

FACULTAD DE INGENIERÍA

Escuela Académico Profesional de Ingeniería Mecatrónica

Tesis

**Implementación y control de un exoesqueleto para
rehabilitación de mano en pacientes con discapacidad
motora causada por ACV**

Christian Edgar Huaman Laura
Mario Daymler Ccucho Aguilar

Para optar el Título Profesional de
Ingeniero Mecatrónico

Huancayo, 2024

Repositorio Institucional Continental
Tesis digital



Esta obra está bajo una Licencia "Creative Commons Atribución 4.0 Internacional" .

INFORME DE CONFORMIDAD DE ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

A : Decano de la Facultad de Ingeniería
DE : Huaytalla Pariona, Jaime Antonio
Asesor de trabajo de investigación
ASUNTO : Remito resultado de evaluación de originalidad de trabajo de investigación
FECHA : 4 de Setiembre de 2024

Con sumo agrado me dirijo a vuestro despacho para informar que, en mi condición de asesor del trabajo de investigación:

Título:

Implementación y control de un exoesqueleto para rehabilitación de mano en pacientes con discapacidad motora causada por ACV.

Autores:

1. Christian Edgar Huaman Laura – EAP. Ingeniería Mecatrónica
2. Mario Daymler Ccucho Aguilar – EAP. Ingeniería Mecatrónica

Se procedió con la carga del documento a la plataforma "Turnitin" y se realizó la verificación completa de las coincidencias resaltadas por el software dando por resultado 11 % de similitud sin encontrarse hallazgos relacionados a plagio. Se utilizaron los siguientes filtros:

- Filtro de exclusión de bibliografía SI NO
- Filtro de exclusión de grupos de palabras menores
Nº de palabras excluidas (**en caso de elegir "SI"**): 40 SI NO
- Exclusión de fuente por trabajo anterior del mismo estudiante SI NO

En consecuencia, se determina que el trabajo de investigación constituye un documento original al presentar similitud de otros autores (citas) por debajo del porcentaje establecido por la Universidad Continental.

Recae toda responsabilidad del contenido del trabajo de investigación sobre el autor y asesor, en concordancia a los principios expresados en el Reglamento del Registro Nacional de Trabajos conducentes a Grados y Títulos – RENATI y en la normativa de la Universidad Continental.

Atentamente,

La firma del asesor obra en el archivo original

(No se muestra en este documento por estar expuesto a publicación)

AGRADECIMIENTO

El reconocimiento se extiende primeramente a Dios, quien ha sido una guía constante y fuente de fortaleza a lo largo de este proyecto.

Asimismo, se agradece profundamente a nuestros padres por su incondicional apoyo y respaldo desde el inicio, siendo fundamentales para nuestra formación profesional y el éxito en la conclusión de este proyecto.

Además, se expresa un sincero agradecimiento a la Clínica NeuroAdvance Perú por permitir y facilitar el desarrollo de esta investigación, brindando el entorno y los recursos necesarios para llevar a cabo este trabajo.

DEDICATORIA

A mi querida madre, Rosario Laura Chuquillanqui, cuyo amor infinito y apoyo incansable han sido la inspiración detrás de cada logro. Tu luz guía ha iluminado mi camino académico y personal. Esta tesis es un tributo a tu inquebrantable dedicación y un reflejo de la fortaleza que me has transmitido. Gracias por ser mi faro en este viaje.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTO	IV
DEDICATORIA	V
ÍNDICE	VI
ÍNDICE DE TABLAS	IX
ÍNDICE DE FIGURAS.....	X
RESUMEN	XII
ABSTRACT.....	XIII
INTRODUCCION	XIV
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO.....	1
1.1. Planteamiento y formulación del problema.....	1
1.1.1. Problema general.....	3
1.1.2. Problemas específicos	3
1.2. Objetivos de la investigación	3
1.2.1. Objetivo general	3
1.2.2. Objetivos específicos.....	4
1.3. Justificación de la investigación.....	4
1.4. Delimitaciones del proyecto	5
1.5. Hipótesis y variables	6
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	7
2.1. Antecedentes de la investigación.....	7
2.2. Definición de términos básicos	13
2.2.1. Exoesqueleto	13
2.2.2. Accidente cerebrovascular	15
2.2.3. Anatomía de la mano.....	16
2.2.4. Articulación.....	17
2.2.5. Grados de libertad (DoF).....	18
2.2.6. Modelamiento matemático	18

2.2.7. Ergonomía	19
2.2.8. Rehabilitación	19
2.3. Modelamiento de la mano	20
2.4. Marco conceptual	22
2.4.1. Actuadores.....	22
2.4.2. Microcontrolador.....	23
2.4.3. Impresión 3D.....	24
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA	25
3.1. Diseño metodológico.....	25
3.1.1. Metodología de la investigación	25
3.1.2. Tipo de la investigación	25
3.1.3. Alcance de investigación.....	26
3.1.4. Unidad de investigación	26
3.2. Metodología de la investigación.....	26
3.2.1. Fase de especificaciones.....	27
3.2.2. Definir funciones.....	27
3.2.3. Definir componentes del diseño	27
3.2.4. Etapa de codificaciones.....	27
3.3. Lista de exigencias	29
3.4. Estructura de funciones	31
3.5. Matriz morfológica.....	34
3.5.1. Primera solución conceptual	36
3.5.2. Segunda solución conceptual	37
3.5.3. Tercera solución conceptual.....	38
3.6. Valoración técnica.....	38
3.6.1. Valoración técnica.....	39
3.6.2. Valoración económica.....	40
CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN	42
4.1. Resultados	42

4.1.1. Perfil del paciente y contexto clínico	42
4.1.2. Diseño del exoesqueleto de mano	43
4.1.3. Diseño del plano esquemático.....	44
4.1.4. Diseño del sistema de control.....	45
4.2. Discusión de resultados	47
4.2.1. Construcción del exoesqueleto de mano	47
4.2.2. Pruebas del exoesqueleto de mano.....	51
CONCLUSIONES	55
RECOMENDACIONES.....	57
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	58
ANEXOS	61

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros Denavit-Hartenberg.....	20
Tabla 2. Datasheet.....	22
Tabla 3. Datasheet.....	23
Tabla 4. Datasheet.....	24
Tabla 5. Investigaciones usadas en este trabajo de investigación.....	29
Tabla 6. Lista de exigencia del exoesqueleto de mano.....	30
Tabla 7. Matriz morfológica.....	34
Tabla 8. Valoración técnica.....	39
Tabla 9. Valoración económica.....	40

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Exoesqueleto de mano Exohand.....	2
Figura 2. Prototipo de un exoesqueleto robótico flexible para la rehabilitación activa de la mano.	7
Figura 3. Diseño de exoesqueleto de 3 grados de libertad para la rehabilitación del miembro superior.	8
Figura 4. Diseño en CAD del exoesqueleto para rehabilitación de mano afectada por artrosis.	9
Figura 5. Diseño del exoesqueleto de mano para la auto-terapia.....	10
Figura 6. Diseño en CAD del exoesqueleto rehabilitador de mano mediante fibras musculares.	11
Figura 7. Diseño y construcción de un prototipo de exoesqueleto para rehabilitación de mano.	12
Figura 8. Exoesqueleto de mano con control asistido.....	13
Figura 9. Exoesqueleto de mano ExoHand.....	14
Figura 10. Exoesqueleto de mano agarrando una botella.	15
Figura 11. Ruptura del vaso sanguíneo en un ACV.....	16
Figura 12. Movimientos de la mano.	17
Figura 13. Articulaciones de la mano.	17
Figura 14. Ejemplo de grados de libertad.	18
Figura 15. Trabajo de la movilidad de la mano y evitar retracciones.	20
Figura 16. Motor-microreductor Pololu.....	22
Figura 17. Relé electromagnético 5 pines.....	23
Figura 18. Ejemplo de un microcontrolador - Arduino.....	24
Figura 19. Ejemplo de impresión 3D.....	24
Figura 20. Modelo V de investigación.....	25
Figura 21. Modelo de la caja negra.....	27
Figura 22. Diagrama de diseño del exoesqueleto de mano.....	28
Figura 23. Caja negra.....	31
Figura 24. Estructura de funciones del exoesqueleto de mano.....	33
Figura 25. Propuesta de solución 1.....	37
Figura 26. Propuesta de solución 2.....	37
Figura 27. Propuesta de solución 3.....	38
Figura 28. Valoración técnica-económica.	41
Figura 29. Modelamiento 3D del exoesqueleto de mano.....	44
Figura 30. Accionamiento del exoesqueleto en estado de marcha.....	45
Figura 31. Accionamiento del exoesqueleto en estado de retroceso.....	45

Figura 32. Parte del código de exoesqueleto de mano.....	46
Figura 33. Diagrama de flujo del funcionamiento exoesqueleto de mano.....	47
Figura 34. Prototipo del exoesqueleto de mano inicial.....	48
Figura 35. Prototipo del exoesqueleto de mano final.....	49
Figura 36. Circuito de marcha/retroceso el exoesqueleto de mano.	49
Figura 37. Exoesqueleto de mano y sus partes.	50
Figura 38. Distribución de los componentes del exoesqueleto de mano.	50
Figura 39. Medición de anillos proximal y distal.	51
Figura 40. Rotación de las falanges del exoesqueleto de mano.....	51
Figura 41. Adaptación de los velcros de seguridad.	52
Figura 42. Pruebas iniciales del exoesqueleto de mano.....	52
Figura 43. Vista inferior del exoesqueleto de mano.	52
Figura 44. Vista frontal del exoesqueleto de mano.....	53
Figura 45. Apertura y cierre de la mano para sostener objetos y transportarlos a otro lugar...	53
Figura 46. Apertura y cierre para abrir y cerrar persianas.	54

RESUMEN

La discapacidad motriz derivada de un accidente cerebrovascular (ACV) es un desafío global que afecta a millones de personas, limitando su movilidad y calidad de vida. Los exoesqueletos se plantean como una solución para la rehabilitación física, pero su accesibilidad se ve restringida por los altos costos y la falta de expertos en el campo. Esta investigación propone el desarrollo y la implementación de un exoesqueleto de mano portátil y asequible, diseñado específicamente para personas con discapacidad motriz causada por ACV. El objetivo es ofrecer una solución accesible que mejore la movilidad y destreza de los dedos, proporcionando una notable mejora en la funcionalidad de la mano. Este trabajo tiene como propósito generar conocimiento y propuestas con el fin de abordar la discapacidad motriz, en particular en el contexto de los ACV, y mejorar la calidad de vida de las personas afectadas por esta condición.

Palabras clave: ACV, exoesqueleto de mano, rehabilitación, motricidad.

ABSTRACT

Motor disability resulting from a cerebrovascular accident (CVA) is a global challenge that affects millions of people, limiting their mobility and quality of life. Exoskeletons are proposed as a solution for physical rehabilitation, but their accessibility is restricted by high costs and the lack of experts in the field. This research proposes the development and implementation of an affordable, portable handheld exoskeleton specifically designed for people with stroke-related motor impairment. The objective is to offer an accessible solution that improves the mobility and dexterity of the fingers, providing a significant improvement in the functionality of the hand. The purpose of this work is to generate knowledge and proposals to address motor disability, particularly in the CVA context, and improve the quality of life of people affected by this condition.

Keywords: CVA, hand exoskeleton, rehabilitation, motricity.

INTRODUCCION

En la actualidad, hay una alta prevalencia de personas que sufren accidentes cerebrovasculares (ACV), así como otros factores neurológicos y traumatismos. Estos eventos pueden causar lesiones en diferentes partes del cuerpo, especialmente en los miembros superiores, lo que resulta en una reducción de la capacidad motora en esa área.

A pesar de la considerable prevalencia de estos casos, la rehabilitación en el contexto peruano ha sido deficientemente atendida en los últimos años. La atención se ha basado en métodos tradicionales de rehabilitación física que han arrojado resultados poco favorables. Como consecuencia, el índice de crecimiento de estos casos es inversamente proporcional al número de pacientes que reciben rehabilitación. Es importante mencionar que una gran cantidad de personas con limitaciones de movilidad en la parte superior del cuerpo no reciben ningún tipo de tratamiento debido a diversos factores sociales o económicos.

Por lo tanto, la investigación titulada "Implementación y control de un exoesqueleto para rehabilitación de mano en pacientes con discapacidad motora causada por ACV" busca adoptar la metodología V, una norma que representa actividades a lo largo del proyecto y se enfoca en la mejora de sistemas. El análisis de diversos proyectos realizados permite seleccionar el material y la forma óptima a utilizar, así como el sistema de control que facilitará la rehabilitación.

El software Fusion 360 ha sido empleado para la creación de las diversas piezas del exoesqueleto, mientras que la impresión 3D ha sido utilizada para fabricar un prototipo funcional. Asimismo, se ha desarrollado una placa electrónica y un sistema de control mediante el uso de Proteus y Arduino respectivamente. De esta forma, se logra un sistema automático que mejorará el movimiento de la mano.

Finalmente, los resultados obtenidos han permitido identificar las mejoras necesarias para un próximo prototipo, como optimizar el peso del dispositivo y ajustar los tiempos entre la apertura y cierre, considerando que cada individuo puede requerir diferentes tiempos. Además, el lector podrá beneficiarse de los conocimientos adquiridos, que abarcan la observación del problema, los antecedentes, el desarrollo de la solución y las conclusiones de esta investigación.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO

1.1. Planteamiento y formulación del problema

La Organización Mundial de la Salud (OMS) señala que cerca de mil millones de personas, aproximadamente el 16 % de la población mundial, presentan alguna forma de discapacidad (1). Aquellos con discapacidades motrices, ya sea parciales o totales, enfrentan obstáculos en sus actividades diarias. La tasa de discapacidad continúa aumentando debido a causas físicas o neurológicas.

En el año 2020, el Consejo Nacional para la Integración de la Persona con Discapacidad (CONADIS) informó que en el territorio nacional la discapacidad física afecta alrededor del 43.4 % de la población, principalmente relacionada con dificultades en los brazos y las piernas (2). Además, el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI) reporta que la discapacidad motora afecta especialmente a adultos mayores, con un 32.5 % de prevalencia (3).

Entre las principales condiciones médicas que ocasionan restricciones o inhabilidad de movimiento en la parte superior del cuerpo y demandan terapia de rehabilitación pasiva se incluyen la esclerosis múltiple, la distrofia muscular, traumas y accidentes cerebrovasculares (ACV) (4). En efecto, los accidentes cerebrovasculares constituyen una de las principales causas de fallecimiento, según la revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública (5). En su mayoría, los pacientes con limitaciones musculoesqueléticas son individuos de 30 años en adelante, quienes son candidatos adecuados para rehabilitación. Sin embargo, debido a diversos factores como la falta de fisioterapia, problemas de acceso a centros de salud y restricciones financieras, muchos no reciben el tratamiento adecuado ni tienen oportunidad de acceder a ninguna forma de terapia (6).

Las proyecciones demográficas sugieren que para 2050, aproximadamente el 80 % de las personas de edad avanzada residirán en países de bajos y medianos ingresos, lo cual tiene implicaciones en el acceso a rehabilitación. Esto afecta especialmente a países de América Latina, incluyendo Perú, donde las personas con discapacidades a causa de ACV podrían enfrentar dificultades en su independencia y autonomía para realizar actividades diarias (7). Esto resalta un grave problema de salud pública, que requiere recursos especializados como profesionales, apoyo diagnóstico, hospitalización, UCI y cirugías, lo que genera un impacto significativo en la economía del estado (8).

De igual forma, datos del INEI revelan que en 2019 solo el 11.4 % de las personas recibieron rehabilitación, subrayando la falta de especialistas en medicina física y rehabilitación. Esto puede llevar a la atrofia muscular y la falta de aptitud para la rehabilitación (9). A medida que aumenta la cantidad de pacientes con discapacidades físicas en los brazos, se necesita especialización para lidiar con su recuperación, que a menudo es prolongada.

Frente a este panorama, algunas empresas en países tecnológicamente avanzados están investigando y desarrollando exoesqueletos electromecánicos para brindar apoyo a individuos afectados por accidentes o lesiones (10). Sin embargo, la alta fabricación y adquisición limitan su alcance, además, la falta de centros especializados y el sistema de salud en Perú contribuyen al problema.

Ante esta situación, se buscan tecnologías innovadoras, como magnetoterapia o electroterapia, para mejorar los resultados funcionales de las dificultades.

Recientemente, los exoesqueletos han causado un profundo impacto en el ámbito de la rehabilitación, sustituyendo los enfoques convencionales de fisioterapia. Estos dispositivos robóticos han sido refinados y perfeccionados con el transcurso del tiempo. Algunas variantes integran elementos de realidad virtual (VR) para una instrucción más didáctica, mientras que otras emplean la inteligencia artificial (IA) para mejorar los patrones de movimiento personalizados para cada paciente. Estas mejoras generan una experiencia más gratificante y un mayor grado de control durante su uso.

En la actualidad, hay sistemas completamente desarrollados en el mercado, como el ExoHand de Festo y el Dispositivo de Entrenamiento de Mano de Robot de Syrebo, que han demostrado ser altamente eficaces en rehabilitación.

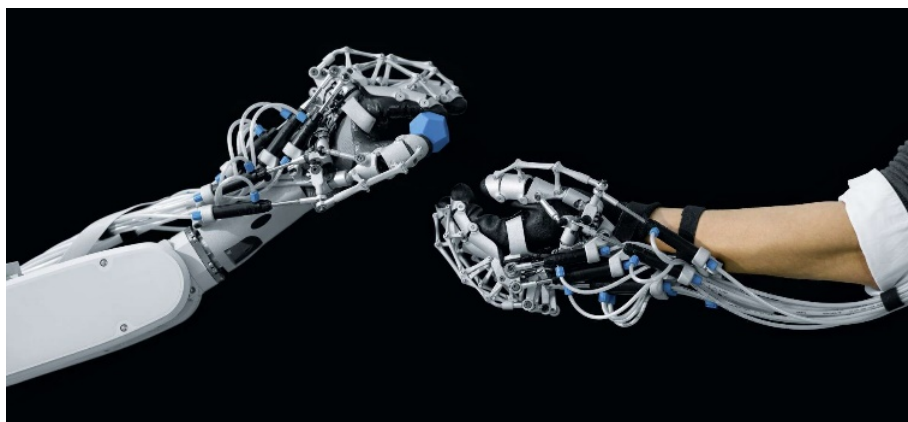


Figura 1. Exoesqueleto de mano Exohand.

