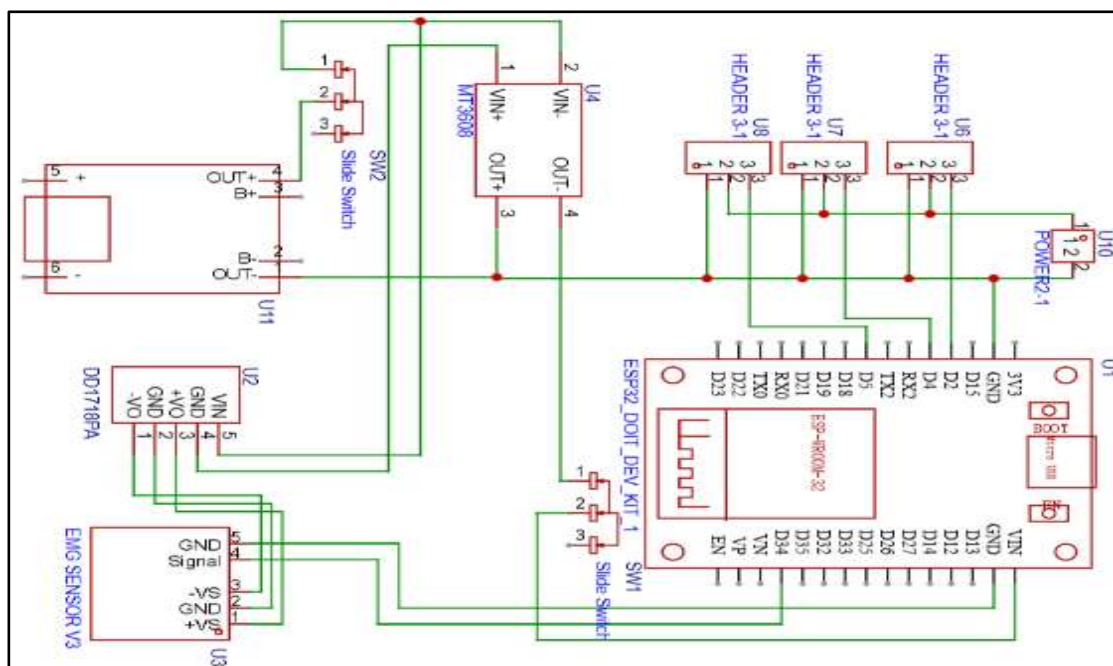
Nota. Elaboración Propia

3.8. Esquemático del proyecto

El diseño esquemático se creó utilizando el software EasyEDA, una herramienta que facilitó la organización del sistema en bloques funcionales y la verificación lógica de las conexiones eléctricas. El sistema se estructuró en los siguientes bloques principales: gestión de la energía, procesamiento, control y adquisición de señales electromiográficas (EMG). Para gestionar la energía se agregó el módulo TP4056, el convertidor CC-CC MT3608 para aumentar el voltaje. También se incluyó el módulo de fuente de alimentación simétrica DD1718PA para proporcionar los niveles de voltaje para el sensor electromiográfico. El bloque de procesamiento y control se diseñó en torno al microcontrolador ESP32, procesar los datos y generar las señales de control para la activación del exoesqueleto.

Figura 24

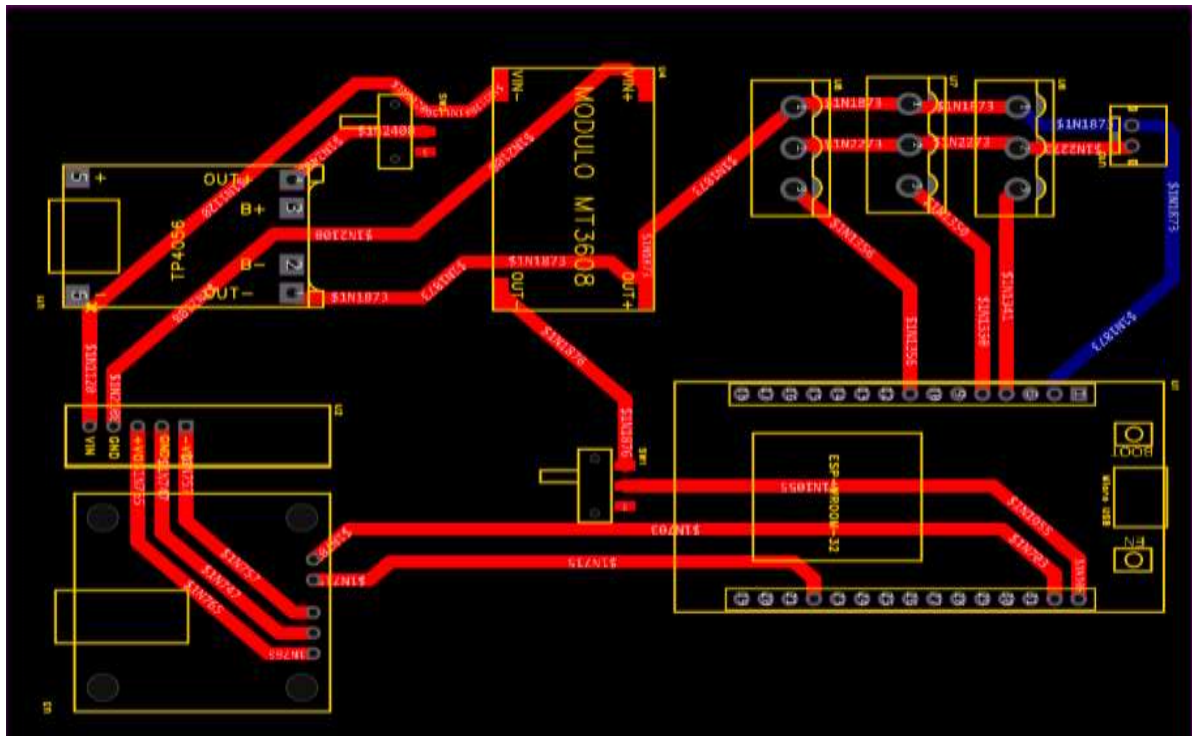
Diseño del esquemático de la tarjeta



Nota. Elaboración Propia

Figura 25

Diseño del circuito impreso de la tarjeta



Nota. Elaboración Propia

IV. RESULTADOS

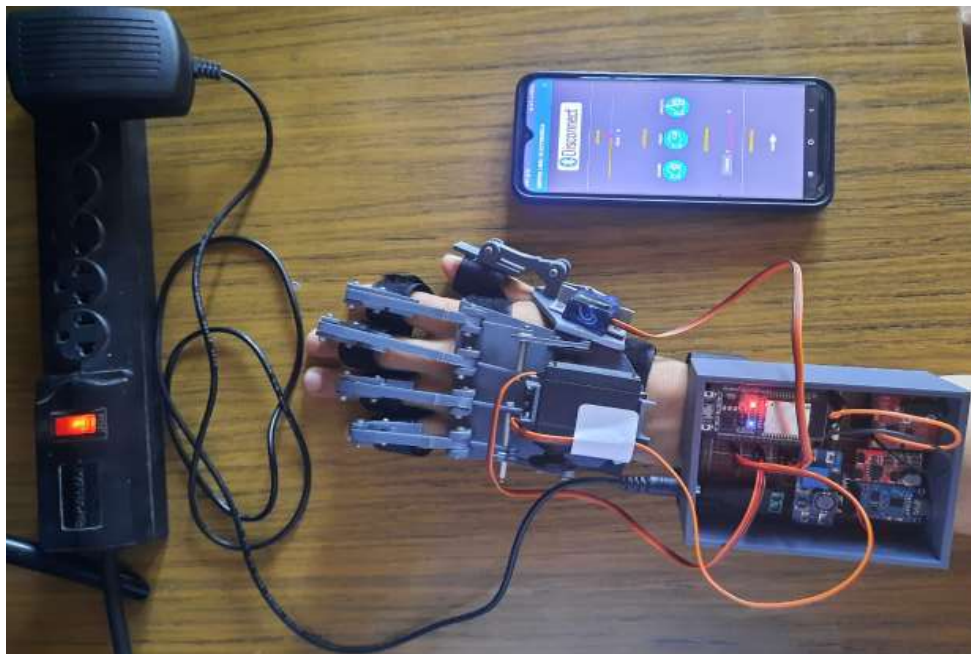
Se realizó el análisis de los métodos de rehabilitación de la mano, se identificó principios comunes destinados a la recuperación funcional en pacientes con enfermedades cerebrovasculares, tales como promover el movimiento voluntario, mantener el rango de movimiento y estimular la neuroplasticidad mediante la repetición controlada. Las terapias convencionales dependen en gran medida de la intervención directa del terapeuta y tienen limitaciones en cuanto a la estandarización y repetibilidad de los ejercicios. Las técnicas complementarias, como la electroterapia y la terapia con espejos, facilitan la activación neuromuscular y la reorganización cortical, especialmente en pacientes con movilidad reducida; sin embargo, ofrecen un control limitado sobre el movimiento funcional de los dedos. Por el contrario, la rehabilitación asistida por tecnología permite la ejecución de movimientos precisos y repetitivos, lo que reduce la carga de trabajo del terapeuta y mejora la consistencia del tratamiento. Basándose en este análisis, se estableció que un sistema asistido debería facilitar cada movimiento funcional de cada mano, como la extensión de los dedos así como la flexión, adaptándose a las capacidades del paciente. Estos criterios constituyeron la base para el diseño del exoesqueleto propuesto como herramienta complementaria a las terapias tradicionales.

Se realizó el diseño estructural del modelo tridimensional (3D) fue elaborada utilizando el software SketchUp, conformado por un total de 38 piezas integradas de manera modular para facilitar su ensamblaje. El exoesqueleto fue diseñado específicamente para su aplicación en la mano izquierda, considerando la anatomía y la disposición natural de las articulaciones de los dedos. En cuanto al material, se propuso el uso de ácido poliláctico (PLA) para la fabricación mediante impresión 3D. Este material contribuye a reducir el peso total del exoesqueleto. La Figura 26 muestra la vista

general del modelo 3D del exoesqueleto completamente ensamblado, colocado sobre la mano izquierda y parte del antebrazo del usuario. En la imagen se aprecia la distribución de las piezas y la interacción con el aplicativo móvil, utilizado como interfaz de control del sistema.

