

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PUCP

**DISEÑO DE UN EXOESQUELETO DE MANO PARA LA
AUTO-TERAPIA ASISTIDA EN BASE A UN PATRÓN DE
MOVIMIENTO**

**Trabajo de investigación para la obtención del grado de BACHILLER
EN CIENCIAS CON MENCIÓN EN INGENIERÍA MECATRÓNICA**

Autor:

Luis Enrique Huanca Champi

ASESORA:

Rocio Liliana Callupe Perez

Lima, agosto, 2020

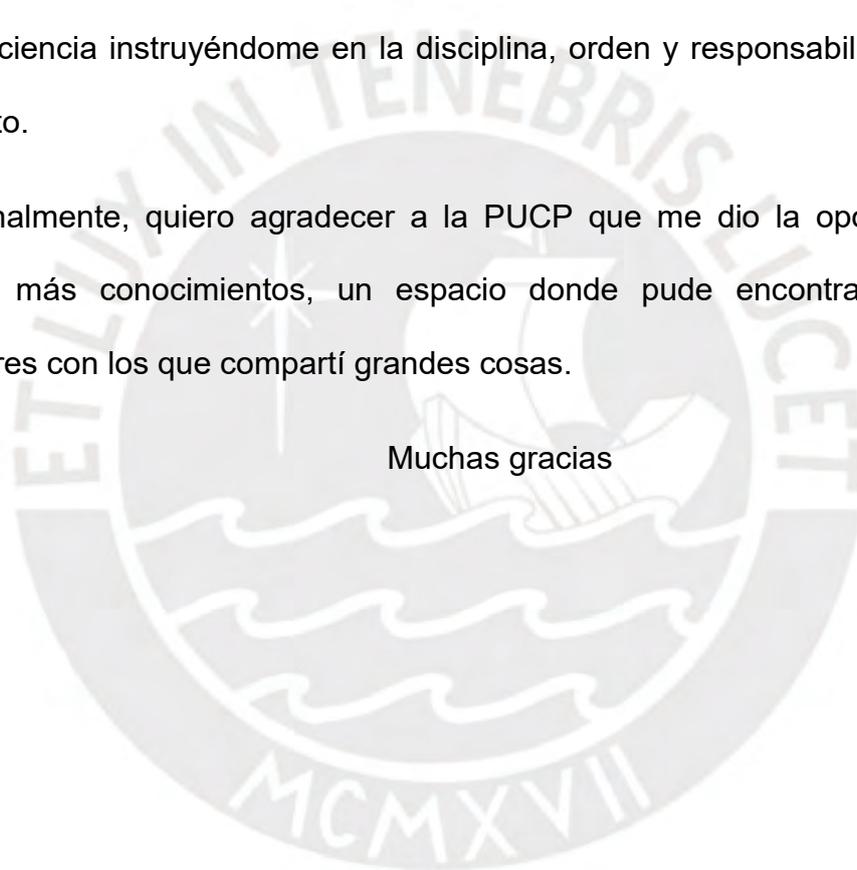
AGRADECIMIENTO

Quiero agradecer en primer lugar a Dios, a mis padres y familia por su amor incondicional, además por brindarme su apoyo para conseguir mis sueños y metas.

Agradezco a mi asesora Rocio Callupe por guiarme en el transcurso del desarrollo de mi tesis porque me brindó las herramientas de un investigador que ama la ciencia instruyéndome en la disciplina, orden y responsabilidad en todo momento.

Finalmente, quiero agradecer a la PUCP que me dio la oportunidad de adquirir más conocimientos, un espacio donde pude encontrar amigos y profesores con los que compartí grandes cosas.

Muchas gracias



RESUMEN

La tecnología y, como consecuencia, la robótica se encuentra influyendo en muchos rubros para ayudar a las personas. Una de estas es la medicina en rehabilitación utilizando dispositivos mecánicos acoplados a las extremidades del cuerpo humano. Por tal motivo diversas compañías a nivel mundial venden exoesqueletos de mano para ayudar a recuperar los movimientos cotidianos que una persona realiza, como por ejemplo, sujetar objetos y colocarlos en otro lugar. Pero, como esta tecnología recién está comenzando, los exoesqueletos comerciales son de elevados costos y nos proporcionan bajo grados de libertad en los movimientos de dedos y muñeca. Por tal motivo, se propone un exoesqueleto que será de bajo costo para que los hospitales del Perú y las personas puedan adquirirlo. Este dispositivo ayuda a los especialistas en rehabilitación en la realización de los ejercicios a pacientes adultos-mayores y, se plantea que los fisioterapeutas puedan atender a mayor cantidad de adultos mayores con accidente cerebrovascular (ACV) debido a que ahora solo tendrán la función de analizar el progreso en la recuperación del paciente mas no en la realización exhaustiva de los ejercicios.

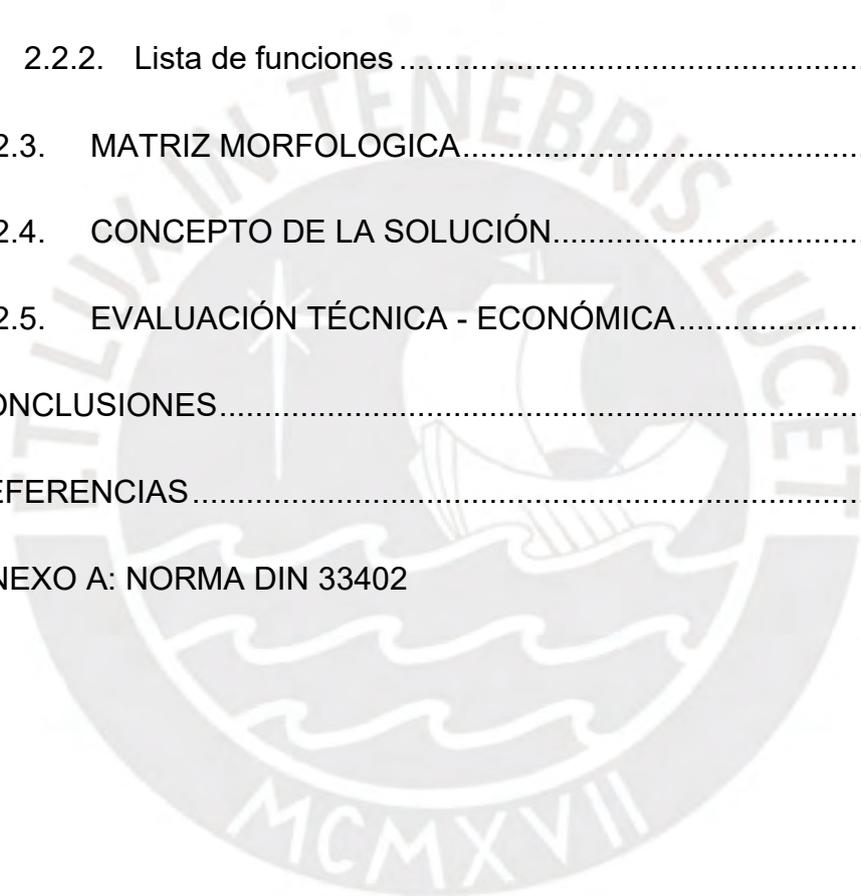
Se propone el diseño de un exoesqueleto para la rehabilitación de mano y muñeca utilizando actuadores y mecanismos de 4 barras para lograr su correcto movimiento, sensores para verificar el correcto funcionamiento del exoesqueleto y una interfaz usuario-máquina para poder controlar el inicio y el estado del progreso del ejercicio; y detener los movimientos en caso de emergencia.

Se obtuvo como resultado el diseño preliminar del exoesqueleto de mano y muñeca, así como los componentes mecánicos y eléctricos a utilizar.

ÍNDICE DE CONTENIDO

	Pág.
AGRADECIMIENTO.....	II
RESUMEN	III
ÍNDICE DE TABLAS	VI
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	VIII
INTRODUCCIÓN	IX
CAPITULO 1. MARCO DEL PROYECTO.....	1
1.1. PROBLEMÁTICA.....	1
1.2. PROPUESTA DE SOLUCIÓN.....	5
1.2.1. Alcances	6
1.2.2. Limitaciones	6
1.3. OBJETIVOS.....	7
1.3.1. Objetivo general.....	7
1.3.2. Objetivos específicos	7
1.4. METODOLOGIA APLICADA	8
1.5. ESTADO DEL ARTE.....	9
1.5.1. Exoesqueletos comerciales	9
1.5.2. Artículos IEE, patentes y tesis	14
1.5.3. Sensores.....	16

1.5.4. Actuadores.....	18
1.5.5. Controladores	21
CAPITULO 2. DISEÑO CONCEPTUAL.....	23
2.1. LISTA DE EXIGENCIAS	23
2.2. ESTRUCTURA DE FUNCIONES	27
2.2.1. Black Box.....	27
2.2.2. Lista de funciones.....	29
2.3. MATRIZ MORFOLOGICA.....	33
2.4. CONCEPTO DE LA SOLUCIÓN.....	39
2.5. EVALUACIÓN TÉCNICA - ECONÓMICA.....	46
CONCLUSIONES.....	50
REFERENCIAS.....	51
ANEXO A: NORMA DIN 33402	



ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1.1. MINSA - Oferta de médicos especialistas según especialidad en Lima	3
Tabla 1.2. Máquinas para mano y muñeca comerciales y sus costos aproximados	4
Tabla 1.3. Tabla comparativa de exoesqueletos comerciales. Fuente: Elaboración propia.....	13
Tabla 1.4. Tabla comparativa de los sensores de posición.	18
Tabla 1.5. Tabla comparativa de actuadores.....	20
Tabla 1.6. Tabla comparativa en microcontroladores.	22
Tabla 2.1. Líneas de conexión de la estructura de funciones.....	31
Tabla 2.2. Matriz morfológica.....	33
Tabla 2.3. Líneas de conexión para matriz morfológica. Fuente: Elaboración propia.....	38
Tabla 2.4: Evaluación técnica	47
Tabla 2.5: Evaluación económica	48

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1. Personas con discapacidad que tienen dificultad para ingresar y/o desplazarse en establecimientos públicos (porcentaje).....	4
Figura 1.2. La mano humana: estructura ósea, vista.....	5
Figura 1.3. Maestra Portátil. Máquina CPM mano y muñeca.....	9
Figura 1.4. Kinetec Maestra. Máquina CPM mano y muñeca.....	10
Figura 1.5. Movimientos de la muñeca.....	10
Figura 1.6. DigiGlide xt mano portátil CPM.....	11
Figura 1.7. Exoesqueleto Rafael Smart Glove.....	12
Figura 1.8. Hand of hope.....	12
Figura 1.9. Exoesqueleto de 4 GDL para rehabilitación del dedo índice-Ju Wang	14
Figura 1.10. Dispositivo de entrenamiento robot exoesqueleto de mano.	15
Figura 1.11. Sistema de rehabilitación de dedos por actuadores lineales.	16
Figura 1.12. Sensor de posición resistivo.....	16
Figura 1.13. Micro-motor con encoder de efecto hall.....	17
Figura 1.14. Encoder óptico o infrarrojo.....	17
Figura 1.15. Motor de pasos.....	18
Figura 1.16. Micro-motor DC con caja reductora.....	19
Figura 1.17. Partes de un servomotor.....	19
Figura 1.18. Arduino Mega embebido.....	21
Figura 1.19. ESP 32 NodeMcu-32.....	21
Figura 1.20. Tiva launchpad.....	22