Fuente: FESTO.

Sin embargo, la adopción de estos sistemas está más extendida en naciones tecnológicamente avanzadas, mientras que en el Perú persiste la falta de implementación de estas tecnologías debido a diversos factores, como la demografía, el aumento de la población adulta, limitaciones económicas, altos costos de adquisición, barreras geográficas, carencia de centros especializados y una falta de profesionales con conocimientos en este campo (6). Por lo tanto, se ha optado por desarrollar un exoesqueleto portátil y asequible, orientado a la rehabilitación pasiva de pacientes adultos, con énfasis en recuperar la movilidad en las falanges medial y proximal de los dedos de la mano.

1.1.1. Problema general

- ¿Cómo implementar y controlar un exoesqueleto para la rehabilitación de la mano en pacientes con discapacidad motora causada por ACV?

1.1.2. Problemas específicos

- ¿Qué investigaciones recientes se han hecho sobre la implementación y control de exoesqueletos de mano para pacientes con discapacidad motora por ACV?
- ¿Cuáles son los requisitos de diseño para implementar un exoesqueleto de mano que se ajuste a las necesidades anatómicas y limitaciones de los pacientes con discapacidad motora causada por ACV?
- ¿Cómo pueden las características anatómicas y biomecánicas de las manos de los pacientes con discapacidad motora causada por ACV ser utilizadas para implementar y controlar un exoesqueleto de mano?
- ¿Qué sistema de control permite un movimiento preciso de los dedos y la regulación del movimiento, adaptándose a las necesidades de los pacientes con discapacidad motora por ACV?
- ¿Cuáles son los resultados obtenidos al implementar y controlar el exoesqueleto de mano para la rehabilitación de pacientes con discapacidad motora causada por ACV?

1.2. Objetivos de la investigación

1.2.1. Objetivo general

- Implementar y controlar un exoesqueleto para la rehabilitación de la mano en pacientes con discapacidad motora causada por ACV.

1.2.2. Objetivos específicos

- Analizar las investigaciones más recientes sobre la implementación y control de exoesqueletos de mano para pacientes con discapacidad motora por ACV.
- Plantear los requisitos de diseño para implementar un exoesqueleto de mano que se ajuste a las necesidades anatómicas y limitaciones de los pacientes con discapacidad motora causada por ACV.
- Obtener las características anatómicas y biomecánicas de las manos de los pacientes con discapacidad motora causada por ACV y ser utilizadas para implementar y controlar un exoesqueleto de mano.
- Diseñar un sistema de control que permita el movimiento preciso de los dedos y la regulación del movimiento, adaptándose a las necesidades de los pacientes con discapacidad motora por ACV.
- Mostrar los resultados al implementar y controlar el exoesqueleto de mano para la rehabilitación de pacientes con discapacidad motora causada por ACV.

1.3. Justificación de la investigación

Tal y como se expuso en la descripción del problema, se evidencia un notable grupo de individuos que carecen de la posibilidad de acceder a tratamientos de rehabilitación dirigidos al miembro superior; aquellos que efectivamente están disponibles en el mercado tienden a ostentar costos prohibitivos. Dada esta circunstancia, surge la imperiosa necesidad de concebir un exoesqueleto con la capacidad de enriquecer sustancialmente la calidad de vida de aquellos individuos que han experimentado un accidente cerebrovascular (ACV), al tiempo que se logra mantener su asequibilidad financiera.

Desde una perspectiva informática, este enfoque adquiere una relevancia aún mayor. La convergencia de tecnologías como la inteligencia artificial, el análisis de datos y la biomecánica computacional facilita la creación de soluciones más efectivas y personalizadas en el ámbito de la rehabilitación. A través de la recopilación y el procesamiento de datos biométricos de los pacientes, se pueden diseñar algoritmos que adapten el funcionamiento del exoesqueleto de manera precisa a las necesidades individuales. Además, el uso de técnicas de fabricación digital, como la impresión 3D, ayuda a reducir los costos de producción, haciendo posible la creación de dispositivos de rehabilitación avanzados a un precio más accesible.

En consecuencia, la creación de un exoesqueleto factible y tecnológicamente respaldado se postula no solo como una solución viable desde la perspectiva médica y terapéutica,

sino también como una iniciativa que se nutre de los avances computacionales y la innovación tecnológica para abordar un desafío social de gran importancia.

1.4. Delimitaciones del proyecto

La investigación se concentra en la concepción de un exoesqueleto orientado a la rehabilitación de la funcionalidad de la mano en la secuela de un accidente cerebrovascular en el contexto peruano. El prototipo por desarrollar adopta la forma de un guante diseñado para albergar la extremidad afectada del paciente, marcando el punto de inicio del proceso terapéutico. La manipulación de las falanges será ejecutada mediante motores de control, los cuales serán sincronizados y gestionados por un microcontrolador. La implementación de esta tecnología permitirá regular y potenciar el espectro de movimientos durante el trayecto de rehabilitación, haciendo uso de un sistema activo-pasivo.

Es de importancia recalcar que esta propuesta se ajustara a la selección estratégica de los motores, basándose en parámetros tales como las revoluciones por minuto (RPM) o las dimensiones físicas. La fundamentación subyacente no radica en el diseño intrínseco de los motores, sino más bien en la elección informada de componentes óptimos que armonicen con los objetivos del dispositivo. Además, esta iniciativa se caracteriza por su enfoque inclusivo, al idear un prototipo de exoesqueleto que brinda sus beneficios a todas las personas, sin distinción de género, que han atravesado una experiencia de ACV.

En el contexto nacional, limitaciones específicas del Perú, es importante considerar factores como la accesibilidad a la atención médica y las tecnologías de rehabilitación. Dado que las zonas rurales o económicamente desfavorecidas pueden enfrentar desafíos en términos de disponibilidad y costo de equipos médicos avanzados, este enfoque podría encontrar obstáculos en su implementación y adopción. Sin embargo, la propuesta también puede ser vista como un promotor de conciencia y acción en la mejora de la atención médica y la accesibilidad a soluciones tecnológicas de rehabilitación en el país. En este sentido, la integración de la tecnología y la medicina presenta una oportunidad para abordar y superar estas limitaciones, en beneficio de la población que enfrenta retos en su proceso de recuperación.

No obstante, dado las limitaciones inherentes a la investigación, se buscará un enfoque colaborativo con una institución especializada en la rehabilitación neurológica, ya que, trabajar con personas que han sufrido un ACV presenta dificultades de acceso, requieren cuidados especiales y el seguimiento médico constante. Esta colaboración permitirá garantizar la seguridad y la integridad de los participantes, así como proporcionar el entorno adecuado para llevar a cabo las fases de prueba y validación del prototipo. De esta manera, se asegurará que los resultados obtenidos sean precisos y representativos de la

población objetivo, facilitando la evaluación de la funcionalidad y eficacia del exoesqueleto en condiciones reales de uso.

1.5. Hipótesis y variables

Hipótesis de Validación (H_i): La implementación y control de un exoesqueleto para rehabilitación en un paciente con discapacidad motora causada por un ACV hemorrágico mejora la funcionalidad de la mano afectada.

Hipótesis Nula (H_o): La implementación y control de un exoesqueleto para rehabilitación en un paciente con discapacidad motora causada por un ACV hemorrágico no mejora la funcionalidad de la mano afectada.

Hipótesis Alternativa (H_1): Existe una correlación positiva entre el proceso de rehabilitación del paciente con discapacidad motora causada por un ACV hemorrágico y la implementación y control de un exoesqueleto de mano personalizado.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación

En primer lugar, la investigación que lleva por nombre “Prototipo de un exoesqueleto robótico flexible para la rehabilitación activa de la mano en personas que han sufrido un ACV en Perú” (11), nos indica que el Accidente Cerebro Vascular (ACV) es una de las enfermedades que más afecta a los miembros superiores especialmente a las manos. Si un paciente con ACV no recibe rehabilitación de manera continua e inmediata, las posibilidades de desarrollar una parálisis permanente o distrofia muscular aumentan considerablemente. Debido a la falta de acceso de algunos pacientes a centros privados donde podrían recibir un tratamiento eficaz y constante con la ayuda de un terapeuta, se ha desarrollado un exoesqueleto flexible de rehabilitación muscular como una nueva alternativa de tratamiento.

El exoesqueleto diseñado incluye un modo de rehabilitación que abarca la flexión y el estiramiento de los dedos, así como el agarre de objetos con una fuerza promedio de 3.8 N. Este sistema entrena el área subcortical del cerebro, permitiendo que la rehabilitación sea efectiva y continua. Además, este dispositivo permite al paciente realizar un entrenamiento muscular de la mano en su propio hogar, como se muestra en la figura 2, reduciendo la necesidad de visitas frecuentes a un centro de salud.

Este exoesqueleto también facilita el entrenamiento de movimientos específicos como el agarre cilíndrico y el agarre de precisión, movimientos esenciales en las actividades cotidianas. De esta manera, se recupera la movilidad de la mano afectada en el entorno doméstico, aumentando las horas de entrenamiento y mejorando los resultados de la rehabilitación.

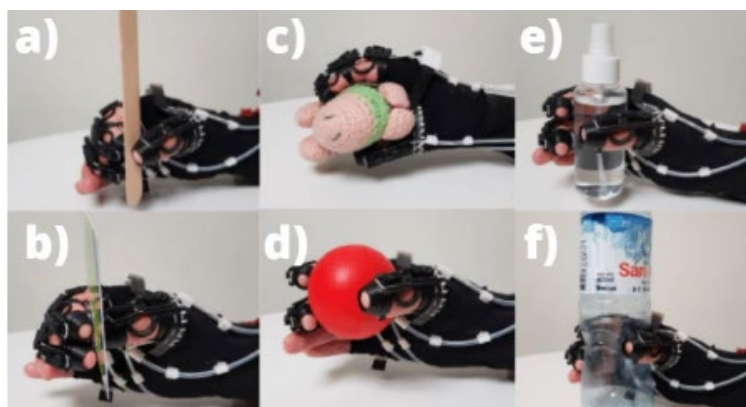


Figura 2. Prototipo de un exoesqueleto robótico flexible para la rehabilitación activa de la mano.

Fuente: Chirinos (11).

Posteriormente, el trabajo de investigación titulado “Diseño de un exoesqueleto de 3 grados de libertad para la rehabilitación del miembro superior derecho en pacientes con hemiplejía moderada” (12), presenta el diseño de un exoesqueleto para la rehabilitación del brazo derecho en pacientes con hemiplejía moderada, enfocado en proporcionar fisioterapia para el codo y la mano. La solución se dirige a personas que han sido afectadas por enfermedades degenerativas o accidentes cerebrovasculares que resultan en parálisis o pérdida de fuerza en el miembro superior. Profesionales de diversas áreas han explorado el uso de exoesqueletos para mejorar las terapias de rehabilitación.

El exoesqueleto diseñado en este proyecto busca reducir la flacidez del codo y la mano mediante movimientos de flexión y extensión, y está compuesto por un sistema mecánico, electrónico y de control como se muestra en la figura 3. Este dispositivo permite fortalecer los movimientos del codo y la mano en pacientes con hemiplejía moderada. El costo estimado para el diseño y fabricación del exoesqueleto, incluyendo el mecanismo de flexión-extensión, es de aproximadamente S/ 800.00 siendo esta una propuesta económica y que pueden adquirir distintos segmentos de la sociedad.

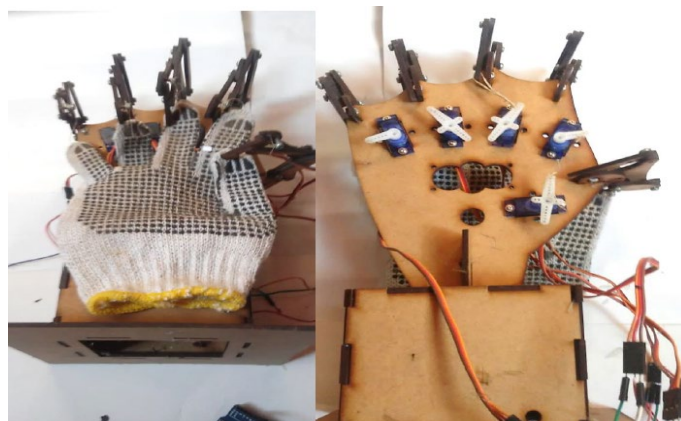


Figura 3. Diseño de exoesqueleto de 3 grados de libertad para la rehabilitación del miembro superior.

Fuente: Janampa (12).

En la siguiente investigación que lleva por nombre “Diseño de exoesqueleto para la rehabilitación de mano afectada con Artrosis” (13), se indica que los exoesqueletos son sistemas electro-mecánicos integrados a las extremidades del cuerpo humano, diseñados para mejorar significativamente la fuerza, velocidad y rendimiento. Este proyecto surge a partir de la identificación de un problema en la terapia física del país, centrado en la rehabilitación de las extremidades superiores, específicamente en los dedos de la mano.

La investigación se fundamenta en el análisis de estadísticas situacionales, visitas a centros de rehabilitación y la identificación de dos factores críticos: la limitación de personal para la atención personalizada y el acceso restringido a equipos tecnológicos avanzados. En

respuesta a estos desafíos, se diseñó un prototipo de exoesqueleto para la rehabilitación de manos afectadas por artrosis, capaz de realizar movimientos de apertura y cierre con la frecuencia y fuerza necesarias para pacientes con esta condición.

Para el diseño del prototipo, se aplicó una metodología integral y específica para diseños mecatrónicos creativos (ver figura 3), utilizando el método VDI2206. Este enfoque incluyó la enumeración de los requisitos del sistema, el diseño mecánico, electrónico y de control, y el modelado de cuatro abstracciones del sistema. Se realizó una cuidadosa selección de materiales mediante un proceso de comparación de alternativas, seguida del ensamblaje y validación del prototipo, garantizando su funcionalidad y eficacia para el propósito específico de la rehabilitación.

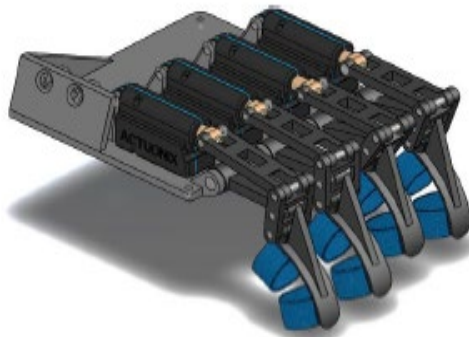


Figura 4. Diseño en CAD del exoesqueleto para rehabilitación de mano afectada por artrosis.

Fuente: Borja y Valencia (13).

En la investigación “Diseño de un exoesqueleto de mano para la auto-terapia asistida en base a un patrón de movimiento” (14), se muestra un panorama donde la tecnología y la robótica están influyendo en diversos campos, incluida la medicina de rehabilitación, mediante el uso de dispositivos mecánicos conectados a las extremidades humanas. A nivel mundial, varias empresas comercializan exoesqueletos para la mano, destinados a ayudar en la recuperación de movimientos cotidianos como agarrar y manipular objetos. Sin embargo, debido a que esta tecnología está en sus etapas iniciales, los exoesqueletos comerciales son costosos y ofrecen limitada libertad de movimiento en los dedos y la muñeca.

Para abordar esta situación, se plantea el desarrollo de un exoesqueleto de bajo costo que pueda ser adquirido por hospitales y personas en el Perú. Este dispositivo asistiría a los especialistas en rehabilitación en la realización de ejercicios con pacientes adultos mayores, permitiendo a los fisioterapeutas centrarse en analizar el progreso de la recuperación en lugar de ejecutar los ejercicios de manera exhaustiva.

El diseño propuesto del exoesqueleto para la rehabilitación de mano y muñeca emplea actuadores y mecanismos de 4 barras para garantizar un movimiento adecuado, sensores para verificar su correcto funcionamiento, y una interfaz usuario-máquina para controlar el inicio y el progreso del ejercicio, así como detener los movimientos en caso de emergencia. Como resultado, se ha obtenido un diseño preliminar del exoesqueleto junto con los componentes mecánicos y eléctricos necesarios como se muestra en la figura 5.

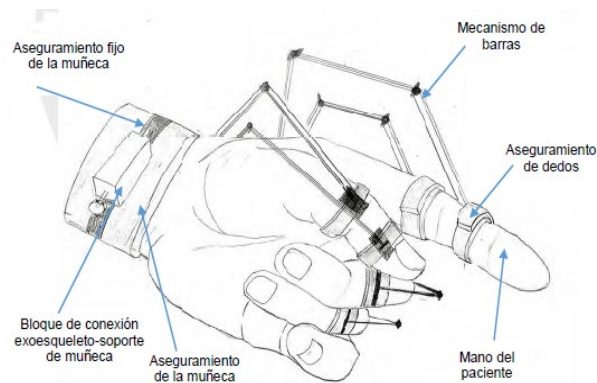


Figura 5. Diseño del exoesqueleto de mano para la auto-terapia.

Fuente: Huanca (14).

El estudio titulado "Exoesqueleto rehabilitador de mano mediante fibras musculares (SMA)" (15), aborda el desarrollo de un dispositivo destinado a la rehabilitación manual, empleando impresión 3D y fibras musculares artificiales SMA (ver figura 6). Estas fibras sustituyen a los actuadores convencionales, logrando un diseño más liviano y antropomórfico que optimiza la compatibilidad y portabilidad del exoesqueleto. El diseño conceptual se utilizó para determinar los requisitos eléctricos y mecánicos, empleando materiales como TPU y PLA en distintas partes del dispositivo.

El controlador B-PID, implementado en el exoesqueleto, demostró su eficacia al alcanzar la posición deseada con un sobre impulso máximo menor al 10%. Este controlador destaca por su simplicidad en la implementación comparado con otros controladores no lineales, facilitando su integración en el sistema. Los materiales seleccionados, como TPU para componentes flexibles y PLA para elementos rígidos, se manufacturaron mediante impresión 3D, permitiendo una producción más eficiente y personalizada.

Las pruebas realizadas en diversas etapas, como adquisición y acondicionamiento de señal, amplificación y comunicación confirmaron el funcionamiento adecuado del exoesqueleto. La tarjeta de control utilizada mostró una correcta comunicación, programación y actuación en los movimientos de flexión. Esto demuestra que el exoesqueleto rehabilitador de mano es una herramienta eficaz para mejorar la movilidad de los pacientes, ofreciendo una solución avanzada y práctica para la rehabilitación de las manos.