Figura 26

Exoesqueleto de mano y aplicativo móvil.



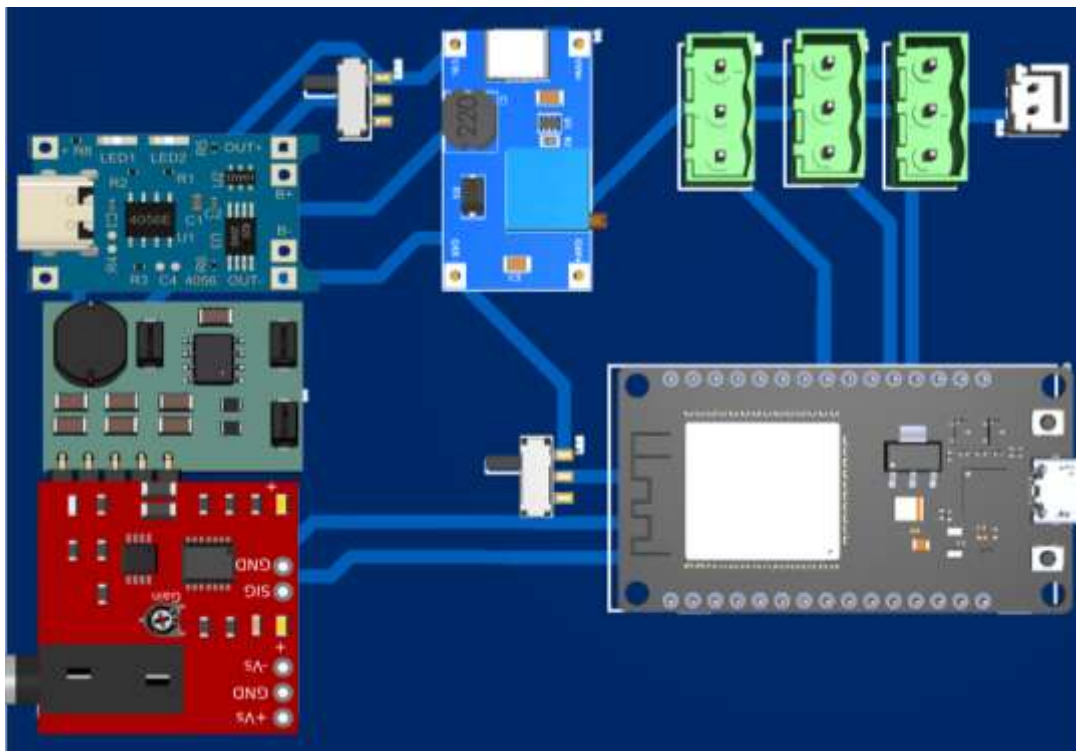
Nota. Elaboración Propia

Se diseñó e implementó una placa de circuito impreso (PCB), diseñada para concentrar los sistemas de control, la adquisición de señales y la activación del exoesqueleto de la mano. La PCB fue desarrollada en el software EasyEDA y se implementó con una configuración de dos capas para optimizar el ruteo de las pistas y la reducción de interferencias de las señales del sistema. La placa integra el microcontrolador ESP32 como unidad principal de procesamiento, el módulo amplificador de voltaje MT3608, el módulo TP4056 para la gestión de la carga de la batería, el módulo simétrico DD1718PA para voltajes duales y el sensor

electromiográfico (EMG) para la adquisición de señales musculares, ver Figura 27. Las pruebas realizadas en la placa de control demostraron un funcionamiento correcto y estable de todos los módulos integrados y la correcta adquisición de la señal electromiográfica.

Figura 27

Diseño de una placa de circuito impreso (PCB)



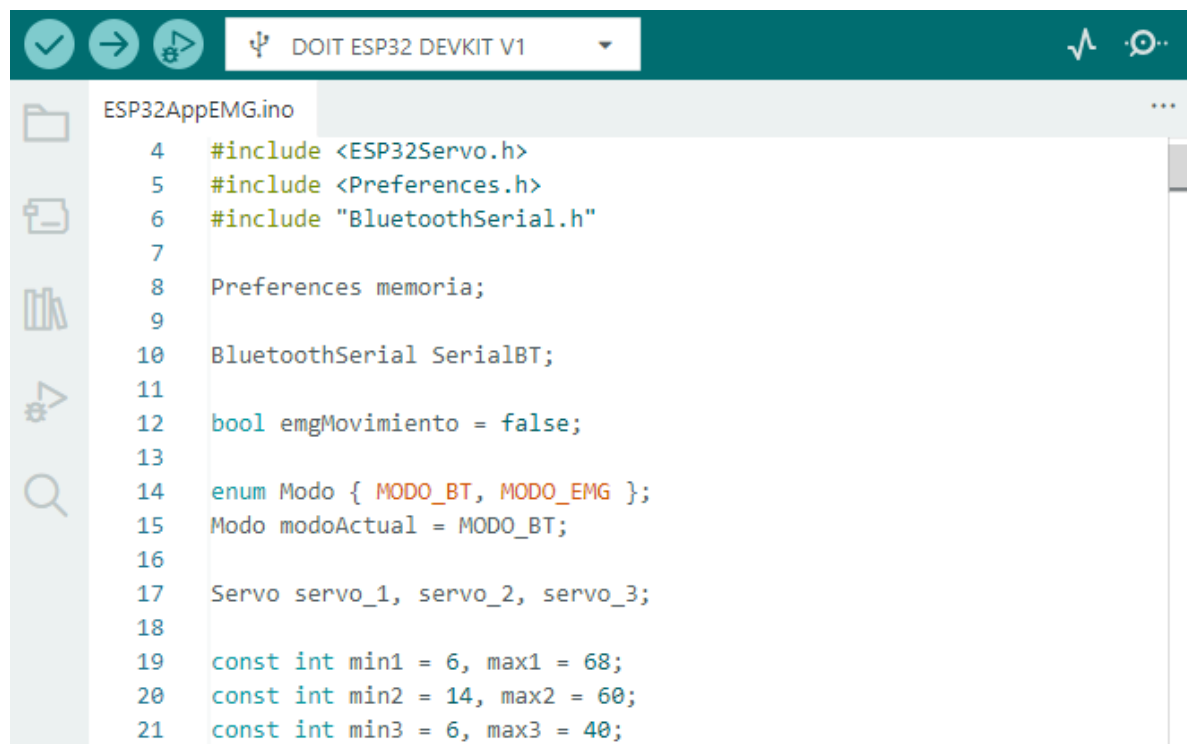
Nota. Elaboración Propia

Se implemento el código fuente del sistema de control del exoesqueleto para el microcontrolador ESP32, utilizando la plataforma Arduino IDE. La lógica de funcionamiento consta dos modos de operación: modo manual y modo EMG. El sistema integra la lectura de la señal electromiográfica (EMG), la cual fue procesa mediante un filtro exponencial de medios móviles (EMA) con un coeficiente $\alpha = 0,12$, lo que da como resultado una señal más estable y una menor influencia del ruido. Para evitar activaciones

no deseadas, se incorporó el uso de memoria no volátil (NVS), utilizando la biblioteca ESP32 *Preferences*, ver Figura 26. Esta memoria permite almacenar los estados operativos del sistema, como las posiciones actuales de los servos, la fase de movimiento y la dirección de desplazamiento. De este modo, ante reinicios inesperados o interrupciones en la alimentación eléctrica, el sistema puede recuperar su último estado operativo, evitando movimientos bruscos o desalineaciones mecánicas.

Figura 28

Programación de código del sistema de control.



```
ESP32AppEMG.ino
4  #include <ESP32Servo.h>
5  #include <Preferences.h>
6  #include "BluetoothSerial.h"
7
8  Preferences memoria;
9
10 BluetoothSerial SerialBT;
11
12 bool emgMovimiento = false;
13
14 enum Modo { MODO_BT, MODO_EMG };
15 Modo modoActual = MODO_BT;
16
17 Servo servo_1, servo_2, servo_3;
18
19 const int min1 = 6, max1 = 68;
20 const int min2 = 14, max2 = 60;
21 const int min3 = 6, max3 = 40;
```