Figura 2.1. Black box del sistema. Fuente: Elaboración propia.	28
Figura 2.2. Estructura de funciones.	32
Figura 2.3. Bosquejo del interfaz de usuario.....	39
Figura 2.4 Posición de las baterías recargables	40
Figura 2.5. Apoyo de muñeca. Concepto de solución 1 y 2.....	41
Figura 2.6. Bosquejo del exoesqueleto de mano.....	41
Figura 2.7. Concepto de solución 2	43
Figura 2.8.Vista frontal del accionador del movimiento de la muñeca.	43
Figura 2.9. Exoesqueleto de mano. Concepto de solución 3.....	45
Figura 2.10. Posición de la batería y botón de emergencia	45
Figura 2.11. Ubicación del interfaz usuario maquina	46

ÍNDICE DE GRÁFICOS

	Pág.
Gráfico 1.1. Evolución de la cantidad de personas mayores a 65 años (1960-2017)	1
Gráfico 1.2. Sudamérica, evolución de la cantidad de personas mayores a 65 años (1960-2017)	2
Gráfico 2.1: Valor técnico-económico entre las soluciones.....	49

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la tecnología es usada en diferentes ámbitos tales de la medicina, entre ellos el uso de exoesqueletos de mano para su rehabilitación, de esta manera se puede lograr mejorar o recuperar la movilidad de dedos y muñeca (La robótica aplicada a la medicina, 2013)

Los exoesqueletos comerciales poseen un costo elevado para realizar el tratamiento y no generan los movimientos precisos que los especialistas recomiendan, además de encontrarse generalmente solo en hospitales modernos por sus altos costos (El tiempo, 2013). Por otro lado, los especialistas en rehabilitación proveen al paciente diversos tipos de ejercicios, pero la cantidad de especialistas en rehabilitación son bajos a comparación del crecimiento poblacional de adultos mayores con problemas de ACV. Por lo tanto, el presente proyecto plantea ofrecer una versión de exoesqueleto de mano que permita realizar el movimiento independiente de las falanges proximales y medias de los dedos; así como la flexión y extensión de la muñeca para poder simular los movimientos que se pueden realizar en la mano en el plano sagital. Este prototipo de bajo costo realiza la rehabilitación activa en adultos mayores desde la comodidad de sus hogares.

En el primer capítulo, se detalla la investigación del porcentaje de personas mayores a 65 años que tienen ACV, su incremento en diversos países así como en el Perú. Además, mencionar los principales problemas para ingresar y/o desplazarse en establecimientos públicos. Asimismo, se plantea los objetivos y el alcance de la solución, se especifica la metodología utilizada (VDI 2006) y se

muestran los avances tecnológicos en exoesqueletos de mano tanto en productos comerciales como en investigaciones en tesis y papers; los cuales resuelven algunas de las funciones presentes del estudio.

En el segundo capítulo, se presenta la lista de exigencias que deberá cumplir el exoesqueleto, la estructura de funciones así como las propuestas de solución que puedan cumplir con las exigencias establecidas previamente y la elección de la solución óptima por medio de la evaluación técnica-económica de todas las posibles soluciones.



CAPITULO 1. MARCO DEL PROYECTO

1.1. PROBLEMÁTICA

La revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Publica afirma que la discapacidad de los accidentes cerebrovasculares (ACV) es la segunda causa de muerte y la tercera discapacidad en el mundo. En el Perú se ha reportado una prevalencia de 6,8% en la zona urbana y 2,7% en la zona rural en mayores de 65 años, en donde representan el 28.6 y 13.7%, respectivamente, de las causas de muerte. (p. 393) (Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud, 2014).

Esto se debe a que la cantidad de adultos mayores está comenzando a crecer desde hace 7 años en todo el mundo (La vejez y la muerte, 2018), lo cual trae como consecuencia el aumento de personas de la tercera edad (mayores a 65 años). Esto es notoriamente visible en países con una gran población como Japón China y EE.UU (ver Gráfico 1.1) (Banco Mundial/BIRF+AIF, 2018).

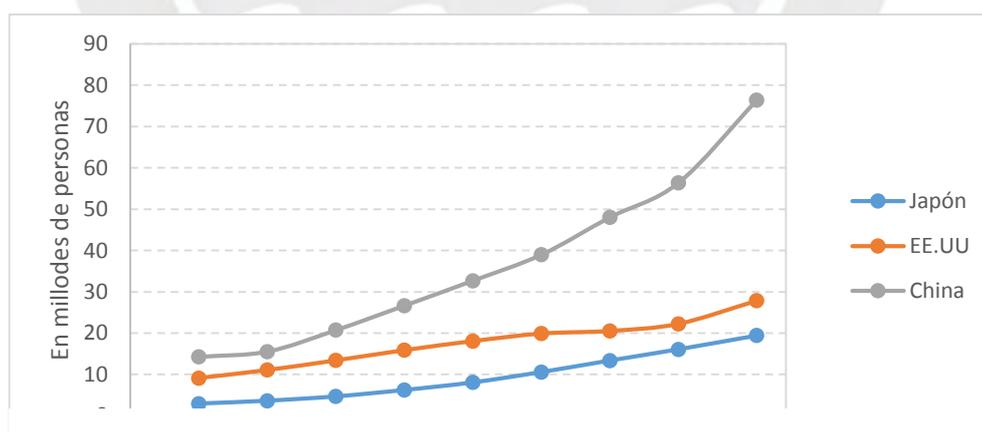


Gráfico 1.1. Evolución de la cantidad de personas mayores a 65 años (1960-2017)

Fuente: Banco Mundial / BIRF+AIF

Pero esto se da también en países con tendencia al crecimiento poblacional como el Perú (ver Gráfico 1.2). Además, se prevé que entre el 2015 y 2050, la proporción de la población mundial con más de 60 años de edad pasara de 900 millones hasta 2000 millones (Organización Mundial de la Salud, 10 datos sobre el envejecimiento y la salud, 2017).

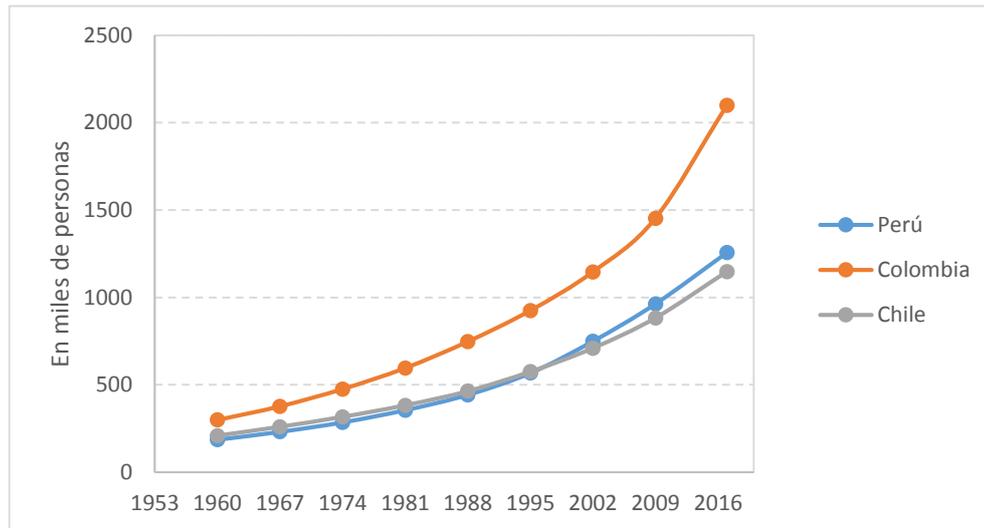


Gráfico 1.2. Sudamérica, evolución de la cantidad de personas mayores a 65 años

Fuente: Banco Mundial / BIRF+AIF

Este crecimiento se ve plasmado en el primer trimestre del año 2018, ya que el 42,2% de los hogares del Perú tenía entre sus miembros a al menos una persona de 60 años o más (INEI 2018: 2) (Blouin, 2018).

El 40% de personas con ACV en el Perú perderán la autonomía e independencia (Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud, 2014). Para evitar que la calidad de vida de los pacientes con ACV disminuya, se necesita médicos en rehabilitación física para realizar los tratamientos de rehabilitación que ayuden a recuperar las habilidades humanas como fuerza y movilidad, lo cual implicaría que un fisioterapeuta realice movimientos repetitivos de manera activa hacia el paciente (Gómez, 2019).

Pero, como se puede observar en la Tabla 1.1, la especialidad Medicina física y rehabilitación es una de las carreras menos demandadas en medicina (MINSA, 2010).

Tabla 1.1. MINSA - Oferta de médicos especialistas según especialidad en Lima

Especialidad	Frecuencia	Especialidad	Frecuencia
Pediatría	911	Oftalmología	178
Gineco- obstetricia	770	Cardiología	124
Cirugía general	650	Gastroenterología	107
Medicina interna	515	Cirugía pediátrica	102
Anestesiología	412	Medicina física y rehabilitación	77
Traumatología	254	Otros (40 especialidades)	1772
Psiquiatría	202	Total	6074

Fuente: Adaptado de MINSA - 2010

Según el INEI, los principales problemas que experimentan las personas con discapacidad para ingresar y/o desplazarse libremente hacia los establecimientos de salud y/o lugares especializados en rehabilitación son del 29.3% y 18.9% respectivamente (ver Figura 1.1) (Primera Encuesta Nacional Especializada sobre Discapacidad, 2012).

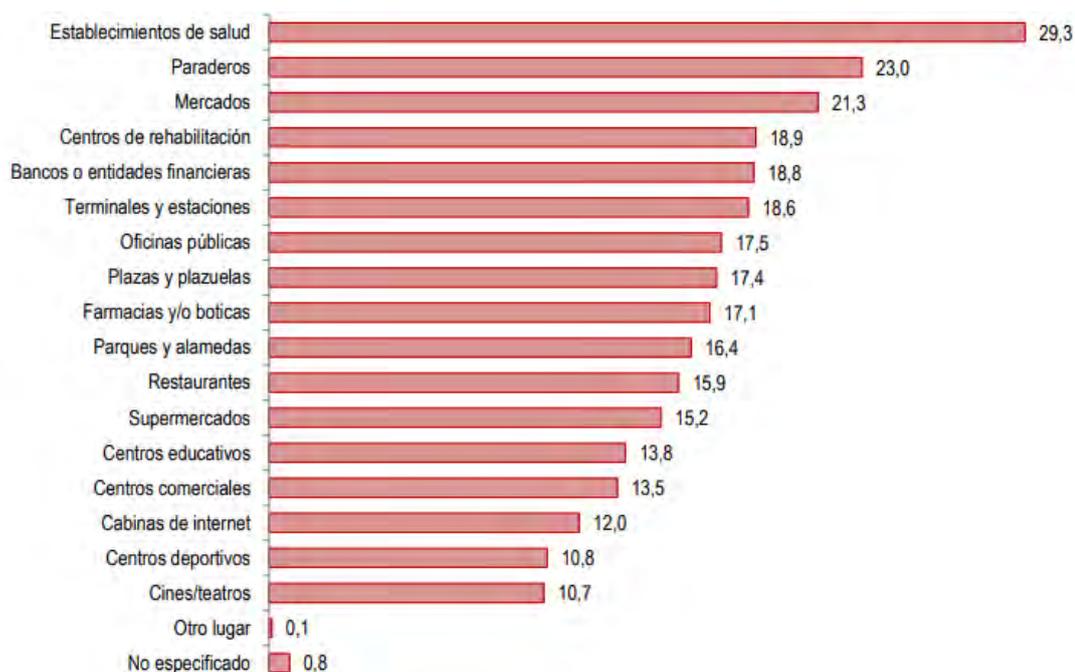


Figura 1.1. Personas con discapacidad que tienen dificultad para ingresar y/o desplazarse en establecimientos públicos (porcentaje)

Fuente: INEI – Primera Encuesta Nacional Especializada sobre Discapacidad (2012)

Debido a estos problemas de sobrepoblación de adultos mayores, los países más avanzados tecnológicamente y diversas compañías en el mundo que realizan investigación en prototipos denominados exoesqueletos, los cuales permiten recuperar y mejorar las habilidades humanas como la fuerza y precisión, pero debido a sus altos costos (ver Tabla 1.2.), estas solo pueden ser adquiridas por pocas personas (Allegra Medical, 2017). Este problema será aún mayor debido que: “el 2050, el 80% de las personas mayores vivirá en países de ingresos bajos y medianos” (Organización Mundial de la Salud, Informe Mundial sobre el envejecimiento y la salud, 2015).