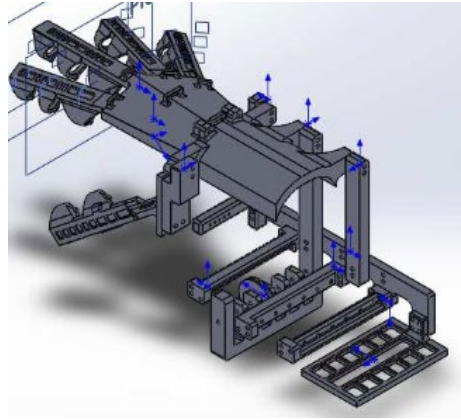


Figura 6. Diseño en CAD del exoesqueleto rehabilitador de mano mediante fibras musculares.

Fuente: Calderón (15).

Por otro lado, el artículo científico "Diseño y Construcción de un Prototipo de Exoesqueleto para Rehabilitación de Mano" (16), describe una solución avanzada en el ámbito de la rehabilitación médica, orientada a pacientes que han experimentado un ACV. Se ha concebido un exoesqueleto utilizando un mecanismo de cremallera y piñón simétrico, accionado mediante motores de corriente continua (DC).

Este diseño permite que el centro de rotación de las falanges coincida con el del mecanismo, aspecto fundamental para prevenir lesiones y asegurar una rehabilitación eficiente, de esta forma, el exoesqueleto logra replicar los rangos de movimiento de una mano sana, facilitando la creación de rutinas de rehabilitación más efectivas (integrando factores de ergonomía, funcionalidad, diseño para ensamblaje y manufactura). Asimismo, se utilizó MATLAB para realizar simulaciones numéricas del análisis cinemático del dispositivo, optimizando así su diseño antes de proceder con la construcción del prototipo.

Finalmente, se llevó a cabo la fabricación y las pruebas preliminares del prototipo, evaluando su ajuste y funcionalidad en sujetos sanos, tal como se muestra en la siguiente figura. Estas pruebas demostraron que el dispositivo puede lograr movimientos independientes de los dedos, manteniendo la alineación adecuada con las articulaciones humanas. Aunque el diseño presentado es una primera aproximación y susceptible de mejoras, ofrece una base sólida para desarrollos futuros en exoesqueletos de rehabilitación de mano, con el potencial de incluir sistemas avanzados de instrumentación y control para pruebas en casos clínicos reales.

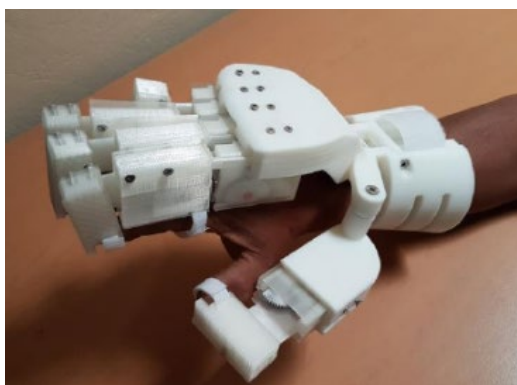


Figura 7. Diseño y construcción de un prototipo de exoesqueleto para rehabilitación de mano.

Fuente: De la Cruz, Arias y Lugo (16).

Finalmente, se presenta un estudio titulado "*Subject-specific assist-as-needed controllers for a hand exoskeleton for rehabilitation*" (17). Este estudio propone un sistema compuesto por tres módulos diseñados para la rehabilitación de los dedos índice, medio y anular. El enfoque se centra en las articulaciones metacarpofalángicas e interfalángicas, y utiliza un control basado en redes neurales y un sistema adaptativo de asistencia. La representación del exoesqueleto se muestra en la figura 8. El objetivo de esta investigación era desarrollar y evaluar dos controladores específicos para un exoesqueleto de mano, con el fin de mejorar la rehabilitación neuromuscular. Se buscaba comparar el control basado en campos de fuerza aprendidos con el control adaptativo de asistencia según sea necesario, y determinar cuál es más adecuado para diferentes tipos de lesiones neuromusculares.

El estudio utilizó un exoesqueleto de mano llamado "Maestro" y se llevaron a cabo experimentos con sujetos sanos y sujetos con exoesqueletos endurecidos para simular diferentes condiciones de lesiones neuromusculares. Se implementaron dos enfoques de control: control basado en campos de fuerza aprendidos y control adaptativo de asistencia según sea necesario. Se realizaron mediciones de torque y ángulo en las articulaciones del exoesqueleto, y se emplearon redes neuronales para predecir los torques articulares a partir de los ángulos articulares.

Los experimentos realizados con el exoesqueleto de mano "Maestro" demostraron que tanto el control basado en campos de fuerza aprendidos como el control adaptativo de asistencia según sea necesario lograron un alto nivel de coordinación en las articulaciones del exoesqueleto. La predicción de los torques articulares a partir de los ángulos articulares mostró bajos errores medios cuadrados para ambos enfoques de control.

Como conclusión, se determinó que el control adaptativo de asistencia según sea necesario es más adecuado cuando se requiere un seguimiento preciso de las trayectorias articulares deseadas en tareas críticas en tiempo real.

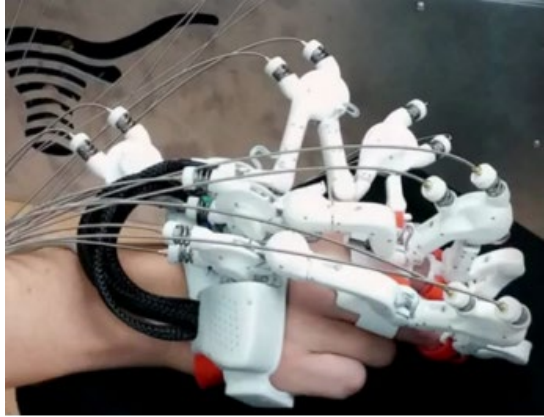


Figura 8. Exoesqueleto de mano con control asistido.

Fuente: Agarwal y Deshpande (17).

2.2. Definición de términos básicos

2.2.1. Exoesqueleto

El concepto de "exoesqueleto" encuentra su origen en la biología de los invertebrados y artrópodos, haciendo referencia a una estructura rígida y resistente que cubre el cuerpo de estos organismos, según lo señalado por Chávez *et al.* (18). En el ámbito de la ingeniería, los exoesqueletos se refieren a estructuras externas que recubren el cuerpo humano con el propósito de brindar apoyo al usuario en diversas acciones. Esto ha llevado a su aplicación en una amplia variedad de campos, como el ámbito militar, industrial, de entretenimiento y, especialmente, en el campo de la salud, donde ha resultado beneficioso en el desarrollo de herramientas especializadas para la rehabilitación y recuperación de pacientes, facilitando el trabajo de los profesionales médicos (18).

El sistema robótico que se menciona cuenta con una tecnología electromecánica y puede ser utilizado como una prenda que se coloca sobre el cuerpo del usuario, específicamente en la mano, tal como se muestra en la figura 9. A este tipo de dispositivos se les atribuye el término "*wearable*". Estos exoesqueletos proporcionan apoyo y asistencia en los movimientos, así como el fortalecimiento de las capacidades físicas del cuerpo humano. Su diseño se basa en encontrar los parámetros, formas y funciones del cuerpo humano, lo que permite el desarrollo de articulaciones y armazones con medidas antropomórficas específicas para cada usuario que lo porte y al que estará adaptado (19).

En los exoesqueletos, se representa una interesante y prometedora tecnología que combina los principios biológicos con la ingeniería para mejorar la calidad de vida de las personas y brindar nuevas posibilidades en el ámbito de la salud y la asistencia

física. La aplicación de estos dispositivos portátiles permite un enfoque más personalizado y adaptado a las necesidades individuales de cada usuario, lo que contribuye significativamente en su bienestar.



Figura 9. Exoesqueleto de mano ExoHand.

Fuente: FESTO.

En la actualidad, los exoesqueletos tienen presencia en varios campos, como mejorar la precisión y habilidad con armas, agilizar el transporte y levantar cargas pesadas con menor esfuerzo en actividades militares e industriales, respectivamente. También, en el ámbito de la rehabilitación, estos sistemas robóticos ayudan a pacientes con discapacidad física a recuperar parcial o totalmente la movilidad del miembro afectado, dependiendo del tipo de trabajo kinesiológico (20).

Los exoesqueletos de rehabilitación pueden operar en dos modos principales: el activo, donde el paciente realiza los ejercicios de movilidad a través del exoesqueleto con la transmisión de información mediante señales eléctricas, como impulsos mioeléctricos que generan la actividad eléctrica muscular mediante electrodos y comunicación de señales cerebrales; y el pasivo, donde los movimientos están preprogramados y son controlados por el especialista para que el exoesqueleto realice los ejercicios de rehabilitación del miembro del paciente, por ejemplo, en casos de recuperación de movilidad después de un ACV (18).

Este tipo de exoesqueletos se conciben a través de disciplinas como la física, mecánica, electrónica y medicina. En este trabajo de investigación, se propone un dispositivo externo ubicado en la mano, que modifique los rangos estructurales del sistema neuromusculoesquelético y recupere la actividad locomotriz en las falanges medial y distal del paciente. Enríquez, Narváez y Vivas (21) proponen un modelo de exoesqueleto de rehabilitación para la mano, con un grado de libertad activo y pasivo en la articulación metacarpofalángica e interfalángica proximal, respectivamente, permitiendo al paciente sujetar y transportar objetos, así como

abrir y cerrar la mano de manera natural (21). La figura 10 muestra una representación visual de este concepto.

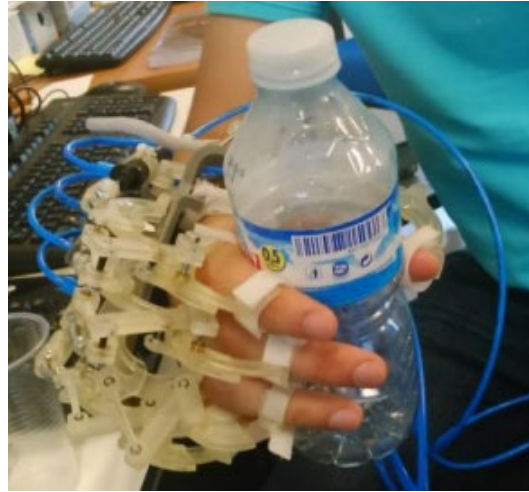


Figura 10. Exoesqueleto de mano agarrando una botella.

Fuente: Enríquez *et al.* (21).

2.2.2. Accidente cerebrovascular

El accidente cerebrovascular, comúnmente conocido como ACV, ocurre debido a la ruptura de vasos sanguíneos, tal como se ilustra en la figura 11, o a la formación de coágulos de sangre que bloquean el flujo adecuado de sangre en una región específica del cerebro. Esto provoca la pérdida de nutrientes y una disminución en el suministro de oxígeno. A nivel global, el ACV es uno de los principales factores de discapacidad, y en el Perú, constituye la principal causa de invalidez permanente en la población adulta (4). Según la definición de la Organización Mundial de la Salud, se considera como "un síndrome clínico de inicio rápido debido a una disfunción cerebral focal de origen vascular y de más de 24 horas de duración" (22).

El ACV afecta a una gran cantidad de personas en todo el mundo y es una de las principales causas de discapacidad. Los individuos que sufren un ACV pueden experimentar una amplia variedad de síntomas y secuelas, incluyendo la pérdida de habilidades motoras y dificultades en el habla. A pesar de la importancia de la rehabilitación en el proceso de recuperación, la atención y el acceso a los servicios de rehabilitación han sido limitados, especialmente en naciones como el Perú, donde la falta de recursos y la escasez de centros especializados dificultan la disponibilidad de rehabilitación (6). Es esencial mejorar la atención médica y buscar soluciones innovadoras para mejorar la calidad de vida de los pacientes que han padecido un ACV.

Se ha reportado que la tasa de mortalidad en pacientes que experimentan un primer episodio de enfermedad cerebrovascular (ECV) es del 11.1 %. Según el artículo titulado "la enfermedad cerebrovascular en el Perú: estado actual y perspectivas de la investigación clínica", a nivel nacional una tasa de mortalidad del 19.6 % en pacientes hospitalizados por ECV a lo largo del año 2011. La población de adultos mayores es la más afectada, con una prevalencia del 6.8 % en áreas urbanas y del 2.7 % en áreas rurales (7).

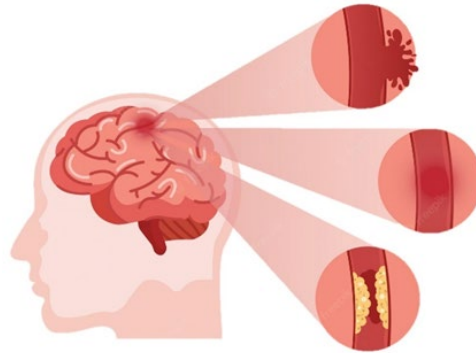


Figura 11. Ruptura del vaso sanguíneo en un ACV.

Fuente: Eurofarma.

2.2.3. Anatomía de la mano

La articulación de la muñeca está formada por los extremos distales del radio y el cubito, junto con los huesos carpianos. Esta estructura presenta tres articulaciones principales conocidas como la articulación radiocarpiana, medio carpiana y radio cubital distal (23).

Estas articulaciones son responsables de permitir movimientos en tres planos principales, tal como se ilustra en la figura 11. En el plano sagital, se encuentran la flexión, que tiene un rango de movimiento de aproximadamente 80-85°, y la extensión, que alcanza una amplitud de extensión de unos 75°. El plano frontal abarca la desviación cubital con un rango de movimiento entre 30-35°. Por último, en el plano transversal, se llevan a cabo la supinación y pronación, con un movimiento de aproximadamente 90° (23).

En conjunto, esta compleja articulación proporciona una amplia variedad de movimientos y flexibilidad, lo que permite a las personas realizar una gran cantidad de actividades diarias y tareas específicas que requieren una precisión y coordinación fina en la manipulación de objetos.



Figura 12. Movimientos de la mano.

Fuente: Anatomía Clínica.

2.2.4. Articulación

Una articulación, como menciona Gonzáles (24), es un elemento esencial en los sistemas robóticos que actúa como la conexión móvil entre los eslabones, permitiendo el movimiento, tanto lineal como no lineal, entre ellos. En este contexto, existen dos tipos principales de uniones que definen los diferentes grados de libertad del robot. La primera es la unión revoluta (R), que facilita una rotación pura entre dos eslabones conectados, permitiendo que el robot pueda girar alrededor de un eje específico. La segunda es la unión prismática (P), que posibilita el deslizamiento lineal entre los dos eslabones enlazados, permitiendo que el robot pueda moverse en una dirección recta.

En resumen, las articulaciones son componentes esenciales para permitir la movilidad y funcionalidad de los robots, y comprender sus diferentes tipos es crucial para el diseño y la implementación de sistemas robóticos eficientes y específicos para tareas particulares.



Figura 13. Articulaciones de la mano.

Fuente: Alamy.

2.2.5. Grados de libertad (DoF)

El concepto de grado de libertad, tal como lo describe Gonzáles (24), es fundamental en el campo de la robótica y la ingeniería mecánica. Se refiere al número de actuadores necesarios para controlar y permitir el movimiento completo de un mecanismo o sistema robótico. En otras palabras, cuantifica la cantidad de direcciones independientes en las que un robot puede moverse o realizar diferentes tareas.

El grado de libertad es un factor crucial en el diseño de robots para tareas específicas. Un sistema con un número óptimo de grados de libertad puede mejorar la precisión y eficiencia de las operaciones robóticas, permitiendo adaptarse mejor a las demandas de distintas aplicaciones industriales y científicas.

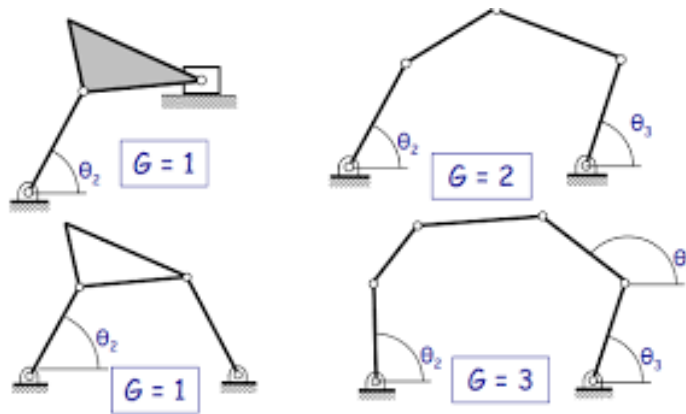


Figura 14. Ejemplo de grados de libertad.

Fuente: Dynadata.

2.2.6. Modelamiento matemático

El concepto teórico, como se señala, se refiere a la relación entre el concepto práctico y su fundamentación matemática. El análisis de las interacciones entre dos o más variables mediante modelos matemáticos es esencial para comprender y explicar fenómenos físicos cotidianos y, en particular, para abordar cuestiones relacionadas con la robótica.

En el ámbito de la robótica, hay diversos métodos para obtener la cinemática de un brazo o sus componentes. Uno de los enfoques más comunes y simples es el propuesto por Denavit-Hartenberg, que utiliza transformaciones matriciales homogéneas para describir y calcular las configuraciones y movimientos de los brazos robóticos (25).

En definitiva, la interacción entre el concepto teórico y las herramientas matemáticas juega un papel esencial en el desarrollo de la robótica. Los distintos métodos, ofrecen enfoques complementarios para abordar los desafíos de la cinemática y la dinámica en el diseño y control de robots. Estas herramientas matemáticas son fundamentales para avanzar en la comprensión y aplicación de la robótica en diversos campos.

2.2.7. Ergonomía

La ergonomía, según la definición expuesta por Garcés (26), representa una disciplina científica que se dedica a analizar datos biológicos y tecnológicos con el propósito de abordar los retos de la adaptación mutua entre el ser humano y el entorno en el que se desenvuelve, particularmente enfocada en la relación entre el individuo y la maquinaria. Este conocimiento aporta información esencial sobre las restricciones relacionadas con posturas, movimientos y conformaciones físicas.

Específicamente, en el ámbito de la ergonomía, se identifican aspectos cruciales que influyen en la relación entre el cuerpo humano y la máquina. Entre estos aspectos destacan la gravedad, la inercia y las fuerzas que afectan tanto la postura estática como la dinámica del individuo al interactuar con la máquina.