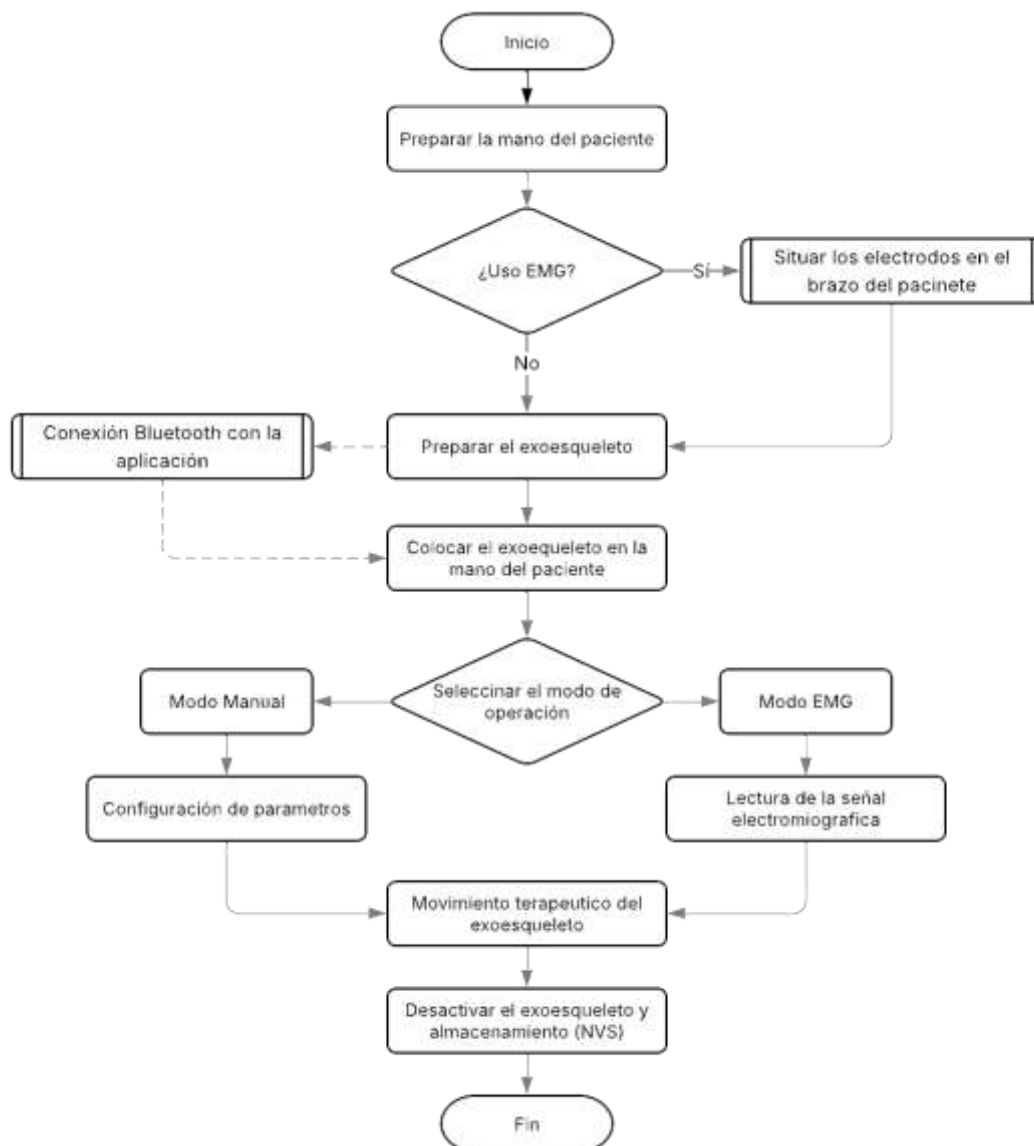
Nota. Elaboración Propia

La figura 29 muestra un diagrama de flujo del proceso de rehabilitación asistida con las manos utilizando un exoesqueleto manual, en el que se detalla la secuencia de funcionamiento del sistema desde la configuración inicial hasta el final de la terapia. El diagrama ilustra las acciones de activación, la ejecución de los ejercicios de apertura y

cierre de la mano, los mecanismos de control y desactivación del dispositivo. Este diagrama ofrece una visión clara del flujo de control y la interacción entre el usuario y el exoesqueleto, lo que permite comprender el funcionamiento general del sistema y su correcta aplicación durante las sesiones de rehabilitación.

Figura 29

Diagrama de flujo del proceso operativo del exoesqueleto de la mano.



Nota. Elaboración Propia

Las pruebas del prototipo del exoesqueleto de mano se llevaron a cabo gracias a cuatro voluntarios que tenían dichas limitaciones en el Hospital de Rehabilitación del Callao, con el propósito de evaluar su rendimiento operativo, funcionalidad y los niveles de satisfacción por parte de los mismos pacientes. El sistema fue sometido a diferentes pruebas de funcionamiento que incluyeron tres tipos de agarre: pinza, gancho y fuerza. También se realizaron pruebas de repetición continua, verificación de la comunicación Bluetooth y validación de los mecanismos de seguridad, como los límites de movimiento programados. En cuanto al rendimiento del sistema, el exoesqueleto ejecutó correctamente los movimientos esperados, manteniendo un comportamiento estable durante las sesiones de prueba. La respuesta del sistema a la señal electromiográfica fue adecuada, se verificó la activación del movimiento de acuerdo con la intención muscular del paciente. La comunicación Bluetooth se mantuvo estable, garantizando la transmisión correcta de los comandos y parámetros desde la aplicación móvil. En cuanto a la funcionalidad, el sistema permitió efectivamente los tipos de agarre propuestos, y los parámetros configurados a través de la aplicación móvil se aplicaron correctamente al exoesqueleto. No se produjeron fallos mecánicos ni electrónicos durante las pruebas, lo que demuestra el funcionamiento fiable del prototipo. La aceptación por parte de los usuarios fue favorable. Los pacientes toleraron bien el exoesqueleto durante las sesiones, informaron de un buen nivel de comodidad y percibieron el dispositivo como útil para la rehabilitación de la mano. Estas observaciones se obtuvieron de forma cualitativa durante el proceso de prueba. Por último, en términos de seguridad, no se registraron molestias, dolor ni riesgos para los pacientes. Los límites de movimiento implementados en el sistema cumplieron su función de proteger tanto al usuario como a la estructura mecánica del exoesqueleto, garantizando un uso seguro durante las sesiones de rehabilitación.

Tabla 5

Resultados del cuestionario basado en QuickDASH

Paciente	Puntaje obtenido	Interpretación
P1	29.54	Dificultad funcional leve
P2	40.9	Dificultad funcional moderada
P3	47.72	Dificultad funcional moderada
P4	50	Dificultad funcional moderada

Nota. Elaboración Propia

Los resultados obtenidos mediante el cuestionario estructurado basado en QuickDASH se presentan en la Tabla 5. La evaluación se llevó a cabo con cuatro pacientes al finalizar las pruebas con el exoesqueleto, con el fin de determinar su percepción de la función de la mano y la interacción con el dispositivo durante las sesiones de rehabilitación. Las puntuaciones obtenidas oscilaron entre 29,54 y 50 puntos. El paciente P1 obtuvo la puntuación más baja, correspondiente a una dificultad funcional leve, mientras que los pacientes P2, P3 y P4 registraron puntuaciones asociadas a una dificultad funcional moderada. Estos resultados reflejan que, a pesar de las limitaciones funcionales inherentes al estado neuromotor de los pacientes evaluados, el exoesqueleto permitió realizar movimientos asistidos de la mano y fue percibido como una herramienta de apoyo durante las pruebas. Además, los resultados demuestran una aceptación adecuada del dispositivo por parte de los participantes, quienes fueron capaces de interactuar con el sistema y completar los ejercicios programados bajo supervisión. Cabe señalar que los resultados corresponden a una evaluación realizada al final de las pruebas funcionales del prototipo, por lo que representan la percepción de los usuarios respecto al uso del exoesqueleto y no constituyen una medición de la evolución clínica ni de la recuperación funcional a largo plazo.

V. DISCUSIÓN

Cada resultado que fue presentado nos dio una base para evaluar y observar el comportamiento del prototipo desarrollado y su viabilidad como herramienta complementaria en la rehabilitación neuromotora de la mano. La integración de tecnologías mecatrónicas y biomédicas demostró ser una opción factible para complementar los métodos terapéuticos convencionales. No obstante, debido a que las pruebas realizadas, fueron de corta duración y número reducido, no se pueden evaluar los beneficios clínicos a largo plazo.

La introducción del microcontrolador ESP32 junto con servomotores (MG996 y MG90S) de alto par dio una respuesta técnica estable y sincronizada al movimiento deseado. Además, la estructura fabricada mediante impresión 3D aportó ligereza y adaptabilidad al sistema. Sin embargo, se identificaron ciertas limitaciones debido a las variaciones anatómicas de los pacientes, condición que influyeron parcialmente al ajuste del dispositivo y la distribución homogénea de la fuerza asistida. Esto representa la conveniencia de implementar, en trabajos futuros, un diseño modular o mecanismos de ajuste personalizado.

El sistema de control electromiográfico implementado se basó en un sistema de activación por umbral, con calibración individual para cada paciente, teniendo en cuenta que la intensidad de la señal EMG varía según el nivel de deterioro neuromotor. Esta estrategia permitió adaptar el funcionamiento del exoesqueleto a las capacidades musculares de cada usuario.

En cuanto a los movimientos evaluados, el exoesqueleto fue capaz de ejecutar 3 agarres funcionales los cuales son: agarre de fuerza, agarre de pinza y agarre de gancho. En el modo de control Bluetooth, el pulgar participó activamente en los ejercicios de agarre de fuerza y agarre de pinza, mientras que en el modo de control EMG, su

participación se concentró principalmente en el agarre de fuerza. Durante las pruebas, se observó que el pulgar desempeña un papel fundamental en las acciones de agarre, lo que supone una mayor exigencia mecánica para él en comparación con los demás dedos. Esto explica la necesidad de considerar actuadores de mayor par para el pulgar en futuras versiones del sistema.

Al comparar los resultados obtenidos con trabajos anteriores, se observa que el dispositivo presenta un desempeño preliminar similar en cuanto a la funcionalidad mecánica y la asistencia motora. Sin embargo, destaca por el uso de componentes de bajo costo y una arquitectura de programación flexible, elementos que facilitan su replicabilidad, mantenimiento y adaptación a otros contextos clínicos o académicos. Aunque la duración de la prueba no permite confirmar una mejoría clínica sostenida en rehabilitación funcional de la mano, los resultados respaldan parcialmente la hipótesis inicial al demostrar que el prototipo asegura una asistencia eficaz durante la realización de los ejercicios terapéuticos.

5.1. Análisis del comportamiento de la señal electromiográfica

Durante la evaluación de control electromiográfico que presenta dicho sistema, se identificó la estabilidad del EMG como señal el cual es un factor crítico para el correcto funcionamiento del exoesqueleto. La calibración del umbral de activación se realizó con el brazo del paciente en una posición de reposo estable, normalmente apoyado sobre una superficie. En estas condiciones, la señal presentó un comportamiento relativamente constante. Sin embargo, cuando el brazo era levantado, se flexionaba o se sometía a movimientos distintos al reposo, se observaron variaciones significativas en la señal EMG. Esta dependencia de la postura del brazo representa una limitación inherente al sistema y demuestra la sensibilidad de la señal EMG a factores biomecánicos y posturales.