Tabla 1.2. Máquinas para mano y muñeca comerciales y sus costos aproximados

Nombre de la maquina	Compañía	US\$ US\$
Kinetec Maestra de mano portátil	Kinetec	5,781.60
DigiGlide XT mano portátil CPM	Kaiser Medical	5,939.16
Rapael Smart Glove	Neofect	4,000.00

Fuente: Elaboración propia

1.2. PROPUESTA DE SOLUCIÓN

Debido al incremento de adultos mayores en el Perú y al déficit de médicos especialistas en medicina física y rehabilitación a nivel nacional; así como los elevados costos de los exoesqueletos comerciales y la dificultad que poseen para trasladarse a los centros de rehabilitación, este proyecto propone realizar un exoesqueleto de mano y muñeca de bajo costo transportable que permitirá el tratamiento pasivo del paciente, el cual realiza diferentes tipos de ejercicios que contribuirá a su rehabilitación en los falanges medial y proximal de los dedos de la mano (ver Figura 1.2) (Lopez, 2013) de manera independiente, así como realizar el movimiento de flexión y extensión de la muñeca.

Por otro lado, los fisioterapeutas podrán atender a mayor cantidad de personas con ACV debido a que ahora solo tendrán la función de analizar el progreso en la recuperación del paciente pero no en la realización exhaustiva de los ejercicios.

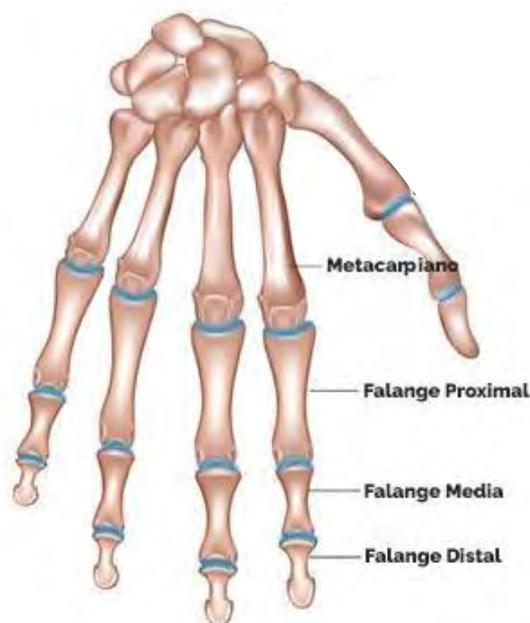


Figura 1.2. La mano humana: estructura ósea. vista

Fuente: Dr. Pedro Pinheiro y Consejo Editorial Médico - Rio de Janeiro (2008)

1.2.1. Alcances

Este proyecto propone tener alcance en diferentes aspectos como el social y económico, los cuales serán expuestos a continuación.

a) Aspecto Social

- El presente proyecto de investigación sirva de guía para futuros desarrollos de exoesqueletos para rehabilitación de manos en el Perú.

b) Aspecto Económico

- El costo de fabricación de la prótesis deberá ser menor al costo del exoesqueleto más económico para rehabilitación de mano disponible comercialmente en el Perú (S/. 7000).
- Los familiares poseerán una carga económica menor debido a la eliminación del tiempo muerto en el traslado del paciente.

1.2.2. Limitaciones

En el aspecto tecnológico se tienen las siguientes limitaciones:

a) Aspecto tecnológico

- Se diseñará exoesqueleto para los dedos y muñeca; sin embargo, no se realizará su implementación.
- La obtención de los parámetros de control no se realizará en el presente trabajo.
- El diseño contempla el diagrama de flujo del sistema.
- EL trabajo contempla el diagrama de conexiones del exoesqueleto así como su diagrama de operaciones que realizara el usuario.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo general

Diseñar el mecanismo de un prototipo de exoesqueleto de mano para la rehabilitación de movimiento de los dedos y que permita realizar el movimiento de flexión y extensión de la muñeca.

1.3.2. Objetivos específicos

- Buscar información sobre los exoesqueletos comerciales (costo y los grados de libertad que proporcionan hacia el usuario para su rehabilitación en manos y muñeca).
- Diseñar un prototipo de exoesqueleto de mano para la rehabilitación de movimiento en las falanges proximales y mediales en los dedos, así como el movimiento de flexión y extensión de la muñeca; con un grado de libertad para cada falange de los dedos y un grado de libertad para la muñeca.
- Realizar el proyecto utilizando la metodología VDI2221 y VDI2206.

1.4. METODOLOGIA APLICADA

Para el presente proyecto se utilizarán las metodologías de diseño mecatrónico (VDI 2206) y diseño de sistemas técnicos y productos (VDI 2221). A continuación, se explica cómo se aplica esta metodología.

- Definición de la problemática actual.
- Planteamiento de hipótesis general, objetivo general, objetivos específicos y propuesta de solución.
- Revisar el estado del arte asociado a la máquina teniendo en cuenta trabajos y estudios anteriores.
- Establecer las exigencias que requiere el diseño para determinar las funciones de la máquina que contiene señales, uso de energía, componentes mecánicos, eléctricos y de control.
- Realizar una matriz morfológica de cada función con distintos principios de solución.
- Proponer conceptos de solución en base a sus combinaciones y hallar el concepto de solución óptimo en base a un análisis técnico-económico.
- Realizar una matriz morfológica de cada función con distintos principios de solución.
- Proponer conceptos de solución en base a sus combinaciones y hallar el concepto de solución óptimo en base a un análisis técnico-económico.
- Realizar un diseño preliminar con el dimensionamiento del sistema analizando geometría y mecanismos a utilizar.
- Seleccionar de forma aproximada y preliminar los materiales mecánicos, eléctricos (sensores y actuadores) y de control que cumplan con las exigencias del proyecto.
- Elaborar un documento formal.

1.5. ESTADO DEL ARTE

En el campo de la robótica existen numerosos productos para el servicio de asistencia humana del tipo exoesqueleto. De estos, a continuación se presenta los modelos más resaltantes en exoesqueletos de mano. En la sección 1.6.1 se presentan patentes y tesis realizadas que poseen el mismo fin, ayudar en la rehabilitación de la mano, mientras que la sección 1.6.2 a la 1.6.3 se presentan los actuadores y controladores que usaron los exoesqueletos comentados previamente en esta sección.

1.5.1. Exoesqueletos comerciales

Es así que en los últimos años diversas compañías en el mundo han logrado avances bastante significativos en cuanto a prótesis de manos.

A continuación, se presenta los productos comerciales más sobresalientes.

a) Productos de la compañía Kinetec

Esta compañía comercializa, instala y mantiene soluciones avanzadas en el mercado en dispositivos para la rehabilitación en distintas partes del cuerpo. En la sección de manos y muñeca se encuentran productos como:

- **Maestra Portátil. Máquina CPM mano y muñeca**

Este dispositivo es muy útil por ser portátil y para realizar movimientos simples de dedos y muñeca como flexión y extensión (ver Figura 1.2) (Kinetec, 2009).



Figura 1.3. Maestra Portátil. Máquina CPM mano y muñeca.

Fuente: Kinetec

- **Kinetec Maestra: Máquina CPM mano y muñeca**

Este exoesqueleto es útil para pacientes que necesitan realizar movimientos más complejos que el anterior dispositivo, como la abducción, aducción, supinación, pronación de muñeca (ver Figura 1.3) (Kinetec, 2009).



Figura 1.4. Kinetec Maestra. Máquina CPM mano y muñeca.

Fuente: Kinetec

En la Figura 1.4 se muestra los movimientos que pueden realizar con el exoesqueleto Kinetec Maestra: Máquina CPM mano y muñeca (Kinetec, 2009).



Figura 1.5. Movimientos de la muñeca

Fuente: Especificaciones del rango de movimiento del exoesqueleto de Kinetec

Ambos exoesqueletos pueden ser utilizados en pacientes pos-operatorio para lograr la rehabilitación en sus articulaciones.

b) DigiGlide xt mano portátil CPM

La compañía Kaiser Medical creó un exoesqueleto manual de último modelo para pacientes que requieran terapia para sus manos llamado DigiGlide XT mano portátil CPM (Movimiento continuo pasivo) (ver Figura 1.5). Este exoesqueleto

ayuda a la recuperación de la movilidad en las articulaciones a través del movimiento repetitivo-pasivo de los dedos del paciente en cierto rango. Además, estos movimientos son registrados y guardados con el fin de utilizarlos para el seguimiento del progreso que está teniendo el paciente (Kaser medical, 2014).



Figura 1.6. DigiGlide xt mano portátil CPM.

Fuente: Kaser Medical

c) Rafael Smart Glove

El exoesqueleto de la compañía coreana encargada de crear tecnología, Neofect, ofrece un guante para monitorear, ejercitar y recuperar sus habilidades motoras a personas que han sufrido un derrame cerebral (ver Figura 1.6). Este guante, Rafael Smart Glove, cuenta con sensores encargados de monitorear el movimiento de brazo y mano del paciente, estos datos son enviados a una computadora que analiza y almacena estos movimientos para ver el proceso de rehabilitación. Además, cuenta con software con juegos en realidad aumentada para mantener al paciente enfocado en el ejercicio de rehabilitación repetitivo. Por ejemplo, uno de estos juegos es exprimir una naranja, el cual permite realizar el ejercicio de flexión y extensión de los dedos. Sin duda, es un dispositivo muy útil y se está comenzando a implementar en hospitales surcoreanos, sin embargo, debido a su alto costo, no todos los hospitales lo pueden adquirir (Neofect, 2010).



Figura 1.7. Exoesqueleto Rafael Smart Glove.

Fuente: Neofect

d) Hand of hope

La compañía Rehab-Robotics creó un dispositivo terapéutico que ayuda a pacientes a recuperar la movilidad en la mano usando sensores de electromiografía que captan el movimiento deseado por el paciente (ver Figura 1.7). Estas señales son procesadas y los motores que se encuentran en el exoesqueleto ejecutan el movimiento deseado. Además, ofrece una retroalimentación visual con juegos interactivos que mantienen comprometidos al paciente con las sesiones de rehabilitación.