En esencia, la ergonomía es esencial para diseñar y adaptar dispositivos y sistemas tecnológicos para que se ajusten de manera óptima a las capacidades y limitaciones del ser humano. Un enfoque adecuado de ergonomía asegura que las personas puedan interactuar de manera cómoda y segura con las máquinas y equipos, evitando así posibles problemas de salud y mejorando la eficiencia y satisfacción en el uso de la tecnología.

2.2.8. Rehabilitación

La rehabilitación es un procedimiento en el cual el paciente se somete a una secuencia de terapias físicas con la meta de progresar y alcanzar progresivamente una mayor independencia física, superando las limitaciones que pueda haber tenido inicialmente. Para lograr esto, se emplean ejercicios físicos que fomentan tanto los movimientos pasivos como los activos del individuo.

En este proceso, el objetivo principal es mejorar la funcionalidad y calidad de vida del paciente, especialmente aquellos que han experimentado lesiones, discapacidades o enfermedades que afectan su movilidad y habilidades físicas (27). La rehabilitación es aplicada en diversos campos de la medicina, como la rehabilitación neurológica, ortopédica y cardiovascular, entre otros.

Cada programa de rehabilitación es personalizado y adaptado a las necesidades específicas del paciente, considerando su estado de salud, grado de afectación y objetivos a alcanzar. A través de la perseverancia y el trabajo constante, la rehabilitación ayuda a los individuos a recuperar la autonomía en sus actividades diarias y reintegrarse a la sociedad de una manera más completa y funcional.

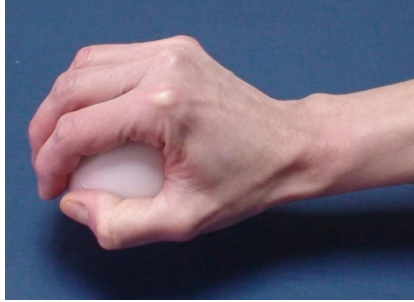


Figura 15. Trabajo de la movilidad de la mano y evitar retracciones.
Fuente: Emalbacete.

2.3. Modelamiento de la mano

Basándose en la representación gráfica adquirida en el capítulo precedente, se establecen los parámetros correspondientes a Denavit-Hartenberg para las cadenas cinemáticas que conforman la estructura de la mano. El proceso se lleva a cabo siguiendo una metodología que comienza con el análisis de los dedos trifalángicos: el índice, medio, anular y meñique (23).

Tabla 1. *Parámetros Denavit-Hartenberg.*

GdL	$\theta_{i,j}$	$d_{i,j}$	$a_{i,j}$	$\alpha_{i,j}$
1	θ_i, Cmc	0	Li, Me	$-\frac{\pi}{2}$
2	$\theta_i, \text{Mcp_a}$	0	0	0
3	$\theta_i, \text{Mcp_a}$	0	Li, P	$\frac{\pi}{2}$
4	θ_i, Pip	0	Li, Mi	0
5	θ_i, Dip	0	Li, D	0

Fuente: Rodríguez (23).

Donde:

- $\theta_{i,j}$ = ángulo desde X_{i-1} hasta X_i , girando alrededor de Z_i
- $d_{i,j}$ = distancia entre ejes Z_{i-1} y Z_i
- $a_{i,j}$ = ángulo desde Z_{i-1} hasta Z_i , girando alrededor de X_i
- $\alpha_{i,j}$ = distancia entre ejes X_{i-1} y X_i
- El subíndice i representa la cadena cinemática analizada (dedo), por efectos de análisis se conserva de esta forma.

Se obtiene una expresión P_i que expresa una matriz que contiene la posición y orientación del extremo del efector final para los dedos índice, medio, anular y meñique. Se expresa P_i en la ecuación 1.

$$P_i = {}^{-1}_0T_i(u_i) * {}^0_5T_i(\theta_{i,j}) \quad (1)$$

- ${}^{-1}_0T_i(u_i)$ = la matriz de transformación correspondiente a u_i , el cual representa el vector de aproximación, desde la referencia de la muñeca de la mano hasta el inicio de la cadena cinemática del dedo.
- ${}^0_5T_i(u_i)$ = la matriz que contiene a su vez las matrices de transformación homogéneas que representan la cadena cinemática, desde su inicio hasta la respectiva punta del dedo.

Por tanto ${}^0_5T_i(\theta_{i,j})$ puede expresarse como:

$${}^0_5T_i(\theta_{i,j}) = {}^0_1T_i(\theta_{i,CMC}) * {}^1_2T_i(\theta_{i,MCP_a}) * {}^2_3T_i(\theta_{i,MCP_f}) * {}^3_4T_i(\theta_{i,PIP}) * {}^4_5T_i(\theta_{i,DIP}) \quad (2)$$

Para determinar cada uno de los elementos que componen la matriz ${}^0_5T_i(\theta_{i,j})$ (ecuación 2), se parte de la forma general de presentar los parámetros de Denavit-Hartenberg en una matriz homogénea expresada en la ecuación 3.

$$T_i(\theta_{i,j}) = \begin{bmatrix} c(\theta_{i,j}) & -s(\theta_{i,j}) * c(\alpha_{i,j}) & s(\theta_{i,j}) * s(\alpha_{i,j}) & a_{i,j} * c(\theta_{i,j}) \\ s(\theta_{i,j}) & c(\theta_{i,j}) * c(\alpha_{i,j}) & -c(\theta_{i,j}) * s(\alpha_{i,j}) & a_{i,j} * s(\theta_{i,j}) \\ 0 & s(\alpha_{i,j}) & c(\alpha_{i,j}) & d_{i,j} \\ 0 & 0 & 0 & 4 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Sustituyendo $T_i(\theta_{i,j})$ (Ecuación 2) para cada una de las juntas se obtiene:

- Juntura entre los puntos de análisis 2-3 (Falange Proximal - Flexión):

$${}^2_3T_i(\theta_{i,MCP_f}) = \begin{bmatrix} c(\theta_{i,MCP_f}) & -s(\theta_{i,MCP_f}) & 0 & L_i p * c(\theta_{i,MCP_f}) \\ s(\theta_{i,MCP_f}) & c(\theta_{i,MCP_f}) & 0 & L_i p * s(\theta_{i,MCP_f}) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

- Juntura entre los puntos de análisis 3-4 (Falange Media):

$${}^3_4T_i(\theta_{i,PIP}) = \begin{bmatrix} c(\theta_{i,PIP}) & -s(\theta_{i,PIP}) & 0 & L_i M_i * c(\theta_{i,PIP}) \\ s(\theta_{i,PIP}) & c(\theta_{i,PIP}) & 0 & L_i M_i * s(\theta_{i,PIP}) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

- Juntura entre los puntos de análisis 4-5 (Falange Distal):

$${}^4_5T_i(\theta_{i,DIP}) = \begin{bmatrix} c(\theta_{i,DIP}) & -s(\theta_{i,DIP}) & 0 & L_i D * c(\theta_{i,DIP}) \\ s(\theta_{i,DIP}) & c(\theta_{i,DIP}) & 0 & L_i D * s(\theta_{i,DIP}) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

2.4. Marco conceptual

Se van a abordar conceptos importantes de los cuales se usarán más adelante para elaborar las matrices de solución.

2.4.1. Actuadores

Los dispositivos actuadores constituyen componentes esenciales en sistemas mecatrónicos, encargados de transformar señales de control en acciones mecánicas. Estos elementos, que comprenden motores eléctricos, hidráulicos, neumáticos y piezoeléctricos, posibilitan la generación de fuerzas y movimientos altamente precisos con el propósito de ejecutar tareas específicas. La función primordial de los actuadores radica en la contribución crucial al control y funcionamiento de sistemas mecatrónicos al conceder la habilidad de reacción y acción necesaria para cumplir con las demandas del sistema (28). Por tanto, la selección y diseño adecuados de los actuadores se vuelven elementos determinantes para lograr un control eficaz y eficiente en aplicaciones mecatrónicas.

2.4.1.1. Motor-microreductor

El micromotorreductor, una combinación de motor y reductor, ajusta la velocidad y el par para equipos mecánicos. Optimiza los motores de CC en automatización y es ensamblado por fabricantes especializados en motores de engranajes (29). Se elige este componente para el prototipo de exoesqueleto debido a su fácil adquisición y menores costos en el mercado nacional.



Figura 16. Motor-microreductor Pololu.

Fuente: Sicma.

Tabla 2. *Datasheet*.

Características	Valor
Voltaje	12 V
Amperaje	750 mA
Relación	150:1 RPM
Torque	1.3 (kg/cm)
Dimensiones	9 mm de largo x 3 mm de ancho

Fuente: Gruposstore.

2.4.1.2. Mini relé

Este componente es ideal para el prototipo de exoesqueleto por su capacidad para manejar corrientes elevadas con control preciso, es decir, es un interruptor electromagnético que controla circuitos de mayor corriente, operado por una pequeña corriente. Gracias a su estructura interna, una bobina de alambre interna que se transforma en imán temporalmente al paso de la corriente (30). Adicionalmente, el bajo costo en el mercado nacional hace que sea un recurso accesible.



Figura 17. Relé electromagnético 5 pines.

Fuente: Grupoelctrostore.

Tabla 3. *Datasheet*.

Características	Valor
Voltaje	12 V
Resistencia de la bobina	70 Ω aprox.
Capacidad de Contacto	NA: 10A/125VAC - NC:10A/28VDC
Pines	5
Dimensiones	19 x 15 x 15.5 mm

Fuente: Grupoelctrostore.

Para más detalles, consultar el anexo 3, donde se proporciona información específica de las datas de cada componente de forma individual.

2.4.2. Microcontrolador

Para el desarrollo de este prototipo, un microcontrolador del tipo Arduino es especialmente adecuado debido a su practicidad en la codificación y su extensa documentación, lo que facilita la implementación y el ajuste del dispositivo. Además, su uso se extiende a una variedad de aplicaciones, incluyendo electrodomésticos, vehículos, instrumentos médicos y sistemas de seguridad, etc. Este componente integra una CPU, memoria y periféricos de entrada/salida en un solo chip, lo que permite la regulación y supervisión de diversas operaciones en sistemas electrónicos. Los microcontroladores pueden programarse para captar datos de sensores, procesar información y controlar actuadores. Sus atributos compactos, eficiencia energética y flexibilidad lo convierten en una elección valorada en ingeniería mecatrónica (31).

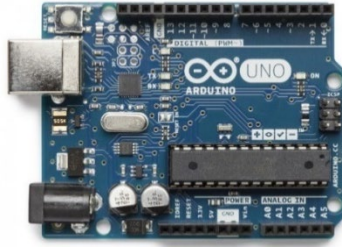


Figura 18. Ejemplo de un microcontrolador - Arduino.

Fuente: Hetpro.

Tabla 4. *Datasheet*.

Características	Valor
Voltaje	7 - 12 V
Amperaje	500 mA
Microcontrolador	ATmega328P
Dimensiones	68.6 mm x 53.4 mm

Fuente: Arduino.

2.4.3. Impresión 3D

Este procedimiento de manufactura aditiva se caracteriza por su capacidad para confeccionar objetos tridimensionales a partir de una representación digital. A través del uso de una impresora 3D, se efectúa la deposición de material estrato tras estrato para edificar el objeto objetivo. Esta tecnología brinda beneficios notables en términos de flexibilidad de diseño, personalización y la rápida obtención de prototipos. El proceso de impresión 3D ha encontrado una amplia gama de aplicaciones en distintos sectores, que engloban desde la industria y la medicina hasta la arquitectura y la educación, posibilitando la creación eficaz y precisa de piezas y modelos de alta complejidad (32).

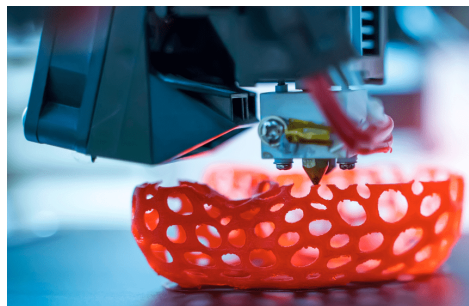


Figura 19. Ejemplo de impresión 3D.

Fuente: Autodesk.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

El presente capítulo expone los requisitos esenciales del sistema y presenta una propuesta conceptual de resolución basada en las tecnologías ya disponibles. Además, se detalla la metodología seguida en el desarrollo de esta investigación.

3.1. Diseño metodológico

3.1.1. Metodología de la investigación

La metodología seleccionada para avanzar en el desarrollo del exoesqueleto será la VDI-2206, la cual se centra en la tarea en cuestión y se dedica al diseño del sistema de rehabilitación dirigido a individuos que han sufrido un ACV, a través de un enfoque basado en la retroalimentación y sus requerimientos (véase el capítulo 3.2 para más detalle).

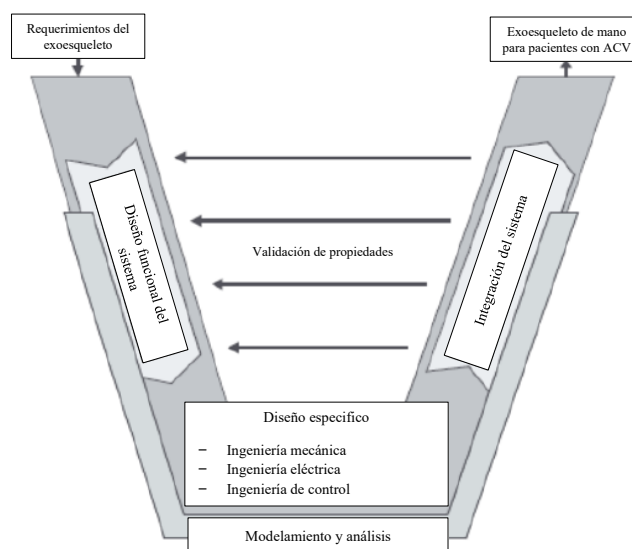


Figura 20. Modelo V de investigación.

3.1.2. Tipo de la investigación

La presente investigación adopta un enfoque tecnológico, con el objetivo de aplicar los conocimientos adquiridos para formular una propuesta concerniente a un sistema robótico que mejore la calidad de vida de individuos, particularmente pacientes que enfrentan restricciones de movilidad debido a un ACV.

En este sentido, se emplearán los saberes que abarcan los tres dominios de la ingeniería mecatrónica: mecánica, electrónica y control, con el propósito de concebir un diseño de prototipo portátil para un exoesqueleto destinado a la mano.

3.1.3. Alcance de investigación

El proyecto de investigación se centrará en un enfoque de descripción, debido a que, se recopilarán datos de la persona que ha sufrido un ACV a través de la realización de ejercicios repetitivos programados entre sesiones, estos son la acción de cerrar la mano y posteriormente abrirla. Esto permitirá mejorar el diseño del prototipo y adaptarlo a las necesidades de rehabilitación activa y pasiva del individuo afectado.

3.1.4. Unidad de investigación

El núcleo de investigación primordial en el proyecto es el prototipo del exoesqueleto de mano, ya que todas las deliberaciones se centran en su evolución y en la formulación de una propuesta de diseño innovadora y pertinente.

3.2. Metodología de la investigación

Cuando se trata de colaborar con adultos que han experimentado un ACV, es imperativo definir los siguientes criterios esenciales: medidas físicas basadas en las dimensiones de la mano (tales como las dimensiones interfalángicas) y parámetros mecánicos (como tamaño, forma y peso) que puedan facilitar la emulación de los movimientos naturales del miembro afectado.

El objetivo principal del sistema consiste en configurar sus atributos de acuerdo con los requisitos previamente indicados. A continuación, se detallarán las diversas componentes del diseño que contribuirán al cumplimiento de dichos requisitos.

- Diseño mecánico: se opta por determinar tanto el tipo de articulación como el modo de movimiento (activo o pasivo) que será aplicado en la concepción del exoesqueleto.
- Diseño electrónico: se procede a la selección de los elementos fundamentales del sistema, en este caso, los actuadores y sensores. Esta elección resultará fundamental para asegurar un rendimiento óptimo, y luego se procederá al desarrollo de la placa electrónica correspondiente.
- Diseño de control: se realiza la elección de la interfaz de control y comunicación, con la intención de construir un sistema que pueda ser activado y desactivado a través de un ajuste de ganancias.

Tras completar las tres funciones esenciales del sistema, se avanzará hacia su integración y verificación de los requisitos estipulados. Esta etapa se respaldará mediante la aplicación de simulaciones y análisis utilizando Fusion 360. La utilización de esta herramienta permitirá la elaboración definitiva del diseño del exoesqueleto, siguiendo además las etapas subsiguientes.

3.2.1. Fase de especificaciones

Se establecerán los puntos de inicio y culminación del proyecto, abarcando así los dos extremos del ciclo, y se conformarán mediante un análisis sistemático de los requisitos. En esta instancia, se enfocará en las dimensiones antropométricas de la mano del paciente y las diversas variaciones que puedan surgir.

3.2.2. Definir funciones

Frecuentemente se caracteriza como la generación de una "caja negra", puesto que involucra la concepción de la estructura y las funcionalidades del sistema. Un modelo de esta "caja negra" se exhibe en la figura 21.

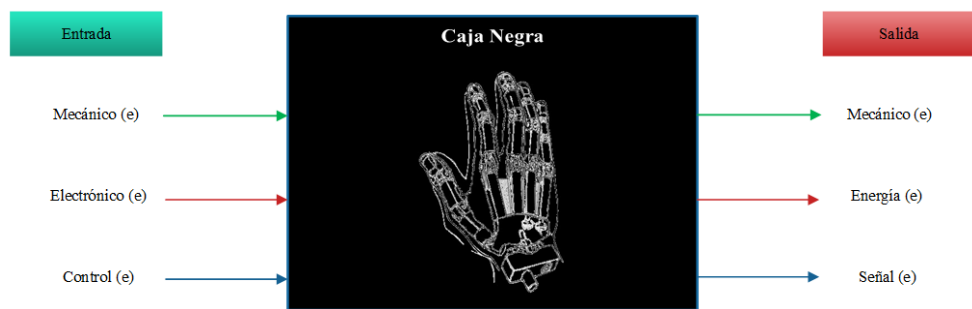


Figura 21. Modelo de la caja negra.

3.2.3. Definir componentes del diseño

En esta fase, se determinan los elementos que conformarán tanto el diseño mecánico como el electrónico y de control del exoesqueleto como sistema integrado. Esta selección garantizará una experiencia excepcional para el paciente.