En cuanto al sensor electromiográfico utilizado, se identificaron limitaciones en su comportamiento cuando se integraba con el microcontrolador ESP32. A diferencia de su funcionamiento con el microcontrolador basados en Arduino Uno, la señal EMG permanece elevada durante toda la contracción muscular y solo disminuye con la relajación muscular, el ESP32 detectaba principalmente el componente inicial de la contracción, seguido de una disminución progresiva de la señal incluso mientras la contracción continuaba. Este comportamiento se atribuye principalmente a las diferencias en la arquitectura del sistema de adquisición de datos entre los dos microcontroladores. El ESP32 tiene un convertidor analógico-digital de mayor resolución cuya frecuencia es muy alta comparada con el Arduino Uno, esto se da cuando se trata de una frecuencia de muestreo, lo que permite una detección más sensible de los cambios rápidos en la señal electromiográfica. Como resultado, el ESP32 captura con mayor precisión el componente transitorio asociado con el inicio de la contracción muscular, mientras que durante la contracción sostenida la señal tiende a disminuir o estabilizarse.

Por último, el uso de técnicas de filtrado digital tuvo un impacto positivo en el control del exoesqueleto. El filtrado redujo el ruido y los picos abruptos en la señal EMG, disminuyendo la aparición de activaciones y desactivaciones repetitivas no deseadas. Como resultado, los picos residuales después del filtrado fueron de menor amplitud, lo que evitó que se superara el umbral de activación de forma errática y contribuyó a una estabilidad del control del sistema así como su fiabilidad.

VI. CONCLUSIONES

Se Analizó los métodos diferentes de las rehabilitaciones que puede presentar las manos, con el objetivo de identificar las técnicas, los enfoques y los fundamentos teóricos que servirán de referencia para el desarrollo del exoesqueleto propuesto.

Se diseñó e implementó un prototipo funcional de un exoesqueleto de mano con ayuda de un microcontrolador ESP32 y controlado por señales electromiográficas (EMG). Este prototipo ayudó eficazmente en la ejecución del movimiento de extensión y flexión en los dedos, posibilitando una ejecución en distintos tipos de agarre funcional, como el agarre de fuerza, agarre en pinza y agarre tipo gancho, durante las pruebas realizadas con pacientes que padecían secuelas cerebrovasculares, demostrando un rendimiento mecánico y electrónico satisfactorio. Para cumplir el objetivo se realizó los siguientes pasos:

- Se Desarrolló una placa de control basada en ESP32 y una de circuito impreso (PCB) que concentre componentes de tipo electrónicos, con el fin de unificar las funciones de control, detección y accionamiento del exoesqueleto.
- Se programó el código fuente de la placa ESP32, integrando rutinas de control de movimiento para que el dispositivo se logre adaptar a cada necesidad específica que tienen los pacientes.
- Se realizó pruebas del prototipo de exoesqueleto con pacientes del hospital de rehabilitación del Callao.

Las pruebas realizadas en el Hospital de Rehabilitación del Callao permitieron comprobar que el exoesqueleto facilita la ejecución de ejercicios terapéuticos de la mano, proporcionando apoyo al movimiento mediante los modos de control implementados. En

este contexto, el prototipo fue validado como herramienta de apoyo terapéutico para la realización de actividades diarias, bajo la supervisión de personal médico, confirmando su viabilidad operativa.

La evaluación del prototipo reveló una percepción positiva entre los pacientes y el personal clínico, destacando aspectos como la comodidad, la ligereza y la facilidad de uso del dispositivo, lo que favorece su posible integración en entornos de rehabilitación.

En general, este trabajo sienta un antecedente sólido para el desarrollo de dispositivos cuya herramienta de apoyo terapéutico en la mano sea asequible y de bajo coste, con potencial para adaptarse a diferentes contextos clínicos. También demuestra la contribución de la ingeniería electrónica al diseño de soluciones tecnológicas destinadas a apoyar la rehabilitación neuromotora.

VII. RECOMENDACIONES

Se recomienda analizar la implementación de módulos electromiográficos de mayor capacidad tecnológica o el diseño de una etapa de adquisición EMG personalizada para el sistema desarrollado, orientada a mejorar el acondicionamiento de la señal, reducir la influencia de interferencias externas y optimizar la integración con el microcontrolador ESP32. Estas mejoras podrían contribuir a incrementar la precisión y robustez del sistema de control.

Se propone optimizar el diseño 3D del exoesqueleto, centrándose en aumentar los rangos de apertura y cierre de la mano, así como en mejorar la ergonomía y la comodidad del usuario durante las sesiones de rehabilitación. También se sugiere aumentar el porcentaje de relleno (infill) y revisar los parámetros de impresión 3D utilizados en la fabricación de las piezas estructurales, con el fin de aumentar su resistencia mecánica y reducir el riesgo de fallos provocados por las fuerzas generadas durante los movimientos asistidos.

Debido a las limitaciones asociadas a las variaciones anatómicas de la mano humana, que afectaban al ajuste del exoesqueleto para algunos usuarios se recomienda incorporar mecanismos de ajuste modulares o diseños personalizables en futuras versiones.

BIBLIOGRAFÍA

- AD8221 Datasheet and Product Info | Analog Devices [WWW Document], 2026. URL <https://www.analog.com/en/products/ad8221.html> (accessed 1.7.26).
- Adalbert Kapandji, C.O., 2019. The Physiology of the Joints - Volume 1 [WWW Document]. UBC Press. URL <https://www.ubcpress.ca/the-physiology-of-the-joints-volume-1> (accessed 11.18.25).
- Alessandro, L., Olmos, L.E., Bonamico, L., Muzio, D.M., Ahumada, M.H., Russo, M.J., Allegri, R.F., Gianella, M.G., Campora, H., Delorme, R., Vescovo, M.E., Lado, V., Mastroberti, L.R., Butus, A., Galluzzi, H.D., Décima, G., Ameriso, S.F., 2020. Rehabilitación multidisciplinaria para pacientes adultos con accidente cerebrovascular. Med. B. Aires 80, 54–68.
- Álvaro Moyano V, 2010. El accidente cerebrovascular desde la mirada del rehabilitador. Rev. Hosp. Clínico Univ. Chile 21, 348–55. <https://doi.org/10.5354/2735-7996.2010.75396>
- Araujo Moran, D.H., Erazo Jossa, R.A., Hidalgo Morillo, K.M., Gómez Meneses, F., Mayorca Torres, D., 2022. Exoesqueleto mecatrónico para mano, enfocado a facilitar funciones de agarres en persona con lesión medular. Boletín Inf. CEI Vol 7 No 3 2020 Bol. Inf. CEI 111-115.
- Cailliet, R., 1994. SINDROMES DOLOROSOS, MANO [WWW Document]. URL https://www.sancristoballibros.com/libro/sindromes-dolorosos-mano_29489 (accessed 11.22.24).
- Deconinck, F.J.A., Smorenburg, A.R.P., Benham, A., Ledebt, A., Feltham, M.G., Savelsbergh, G.J.P., 2015. Reflections on Mirror Therapy: A Systematic Review of the Effect of Mirror Visual Feedback on the Brain. Neurorehabil. Neural Repair 29, 349–361. <https://doi.org/10.1177/1545968314546134>

Distrofia muscular de Duchenne – Infogen, n.d. URL
<https://www.infogen.org.mx/distrofia-muscular/> (accessed 11.22.24).

Hermens, H., Freriks, B., Merletti, R., Stegeman, D., Blok, J., Rau, G., Disselhorst-Klug, C., Hägg, G., Hermens, I.H.J.B., Freriks, 1999. European recommendations for surface electromyography: Results of the SENIAM Project.

Huaman Laura, C.E., Ccucho Aguilar, M.D., 2024. Implementación y control de un exoesqueleto para rehabilitación de mano en pacientes con discapacidad motora causada por ACV. Univ. Cont.

Langhorne, P., Bernhardt, J., Kwakkel, G., 2011. Stroke rehabilitation. The Lancet 377, 1693–1702. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(11\)60325-5](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(11)60325-5)

Luca, C.J.D., 1997. The Use of Surface Electromyography in Biomechanics. <https://doi.org/10.1123/jab.13.2.135>

Mehrholtz, J., Pohl, M., Platz, T., Kugler, J., Elsner, B., 2015. Electromechanical and robot-assisted arm training for improving activities of daily living, arm function, and arm muscle strength after stroke - Mehrholz, J - 2015 | Cochrane Library.

Morales Cahuana, J.D., 2024. Desarrollo de un exoesqueleto de mano en apoyo a un Centro de Rehabilitación física de la localidad de Atalaya, Ucayali. Repos. Inst. - UTP.

Paci, M., 2003. PHYSIOTHERAPY BASED ON THE BOBATH CONCEPT FOR ADULTS WITH POST-STROKE HEMIPLEGIA: A REVIEW OF EFFECTIVENESS STUDIES [WWW Document]. <https://doi.org/10.1080/16501970306106>

Pizarro Gamarra, J.J.E., 2024. Diseño de prototipo mecánico para rehabilitación de mano en personas adultas con enfermedades degenerativas y/o secuelas de accidentes. Repos. Inst. - USS.