Este dispositivo puede ser utilizado en pacientes a partir de los 8 años de edad y es comúnmente utilizado en pacientes con accidente cerebrovascular, pero hay otras afecciones que puedan requerir el reaprendizaje del movimiento de la mano (Hand of Hope, 2018).



Figura 1.8. Hand of hope

Fuente: Rehab - Robotics

En los últimos años diversas compañías en el mundo han logrado avances significativos en cuanto a prótesis de manos. A continuación se presentan en un cuadro comparativo (ver Tabla 1-3) los modelos más sobresalientes previamente mencionados.

Tabla 1.3. Tabla comparativa de exoesqueletos comerciales. Fuente: Elaboración propia.

Características técnicas	Maestra Portátil. Máquina CPM mano y muñeca	Kinetec Maestra. Máquina CPM mano y muñeca	DigiGlide xt mano portátil CPM	Rafael Smart Glove	Hand of hope
Compañía	Kinetec	Kinetec	Kaiser Medical	Neofect	Rehab-Robotics
Portable	Si	No	Si	Si	No
Fácil de utilizar	Si	No	Si	Si	Si
Movimiento en los dedos	Si	Si	Si	Si	Si
Movimientos independientes en diferentes articulaciones	No	Si	No	Si	Si
Grados de libertad	1	2	1	Más de 6	5
Acción pasiva	Si	Si	Si	No	Si
Estructura mecánica	Sencilla	Compleja	Sencilla	Sencilla	Sencilla

Fuente: Elaboración propia

1.5.2. Artículos IEE, patentes y tesis

Hablando específicamente sobre el tema de rehabilitación de dedos, Ju Wang, Jiting Li, Yuru Zhang y Shuang Wang desarrollaron un exoesqueleto con cuatro grados de libertad para rehabilitación del dedo índice (Figura 1.9). Este dispositivo puede generar movimiento bidireccional (flexión-extensión) en las falanges proximal y medial del dedo a través de transmisión por cable. El movimiento del exoesqueleto es controlado por un algoritmo de control que analiza la información recibida de los sensores. El sistema de control consiste en un lazo de control de posición y un lazo cerrado de compensación. El control de posición se realiza por medio de impedancia donde se utilizan sensores de fuerza FlexiForce, para medir la posición angular se utilizan encoders acoplados a los motores de CD. El control de compensación es usado para compensar el error de posición causado por la extensión del cable en la transmisión mecánica (Wang, Li, Zhang, & Wang, 2009).

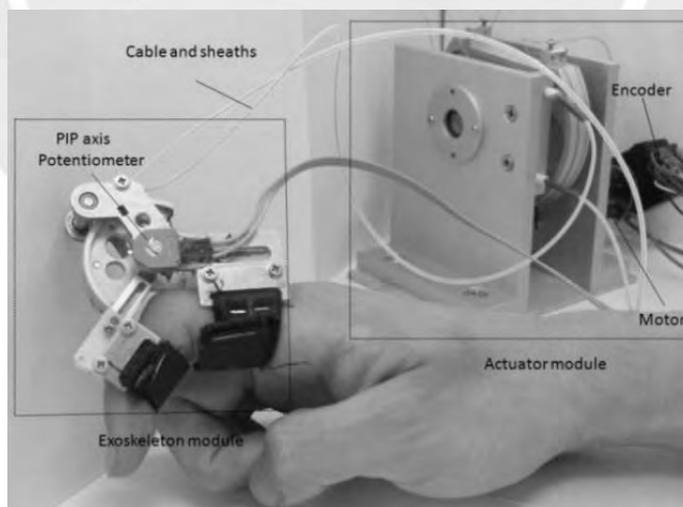


Figura 1.9. Exoesqueleto de 4 GDL para rehabilitación del dedo índice-Ju Wang

Fuente: Diseño y construcción de un exoesqueleto con 4 grados de libertad
(Artículo IEE)

Otro exoesqueleto utilizado en rehabilitación es el que desarrollo Raymond Tong Kai-yu con el Departamento de Tecnología de la Salud e Informática de la Universidad Politécnica de Hong Kong. Este exoesqueleto está diseñado para ayudar a pacientes con accidente cerebrovascular para que recuperen las funciones de sus manos utilizando señales de electromiografía de superficie (EMG) los cuales permiten que el paciente pueda practicar con mayor facilidad la apertura y el cierre de las manos por su propia voluntad y manejar las tareas funcionales de la vida diaria de manera fácil por motores lineales DC. El sofisticado exoesqueleto está compuesto por un controlador integrado y un módulo de mano robótica. Además, su diseño permite adaptarse a diferentes longitudes de dedos (Asia Research News, 2011).



Figura 1.10. Dispositivo de entrenamiento robot exoesqueleto de mano.

Fuente: Departamento de Tecnología de la Salud e Informática de la Universidad Politécnica de Hong Kong (Tesis)

La patente “*Weareable Power Assistive Device for Helping a User to Move Their Hand*” con número US 2010/0305717 A1 (ver Figura 1.11), es un exoesqueleto de rehabilitación para movimiento de entrenamiento de la mano de un usuario. Este sistema contiene una superficie donde se coloca la mano del usuario. El sub-ensamble de cada dedo está compuesto por un motor de desplazamiento lineal conectado a un montaje mecánico desde la falange de los

metacarpos a la falange proximal unidos por un carril guía para el movimiento por mecanismos de la falange proximal a la falange distal del dedo. Cuando el actuador lineal es activado se genera un movimiento en la falange proximal e medial de manera dependiente, es decir ambos movimientos se encuentran correlacionados (Assistive device for helping a user to move their hand, 2009).

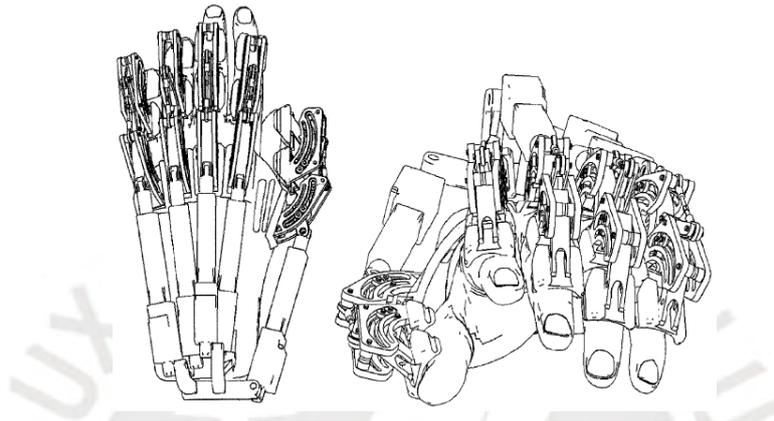


Figura 1.11. Sistema de rehabilitación de dedos por actuadores lineales.

Fuente: Exoesqueleto de rehabilitación en dedos (Patente)

1.5.3. Sensores

- **Sensor de posición resistivo:** Son comúnmente llamado potenciómetros rotativos, los cuales cambian su valor de resistencia al encontrarse desfasado un cierto ángulo.



Figura 1.12. Sensor de posición resistivo

Fuente: AliExpress

- **Encoder de efecto hall:** Son sensores que detectan la variación de un campo magnético variable. Esta variación es leída por un sistema micro-controlador con el cual se puede calcular la velocidad, sentido de giro y posición del eje (Amazon, 2019).



Figura 1.13. Micro-motor con encoder de efecto hall.

Fuente: Amazon

- **Encoder óptico o infrarrojo:** Es un sensor que se añade a un motor DC para convertir el movimiento del eje del motor en pulsos digitales, el cual es convertido en velocidad y posición del eje del motor. Esta transformación de movimiento a pulsos es gracias a la interrupción de un haz de luz entre un emisor y un receptor IR (infrarrojo) (Plata, 2014).



Figura 1.14. Encoder óptico o infrarrojo.

Fuente: Ingeniería Creativa

A continuación se muestra una tabla comparativa entre los sensores mencionados (ver Tabla 1.4).

Tabla 1.4. Tabla comparativa de los sensores de posición.

Sensor	Ventaja	Desventaja
Sensor de posición resistivo	Son de tamaño muy reducido.	Consume más corriente que los otros sensores mencionados
Encoder de efecto hall	Son fácilmente montables a los motores con eje expandido.	Solo puede ser utilizado en motores que tengan un eje expandido por la parte posterior.
Encoder óptico infrarrojo	Poseen más precisión en detectar la posición del eje del motor.	Ocupa mayor volumen que los sensores mencionados. Necesita un estructura adicional para el recubrimiento de la superficie ranurada.

Fuente: Elaboración propia.

1.5.4. Actuadores

- **Motor paso a paso:** Es un motor DC que convierte una serie de pulsos en desplazamientos angulares. Es generalmente usado en proyectos que se requieran gran precisión en sus movimientos; además de poder mantener una misma posición a pesar que se le esté aplicando un torque mayor al recomendado por su fabricante en un lapso de tiempo relativamente pequeño (depende del motor a pasos a usar).



Figura 1.15. Motor de pasos.

Fuente: AliExpress

- **Motor DC:** Todos los motores usados en proyectos son DC (servomotores, actuadores lineales y motores a paso). Este tipo de motor posee grandes velocidades y bajo torque por lo cual generalmente se acopla a su eje una caja reductora para aumentar el torque y reducir su velocidad.



Figura 1.16. Micro-motor DC con caja reductora.

Fuente: AliExpress

- **Servomotor:** Es un tipo especial de motor DC que permite controlar la posición del eje por medio de una señal PWM. Este tipo de motor posee una caja de engranajes que permite aumentar el torque y un controlador que realiza en control de la posición angular del eje del motor.

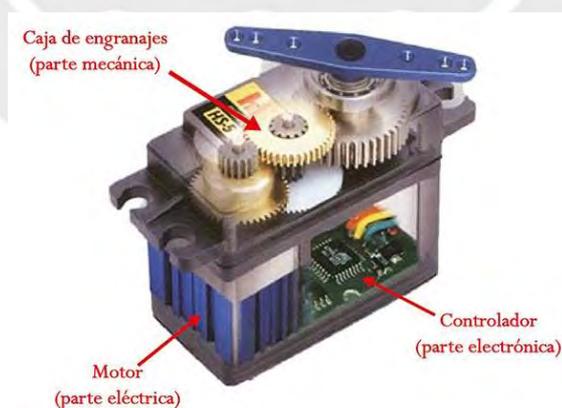


Figura 1.17. Partes de un servomotor.

Fuente: AliExpress

En la Tabla 1.5 se muestra la comparación entre los tipos motores DC mencionados.

Tabla 1.5. Tabla comparativa de actuadores.

Tipo de motor DC	Características	Desventaja
Motor paso a paso	Gran precisión en posicionarse en un ángulo deseado.	Consumo mayor de corriente a comparación de un motor DC tradicional y un servomotor. Necesidad de un driver con múltiples conexiones. Control más complejo. Necesidad de un Encoder para corroborar su posición.
Motor DC + caja de engranes	Gran torque. Dimensiones reducidas. Diferentes posiciones del movimiento de su eje de salida (puede ser axial o radial)	Para controlar su posición es necesario utilizar un encoder.
Servomotor	Fácil control de la posición de su eje. Solo posee 3 pines de conexión. Única posición del movimiento de su eje de salida (solo axial)	Dimensiones pre-establecidas por el fabricante. Necesidad de un Encoder para corroborar su posición.