3.2.4. Etapa de codificaciones

Se procederá a la integración de los elementos del diseño, asegurando su alineación con las especificaciones y funciones necesarias para la creación de un modelo tridimensional. A continuación, se presenta el diseño estructural que servirá como base para la construcción del prototipo de exoesqueleto de mano dirigido a pacientes que han experimentado un ACV.

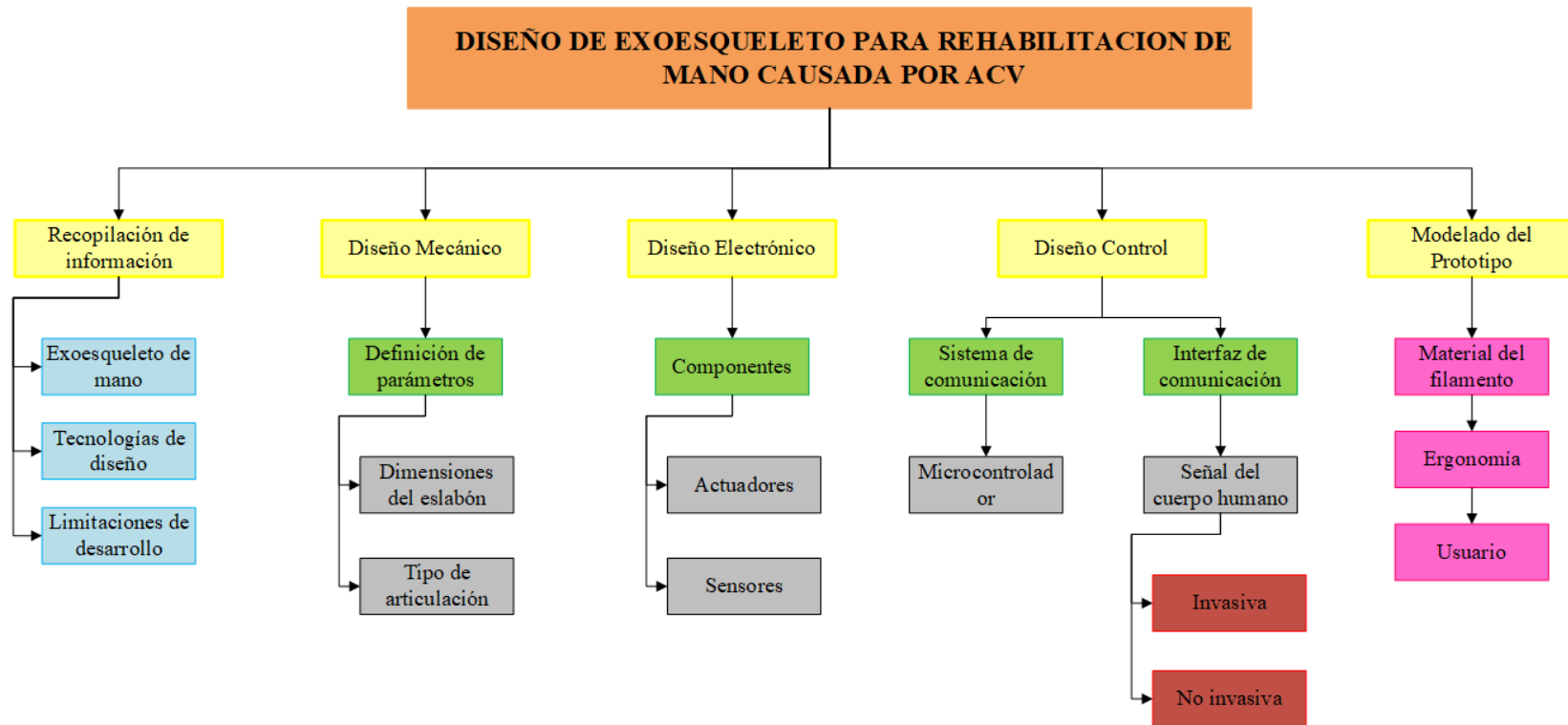


Figura 22. Diagrama de diseño del exoesqueleto de mano.

3.3. Lista de exigencias

En concordancia con las etapas previamente indicadas, se procederá a la adecuación de estas fases al contexto y requisitos del sistema actual, detallando de manera más exhaustiva su estructura funcional.

En la tabla subsiguiente, se presenta un compendio de investigaciones científicas llevadas a cabo hasta la fecha en relación con dispositivos de asistencia destinados a la rehabilitación de la mano. Este análisis tiene como propósito establecer los fundamentos sobre los cuales se cimentará la propuesta de diseño para el exoesqueleto.

Tabla 5. *Investigaciones usadas en este trabajo de investigación.*

Nro.	Nombre de la investigación
1	Prototipo de un exoesqueleto robótico flexible para la rehabilitación activa de la mano en personas que han sufrido un ACV en Perú.
2	Diseño de un exoesqueleto de 3 grados de libertad para la rehabilitación del miembro superior derecho en pacientes con hemiplejía moderada.
3	Diseño de exoesqueleto para la rehabilitación de mano afectada con Artrosis.
4	Diseño de un exoesqueleto de mano para la auto-terapia asistida en base a un patrón de movimiento.
5	Exoesqueleto rehabilitador de mano mediante fibras musculares (SMA).
6	Diseño y Construcción de un Prototipo de Exoesqueleto para Rehabilitación de Mano.
7	Subject-Specific Assist-as-Needed Controllers for a Hand Exoskeleton for Rehabilitation.

A continuación, se presenta una enumeración de requisitos esenciales para el éxito del proyecto. Estos criterios han sido establecidos a partir de un análisis exhaustivo de las necesidades de los pacientes con ACV y los aspectos tecnológicos requeridos para el exoesqueleto propuesto. Los requisitos abarcan desde especificaciones anatómicas hasta aspectos técnicos como la elección de materiales y la seguridad en el diseño. Cumplir con estas exigencias asegurará un producto funcional y efectivo en la rehabilitación, con un impacto positivo en la calidad de vida de los pacientes. Este listado se ha elaborado siguiendo altos estándares de calidad y prácticas médicas e ingenieriles, buscando satisfacer las expectativas de todos los involucrados, desde profesionales de la salud hasta pacientes y sus familias.

Tabla 6. Lista de exigencia del exoesqueleto de mano.

Lista de exigencias		Fecha: 12 - 10 - 2023
Proyecto:	Exoesqueleto de mano	Revisado: J.H.P.
Ciente:	NeuroAdvance Perú	Elaborado: C.H.L.
Denominación	Descripción	Responsable
Función Principal	Diseñar el exoesqueleto capaz de ejecutar los movimientos articulares del dedo para la rehabilitación de movilidad.	M.C.A. / C.H.L.
Geometría	Las dimensiones del equipo estarán basadas en la antropometría promedio de un paciente en el país: 18 cm aproximadamente.	M.C.A. / C.H.L.
Energía	<p>El sistema contará con dos sistemas de energía:</p> <p>Entrada de energía:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Energía mecánica: para la colocación del dispositivo el esfuerzo cinético del paciente. - Energía eléctrica: se necesita energizar el sistema mediante una fuente de alimentación no mayor a 12V. <p>Salida de energía:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Energía térmica: se genera por el calor de los actuadores durante su ejecución. - Energía lumínica: producido por las señales indicadores de trabajo. 	M.C.A.
Comunicación	La comunicación entre el usuario y el exoesqueleto debe de ser intuitivo a fin de evitar errores de uso.	M.C.A. / C.H.L.
Software	<p>El microcontrolador debe de asegurar el correcto funcionamiento de los componentes durante el proceso de ejecución.</p> <p>La codificación desarrollada estará programada en software de código libre.</p>	C.H.L.
Control	<p>El dispositivo deberá de ser encendido y apagado de forma manual, en caso de presentar fatiga el paciente también puede comunicarlo de forma gesticular.</p> <p>El microcontrolador controlara el posicionamiento de los actuadores para los ejercicios de rehabilitación.</p>	C.H.L.
Señal	<p>Las siguientes señales visuales serán:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Señal de activación: informa que el dispositivo esta energizado. - Señales de ejercicio: muestra que el ejercicio está siendo ejecutado. - Señal de parada de ejercicio: indica que el paciente está teniendo fatiga y dolor por ejercer el dispositivo. - Señal de desactivación: informa que el dispositivo está bloqueado. 	C.H.L.

Seguridad	El exoesqueleto deberá contar con un sistema de riel para restringir los movimientos no naturales de la mano. El exoesqueleto tendrá desfases entre los dedos, el cual evitará la colisión entre sí permitiendo la integridad de uso del paciente.	M.C.A. / C.H.L.
Fabricación	Todos los materiales y dispositivos serán adquiridos en el campo nacional y que sean accesibles al consumidor.	M.C.A. / C.H.L.
Fuerza	Los actuadores generaran la fuerza y revolución mínima para asegurar la rehabilitación en la mano del paciente.	M.C.A.
Control de calidad	La posición real del sistema será $\pm 1^\circ$ teniendo en consideración un accionamiento articular de dedos de 65° .	C.H.L.
Montaje	El diseño para permitir el sistema de montaje y desmontaje debe ser simple, compacto y de rápido ensamble.	C.H.L.
Ergonomía	El sistema deberá de tener en consideración la actividad física diaria del paciente. El dispositivo deberá de ser cómodo y de fácil uso para la rehabilitación.	M.C.A. / C.H.L.
Material	El material deberá de ser resistente a las diferentes temperaturas y humedad dependiente a la región del Perú. El material deberá de ser biocompatible puesto que tendrá contacto con la piel del paciente.	M.C.A. / C.H.L.
Transporte	El sistema deberá de ser portable, permitiéndose la libertar de desplazamiento para ser empleado en otros lugares. El dispositivo será de material ligero y no debe de sobrepasar el kg en conjunto.	M.C.A. / C.H.L.

3.4. Estructura de funciones

Con base en las directrices establecidas en la norma VDI-2206, tal como se detalló en el capítulo 3.2 previamente, se han delineado tres dominios cruciales para el avance del proyecto. En este contexto, la representación integral del sistema mediante el concepto de caja negra presentará una panorámica esencial para asegurar que el sistema de rehabilitación cumpla de manera efectiva su propósito. A continuación, se mostrará la ilustración correspondiente a la caja negra.



Figura 23. Caja negra.

En un enfoque análogo, se expone un análisis detallado de las esferas en las que el sistema despliega su funcionamiento, específicamente, las áreas mecánicas, electrónica y de control. Estos aspectos serán explorados y elaborados en profundidad en la concepción y confección del diseño integral del exoesqueleto.

Dominio mecánico:

- Pretratamiento y postratamiento.
- Colocar y retirar el seguro del exoesqueleto.
- Generar movimiento con los dedos.
- Realizar movimientos de prueba manual y angular.
- Colocar la mano en la superficie de apoyo (área de trabajo).

Dominio electrónico:

- Energizar el dispositivo de rehabilitación.
- Acondicionar la energía de control.
- Accionar el mecanismo de movimiento de los dedos.
- Emitir señales eléctricas capaces de visualizarse por los indicadores (inicio, desarrollo y fin).

Dominio de control:

- Controlar el encendido o apagado del sistema.
- Convertir las señales digitales a analógicas.
- Controlar los movimientos del actuador (fuerza y revolución).
- Controlar las señales visuales dependiendo la etapa de trabajo.
- Visualizar el estado de los indicadores.

Una vez que se ha establecido la estructura funcional, se procede a elaborar el siguiente esquema, el cual establecerá conexiones entre los ámbitos mecánico, electrónico y de control. En la siguiente página, se exhibe visualmente el diagrama de funciones del sistema, proporcionando una representación gráfica clara y concisa de estas interrelaciones.

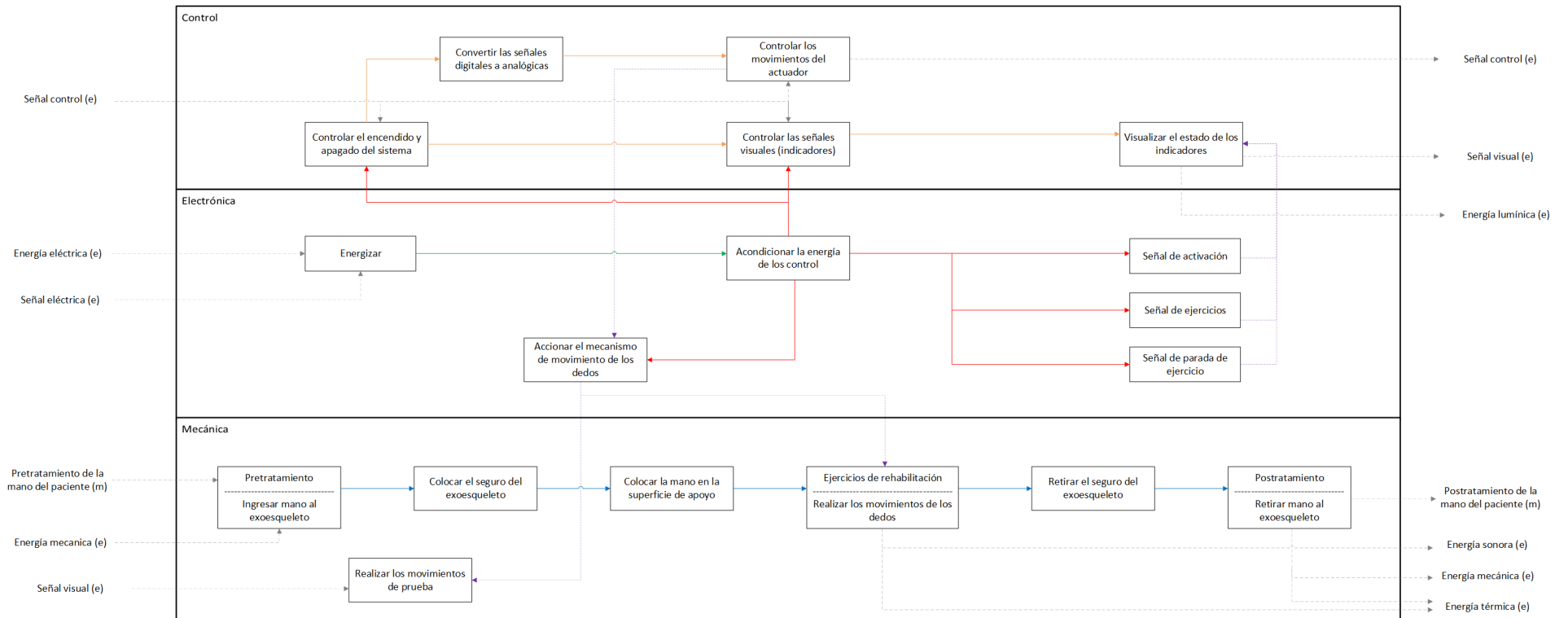

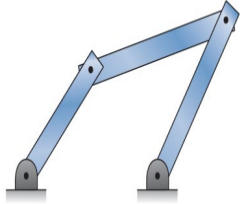
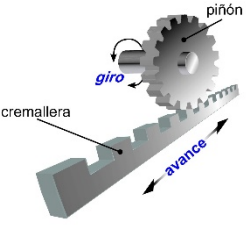













Figura 24. Estructura de funciones del exoesqueleto de mano.







3.5. Matriz morfológica

Conforme a las directrices establecidas por la metodología VDI 2221 y considerando la lista de requisitos provista por la metodología VDI 2206, se emplea la matriz morfológica con el propósito de generar diversas opciones de solución. En este punto, se presentan tres posibles enfoques fundamentados en el conocimiento actual. A través de un análisis exhaustivo y la utilización de líneas de seguimiento, estas propuestas se proponen como caminos viables para abordar la problemática en cuestión.

Tabla 7. Matriz morfológica.

Funciones Parciales	Portador de Funciones		
	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
GDL	1	2	3
Mecanismo de movimiento	Cable bowden 	Sistema de eslabones 	Sistema de piñón-cremallera 
Controlador	Pic 18F4450 	Arduino Uno 	Raspberry Pi3 

<p>Accionamiento</p>	<p>Botonera fisica</p> 	<p>Botonera virtual</p> 	
<p>Actuador</p>	<p>Motorreductor</p> 	<p>Servomotor</p> 	<p>Encoder</p> 
<p>Indicador de estado</p>	<p>LED</p> 	<p>Minibocina</p> 	<p>Display LCD</p> 
<p>Fuente de Poder</p>	<p>Baterías simples 9 V</p> 	<p>Transformador 9 – 12 V</p> 	<p>Batería de Lipo 12 V</p> 

Seguro del dispositivo	Cintillo de plástico 	Cinta de velcro 	Cinta de nylon ajustable 
Material	MDF 	Filamento 3D 	Resina 

Solución Nro. 1

Solución Nro. 2

Solución Nro. 3

Se determina las siguientes trayectorias para llegar al concepto de solución óptimo.

- Color verde: primera solución conceptual.
- Color morado: segunda solución conceptual.
- Color naranja: tercera solución conceptual.

3.5.1. Primera solución conceptual

La propuesta de solución número 1 se desglosa en tres componentes. El sistema que transmitirá el movimiento para abrir y cerrar la mano se basará en un mecanismo con 1 grado de libertad conectado a servomotores a través de cables Bowden. Esto permitirá emular los movimientos deseados entre las falanges y las articulaciones metacarpofalángicas. Para la fijación del dispositivo se utilizará un cintillo de seguridad. En términos de control, se programará un PIC 18F4450, el cual estará conectado a un par de pulsadores para activar o desactivar el sistema, y se empleará una batería lipo de 12V como fuente de energía. El material elegido para este concepto es MDF y se utilizará una mini bocina como señal de estado para indicar el movimiento alcanzado. Sin embargo, esta propuesta se descarta debido a la cantidad de mecanismos requeridos, la obsolescencia del PIC y la limitada disponibilidad de componentes, lo que podría generar incomodidades para el usuario. Además, no se cumpliría uno de los requisitos de diseño estipulados.

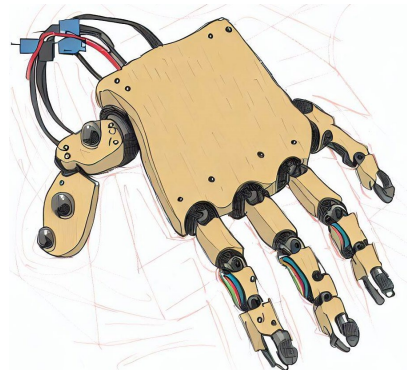


Figura 25. Propuesta de solución 1.