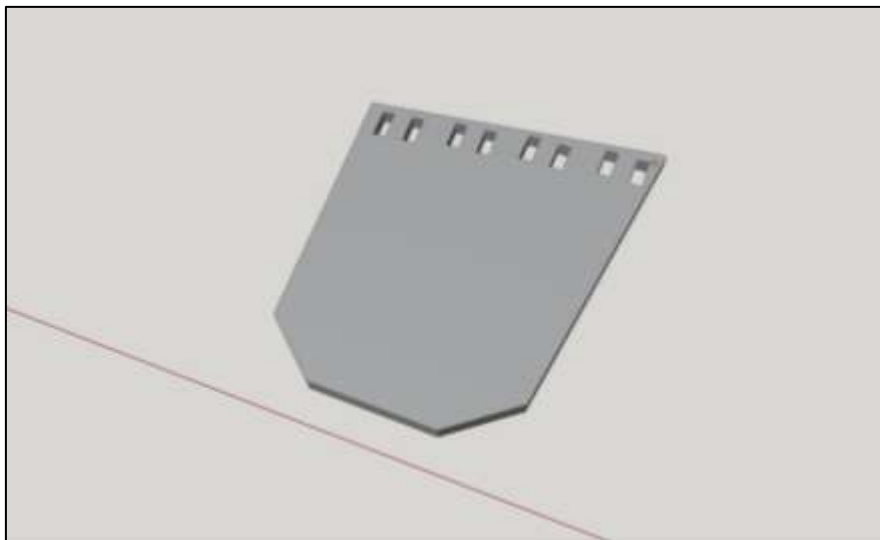
- Puttasakul, T., Pumjaroen, K., Trakunjanthrasiri, T., Auttakunchai, J., 2018. Evaluation of Human Hand Movement For Office Syndrome, in: 2018 15th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON). Presented at the 2018 15th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), pp. 453–456. <https://doi.org/10.1109/ECTICon.2018.8620026>
- Rebolledo, F.A., 2003. Plasticidad cerebral. Parte 1. Rev. Médica Inst. Mex. Seguro Soc. 41, 55–64.
- Shaheen, A.A.M., Omar, M.T.A., Ali, O.I., 2021. Normative values of handgrip and pinch strengths in healthy female college students in Riyadh, Saudi Arabia: a cross-sectional study. Bull. Fac. Phys. Ther. 26, 1. <https://doi.org/10.1186/s43161-021-00019-x>
- Silva Quintero, F.J., 2022. Diseño de un prototipo funcional de un exoesqueleto electromecánico por el método de manufactura aditiva FMD para la rehabilitación de la mano derecha.
- Taylor, C.L., Schwarz, R.J., 1955. The Anatomy and Mechanics of the Human Hand.
- Wolf, S.L., Butler, A.J., Alberts, J.L., Kim, M.W., 2005. Contemporary linkages between EMG, kinetics and stroke rehabilitation. J. Electromyogr. Kinesiol. 15, 229–239. <https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2005.01.002>

ANEXOS

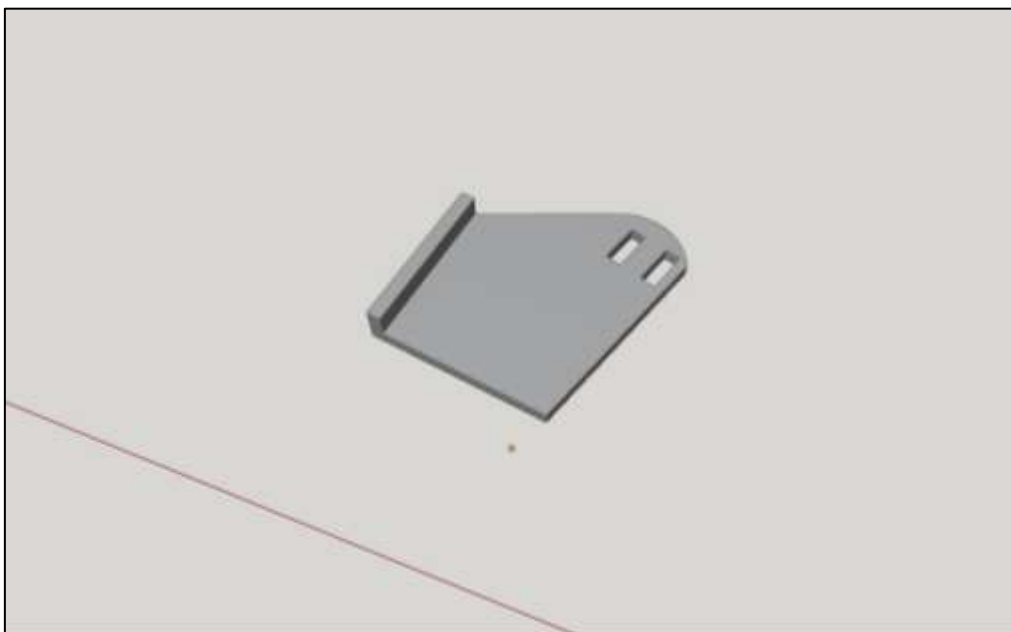
Anexo 01: Diseño de las Piezas e impresión en 3D del exoesqueleto para la mano



Anexo 02: Módulo dorsal de la mano



Anexo 03: Módulo dorsal del pulgar



Anexo 04: Brazos de servo motor



Anexo 05: Brazo actuador de falange



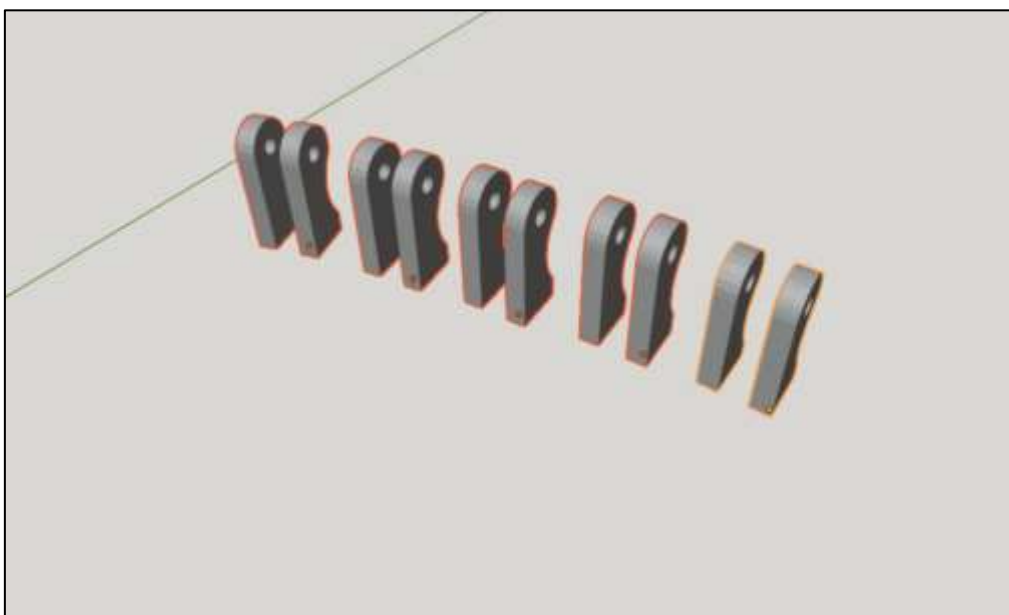
Anexo 06: Segmento de falange media



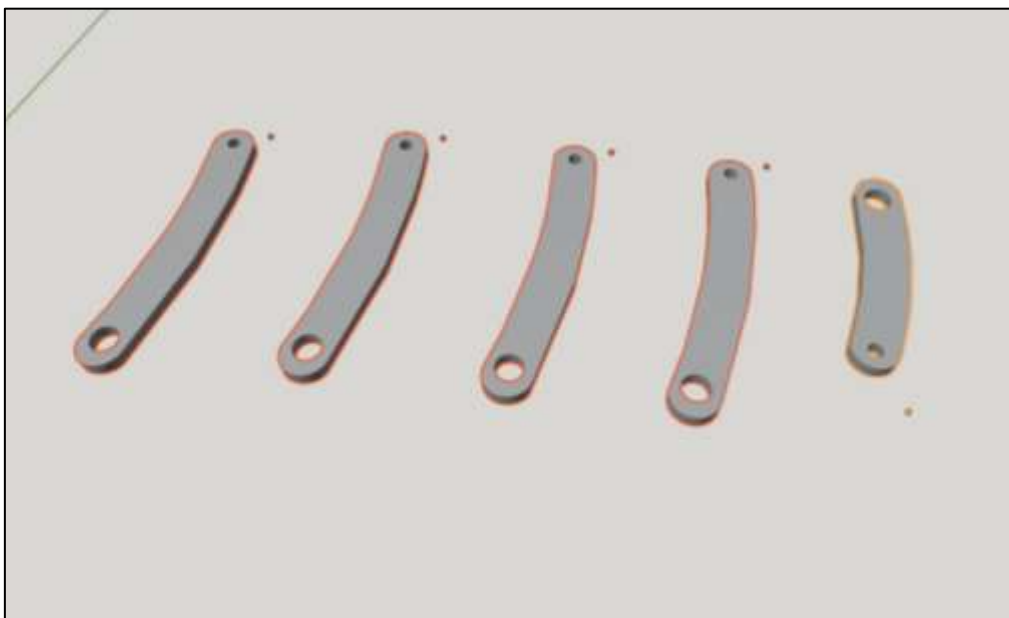
Anexo 07: Conector articulado de falange



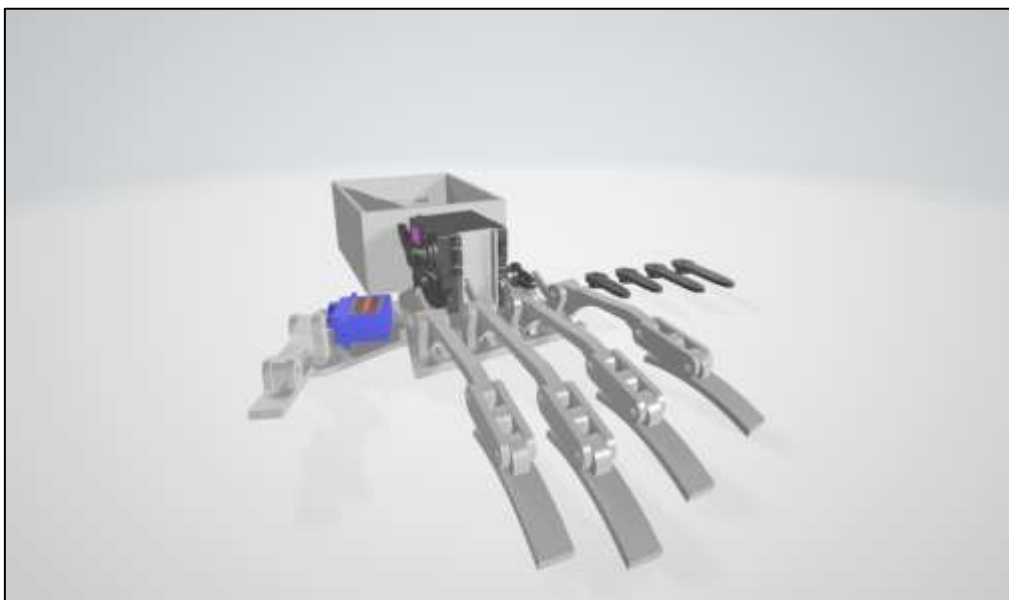
Anexo 08: Articulador base – Brazo actuador