1.5.5. Controladores

- **Arduino Mega embebido:** Es un microcontrolador con gran cantidad de pines digitales como analógicos (54 pines digitales de las cuales 15 pueden usarse como PWM). Además es compatible con ID de arduino (código libre) por lo cual es generalmente usado en prototipos de proyectos (Naylamp Mechatronics, Arduino Mega 2560 - Embebido, 2018).

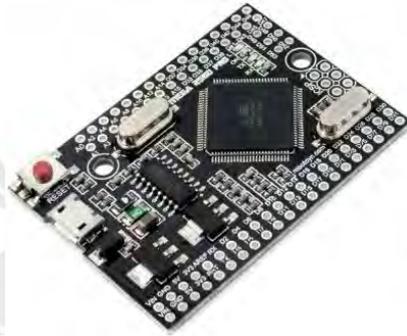


Figura 1.18. Arduino Mega embebido.

Fuente: Naylamp Mechatronics

- **ESP 32 NodeMcu-32:** Es un microcontrolador de bajo costo que ofrece capacidades de Wifi y bluetooth. Posee un CPU de dos núcleos de hasta 24MHz que se pueden controlar de forma independiente. Compatible con diferentes softwares y lenguajes de programación (como Zephyr Project, Mongoose OS, ID arduino y NuttX RTOS) (Naylamp Mechatronics, ESP32 NodeMcu-32, 2018).



Figura 1.19. ESP 32 NodeMcu-32.

Fuente: Naylamp Mechatronics

- **Tiva launchpad:** Microcontrolador equipado con 40 a 80 pines multifunción (pueden llegar a ser programados como entradas o salidas, digitales o analógicas). Su velocidad de procesamiento es de 5 a 7 veces más rápida que el arduino 1 (Texas Instrument, 2013).



Figura 1.20. Tiva launchpad.

Fuente: Texas Instrument

A continuación se mostrara una tabla con las características de cada microcontrolador mencionado.

Tabla 1.6. Tabla comparativa en microcontroladores.

Micro controlador	Característica	Desventaja
Arduino Mega embebido	<ul style="list-style-type: none"> • CPU ATmega2560 de un núcleo • Pines digitales: 54 (15 salidas PWM) • Memoria FLASH/ SRAM/ EEPROM: 256K/8K/4K • Gran cantidad de librerías fácil de utilizar. • Dimensiones: 38x35mm 	Velocidad de reloj: 16MHz
ESP 32 NodeMcu-32	<ul style="list-style-type: none"> • CPU Tensilica Xtensa 32-bit LX6 de dos núcleos. • Velocidad de reloj: 254MHz. • Memoria FLASH: 520K • Memoria SRAM: 16K 	Existen pocas librerías. Su programación más compleja (necesita varias configuraciones previas para poder ser utilizado)
Tiva launchpad	<ul style="list-style-type: none"> • CPU: ARM Cortex-M4F. • Velocidad de reloj: 80 a 120Hz. • Memoria RAM:32K. • Memoria EEPROM: 2K. 	La programación se puede realizar solo en el software subministrado por Texas Instrument.

Fuente: Elaboración propia

CAPITULO 2. DISEÑO CONCEPTUAL

En este capítulo se determinan las exigencias que debe cumplir el diseño en función de parámetros establecidos, el dimensionamiento, materia, energía, entre otros.

2.1. LISTA DE EXIGENCIAS

El diseño del proyecto requiere de ciertas exigencias según la demanda actual que se requiere por el cliente (ver Anexo 1), un exoesqueleto que cumpla de mejor manera a los movimientos recomendados por especialistas en rehabilitación de dedos y muñeca. Algunos de estos requerimientos son exigencias obligatorias que la máquina debe cumplir y otros, son deseos que se plantea para elaborar satisfactoriamente el diseño del exoesqueleto.

- **FUNCION PRINCIPAL:** Realizar la auto-terapia asistida al paciente mediante movimientos naturales de los dedos y muñeca en base a un patrón de movimiento ejecutado por el exoesqueleto de mano con diferentes velocidades de movimiento y cantidad de repeticiones.
- **GEOMETRIA:** Las dimensiones del equipo estarán basadas en medidas y proporciones antropométricas promedio de adultos mayores en la región (Perú y países sudamericanos cercanos al nacional).
- **MATERIAL:** Resistentes a la húmedas y temperaturas promedio del Perú- región costa. Además, estos no deben ocasionar incomodidad (peso y material) cuando estén en contacto con la piel del paciente.

- **MATERIA:** El producto de entrada será la mano del paciente pre-tratamiento introducida por el mismo. Se obtendrá la realización del ejercicio prescrito que el fisioterapeuta acompañó.
- **CINEMATICA:** El movimiento de las falanges proximal y medial serán independientes para tener una mayor proximidad a los movimientos recomendados por los especialistas. Además, se realizara la flexión y extensión de la articulación de la muñeca con un grado de libertad. Estos movimientos se realizarán por un intervalo de tiempo.
- **FUERZA:** Los actuadores del exoesqueleto generaran una fuerza mínima para mover los dedos y muñeca de las personas de la tercera edad.
- **ENERGÍA:**

Se ingresan estas fuentes de energía al sistema:

- Energía mecánica: El ingreso de la mano por parte del usuario lo cual se requiere energía cinética para lograrlo.
- Energía eléctrica: Se necesita energizar los sensores y actuadores del sistema.

Se expulsan las siguientes formas de energía al entorno:

- Energía térmica: Se obtendrá calor de parte de los actuadores del exoesqueleto.
- Energía sonora: Se produce sonido cuando se realiza el debido movimiento durante los ejercicios de rehabilitación.
- Energía lumínica: Producido por los indicadores del progreso durante el ejercicio de rehabilitación y el panel de control.

- **SOFTWARE:** El controlador debe asegurar el correcto funcionamiento de los equipos de control y electrónicos durante todo el proceso. Los códigos desarrollados deberán estar programados en software de código abierto.
- **COMUNICACIÓN:** La comunicación entre la máquina y el operario debe ser intuitiva a fin de evitar errores en el uso.
- **SEÑALES:**

Se ingresarán las siguientes señales al inicio y durante el proceso

- Señal de activación: Esta señal energiza al exoesqueleto y la distribuye a los sensores y actuadores.
- Señal de inicio del ejercicio: Esta señal indica que el ejercicio va a comenzar.
- Señal de parada de ejercicio: Esta señal es enviado por parte del usuario debido a los altos esfuerzos que le pueda ejercer el exoesqueleto.
- Señal de parada de emergencia: Esta señal deja de energizar al exoesqueleto por motivo de emergencia.

Se obtendrán las siguientes señales:

- Señal de estado de proceso: Esta señal será visible en el panel de control, la cual indicara el nombre del ejercicio que está realizando.
- Señal de seguimiento de tiempo: Esta señal será visible en el panel de control, la cual indica cuanto tiempo va realizando el mismo ejercicio.
- Señal de alarma y/o advertencia: Señal visible donde se indicara si un actuador no se encuentra funcionando correctamente.
- Señal de fin de ejercicio: Señal visual donde se indicara el fin del ejercicio.

- **USO:** El funcionamiento del exoesqueleto debe funcionar correctamente la región costa del Perú. Además, el usuario solo tiene acceso a las secciones diseñadas donde se encontrara ubicada la mano y las fuerzas ejercidas por el exoesqueleto podrán ser detenidas por el usuario.

Para poder utilizar el exoesqueleto de mano se necesitara una base de apoyo que soportara la mano del usuario y el dispositivo exoesqueleto de mano.

- **CONTROL:** El exoesqueleto de mano deberá ser encendida y apagada manualmente, en caso de emergencia el usuario también puede detener el dispositivo. El microcontrolador controlara la velocidad, la posición de los actuadores y la interfaz de la maquina con el usuario.
- **SEGURIDAD:** El exoesqueleto de mano contará con topes mecánicos y de control que impidan movimientos fuera de los rangos de desplazamiento de los dedos y la muñeca. Además, se evitara la colisión entre dedos durante el ejercicio.
- **CONTROL DE CALIDAD:** Las posiciones reales serán $\pm 2^\circ$ a las esperadas teniendo en cuenta que el rango de acción promedio de los dedos es de $\pm 45^\circ$.
- **Montaje:** El diseño debe permitir el montaje y desmontaje de los actuadores, los cuales no involucraran desensamblar todo el exoesqueleto. Esto será posible al usar su manual para alcanzar esta tarea.
- **MANTENIMIENTO:** Se plantea un mantenimiento anual encargado por el técnico especialista para los actuadores que generan el movimiento.

- **FABRICACION:** Todos los materiales deben ser de fácil adquisición en el mercado nacional y cuente con componentes de bajo costo de adquisición.
- **TRANSPORTE:** El exoesqueleto de mano será portable para permitir la libertad de desplazamiento del usuario con el dispositivo para ser utilizado en otra superficie. Además, los actuadores deben ser ligeros (no mayor a 5kg en conjunto) para que sea fácil el transporte del exoesqueleto.
- **ERGONOMIA:** El dispositivo exoesqueleto de mano será de fácil uso y cómodo para el paciente.
- **COSTO:** Bajo costo de producción y accesible a centros de salud nacional.
- **TIEMPO:** El tiempo de diseño no será mayor a 5 meses.

2.2. ESTRUCTURA DE FUNCIONES

Para definir las funciones con las que contará el sistema, primero se realiza un análisis del sistema definiendo las entradas y salidas de acuerdo a la lista de exigencias planteada anteriormente sin tener en cuenta los procesos internos (Black Box). Luego, se muestran las funciones del sistema, proponiendo los procesos con los que contará en la estructura de funciones.

2.2.1. Black Box

En la Figura 2.1 se muestran las entradas y salidas del sistema que se implementará en el exoesqueleto. De acuerdo a la lista de exigencias planteada, se ingresa la mano del paciente como materia de entrada al sistema para que, al final del proceso, se obtengan la mano post-tratamiento. Todo sistema debe recibir energía para poder operar; por tanto, se entregará energía mecánica y eléctrica al sistema para que los elementos internos cumplan sus funciones. La

energía mecánica son la energía cinética y potencial en el ingreso de la mano y energía eléctrica, para la activación los sensores y actuadores que automatizan el proceso. Se obtendrá energía mecánica, térmica, sonora y lumínica una vez finalizado el tratamiento asistido. La energía térmica, como del incremento de temperatura por parte de los motores; y energía lumínica, como indicadores en el panel de control. También se contará con señales que controlan el proceso, algunas serán internas y otras visuales. Los detalles de las señales están indicados en el Anexo 1 y detalladas en la sección 2.