3.5.2. Segunda solución conceptual

Este enfoque deriva de la solución 2. Aquí, se empleará el microcontrolador Arduino Uno para transmitir las acciones de apertura y cierre de la mano. Esto se logrará mediante un conjunto de pulsadores circulares que activarán los motorreductores Pololu, generando el movimiento en el sistema de eslabones. El dispositivo operará con 1 grado de libertad (GdL) activo y 1 GdL pasivo en la articulación metacarpofalángica e interfalángica proximal, respectivamente. Para alimentar la placa de control, conectada al microcontrolador, se utilizará un transformador entre 9 - 12 V (cargador), y las señales de estado se indicarán mediante la activación de componentes LEDs. La estructura de la mano se fabricará con filamento 3D, lo que evitará generar exceso de peso en la mano del paciente y cinta velcro para su fijación. Este concepto fue seleccionado como el más adecuado debido a la facilidad para adquirir los elementos necesarios y su potencial para mejorar la rehabilitación del paciente. Se realizarán ajustes menores, para optimizar aún más este enfoque de solución.



Figura 26. Propuesta de solución 2.

3.5.3. Tercera solución conceptual

En esta instancia, se ha desarrollado una alternativa centrada en el uso del Raspberry Pi debido a su notable capacidad para procesar información de manera eficiente, permitiéndole recibir múltiples señales simultáneamente. En esta propuesta, la información procesada se exhibiría a través de una pantalla LCD como señal de estado, lo cual proporcionaría al paciente información gráfica de manera visual. El enfoque para transmitir los movimientos se basó en la utilización de un sistema "piñón y cremallera" con articulación simétrica, junto con un mecanismo de deslizamiento paralelo conectado a encoders. Esta configuración posibilita la apertura y cierre de la mano mediante el movimiento de las falanges. El control de la posición se planificó a través de una botonera digital y una aplicación móvil. Con respecto al suministro de energía, se sugiere una batería de lipo de 12V para mantener los componentes alimentados constantemente. En lo que respecta al material para el prototipo de la mano, se consideró la utilización de resina para impresión 3D. Sin embargo, esta propuesta se descartó debido a los altos costos asociados con el material y la impresión, además de que contradice el requisito de accesibilidad al público en general que se estableció inicialmente.

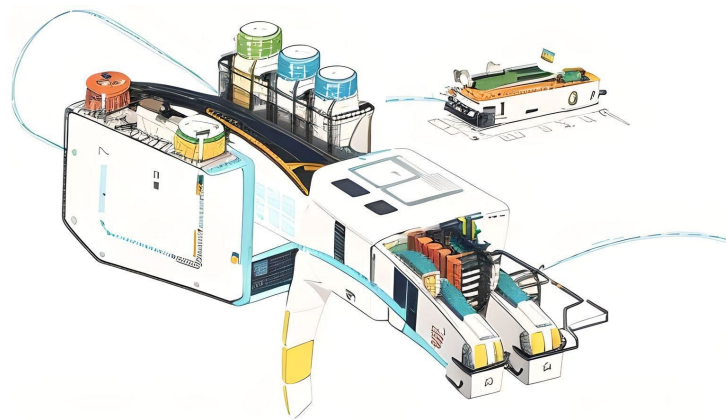


Figura 27. Propuesta de solución 3.

3.6. Valoración técnica

La evaluación de las tres alternativas de solución se lleva a cabo considerando varios aspectos y características relevantes para seleccionar el enfoque de diseño del exoesqueleto de miembro superior destinado a pacientes con hemiparesia. Los resultados de esta evaluación técnica y económica se presentan de manera detallada en las tablas 8 y 9, respectivamente. Estas tablas respaldan la garantía de obtener un diseño apropiado para el propósito establecido.

3.6.1. Valoración técnica

Tabla 8. *Valoración técnica.*

Evaluación de soluciones valor técnico								
Valor técnico (Xi)								
p: puntaje de 0 a 4 (Escala de valores según VDI 2206)								
0: no satisface 1: aceptable 2: suficiente 3: bien 4: muy bien								
g: es el peso ponderado y se da en función de la importancia de los criterios de evaluación								
Criterios de evaluación para las distintas soluciones de consultoría								
Variante de concepto / proyecto		g	Solución 1 (S1)		Solución 2 (S2)		Solución 3 (S3)	
N	Criterio de evaluación	%	p	gp	p	gp	p	gp
1	Función Principal	10	3	0.3	4	0.4	3	0.3
2	Geometría	7	3	0.21	3	0.21	3	0.21
3	Energía	6	1	0.06	2	0.12	3	0.18
4	Comunicación	5	2	0.1	3	0.15	3	0.15
5	Software	7	2	0.14	3	0.21	2	0.14
6	Control	9	1	0.09	3	0.27	3	0.27
7	Señal	4	2	0.08	2	0.08	3	0.12
8	Seguridad	9	1	0.09	3	0.27	2	0.18
9	Fabricación	7	3	0.21	2	0.14	2	0.14
10	Fuerza	6	3	0.18	3	0.18	3	0.18
11	Control de calidad	7	1	0.07	3	0.21	2	0.14
12	Montaje	6	3	0.18	2	0.12	2	0.12
13	Ergonomía	9	2	0.18	3	0.27	3	0.27
14	Material	5	1	0.05	2	0.1	3	0.15
15	Transporte	3	2	0.06	2	0.06	2	0.06
Punta total $\sum p$ o $\sum gp$		100	30	2	40	2.79	39	2.61
Valor técnico Xi			0.50		0.67		0.65	

3.6.2. Valoración económica

Tabla 9. *Valoración económica.*

Evaluación de soluciones valor económica								
Valor económico (Yi)								
p: puntaje de 0 a 4 (Escala de valores según VDI 2206)								
0: no satisface 1: aceptable 2: suficiente 3: bien 4: muy bien								
g: es el peso ponderado y se da en función de la importancia de los criterios de evaluación								
Criterios de evaluación para las distintas soluciones de consultoría								
Variante de concepto / proyecto		g	Solución 1 (S1)		Solución 2 (S2)		Solución 3 (S3)	
N	Criterio de evaluación	%	p	gp	p	gp	p	gp
1	Función Principal	10	3	0.3	3	0.3	3	0.3
2	Geometría	7	2	0.14	2	0.14	2	0.14
3	Energía	6	2	0.12	3	0.18	2	0.12
4	Comunicación	5	2	0.1	3	0.15	3	0.15
5	Software	7	2	0.14	3	0.21	1	0.07
6	Control	9	3	0.27	3	0.27	2	0.18
7	Señal	4	2	0.08	3	0.12	2	0.08
8	Seguridad	9	3	0.27	2	0.18	2	0.18
9	Fabricación	7	4	0.28	3	0.21	2	0.14
10	Fuerza	6	3	0.18	2	0.12	1	0.06
11	Control de calidad	7	2	0.14	2	0.14	2	0.14
12	Montaje	6	3	0.18	3	0.18	2	0.12
13	Ergonomía	9	3	0.27	3	0.27	3	0.27
14	Material	5	3	0.15	2	0.1	1	0.05
15	Transporte	3	3	0.09	3	0.09	2	0.06
Punta total $\sum p$ o $\sum gp$		100	40	2.71	40	2.66	30	2.06
Valor económico Yi			0.67		0.67		0.50	

Una vez obtenidas las coordenadas correspondientes al valor técnico (X) y al valor económico (Y), se procede a construir un diagrama de toma de decisiones, como se ilustra en la figura 28. En este gráfico, la solución ideal se representa mediante una línea con una pendiente de 1. La alternativa que se encuentre en proximidad al punto de intersección (1.1) se considera como la elección óptima.

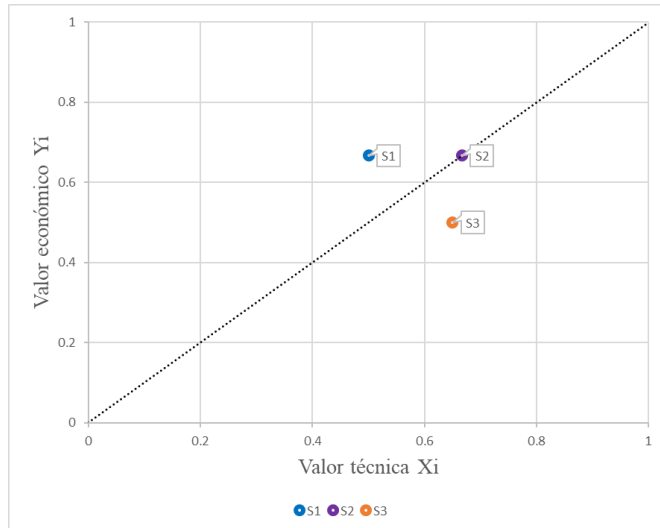


Figura 28. Valoración técnica-económica.

Apoyándose en la evaluación técnico-económica y haciendo uso del gráfico de decisión, se ha determinado que la elección más adecuada para la fase preliminar del proyecto es la propuesta número 2.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados se generaron después de completar con éxito el proceso de diseño del exoesqueleto mediante el software Fusion 360, incluyendo la creación del plano esquemático y la implementación del sistema de control correspondiente. Este proceso integral permitió visualizar y modelar de manera precisa la estructura y las funcionalidades del exoesqueleto para su posterior análisis y evaluación. Además, se avanzó en la etapa de desarrollo al contar con un prototipo funcional del dispositivo, lo que brindó la oportunidad de realizar pruebas y experimentos iniciales para verificar su desempeño y ajustar aspectos específicos en caso necesario.

El proceso de obtención de resultados involucró una cuidadosa secuencia de pasos que abarcó desde el diseño virtual hasta la materialización del prototipo. La combinación de tecnologías como Fusion 360 para el diseño y la simulación, junto con la implementación de componentes de control y la fabricación del prototipo, condujo a la adquisición de datos y conocimientos esenciales para la evaluación y refinamiento del exoesqueleto propuesto. Estos resultados iniciales sientan las bases para un análisis más profundo, pruebas exhaustivas y posibles iteraciones en el diseño a medida que el proyecto avanza hacia su fase de desarrollo completa.

4.1. Resultados

4.1.1. Perfil del paciente y contexto clínico

El estudio se centró en un paciente masculino de 38 años, empleado bancario, quien sufrió un Accidente Cerebrovascular hemorrágico en la región temporoparietal el 23 de enero de 2024. Como consecuencia, se observó hemiplejía izquierda, afectando la motricidad y sensibilidad de los miembros superior e inferior del lado izquierdo del cuerpo.

Tras su ingreso hospitalario, el paciente fue sometido a cirugía el 28 de enero de 2024 para evacuar coágulos, y fue dado de alta el 5 de febrero de 2024. Posteriormente, inició un programa de rehabilitación física convencional en su lugar de residencia, que duró 10 días. Luego, fue derivado a la Clínica Neuroadvance para un tratamiento más especializado, donde se constató un déficit significativo en la capacidad de realizar movimientos voluntarios con el miembro superior izquierdo, afectando su funcionalidad en actividades como el alcance y agarre, y presentando alteraciones en la marcha debido a la afectación del miembro inferior.

Para cuantificar la discapacidad y evaluar la función del miembro superior, se utilizó el cuestionario Quick Dash. Este instrumento de evaluación se aplicó tanto antes de la intervención con el exoesqueleto como al finalizar las pruebas, proporcionando una medición objetiva del progreso del paciente y del impacto de la tecnología implementada en su proceso de recuperación.

Para mayor detalle sobre el perfil clínico del paciente y los resultados del cuestionario Quick Dash, se remite al lector a el Anexo 6, donde se encuentra la documentación completa.

4.1.2. Diseño del exoesqueleto de mano

El proceso de creación del exoesqueleto comenzó con el diseño meticuloso en la plataforma Fusion 360, donde cada componente fue modelado con precisión para formar una estructura coherente. Cada aspecto del exoesqueleto de la mano se desarrolló tomando como referencia las dimensiones promedio de una mano adulta, lo que garantiza que el dispositivo sea ergonómico y se adapte de manera adecuada a la anatomía del paciente. Además, se presta atención a los detalles funcionales, como la inclusión de un diseño de "agarre" en los modelos de los dedos, permitiendo que los dedos del usuario encuentren un soporte cómodo y natural en el dispositivo.

Una vez finalizado el diseño virtual, se procedió a materializar el exoesqueleto mediante la tecnología de impresión 3D. Cada parte del sistema, diseñada en la etapa anterior, fue transformada en piezas físicas que luego serían ensambladas para formar el exoesqueleto completo. Esta fase de fabricación garantizó la precisión y fidelidad del diseño virtual en la realidad física, permitiendo la creación de un prototipo funcional que puede ser evaluado tanto en términos de forma como de función.

La figura 29 en el documento muestra una vista detallada del exoesqueleto de la mano, ilustrando la culminación del proceso de diseño y fabricación, el plano general se encuentra en el anexo 1. Esta imagen captura el resultado tangible del esfuerzo, evidenciando cómo las etapas de diseño y fabricación se fusionaron para dar vida a un dispositivo que promete contribuir significativamente a la rehabilitación de pacientes con limitaciones de movimiento en la mano.

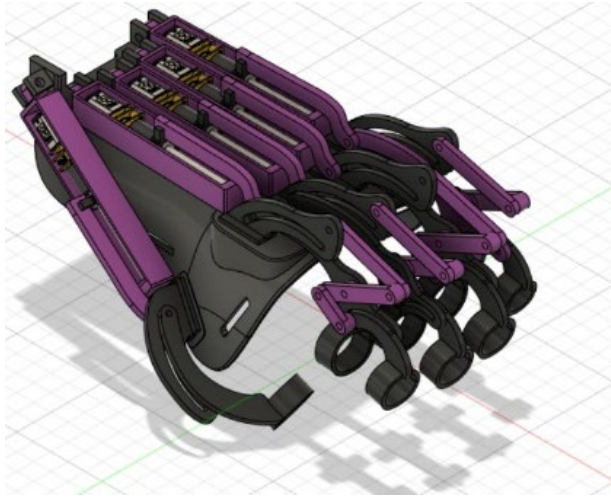


Figura 29. Modelamiento 3D del exoesqueleto de mano.

4.1.3. Diseño del plano esquemático

El proceso de desarrollo también involucró la utilización del software Proteus para llevar a cabo una simulación exhaustiva de las conexiones entre el Arduino y los diversos componentes electrónicos requeridos para controlar los motores del exoesqueleto. Esta etapa permite anticipar y verificar el comportamiento de la parte electrónica, asegurando su funcionamiento adecuado y permitiendo la evaluación de factores como el consumo de corriente y la elección de la batería más apropiada. La simulación ofrece una visión precisa de cómo cada entrada del Arduino se relacionará con los elementos electrónicos, garantizando la eficiencia y fiabilidad del sistema.

En el proceso de implementación real, se notó que no todas las borneras previamente planificadas fueron utilizadas, lo que demuestra la flexibilidad y adaptabilidad del enfoque de diseño. La figura 30 y 31 proporciona una representación visual del plano esquemático y la simulación de los componentes electrónicos, ofreciendo un vistazo detallado de cómo se estructuran y comunican en el sistema. Esta representación gráfica es esencial para confirmar la funcionalidad adecuada y la interacción entre los componentes electrónicos, antes de proceder con la implementación práctica del exoesqueleto (consultar el Anexo 2 para más detalles).

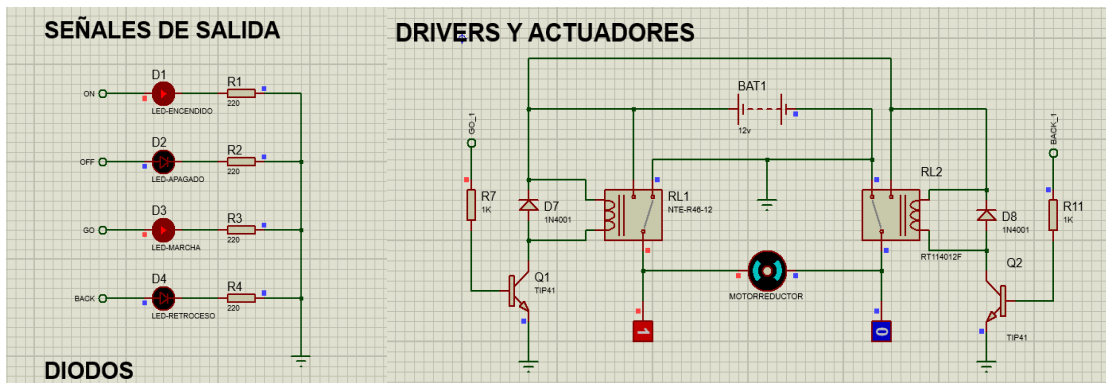


Figura 30. Accionamiento del exoesqueleto en estado de marcha.

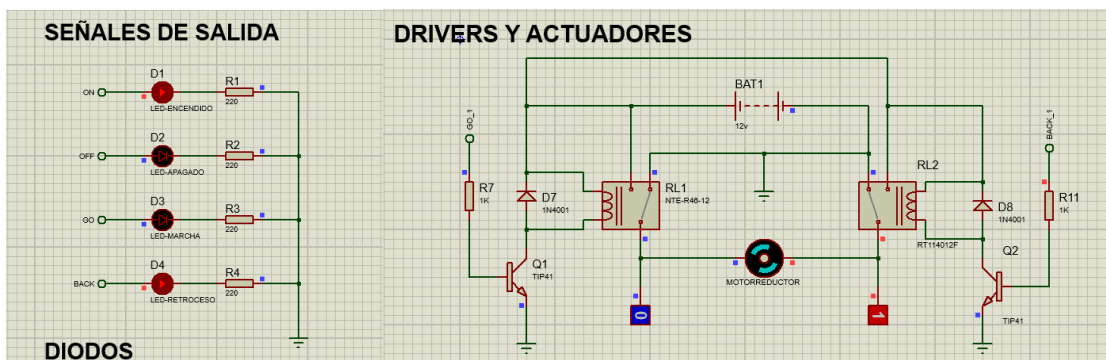


Figura 31. Accionamiento del exoesqueleto en estado de retroceso.