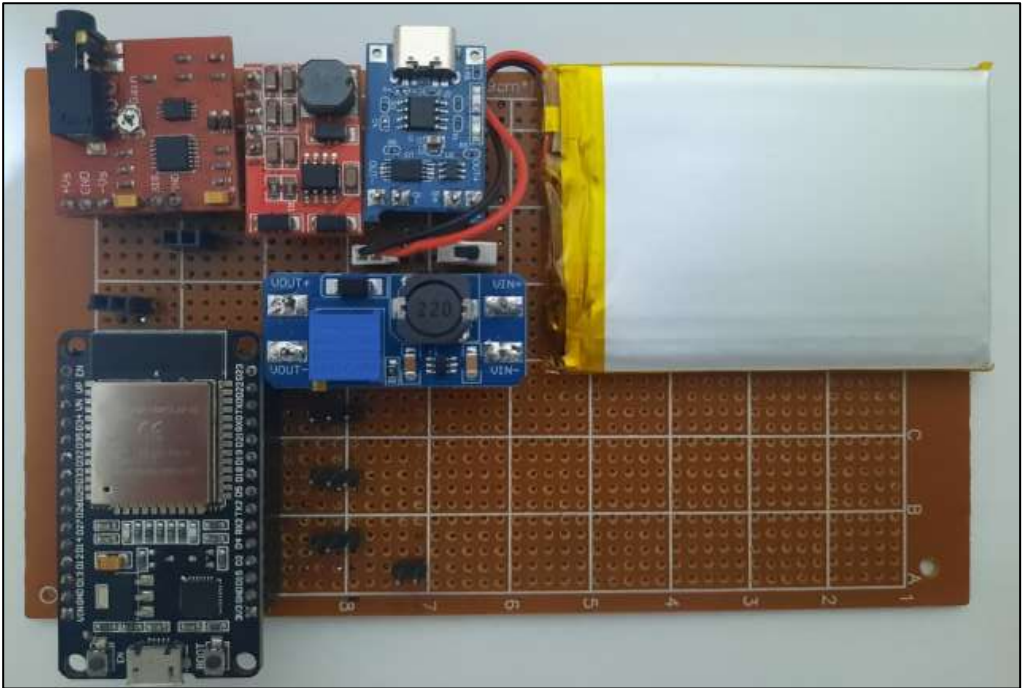
Anexo 09: Palanca de acoplamiento al servomotor



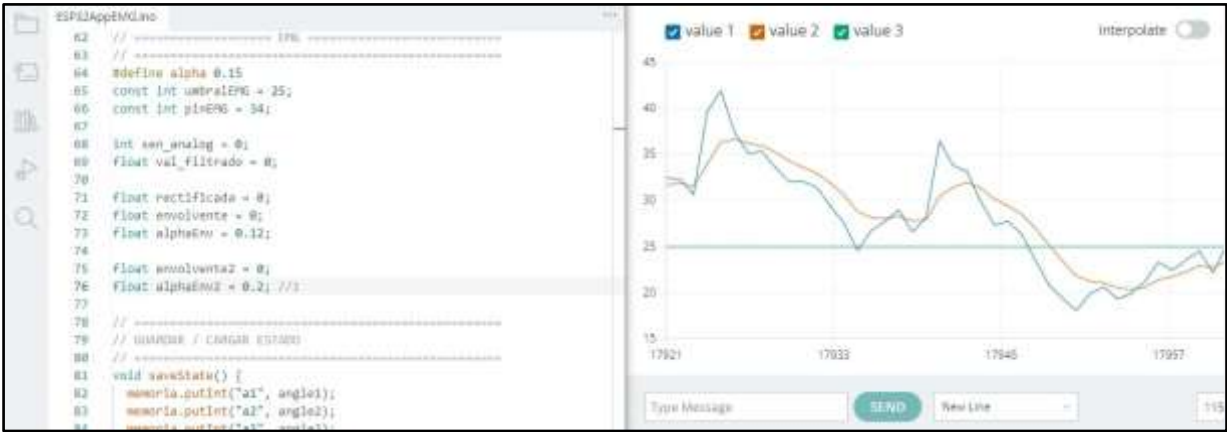
Anexo 10: Visor 3D del exoesqueleto



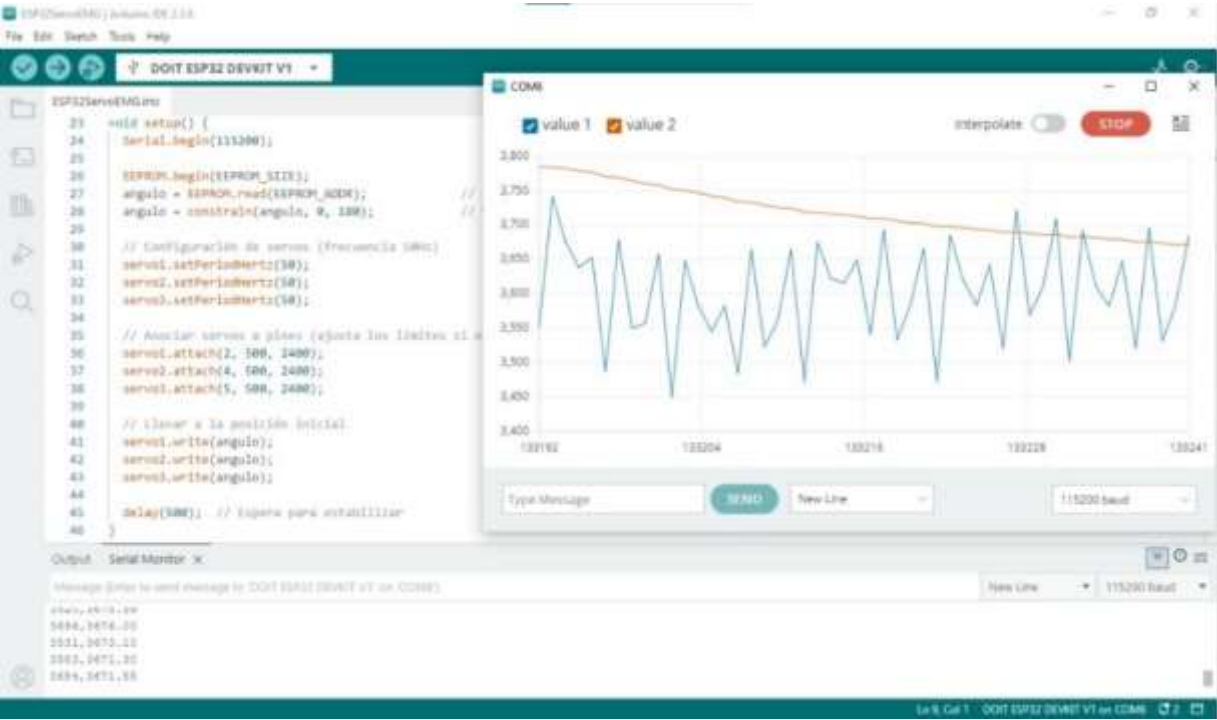
Anexo 11: Sistema de exoesqueleto



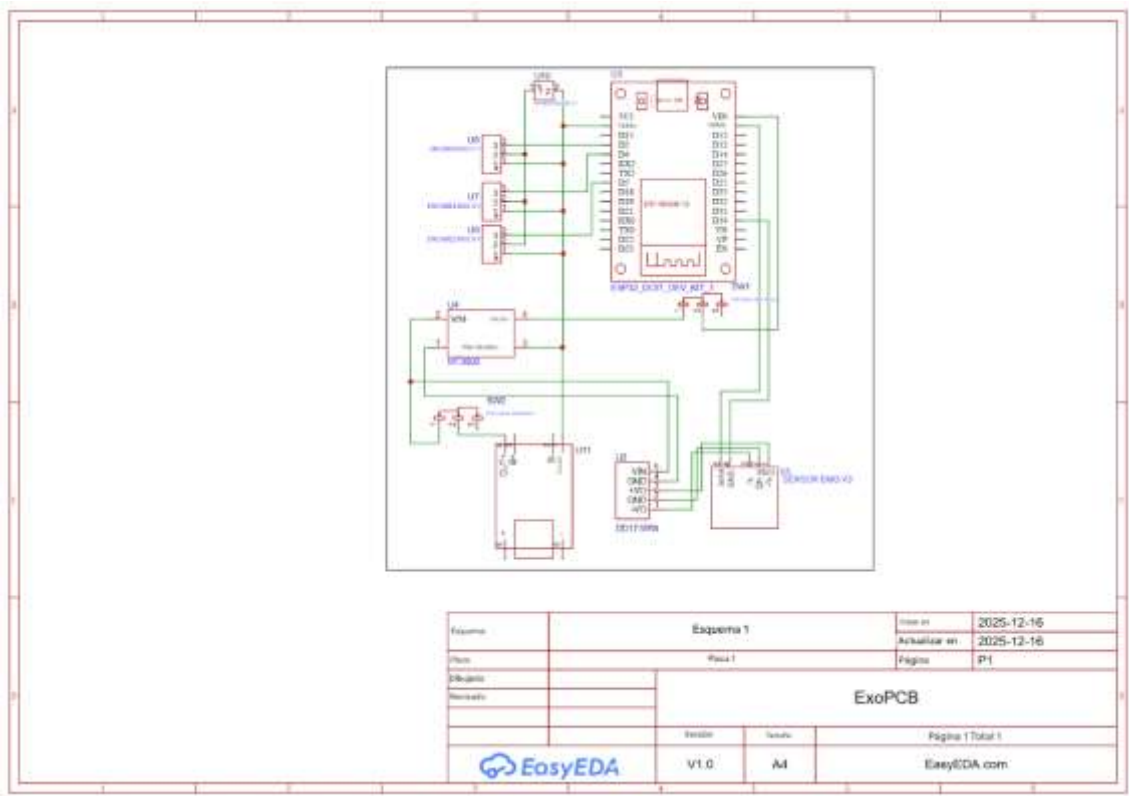
Anexo 12: Superación de umbral por señal muscular