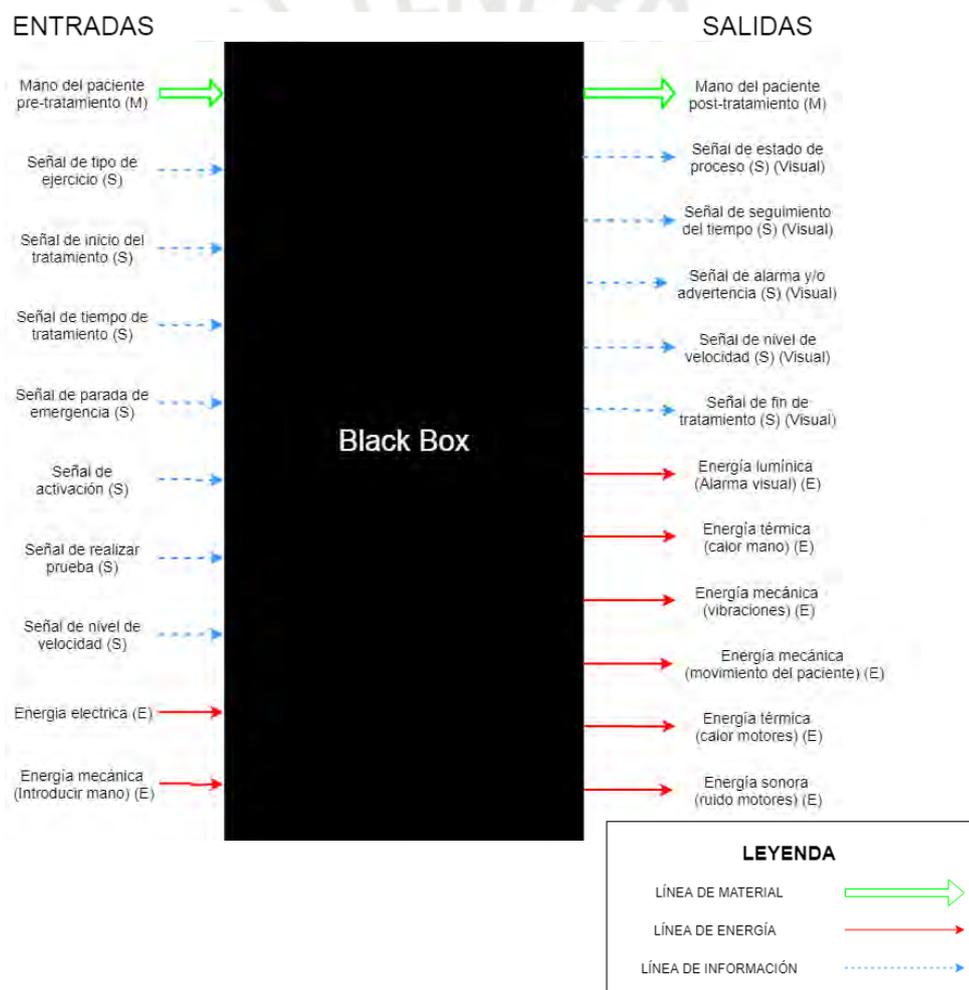


Figura 2.1. Black box del sistema. Fuente: Elaboración propia.

Fuente: Elaboración propia

2.2.2. Lista de funciones

A continuación, se enlistan y explican las funciones que contiene el sistema. Además, se indican las entradas y salidas en forma de energía, materia y señales de acuerdo al black box. Finalmente, se presenta la estructura de funciones (ver Figura 2.2) que integra los conceptos mostrados en esta sección.

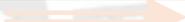
- **Ingresar y/o retirar mano pre-tratamiento del exoesqueleto:** Manera en la que la mano del paciente ingresa y/o retira del exoesqueleto.
- **Realizar movimientos de prueba:** Forma de comunicar al exoesqueleto que debe realizar movimientos de prueba para analizar si se encuentra funcionando correctamente antes del tratamiento.
- **Colocar y/o retirar el aseguramiento de dedos y muñeca del exoesqueleto:** Forma de asegurar el contacto de la mano del paciente y el exoesqueleto.
- **Realizar los movimientos en los dedos:** Mecanismo o manera de realizar los movimientos de los dedos.
- **Superficie de apoyo:** Forma de la superficie de apoyo para realizar el movimiento recomendado de la muñeca.
- **Realizar los movimientos en la muñeca:** Mecanismo o manera de realizar los movimientos de los dedos.
- **Accionar movimiento del mecanismo dedo pulgar:** Actuador que genera el movimiento del dedo pulgar.
- **Accionar movimiento de los mecanismos de los dedos:** índice, medio, anular y meñique: Actuadores que generan el movimiento de los dedos: índice, medio, anular y meñique.

- **Accionar movimiento del mecanismo de la muñeca:** Actuador que genera el movimiento de la muñeca.
- **Visualizar estado de proceso de alarma e indicadores:** Interface paciente-exoesqueleto.
- **Energizar:** Energía eléctrica que energizara a las partes eléctricas del exoesqueleto
- **Acondicionar energía de control:** Componente que regula el voltaje ingresado al voltaje que requiere el controlador.
- **Acondicionar energía de sensores:** Componente que regula el voltaje ingresado al voltaje que requieren los sensores.
- **Acondicionar energía de actuadores:** Componente que regula el voltaje ingresado al voltaje que requieren los actuadores.
- **Sensar ángulo del dedo pulgar:** Sensor que detecta el ángulo real del motor del dedo pulgar durante su funcionamiento.
- **Sensar ángulo de los dedos:** índice, medio, anular y meñique: Sensores que detectan los ángulos reales de los motores de los dedos: índice, medio, anular y meñique durante su funcionamiento.
- **Sensar ángulo de la muñeca:** Sensor que detecta el ángulo real del motor de la muñeca durante su funcionamiento.
- **Sensar presencia de mano:** Sensor que detecta si el usuario ya se encuentra utilizando el exoesqueleto.
- **Sensor parada de emergencia:** Sensor que detecta si el operario desea detener el sistema en caso de malfuncionamiento de la máquina o si el operario así lo desea.

- **Controlar variables:** Dispositivo de control usado para gobernar el sistema de movimientos de los dedos y muñeca; así como las variables de proceso tales como temperatura, velocidad de flujo de aire y tiempo de tostado.

Con la lista de funciones y las entradas/salidas presentes en el black box se realiza la estructura global de funciones (Figura 2.2) del sistema dividido en 5 grupos: controlar variables, actuadores, energía, sensores y sistema físico. Las líneas de conexión son las siguientes:

Tabla 2.1. Líneas de conexión de la estructura de funciones.

Línea de control	
Línea de conexión por mecanismo	
Línea de información	
Línea de energía recibida inicial	
Línea de energía acondicionada	
Línea de interacción de la mano del usuario	

Fuente: Elaboración propia

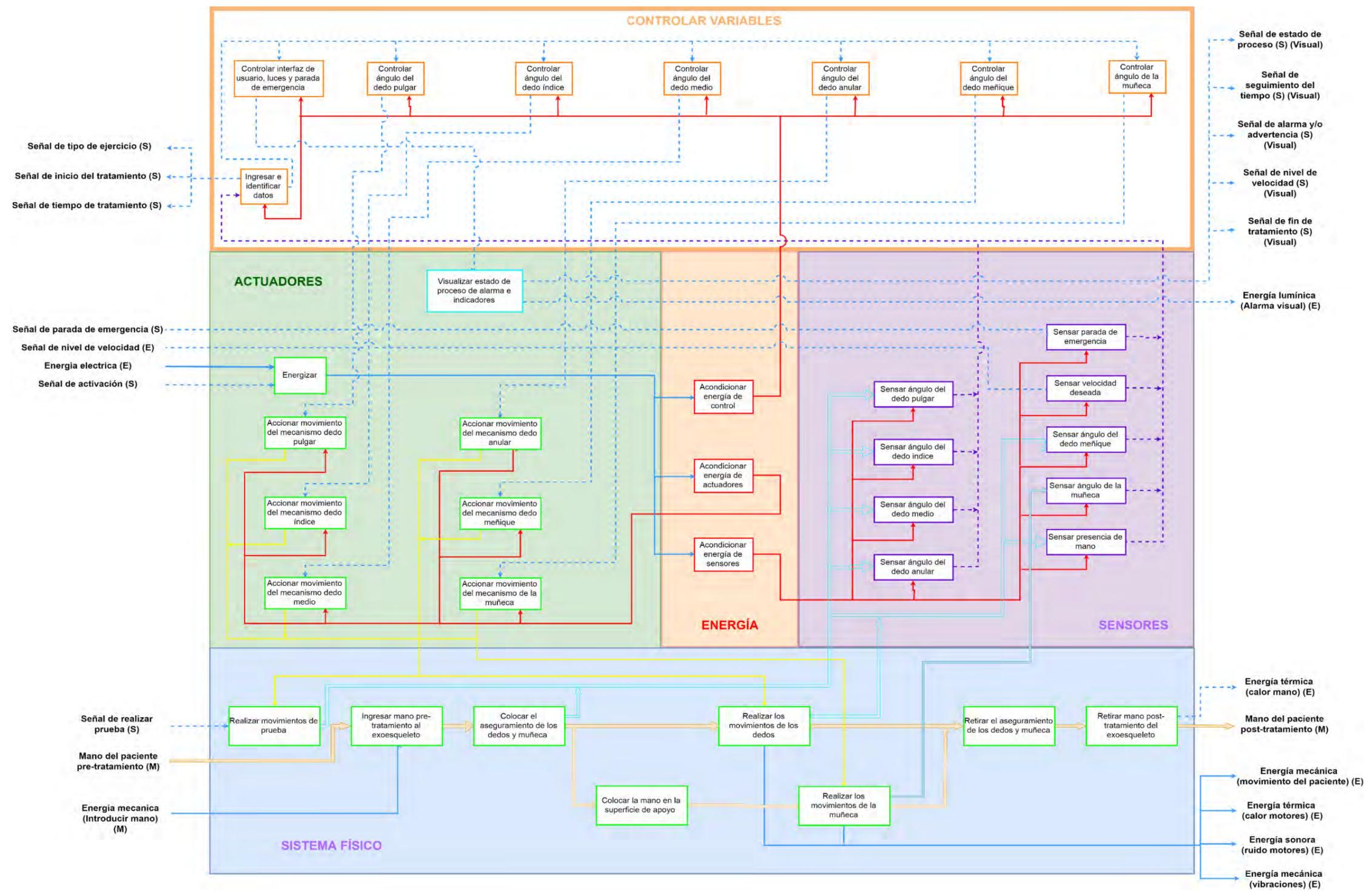


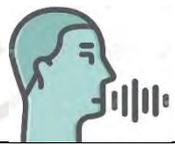
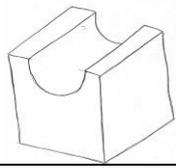
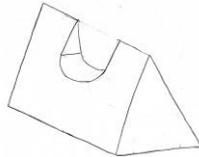
Figura 2.2. Estructura de funciones.

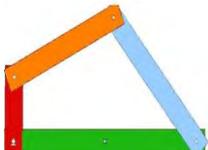
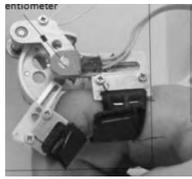
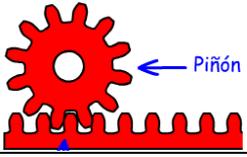
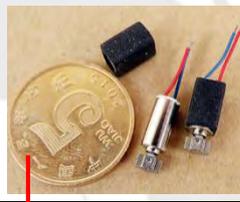
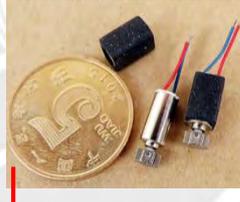
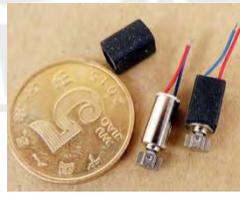
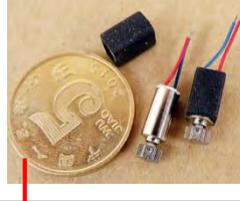
Fuente: Elaboración propia

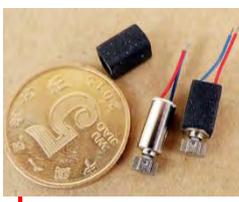
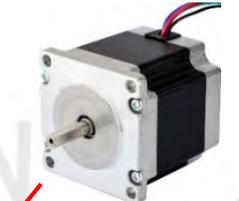
2.3. MATRIZ MORFOLOGICA

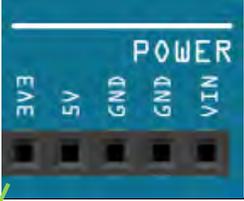
En cada función presenta en la estructura de funciones se plantean como máximo 3 portadores de solución basadas en tecnologías estudiadas en el Estado del arte de la sección 1.7. A partir de un seguimiento por flechas en la matriz se proponen 3 soluciones (ver Tabla 2.2).