4.1.4. Diseño del sistema de control

El diseño y desarrollo del sistema de control del exoesqueleto se ha enfocado en proporcionar una interacción directa y personalizada para el usuario. En este sentido, se ha implementado un modo de operación manual, el cual se caracteriza principalmente por la inclusión de dos pulsadores que permiten el avance y retroceso de los motores, otorgando al usuario un control preciso sobre el movimiento del exoesqueleto. Asimismo, se incorpora un pulsador que permite la marcha de avance-retroceso, cuya funcionalidad se detallará más adelante.

Este enfoque manual no solo facilita la personalización del movimiento según la comodidad y necesidades del paciente, sino que también representa una respuesta técnica efectiva a las diversas exigencias que pueden surgir durante la rehabilitación. La programación de esta funcionalidad se realizó mediante el entorno de desarrollo integrado (IDE) de Arduino, asegurando que el sistema sea accesible y fácil de operar para el usuario. Para una información más detallada, revisar el anexo 4.

La siguiente figura permite ilustrar un fragmento del código desarrollado, que documenta la lógica detrás del control de la apertura y cierre de la mano del exoesqueleto. Este código no solo refleja el aspecto técnico de la implementación,

sino que también destaca cómo la programación se alinea con los objetivos de adaptabilidad y funcionalidad del exoesqueleto, permitiendo que el sistema se ajuste de manera efectiva a las capacidades y preferencias individuales del paciente.

```
exoesqueleto.ino
1  const int led4 = 3;
2  const int led1 = 4;
3  const int led2 = 5;
4  const int led3 = 6;
5  const int bpower = 7;
6  const int badelante = 8;
7  const int batras = 9;
8  //const int bemergencia = 10;
9  const int motoradelante = 11;
10 const int motoratras = 12;
11 volatile int estado1 = 0;
12 int estado = 0;
13
14 void setup() {
15   // put your setup code here, to run once:
16   pinMode(led1,OUTPUT);
17   pinMode(led2,OUTPUT);
18   pinMode(led3,OUTPUT);
19   pinMode(led4,OUTPUT);
20   pinMode(bpower,INPUT);
21   pinMode(badelante,INPUT);
22   pinMode(batras,INPUT);
23   //pinMode(bemergencia,INPUT);
24   pinMode(motoradelante,OUTPUT);
25   pinMode(motoratras,OUTPUT);
26   attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(2),paroemergencia,RISING);
27   Serial.begin(9600);
28 }
29
```

Figura 32. Parte del código de exoesqueleto de mano.

En la siguiente página, se incluye un diagrama de bloques que ofrece una representación visual clara y detallada de la estructura operativa del exoesqueleto y su sistema de control. Este diagrama desglosa las interacciones y componentes esenciales, permitiendo a los observadores comprender rápidamente la secuencia de control y las conexiones dentro del dispositivo. La inclusión de este diagrama enriquece la documentación técnica y proporciona una herramienta valiosa para entender en profundidad el funcionamiento del exoesqueleto, ofreciendo una visión integral de la tecnología desarrollada.



Figura 33. Diagrama de flujo del funcionamiento exoesqueleto de mano.

4.2. Discusión de resultados

4.2.1. Construcción del exoesqueleto de mano

Conforme a los objetivos delineados en el marco de esta investigación centrada en el exoesqueleto y en concordancia con los requerimientos previamente establecidos en el inicio de este capítulo, se ha alcanzado con éxito implementar y controlar el prototipo funcional de exoesqueleto destinado a la rehabilitación de la mano en pacientes con discapacidad motora causada por ACV. A continuación, se procederá a explorar en detalle cada uno de los subsistemas que componen esta innovadora solución.

En el proceso inicial, la creación del prototipo de mano mediante la tecnología de impresión 3D, como se puede apreciar en la figura 34, demuestra un avance significativo en el desarrollo de este exoesqueleto. Inicialmente, se consideraron dimensiones promedio de 18 cm para las falanges proximal y distal; sin embargo, se realizaron ajustes específicos para adaptarse mejor al paciente. Se añadieron dos cm. en los anillos de las falanges del dedo índice y un cm. al dedo medio, así como, se recortaron los largos de las falanges para adecuarse a la mano del paciente, logrando un ajuste exacto.



Figura 34. Prototipo del exoesqueleto de mano inicial.

De igual forma, uno de los aspectos elementales que se ha tenido en cuenta es el peso del prototipo, el cual se ha mantenido en un nivel mínimo para garantizar que no cause ninguna molestia durante las sesiones de rehabilitación. Con la ayuda de goniómetros, se efectuaron rotaciones en los dedos meñique, anular, índice y pulgar para asegurar la movilidad sin incomodidad. Además, para las falanges proximales de los dedos meñique, índice y pulgar, se implementó un mecanismo graduable mediante tornillos stove de $\frac{1}{8}$ " x $\frac{1}{4}$ ", permitiendo ajustes en sus medidas según sea necesario.

Adicionalmente, se realizaron pequeños desbastes circulares entre los anillos para asegurar que se sujeten adecuadamente al dedo, evitando deslizamientos, y se añadió material microporoso para mejorar la funcionalidad de agarre. Con el objetivo de asegurar una experiencia efectiva y cómoda para el paciente, la ergonomía y su facilidad de uso han sido consideraciones necesarias en su diseño. En cuanto al material de las piezas, se optó por PETG para incrementar la durabilidad, dado que las piezas iniciales se rompían durante las fases de prueba. Los cambios realizados se ilustran en la siguiente figura.



Figura 35. Prototipo del exoesqueleto de mano final.

Posteriormente, el componente de control destaca por el uso del microcontrolador, cuya programación en lenguaje C permite la activación de los motores mediante señales de pulsadores, como se detalla en el Anexo 4. Esta programación, en caso de ser necesario, también incluye una representación visual simplificada del estado del sistema, proporcionando una visión clara en tiempo real, mostrando "1" cuando el pulsador está activado y "0" cuando está apagado.

En la figura 36 se presenta la sección de botoneras e indicadores, esenciales para la interacción entre el paciente y el exoesqueleto. Se han implementado LED para indicar el estado del sistema: el LED rojo señala que el sistema no está operativo, mientras que los pulsadores azul y verde encienden el LED correspondiente, brindando retroalimentación visual sobre el sentido del movimiento. El botón negro permite la activación de un modo automático, útil para la pre calibración del exoesqueleto y ciertos ejercicios con tiempos determinados que facilitan la ejecución de movimientos repetitivos, como la apertura y/o cierre de la mano, tal como se evidencia en el Anexo 4.

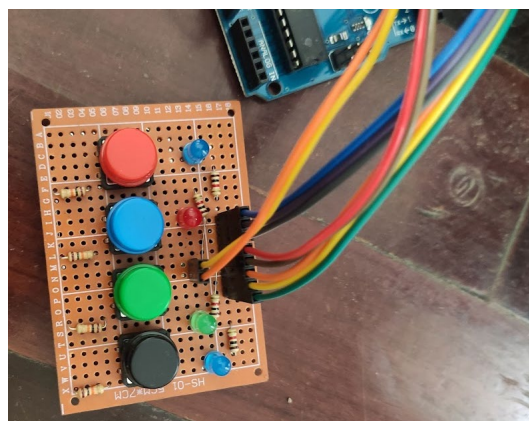


Figura 36. Circuito de marcha/retroceso el exoesqueleto de mano.

Inicialmente, el prototipo incluía cinco dedos interconectados paralelamente, pero se ha añadido cinco borneras con enlaces para permitir la manipulación independiente de cada dedo, siempre que se cuente con el enlace correspondiente. Además, el largo del cable inicial de 80 cm se extendió a 3 m para facilitar el traslado del paciente entre ejercicios (ver figura 37).



Figura 37. Exoesqueleto de mano y sus partes.

Por otro lado, se ha reordenado y adecuado los componentes a un soporte pequeño de material MDF para facilitar su manipulación, mantenimiento (preventivo y correctivo) y transporte sin incurrir en daños. En la figura 38, se detalla la distribución del microcontrolador, la botonera y la placa electrónica que controla los motores, fundamentales para el movimiento deseado. La fuente de alimentación de 12V asegura el suministro energético necesario y la placa permite que los motores cambien de dirección mediante mini relés y electrónica asociada.

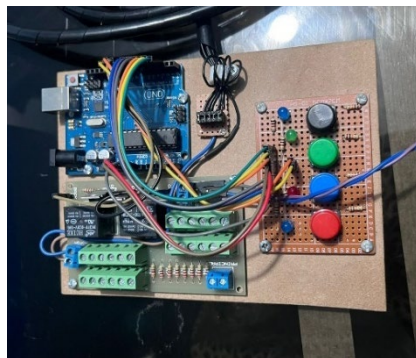


Figura 38. Distribución de los componentes del exoesqueleto de mano.

Los motores seleccionados con una velocidad de 150 RPM son una elección adecuada, ya que permiten movimientos gradualmente controlados que son esenciales para garantizar la seguridad y la comodidad del paciente durante el proceso de rehabilitación.

La integración exitosa de estas diversas partes ha culminado en la implementación del exoesqueleto de mano que aborda específicamente la rehabilitación después de un ACV.

4.2.2. Pruebas del exoesqueleto de mano

En esta sección, se presentan diversas fases de la implementación del exoesqueleto de mano y la retroalimentación obtenida durante múltiples sesiones en la clínica, con la colaboración activa del paciente, lo cual permitió la construcción final del prototipo.

En las figuras 39, 40 y 41, se muestra a la Tecnólogo Médico realizando las medidas necesarias y efectuando las correcciones pertinentes. Esto incluyó ajustar las dimensiones de los anillos para que se adaptaran a la mano del paciente. Además, se empleó un goniómetro para corregir la rotación en los dedos pulgar, índice, anular y meñique, evitando así incomodidades durante los movimientos de extensión. También se incorporaron velcros para asegurar el exoesqueleto a la mano del paciente.



Figura 39. Medición de anillos proximal y distal.



Figura 40. Rotación de las falanges del exoesqueleto de mano.



Figura 41. Adaptación de los velcros de seguridad.

Debido a las observaciones efectuadas durante las pruebas iniciales (ver figura 43), se optó por reajustar algunos anillos de las falanges del pulgar, índice y meñique. Estos anillos fueron rediseñados para ser ajustables mediante la adición de tornillos stove de $\frac{1}{8}$ " x $\frac{1}{4}$ ". Asimismo, se realizaron desbastes en los anillos para prevenir deslizamientos, una problemática detectada en las fases preliminares. Las figuras siguientes muestran estos ajustes y su implementación.



Figura 42. Pruebas iniciales del exoesqueleto de mano.



Figura 43. Vista inferior del exoesqueleto de mano.



Figura 44. Vista frontal del exoesqueleto de mano.

Finalmente, al concluir los ajustes personalizados al paciente, se integró el exoesqueleto de mano en el proceso de terapia (ver figuras 45 y 46). Es importante mencionar que, para optimizar el movimiento voluntario de la mano, se optó por cambiar a motores de 150 RPM. Este cambio facilitó la ejecución de los ejercicios terapéuticos. Para una información más detallada, revisar el Anexo 5.



Figura 45. Apertura y cierre de la mano para sostener objetos y transportarlos a otro lugar.

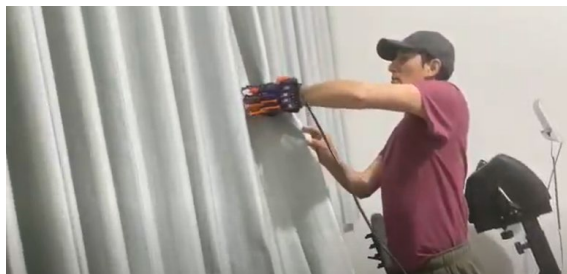




Figura 46. Apertura y cierre para abrir y cerrar persianas.

En resumen, la implementación y control del prototipo de exoesqueleto de mano para la rehabilitación de pacientes con discapacidad motora causada por ACV ha implicado:

En la fase inicial, durante las pruebas clínicas, la colaboración del paciente y la recolección de datos permitieron realizar ajustes personalizados, dichas observaciones, condujeron al rediseño del prototipo.

- Se usaron goniómetros para realizar rotaciones en los dedos y asegurar una movilidad sin incomodidades.
- Se redujeron las dimensiones de las falanges (largo) para adaptarse a la mano del paciente.
- Se diseñaron anillos graduables de las falanges mediante tornillos stove de $\frac{1}{8}$ " x $\frac{1}{4}$ ".
- Se realizaron desbastes para prevenir deslizamientos, garantizando un ajuste específico.
- Se incorporó material microporoso y velcros de seguridad para mejorar el agarre y sujeción respectivamente.
- Se optó por utilizar PETG en la fabricación de las piezas para incrementar su durabilidad.

De igual forma, se realizaron ajustes en la longitud del cable y se incluyeron borneras para la manipulación independiente de los dedos, mejorando la funcionalidad y flexibilidad del sistema, así como, el reemplazo de motores a 150 RPM para facilitar los movimientos voluntarios de la mano.

Finalmente, un informe clínico incluido en el Anexo 6 respalda la hipótesis de validación, demostrando la eficacia del exoesqueleto en la mejora funcional del paciente. A continuación, se presenta un extracto del informe:

"... la funcionalidad de agarre mejoró considerablemente en un periodo de seis sesiones, y se trabajó en la funcionalidad del alcance del brazo izquierdo, esencial para los movimientos de apertura y cierre de la mano ...".

CONCLUSIONES

- El análisis de las investigaciones más recientes permitió identificar tecnologías y enfoques efectivos para la implementación y control de exoesqueletos de mano, proporcionando una base sólida para el desarrollo del presente proyecto. Las tecnologías emergentes, como el uso de materiales ligeros y resistentes, junto con los avances en la miniaturización de actuadores y sensores, fueron identificados como cruciales para el diseño y desarrollo de exoesqueletos más eficientes y accesibles. Este análisis también destacó la importancia de enfoques interdisciplinarios que combinan la ingeniería biomédica, asegurando un desarrollo tecnológico alineado con las necesidades clínicas.
- Se concluye que un diseño centrado en el usuario, que tenga en cuenta tanto las características físicas como las necesidades psicológicas del paciente, es crucial para el éxito del dispositivo en entornos de rehabilitación. Los requisitos de diseño planteados en este estudio para crear un exoesqueleto que se ajusta a las necesidades anatómicas y limitaciones del paciente con discapacidad motora causada por ACV, fueron importantes, asegurando su comodidad y efectividad, evitando lesiones y maximizando los beneficios terapéuticos.
- La obtención y aplicación de las características anatómicas y biomecánicas de las manos del paciente con ACV fueron esenciales para la implementación y control del exoesqueleto, permitiendo una rehabilitación más personalizada. Los datos detallados sobre la velocidad, rango y patrones de movimiento del paciente permitieron un diseño que replica de manera casi natural los movimientos de la mano. Se concluye que la integración de estas características biomecánicas es vital para la efectividad del exoesqueleto, ya que permite una interacción más armoniosa entre el dispositivo y el paciente.
- Se concluye que un sistema de control flexible es fundamental para proporcionar una terapia efectiva, y que los avances en algoritmos de control y aprendizaje automático pueden ofrecer mejoras significativas en futuras versiones del exoesqueleto. Por consiguiente, el sistema de control diseñado en esta investigación demostró ser capaz de responder y ejecutar el movimiento de los dedos, adaptándose a las necesidades individuales del paciente en cuestión, mejorando la funcionalidad de la mano.
- Los resultados obtenidos al implementar y controlar el exoesqueleto de mano confirmaron su eficacia en la rehabilitación del paciente con discapacidad motora causada por ACV, validando el enfoque y los métodos utilizados en este estudio. El paciente que utilizó este exoesqueleto mostró mejoras significativas en la fuerza y la coordinación de la mano donde se tenía con anterioridad que solo podía llevar a cabo un 43 % de capacidad para llevar a cabo ciertas actividades con el miembro superior, lo que sugiere que el dispositivo es una herramienta efectiva para la rehabilitación. Se concluye que la implementación de exoesqueletos de mano en programas de rehabilitación puede acelerar la recuperación y

mejorar la calidad de vida de los pacientes, y que futuras investigaciones deberían centrarse en optimizar el diseño y el control del dispositivo para maximizar estos beneficios.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda la implementación de motores más eficientes y de menor consumo energético para mejorar el rendimiento durante la etapa de terapia. Actuadores avanzados con mayor precisión y control, podrían proporcionar una respuesta más suave y adaptable a las necesidades del paciente.
- Es esencial explorar técnicas avanzadas de diseño y modelado, para reducir el peso del exoesqueleto. Un dispositivo más ligero facilitará su uso prolongado y aumentará la comodidad del paciente, quienes frecuentemente tienen limitada la fuerza y capacidad de movilidad.
- Se recomienda considerar el uso de microcontroladores más compactos y versátiles, como el PIC, que permitirían una reducción significativa en el tamaño del sistema de control. Esto haría el exoesqueleto más portable y fácil de integrar en diversos entornos de rehabilitación, mejorando la experiencia del usuario y facilitando el uso cotidiano del dispositivo.
- Diseñar una interfaz de usuario más amigable que permita al paciente y terapeuta ajustar fácilmente los parámetros del exoesqueleto. Una interfaz intuitiva puede mejorar la adherencia al tratamiento y permitir ajustes rápidos durante las sesiones de rehabilitación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD [En línea]. Discapacidad, 2023. Disponible en: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/disability-and-health>.
- (2) CONSEJO NACIONAL PARA LA INTEGRACIÓN DE LA PERSONA CON DISCAPACIDAD [En línea]. Anuario Estadístico 2020 del Registro Nacional de la Persona con Discapacidad, 2021. Disponible en: <https://www.gob.pe/institucion/conadis/informes-publicaciones/2745692-anuario-estadistico-2020-del-registro-nacional-de-la-persona-con-discapacidad>.
- (3) INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA E INFORMÁTICA [En línea]. En el Perú 1 millón 575 mil personas presentan algún tipo de discapacidad, 2013. Disponible en: <https://m.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/noticias/16775.pdf>.
- (4) MINISTERIO DE SALUD [En línea]. Accidente cerebrovascular es la primera causa de discapacidad permanente en edad adulta, 2019. Disponible en: <https://goo.su/21UBH>.
- (5) BERNABÉ, A. y CARRILLO, R. Tasa de incidencia del accidente cerebrovascular en el Perú. Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública, 2021, 38(3), 399-405 pp. ISSN: 1726-4634.
- (6) GALÁN-CUTIPA, F. Diseño, implementación y control de un exoesqueleto para rehabilitación de extremidades superiores. Tesis de Máster (Ingeniería Mecánico - Eléctrica). Piura: Universidad de Piura, 2017.
- (7) MÁLAGA, G., y otros. La enfermedad cerebrovascular en el Perú: estado actual y perspectivas de investigación clínica. Acta Médica Peruana, 2018, 35(1). ISSN: 1728-5917.
- (8) INSTITUTO NACIONAL DE CIENCIAS NEUROLÓGICAS PERÚ [En línea]. Boletín Epidemiológico, 2022. Disponible en: <https://www.incn.gob.pe/wp-content/uploads/2022/07/BOLET%3%8DN-EPIDEMIOL%3%93GICO-8.pdf>.
- (9) MINISTERIO DE SALUD [En línea]. Anexo N°2: Contenidos mínimos del programa presupuestal, 2019. Disponible en: https://www.minsa.gob.pe/presupuestales/doc2019/pp/anexo/ANEXO2_8.pdf?fbclid=IwAR3Dh3bdqzTJAsyyliz2DvhMw5A9QXhCou4bYt0N6L9mjifPi4rEYvE1gAA.
- (10) INGENIERÍA BIOMÉDICA [En línea]. Exoesqueletos para potenciar las capacidades humanas, 2022. Disponible en: <https://www.ingenieriabiomedica.org/post/charla-exoesqueletos-para-potenciar-las-capacidades-humanas>.
- (11) CHIRINOS, S. Prototipo de un exoesqueleto robótico flexible para la rehabilitación activa de la mano en personas que han sufrido un ACV en Perú. Tesis (Título de Ingeniero Mecatrónico). Lima: Universidad de Ingeniería y Tecnología, 2023.