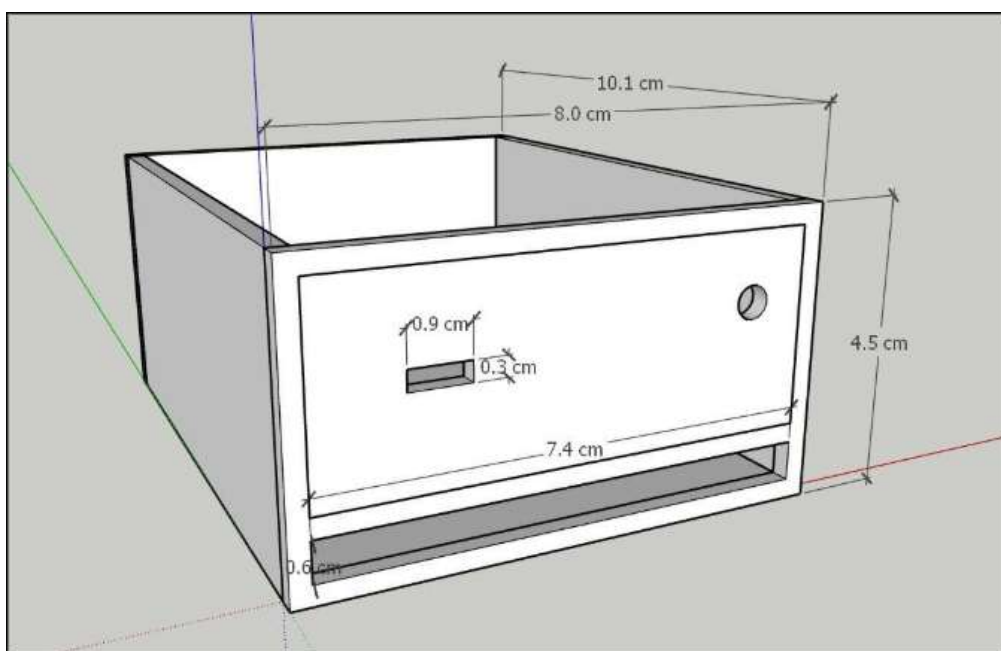
Anexo 13: Código para ESP32 mostrando la lectura y filtrado de la señal EMG.



Anexo 14: Diseño del esquemático de la PCB



Anexo 15: Compartimento 3D de los componentes

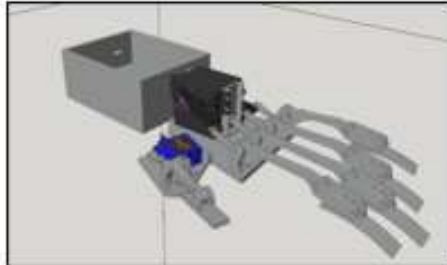


EL CUESTIONARIO *QUICK DASH*

Instrucciones:

Este cuestionario contiene preguntas acerca de la evaluación de la funcionalidad de la mano. Dicho cuestionario está distribuido en cuatro dimensiones:

- Actividad Funcional
- Uso del Exoesqueleto
- Función muscular
- Percepción del paciente



Y cada ítem será valorado mediante una escala tipo Likert de 5 niveles que son los siguientes:

- 1 = Sin dificultad
- 2 = Leve dificultad
- 3 = Dificultad moderada
- 4 = Mucha dificultad
- 5 = Incapaz de realizar

Forma de aplicación:

El cuestionario es aplicado de manera individual a cada paciente después del uso del sistema de exoesqueleto, con el fin de evaluar los cambios en la funcionalidad de la mano.

IMPORTANTE:

Por favor marque con un circulo alrededor del número que mejor indica su capacidad para llevar a cabo las siguientes actividades durante la ejecución del exoesqueleto.

1. Dimensión 1: Actividad Funcional

	ninguna dificultad	poca dificultad	Dificultad moderada	Mucha dificultad	Incapaz
1. Abrir y cerrar la mano	1	2	3	4	5
2. Sujetar objetos	1	2	3	4	5
3. Realizar agarre tipo pinza	1	2	3	4	5
4. Realizar agarre tipo fuerza	1	2	3	4	5

2. Dimensión 2: Uso del exoesqueleto

	ninguna dificultad	poca dificultad	Dificultad moderada	Mucha dificultad	Incapaz
1. Facilidad de uso del dispositivo	1	2	3	4	5
2. Comodidad durante su utilización	1	2	3	4	5
3. Adaptación del dispositivo a la mano	1	2	3	4	5

3. Dimensión 3: Función muscular

	ninguna dificultad	poca dificultad	Dificultad moderada	Mucha dificultad	Incapaz
1. Capacidad de flexión de la mano	1	2	3	4	5
2. Comodidad durante su utilización	1	2	3	4	5

4. Disminución de la rigidez muscular

	ninguna dificultad	poca dificultad	Dificultad moderada	Mucha dificultad	Incapaz
1. Presencia de dolor durante el movimiento	1	2	3	4	5
2. Sensación de mejora funcional	1	2	3	4	5

Puntuación de discapacidad/síntoma *Quick DASH*

Para poder calcular la puntuación del *Quick DASH* hay que completar al menos 10 de las 11 preguntas.

Se suman los valores asignados a cada una de las respuestas completadas y se halla el promedio, obteniendo así una puntuación del uno al cinco. Para expresar esta puntuación en por ciento, se le resta 1 y se multiplica por 25. A mayor puntuación, mayor discapacidad.

Puntuación de DASH de discapacidad/síntoma =

$$\left(\frac{\text{suma de n respuestas}}{n} \right) - 1 \times 25;$$

Donde n es igual al número de respuestas completadas.

Anexo 17: Encuesta a paciente N°1

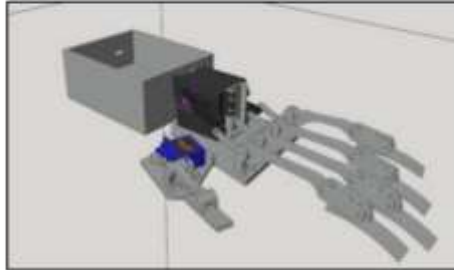
CUESTIONARIO DE TESIS 2026

EL CUESTIONARIO *QUICK DASH*

Instrucciones:

Este cuestionario contiene preguntas acerca de la evaluación de la funcionalidad de la mano. Dicho cuestionario esta distribuido en cuatro dimensiones:

- Actividad Funcional
- Uso del Exoesqueleto
- Función muscular
- Percepción del paciente



Y cada ítem será valorado mediante una escala tipo Likert de 5 niveles que son los siguientes:

1 = Sin dificultad

2 = Leve dificultad

3 = Dificultad moderada

4 = Mucha dificultad

5 = Incapaz de realizar

Forma de aplicación:

El cuestionario es aplicado de manera individual a cada paciente antes y después del uso del sistema de exoesqueleto, con el fin de evaluar los cambios en la funcionalidad de la mano.

CUESTIONARIO DE TESIS 2026

Por favor marque con un círculo alrededor del número que mejor indica su capacidad para llevar a cabo las siguientes actividades durante la ejecución del exoesqueleto.

1. Dimensión 1: Actividad Funcional

	ninguna dificultad	poca dificultad	Dificultad moderada	Mucha dificultad	Incapaz
1. Abrir y cerrar la mano	1	2	3	4	5
2. Sujetar objetos	1	2	3	4	5
3. Realizar agarre tipo pinza	1	2	3	4	5
4. Realizar agarre tipo fuerza	1	2	3	4	5

2. Dimensión 2: Uso del exoesqueleto

	ninguna dificultad	poca dificultad	Dificultad moderada	Mucha dificultad	Incapaz
1. Facilidad de uso del dispositivo	1	2	3	4	5
2. Comodidad durante su uso	1	2	3	4	5
3. Adaptación del dispositivo a la mano	1	2	3	4	5

3. Dimensión 3: Función muscular

	ninguna dificultad	poca dificultad	Dificultad moderada	Mucha dificultad	Incapaz
1. Capacidad de flexión de la mano	1	2	3	4	5
2. Comodidad durante su utilización	1	2	3	4	5

4. Disminución de la rigidez muscular

	ninguna dificultad	poca dificultad	Dificultad moderada	Mucha dificultad	Incapaz
1. Presencia de dolor durante el movimiento	1	2	3	4	5
2. Sensación de mejora funcional	1	2	3	4	5

CUESTIONARIO DE TESIS 2026

Puntuación de discapacidad/síntoma *Quick DASH*

Para poder calcular la puntuación del *Quick DASH* hay que completar al menos 10 de las 11 preguntas.

Se suman los valores asignados a cada una de las respuestas completadas y se halla el promedio, obteniendo así una puntuación del uno al cinco. Para expresar esta puntuación en por ciento, se le resta 1 y se multiplica por 25. A mayor puntuación, mayor discapacidad.

Puntuación de DASH de discapacidad/síntoma:

$$\left(\frac{\text{suma de n respuestas}}{n} - 1 \right) \times 25$$

Donde n es igual al número de respuestas completadas

Resultado:

$$\left(\frac{24}{11} - 1 \right) \times 25 = 29.54$$

Anexo 18: Encuesta a paciente N° 2

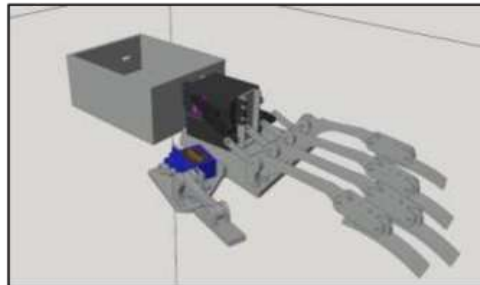
CUESTIONARIO DE TESIS 2026

EL CUESTIONARIO *QUICK DASH*

Instrucciones:

Este cuestionario contiene preguntas acerca de la evaluación de la funcionalidad de la mano. Dicho cuestionario está distribuido en cuatro dimensiones:

- Actividad Funcional
- Uso del Exoesqueleto
- Función muscular
- Percepción del paciente



Y cada ítem será valorado mediante una escala tipo Likert de 5 niveles que son los siguientes:

1 = Sin dificultad

2 = Leve dificultad

3 = Dificultad moderada

4 = Mucha dificultad

5 = Incapaz de realizar

Forma de aplicación:

El cuestionario es aplicado de manera individual a cada paciente antes y después del uso del sistema de exoesqueleto, con el fin de evaluar los cambios en la funcionalidad de la mano.