Tabla 2.2. Matriz morfológica.

FUNCIONES	PORTADORES DE SOLUCIÓN		
	1	2	3
Realizar movimientos de prueba	Botón 	Automático 	Comandos de voz 
Ingresar mano pre-tratamiento al exoesqueleto	Manual 		
Colocar aseguramiento de los dedos y muñeca	Manual 		
Aseguramiento de los dedos y muñeca	Cinta con pegapega 	Bridas reutilizables de Nylon 	Bridas con correa de nylon 
Colocar la mano en la superficie de apoyo	Manual 		
Colocar la mano en la superficie de apoyo	Forma cubica 	Forma del mouse 	Forma prismática 

FUNCIONES	PORTADORES DE SOLUCIÓN		
	1	2	3
Realizar los movimientos en los dedos	<p>Mecanismo de 4 barras</p> 	<p>Cuerdas</p> 	<p>Aplicación directa de un motor y un mecanismo de 4 barras</p>
Realizar los movimientos en la muñeca	<p>Servomotor</p> 		<p>Mecanismo piñón-cremallera</p> 
Accionar movimiento del mecanismo dedo pulgar	<p>Servomotor miniatura</p> 	<p>Motor DC miniatura</p> 	<p>Motor de Pasos miniatura</p> 
Accionar movimiento del mecanismo dedo índice	<p>Servomotor miniatura</p> 	<p>Motor DC miniatura</p> 	<p>Motor de Pasos miniatura</p> 
Accionar movimiento del mecanismo dedo medio	<p>Servomotor miniatura</p> 	<p>Motor DC miniatura</p> 	<p>Motor de Pasos miniatura</p> 
Accionar movimiento del mecanismo dedo anular	<p>Servomotor miniatura</p> 	<p>Motor DC miniatura</p> 	<p>Motor de Pasos miniatura</p> 

FUNCIONES	PORTADORES DE SOLUCIÓN		
	1	2	3
Accionar movimiento del mecanismo dedo meñique	<p>Servomotor miniatura</p> 	<p>Motor DC miniatura</p> 	<p>Motor de Pasos miniatura</p> 
Accionar movimiento del mecanismo de la muñeca	<p>Servomotor</p> 	<p>Motor a pasos</p> 	<p>Motor DC</p> 
Visualizar estado de proceso de alarma e indicadores	<p>Pantalla LCD</p> 	<p>Pantalla TFT</p> 	<p>Pantalla TFT LCD táctil</p> 
Energizar	<p>Baterías de recargables</p> 	<p>Baterías DC simples</p> 	<p>Corriente alterna (AC)</p>  <p>Convertidor AC-DC</p> 
Acondicionar energía de control	<p>Convertidor DC-DC lineal</p> 	<p>Convertidor DC-DC fija</p>  <p>Input: 2-5V Output: 5V</p>	<p>Baterías DC simples</p> 

FUNCIONES	PORTADORES DE SOLUCIÓN		
	1	2	3
Acondicionar energía de sensores	<p>Convertidor DC-DC fija</p>  <p>Input: 2-5V Output : 5V</p>	<p>Convertidor DC-DC lineal</p> 	<p>Fuente propia del microcontrolador</p> 
Acondicionar energía de actuadores	<p>Convertidor DC-DC lineal</p> 	<p>Convertidor DC-DC fija</p>  <p>Input: 2-5V Output : 5V</p>	
Sensar ángulo del dedo pulgar	<p>Potenciómetro</p> 	<p>Encoder de efecto Hall</p> 	<p>Encoder óptico o infrarrojo</p> 
Sensar ángulo del dedo índice	<p>Potenciómetro</p> 	<p>Encoder de efecto Hall</p> 	<p>Encoder óptico o infrarrojo</p> 
Sensar ángulo del dedo medio	<p>Potenciómetro</p> 	<p>Encoder de efecto Hall</p> 	<p>Encoder óptico o infrarrojo</p> 
Sensar ángulo del dedo anular	<p>Potenciómetro</p> 	<p>Encoder de efecto Hall</p> 	<p>Encoder óptico o infrarrojo</p> 

FUNCIONES	PORTADORES DE SOLUCIÓN		
	1	2	3
Sensar ángulo del dedo meñique	Potenciómetro 	Encoder de efecto Hall 	Encoder óptico o infrarrojo 
Sensar ángulo de la muñeca	Potenciómetro 	Encoder de efecto Hall 	Encoder óptico o infrarrojo 
Parada de emergencia	Botón físico 		
Ingresar e identificar datos	Botones físicos 	Botón virtual en la pantalla táctil 	
Controlar ángulo del dedo pulgar	Arduino mega embebido 	ESP32 NodeMcu-32 	Tiva launchpad 



FUNCIONES	PORTADORES DE SOLUCIÓN		
	1	2	3
Controlar ángulo del dedo índice	Arduino mega embebido 	ESP32 NodeMcu- 	Tiva launchpad 
Controlar ángulo del dedo medio	↓ Arduino mega embebido 	↓ 32 ESP32 NodeMcu-32 	↓ Tiva launchpad 
Controlar ángulo del dedo anular	↓ Arduino mega embebido 	↓ ESP32 NodeMcu- 	↓ Tiva launchpad 
Controlar ángulo del dedo meñique	↓ Arduino mega embebido 	↓ 32 ESP32 NodeMcu-32 	↓ Tiva launchpad 
Controlar ángulo de la muñeca	↓ Arduino mega embebido 	↓ ESP32 NodeMcu-32 	↓ Tiva launchpad 

Fuente: Elaboración propia

En la siguiente tabla se detalla el significado de cada tipo de flecha.

Tabla 2.3. Líneas de conexión para matriz morfológica. Fuente: Elaboración propia.

Indicador	Concepto 1	Concepto 2	Concepto 3
Flecha	→	→	→

Fuente: Elaboración propia

2.4. CONCEPTO DE LA SOLUCIÓN

Para cada solución trazada en la matriz morfológica se realiza un bosquejo detallando dimensiones aproximadas y el portador de solución seleccionado. A continuación, se explica cada concepto de solución y una imagen general del bosquejo.

El concepto primer concepto de solución plantea que si se desea realizar movimientos de prueba, esta pueda ser accionada mediante un botón físico encontrado junto a la pantalla LCD (ver figura 2.3) y energizar al sistema por medio de baterías recargables los cuales se encuentran detrás del interfaz de usuario (ver Figura 2.4). El diseño contempla un ingreso de la mano del paciente de forma manual, sea por el mismo o por ayuda de otra persona que le ayude. Después de colocar la mano del paciente al exoesqueleto, se debe asegurar que los dedos y muñeca siempre estén en contacto con el exoesqueleto y esto es logrado con cintas con los sujetadores en cada dedo. Se plantea que los movimientos recomendados sean por medio de mecanismos de 4 barras.

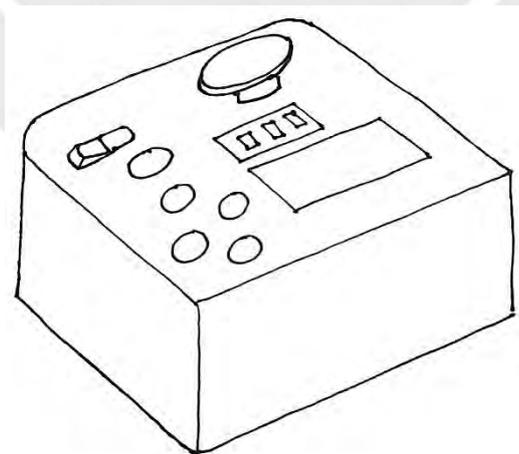


Figura 2.3. Bosquejo del interfaz de usuario

Fuente: Elaboración propia

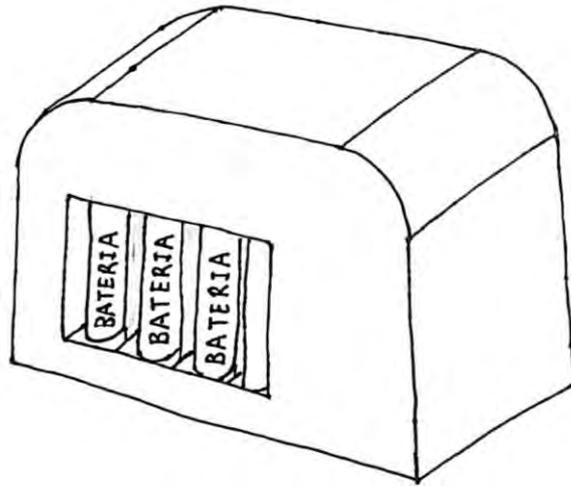


Figura 2.4 Posición de las baterías recargables

Fuente: Elaboración propia

El tipo de tratamiento, tiempo y estado de los motores se encontrara indicado en la pantalla LCD. Se utilizara una batería recargable para poder ser utilizado en lugares sin energía eléctrica; y estas se encontraran debajo de la pantalla LCD, para luego ser transmitida esta energía por medio de cables hacia los micromotores.

El tratamiento de la muñeca se podrá realizar solo con la superficie de apoyo, el cual poseerá un servomotor en su interior con una rueda dentada, el paciente colocara su mano, guiado por carriles, en la superficie de apoyo (ver Figura 2.5). El movimiento de la muñeca será realizado gracias al contacto de la rueda dentada de la superficie de apoyo y la rueda dentada que se encuentra en el exoesqueleto.

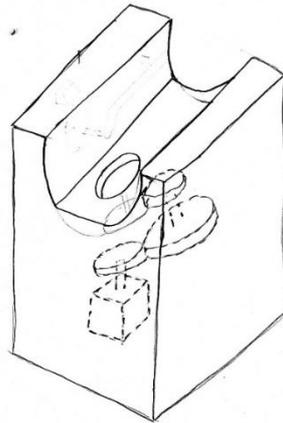


Figura 2.5. Apoyo de muñeca. Concepto de solución 1 y 2

La superficie de apoyo será de forma cubica para que el paciente pueda apoyarse, para evitar que el codo, así como el hombro se fatiguen innecesariamente.