- (12) JANAMPA, J. Diseño de un exoesqueleto de 3 grados de libertad para la rehabilitación del miembro superior derecho en pacientes con hemiplejía moderada. Tesis (Título de Ingeniero Mecatrónico). Lima: Universidad Tecnológica del Perú, 2021.
- (13) BORJA, A. y VALENCIA, E. Diseño de exoesqueleto para rehabilitación de mano afectada con Artrosis. Tesis (Título de Ingeniero Mecatrónico). Lima: Universidad Tecnológica del Perú, 2020.
- (14) HUANCA, L. Diseño de un exoesqueleto de mano para la auto-terapia asistida en base a un patrón de movimiento. Trabajo de Investigación (Bachiller en Ciencias). Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú, 2020.
- (15) CALDERÓN, R. Exoesqueleto rehabilitador de mano mediante fibras musculares (SMA). Trabajo de Grado (Título de Ingeniero en Mecatrónica). Ecuador: Universidad Técnica del Norte, 2020.
- (16) DE LA CRUZ, B., ARIAS, M. y LUGO, E. Diseño y construcción de un prototipo de exoesqueleto para rehabilitación de mano. XLI Congreso Nacional de Ingeniería Biomédica, 2018, 398-401 pp.
- (17) AGARWAL, P. y DESHPANDE, A. Subject-specific assist-as-needed controllers for a hand exoskeleton for rehabilitation. IEEE Xplore, 2018, 3(1), 508-515 pp. ISSN: 2377-3766.
- (18) CHÁVEZ, M., RODRÍGUEZ, F. y BARIDICA, A. Exoesqueletos para potenciar las capacidades humanas y apoyar la rehabilitación. Rev. Ing. Bioméd., 2010, 4(7), 63-73 pp. ISSN: 1909-9762.
- (19) ANGELES, M. Diseño y simulación de un mecanismo exoesqueleto para rehabilitación de miembro superior para personas adultas de hasta 100 kg. Tesis (Título de Ingeniero Mecánico Electricista). Chiclayo: Universidad Señor de Sipán, 2022.
- (20) MIRANDA, C. Diseño y fabricación de exoesqueletos ultralivianos. Proyecto Final de Grado. Argentina: Universidad Mar de Plata, 2021.
- (21) ENRIQUEZ, S., NARVAEZ, Y. y VIVAS, O. Sistema robótico de tipo exoesqueleto para rehabilitación de la mano. XXXV Jornadas de Automática, 2014.
- (22) ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD. Las enfermedades crónicas no transmisibles. 2017.
- (23) RODRÍGUEZ, C. Modelamiento y simulación del movimiento de la mano humana, empleando herramientas Cae. Trabajo de Grado (Título de Ingeniero en Automatización). Bogotá: Universidad de La Salle, 2016.
- (24) GONZALES, B. Diseño de un mecanismo de ayuda técnica para la marcha a manos libres para lesiones temporales en un miembro inferior en personas de 21 a 50 años para desplazamiento horizontal. Tesis (Título de Ingeniero Mecánico Eléctrico). Chiclayo: Universidad Santo Toribio de Mogrovejo, 2018.

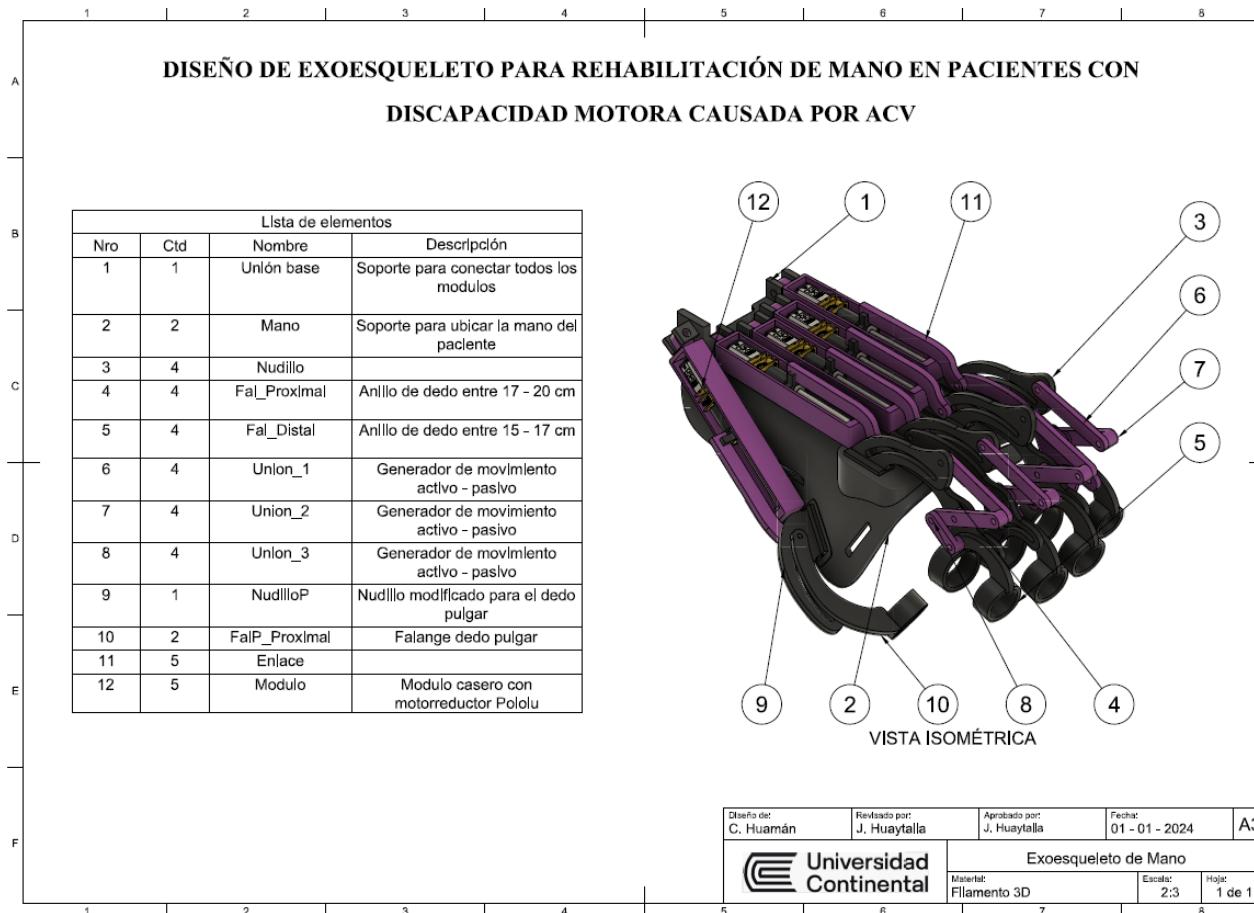
- (25) REYES, F. *Robótica: control de robots manipuladores*. México: Alfaomega, 2011. ISBN: 9789586829618.
- (26) GARCÉS, A. Diseño de un mecanismo del tipo exoesqueleto de miembros inferiores que permita reproducir patrones de movimiento. Tesis (Título de Ingeniero Mecánico). Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú, 2017.
- (27) SAINZ, E. y CISNEROS, M. Rehabilitación y capacidad funcional en la salud del siglo XXI. *Anales del Sistema Sanitario de Navarra*, 2022, 45(3), 1-8 pp. ISSN: 1137-6627.
- (28) CORDERO, J. y GUTIÉRREZ, E. *Diagnostica el estado de los componentes de fuerza y actuadores de sistemas Mecatrónicos*. México: CECyTE, 2018.
- (29) INEEDMOTORS [En línea]. ¿Qué es el motor con microreductor?, 2022. Disponible en: <https://www.ineed-motor.com/news/what-is-micro-gearred-motor-60103961.html>.
- (30) SOLECTRO [En línea]. Funcionamiento y características de los relés, 2022. Disponible en: <https://solectroshop.com/es/blog/funcionamiento-y-caracteristicas-de-los-reles--n116>.
- (31) CALDERÓN, A. y GONZÁLEZ, I. Consideraciones sobre la utilización del microcontrolador Arduino como sistema de adquisición de datos. XXXIX Jornadas de Automática, 2018.
- (32) ODREMAN, J. Impresión 3D en la Industria: un acercamiento a la tecnología y su influencia en la industria petrolera. *Semantic Scholar*, 2014, 18(73), 1-15 pp. ISSN: 1316-4821.

ANEXOS

Se muestran los anexos de construcción y elaboración del exoesqueleto de mano considerando los diversos enfoques (mecánico, electrónico y control), entre otros.

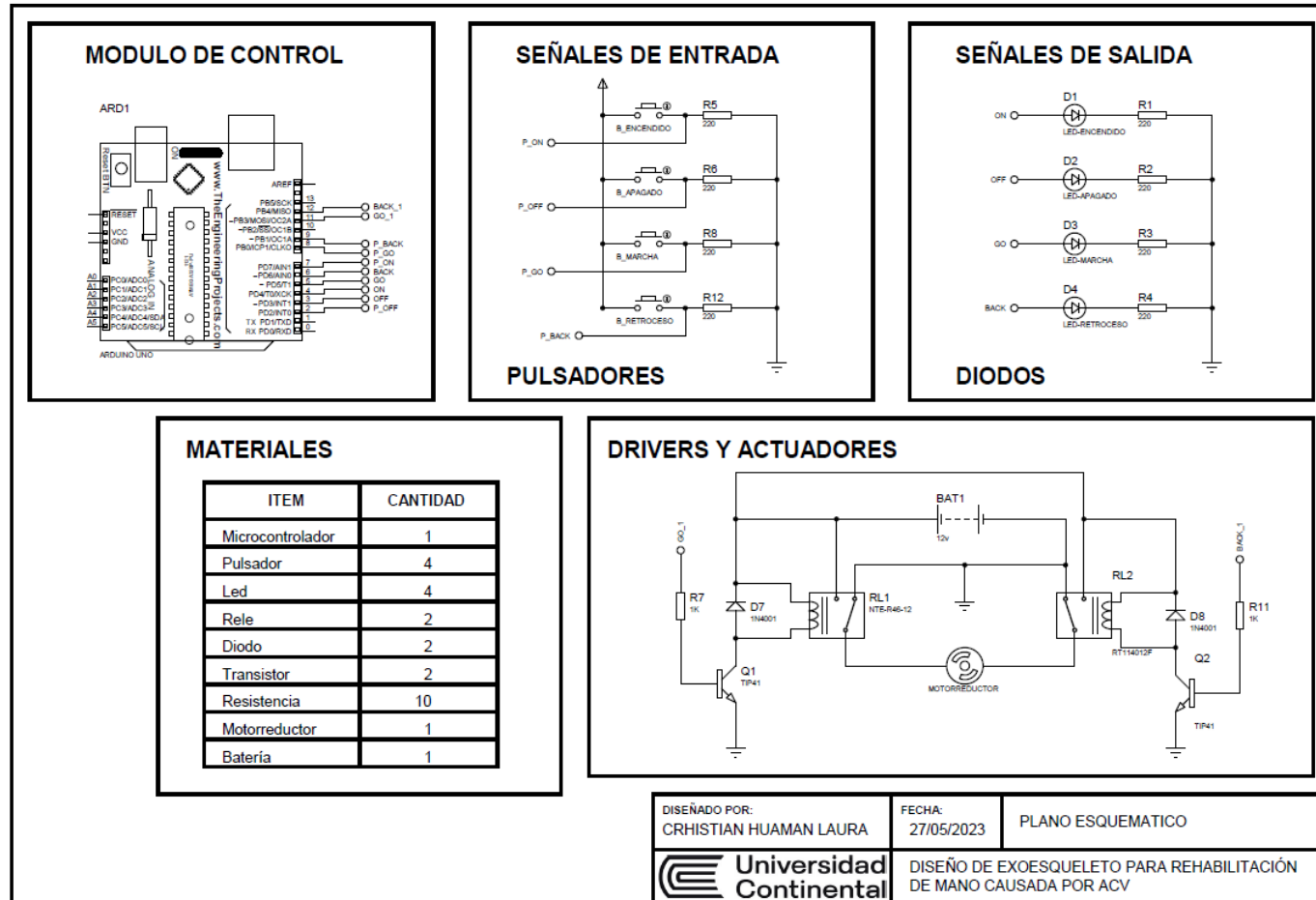
Anexo 1

Plano general del exoesqueleto de mano



Anexo 2

Plano esquemático



Anexo 3

Hoja de datos de los actuadores

Micro Metal Gearmotors



The [Pololu Micro Metal Gearmotor family](#) consists of small, bidirectional, brushed DC metal gearmotors with nitride-hardened martensitic stainless steel gears. They are available in a wide range of gear ratios, motor windings, brushes, and encoder configurations:

Gear ratio options	Motor winding/brush options	Encoder options
<ul style="list-style-type: none"> • 5:1 • 10:1 • 15:1 • 30:1 • 50:1 • 75:1 • 100:1 • 150:1 • 210:1 • 250:1 • 298:1 • 380:1 • 1000:1 	<ul style="list-style-type: none"> • HPCB 12V: high-power 12V with long-life carbon brushes • HPCB 6V: high-power 6V with long-life carbon brushes • HP 6V: high-power 6V with precious metal brushes • MP 6V: medium power 6V with precious metal brushes • LP 6V: low-power 6V with precious metal brushes 	<ul style="list-style-type: none"> • Integrated 12 CPR quadrature encoder with back connector • Integrated 12 CPR quadrature encoder with side connector • Encoder-compatible (extended motor shaft for adding an encoder) • No encoder

Motor winding and brush options

The 6V and 12V HPCB are high-power motors with long-life carbon brushes. They offer nearly the same performance at their respective nominal voltages, just with the 12 V motor drawing half the current of the 6 V motor.



The HP, MP, and LP motors are intended for operation around 6V and offer three different power levels, with the lowest-power LP versions drawing the least current and the highest-power HP versions drawing the most current. These motors have shorter-life precious metal brushes, which are lower-friction than carbon brushes and generally preferred for lower-current applications.



The HPCB versions can be differentiated from versions with precious metal brushes by their copper-colored terminals. Note that the HPCB terminals are 0.5 mm wider than those on the HP/MP/LP versions (2 mm vs. 1.5 mm), and they are approximately 1 mm closer together (6 mm vs. 7 mm).

HK3FF

SUBMINIATURE HIGH POWER RELAY



Features

- 15A switching capability
- 1 Form A & C configurations
- Subminiature, standard PCB layout
- Plastic sealed and flux proofed types available
- Environmental friendly product (RoHS compliant)
- Outline Dimensions: (19.0 x 15.5 x 15.8) mm

CONTACT DATA

Contact Form	1A, 1C
Contact Material	Silver Alloy
Contact Ratings	10A 277VAC 30VDC
Max Switching Voltage	16VDC
Max Switching Current	15A
Max Switching Power	2770VA 210W
Contact Resistance	100MΩ(at 1A 6VDC)
Electrical Life	1X105Ops(30Ops/min)
Mechanical Life	1X107Ops(300Ops/min)

GENERAL DATA

Insulation Resistance	100MΩ 500VDC	
Dielectric Strength	Between coil & contacts	1500VAC 1min
	Between open contacts	750VAC 1min
Operate Time	Max. 10ms	
Release Time	Max. 5ms	
Temperature Range	-40°C to +70°C	
Shock Resistance	Functional	98m/s ² (10g)
	Destructive	980m/s ² (100g)
Vibration Resistance	10 to 55Hz 1.5mm	
Humidity	35% to 85% RH	
Weight	Approx. 10g	
Safety Standard	CUL TuV CQC	

COIL DATA

Nominal Voltage (VDC)	Coil Resistance at 20°C ± 10%(Ω)		Max Operate Voltage (VDC)	Min Release Voltage (VDC)	Max Apply Voltage (VDC)
	0.36W	0.45W			
3	25	20	2.25	0.3	3.9
5	70	55	3.75	0.5	6.5
6	100	80	4.50	0.6	7.8
9	225	180	6.75	0.9	11.7
12	400	320	9.00	1.2	15.6
24	1600	1280	18.00	2.4	31.2
48	6400	5100	36.00	4.8	62.4

Anexo 4

Sistema de control

El código de control se encuentra en el siguiente link:

<https://github.com/CrhastianHI08/Exoesqueleto.git>

Anexo 5

Sesiones de rehabilitación

El registro de sesiones de rehabilitación se encuentra en el siguiente link:

https://drive.google.com/drive/folders/1rHmzYquC_5p96NhAn9oeUus4ajAsxwhM

Anexo 6

Historial clínico del paciente

Los documentos relaciones con historial clínico del paciente se encuentra en el siguiente link:

<https://drive.google.com/drive/u/1/folders/1JaIy5Awh1Yya9OA-KvQwm1FvXl5c33Ns>