CUESTIONARIO DE TESIS 2026

Por favor marque con un círculo alrededor del número que mejor indica su capacidad para llevar a cabo las siguientes actividades durante la ejecución del exoesqueleto.

1. Dimensión 1: Actividad Funcional

	ninguna dificultad	poca dificultad	Dificultad moderada	Mucha dificultad	Incapaz
1. Abrir y cerrar la mano	1	2	3	4	5
2. Sujetar objetos	1	2	3	4	5
3. Realizar agarre tipo pinza	1	2	3	4	5
4. Realizar agarre tipo fuerza	1	2	3	4	5

2. Dimensión 2: Uso del exoesqueleto

	ninguna dificultad	poca dificultad	Dificultad moderada	Mucha dificultad	Incapaz
1. Facilidad de uso del dispositivo	1	2	3	4	5
2. Comodidad durante su uso	1	2	3	4	5
3. Adaptación del dispositivo a la mano	1	2	3	4	5

3. Dimensión 3: Función muscular

	ninguna dificultad	poca dificultad	Dificultad moderada	Mucha dificultad	Incapaz
1. Capacidad de flexión de la mano	1	2	3	4	5
2. Comodidad durante su utilización	1	2	3	4	5

4. Disminución de la rigidez muscular

	ninguna dificultad	poca dificultad	Dificultad moderada	Mucha dificultad	Incapaz
1. Presencia de dolor durante el movimiento	1	2	3	4	5
2. Sensación de mejora funcional	1	2	3	4	5

CUESTIONARIO DE TESIS 2026

Puntuación de discapacidad/síntoma *Quick DASH*

Para poder calcular la puntuación del *Quick DASH* hay que completar al menos 10 de las 11 preguntas.

Se suman los valores asignados a cada una de las respuestas completadas y se halla el promedio, obteniendo así una puntuación del uno al cinco. Para expresar esta puntuación en por ciento, se le resta 1 y se multiplica por 25. A mayor puntuación, mayor discapacidad.

Puntuación de DASH de discapacidad/síntoma:

$$\left(\frac{\text{suma de n respuestas}}{n} - 1 \right) \times 25$$

Donde n es igual al número de respuestas completadas

Resultado:

$$\left(\frac{29}{11} - 1 \right) \times 25 = 40.9$$

Anexo 19: Encuesta a paciente N° 3

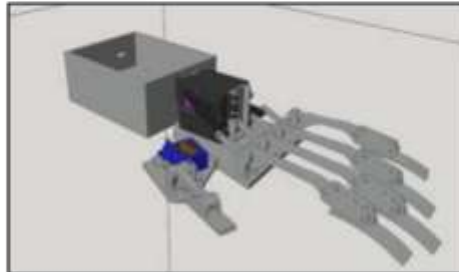
CUESTIONARIO DE TESIS 2026

EL CUESTIONARIO *QUICK DASH*

Instrucciones:

Este cuestionario contiene preguntas acerca de la evaluación de la funcionalidad de la mano. Dicho cuestionario está distribuido en cuatro dimensiones:

- Actividad Funcional
- Uso del Exoesqueleto
- Función muscular
- Percepción del paciente



Y cada ítem será valorado mediante una escala tipo Likert de 5 niveles que son los siguientes:

- 1 = Sin dificultad
- 2 = Leve dificultad
- 3 = Dificultad moderada
- 4 = Mucha dificultad
- 5 = Incapaz de realizar

Forma de aplicación:

El cuestionario es aplicado de manera individual a cada paciente antes y después del uso del sistema de exoesqueleto, con el fin de evaluar los cambios en la funcionalidad de la mano.

CUESTIONARIO DE TESIS 2026

Por favor marque con un círculo alrededor del número que mejor indica su capacidad para llevar a cabo las siguientes actividades durante la ejecución del exoesqueleto.

1. Dimensión 1: Actividad Funcional

	ninguna dificultad	poca dificultad	Dificultad moderada	Mucha dificultad	Incapaz
1. Abrir y cerrar la mano	1	2	3	4	5
2. Sujetar objetos	1	2	3	4	5
3. Realizar agarre tipo pinza	1	2	3	4	5
4. Realizar agarre tipo fuerza	1	2	3	4	5

2. Dimensión 2: Uso del exoesqueleto

	ninguna dificultad	poca dificultad	Dificultad moderada	Mucha dificultad	Incapaz
1. Facilidad de uso del dispositivo	1	2	3	4	5
2. Comodidad durante su uso	1	2	3	4	5
3. Adaptación del dispositivo a la mano	1	2	3	4	5

3. Dimensión 3: Función muscular

	ninguna dificultad	poca dificultad	Dificultad moderada	Mucha dificultad	Incapaz
1. Capacidad de flexión de la mano	1	2	3	4	5
2. Comodidad durante su utilización	1	2	3	4	5

4. Disminución de la rigidez muscular

	ninguna dificultad	poca dificultad	Dificultad moderada	Mucha dificultad	Incapaz
1. Presencia de dolor durante el movimiento	1	2	3	4	5
2. Sensación de mejora funcional	1	2	3	4	5

CUESTIONARIO DE TESIS 2026

Puntuación de discapacidad/síntoma *Quick DASH*

Para poder calcular la puntuación del *Quick DASH* hay que completar al menos 10 de las 11 preguntas.

Se suman los valores asignados a cada una de las respuestas completadas y se halla el promedio, obteniendo así una puntuación del uno al cinco. Para expresar esta puntuación en por ciento, se le resta 1 y se multiplica por 25. A mayor puntuación, mayor discapacidad.

Puntuación de DASH de discapacidad/síntoma:

$$\left(\frac{\text{suma de n respuestas}}{n} - 1 \right) \times 25$$

Donde n es igual al número de respuestas completadas

Resultado: $\left(\frac{32}{11} - 1 \right) \times 25 = 47.72$

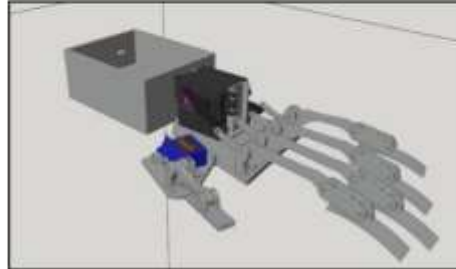
CUESTIONARIO DE TESIS 2026

EL CUESTIONARIO *QUICK DASH*

Instrucciones:

Este cuestionario contiene preguntas acerca de la evaluación de la funcionalidad de la mano. Dicho cuestionario esta distribuido en cuatro dimensiones:

- Actividad Funcional
- Uso del Exoesqueleto
- Función muscular
- Percepción del paciente



Y cada ítem será valorado mediante una escala tipo Likert de 5 niveles que son los siguientes:

1 = Sin dificultad

2 = Leve dificultad

3 = Dificultad moderada

4 = Mucha dificultad

5 = Incapaz de realizar

Forma de aplicación:

El cuestionario es aplicado de manera individual a cada paciente antes y después del uso del sistema de exoesqueleto, con el fin de evaluar los cambios en la funcionalidad de la mano.

IMPORTANTE:

CUESTIONARIO DE TESIS 2026

IMPORTANTE:

Por favor marque con un círculo alrededor del número que mejor indica su capacidad para llevar a cabo las siguientes actividades durante la ejecución del exoesqueleto.

1. Dimensión 1: Actividad Funcional

	ninguna dificultad	poca dificultad	Dificultad moderada	Mucha dificultad	Incapaz
1. Abrir y cerrar la mano	1	2	3	4	5
2. Sujetar objetos	1	2	3	4	5
3. Realizar agarre tipo pinza	1	2	3	4	5
4. Realizar agarre tipo fuerza	1	2	3	4	5

2. Dimensión 2: Uso del exoesqueleto

	ninguna dificultad	poca dificultad	Dificultad moderada	Mucha dificultad	Incapaz
1. Facilidad de uso del dispositivo	1	2	3	4	5
2. Comodidad durante su uso	1	2	3	4	5
3. Adaptación del dispositivo a la mano	1	2	3	4	5

3. Dimensión 3: Función muscular

	ninguna dificultad	poca dificultad	Dificultad moderada	Mucha dificultad	Incapaz
1. Capacidad de flexión de la mano	1	2	3	4	5
2. Comodidad durante su utilización	1	2	3	4	5

4. Disminución de la rigidez muscular

	ninguna dificultad	poca dificultad	Dificultad moderada	Mucha dificultad	Incapaz
1. Presencia de dolor durante el movimiento	1	2	3	4	5
2. Sensación de mejora funcional	1	2	3	4	5

Puntuación de discapacidad/síntoma *Quick*DASH

Para poder calcular la puntuación del *Quick* DASH hay que completar al menos 10 de las 11 preguntas.

Se suman los valores asignados a cada una de las respuestas completadas y se halla el promedio, obteniendo así una puntuación del uno al cinco. Para expresar esta puntuación en por ciento, se le resta 1 y se multiplica por 25. A mayor puntuación, mayor discapacidad.

Puntuación de DASH de discapacidad/síntoma:

$$\left(\frac{\text{suma de n respuestas}}{n} - 1 \right) \times 25$$

Donde n es igual al número de respuestas completadas

Resultado:

$$\left(\frac{33}{11} - 1 \right) \times 25 = 50$$