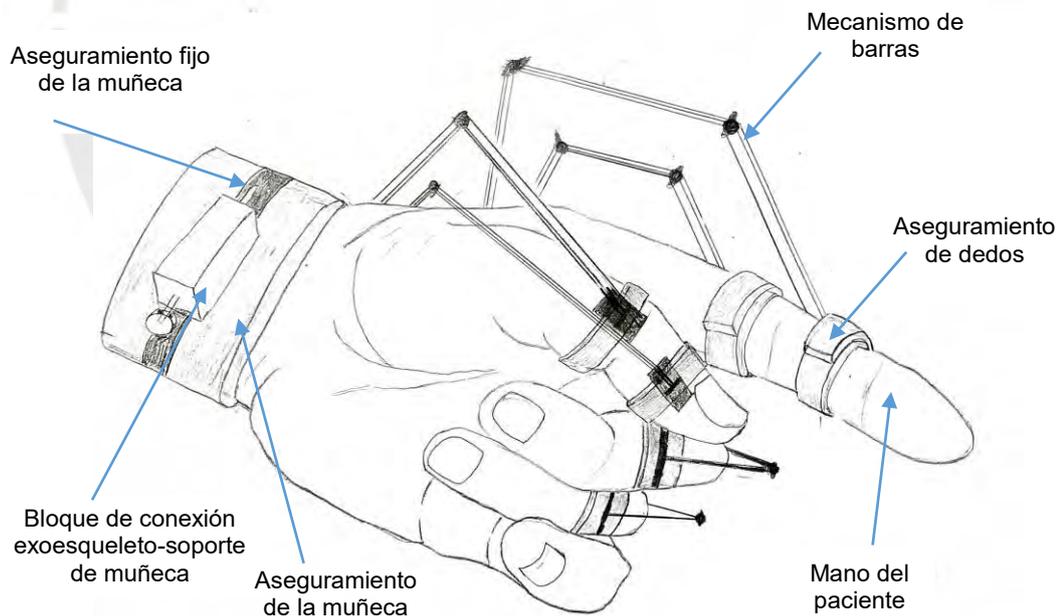


Figura 2.6. Bosquejo del exoesqueleto de mano

Fuente: Elaboración propia

El segundo concepto (Figura 2.6) plantea que si se desea realizar movimientos de prueba, esta pueda ser accionada mediante un botón. El diseño contempla un ingreso de la mano del paciente de forma manual, sea por el mismo o por ayuda de alguna persona que le ayude. Después de colocar la mano del paciente al exoesqueleto, se debe asegurar que los dedos y muñeca siempre estén en contacto con el exoesqueleto y esto es logrado bridas reutilizables de nylon en cada dedo y muñeca. Se plantea que los movimientos recomendados sean por medio de cuerdas tensadas.

El tratamiento de la muñeca se podrá realizar solo con la superficie de apoyo, el cual poseerá un servomotor en su interior con una rueda dentada y una cuerda, el paciente colocara su mano, guiado por carriles, en la superficie de apoyo. El movimiento de la muñeca será realizado gracias al contacto de la rueda dentada de la superficie de apoyo y la rueda dentada que se encuentra en el exoesqueleto, y otro motor accionara el movimiento gracias a la cuerda tensada.

El tipo de tratamiento, tiempo y estado de los motores se encontrara indicado en la superficie de apoyo por una pantalla táctil. Se utilizara pilas simples para poder ser utilizado en lugares sin energía eléctrica; y estas se encontraran debajo de la superficie de apoyo. La alimentación de los servomotores de los dedos se encontraran en la superficie de apoyo y será transmitida por medio de cables.

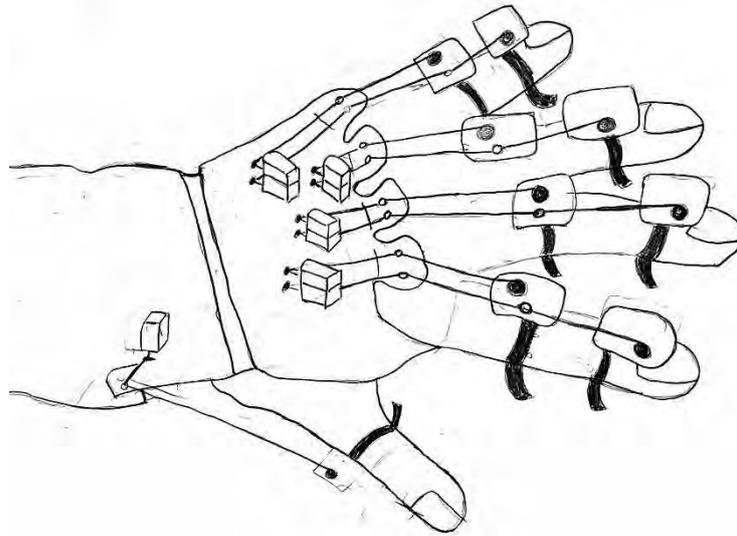


Figura 2.7. Concepto de solución 2

Fuente: Elaboración propia

A continuación se mostrara la vista frontal del mecanismo que realiza el movimiento de la muñeca (ver Figura 2.7) el cual es parte del primer y segundo concepto de solución d.

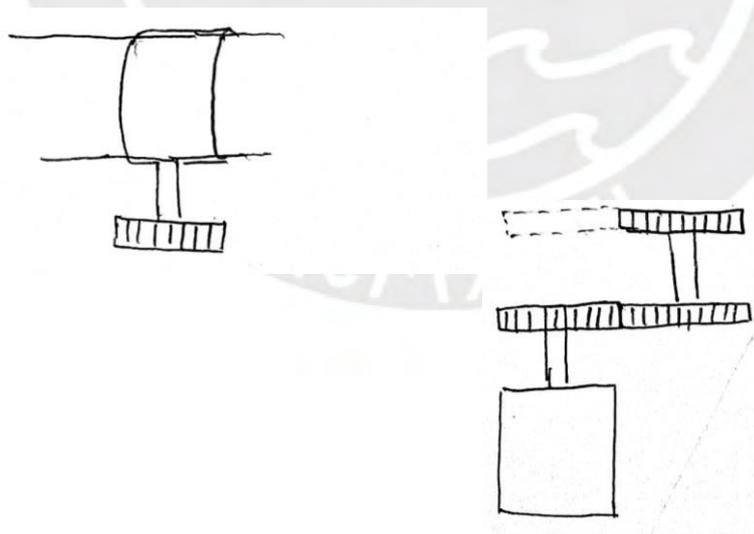


Figura 2.8. Vista frontal del accionador del movimiento de la muñeca.

Concepto de solución 1 y 2

Fuente: Elaboración propia

El tercer concepto (Figura 2.8) plantea que si se desea realizar movimientos de prueba, esta pueda ser accionada mediante comandos de voz. El diseño contempla un ingreso de la mano del paciente de forma manual, sea por el mismo o por ayuda de alguna persona que le ayude. Después de colocar la mano del paciente al exoesqueleto, se debe asegurar que los dedos y muñeca siempre estén en contacto con el exoesqueleto y esto es logrado con bridas con correa de nylon en cada dedo y muñeca. Se plantea que los movimientos recomendados sean por medio de mecanismos de barras.

El tratamiento de los dedos y de la muñeca se realizara solo con la superficie de apoyo, el cual poseerá un actuador lineal que ira conectado a una cremallera en su interior con una rueda dentada, el paciente colocara su mano, guiado por carriles, en la superficie de apoyo. El movimiento de la muñeca será realizado gracias al contacto de la rueda dentada de la superficie de apoyo y la rueda dentada que se encuentra en el exoesqueleto.

Para el movimiento de los dedos se utilizara un mecanismo de cuatro barras para las articulaciones más alejadas de la palma de la mano, y un motor directo para el movimiento de la articulación más próxima a la palma de la mano.

El tipo de tratamiento, tiempo y estado de los motores se encontrara indicado en una pantalla led en la superficie de apoyo. Se utilizara una batería recargable para poder ser utilizado en lugares sin energía eléctrica; y estas se encontraran debajo de la superficie de apoyo. La alimentación de los servomotores de los dedos se encontraran en la superficie de apoyo y será transmitida a los servomotores por medio de cables.

La superficie de apoyo será de forma de un prisma triangular (tamaño de la mano) para que el paciente, cuando quiera movilizarse y desee guardarlo, ocupara menor espacio.

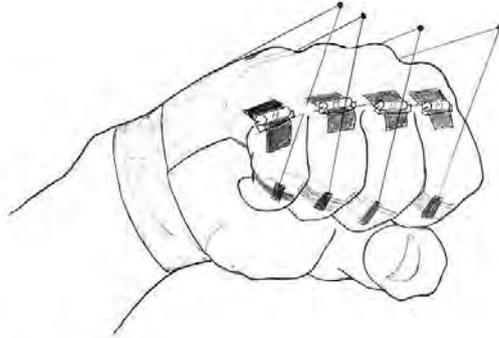


Figura 2.9. Exoesqueleto de mano. Concepto de solución 3

Fuente: Elaboración propia

La posición de la batería para los dos últimos conceptos de solución anteriormente mencionados se encontraran en la parte inferior del botón de emergencia (ver Figura 2.9).

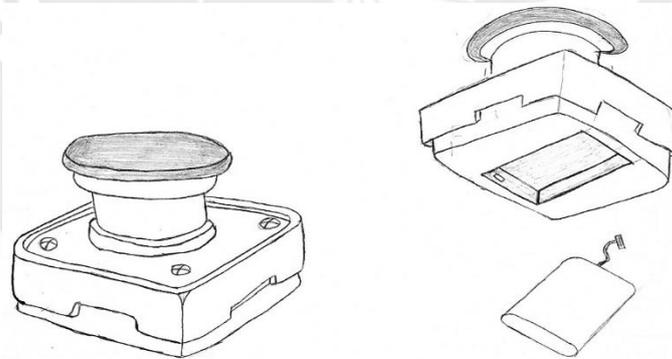


Figura 2.10. Posición de la batería y botón de emergencia

Fuente: Elaboración propia

La posición de la pantalla TFT táctil, no táctil y ICD se encontrarán en el antebrazo, así como el botón de emergencia (ver Figura 2.10).

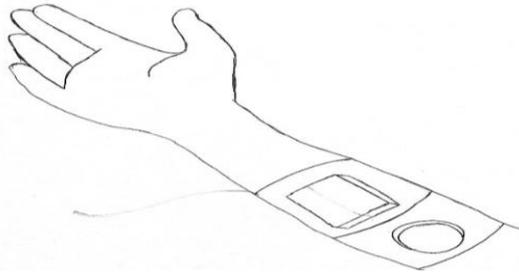


Figura 2.11. Ubicación del interfaz usuario maquina

Fuente: Elaboración propia

2.5. EVALUACIÓN TÉCNICA - ECONÓMICA

Se realiza una evaluación de carácter técnico y económico a cada uno de los 3 conceptos de solución planteados. A cada solución se le asigna un puntaje entre 1 y 3, además, cada puntaje es multiplicado por un peso asignado según el criterio de evaluación, el cual es determinado por el diseñador. En la Tabla 2.4 y 2.5 se detallan los puntajes asignados y se muestran los promedios de cada solución con respecto al puntaje ideal.

Tabla 2.4: Evaluación técnica

TÉCNICO			Solución 1 (S1)			Solución 2 (S2)		Solución 3 (S3)		Solución ideal (SI)	
Nro	criterio	g	p	pxg	p	pxg	p	pxg	p	pxg	
1	Presentación funcional	Función principal	4	4	16	4	16	4	16	4	16
2		Geometría	3	2	6	3	9	3	9	4	12
3		Señales	3	3	9	2	6	2	6	4	12
4		Control	4	3	12	2	8	2	8	4	16
5		Comunicaciones	4	3	12	3	12	3	12	4	16
6		Seguridad	4	3	12	2	8	1	4	4	16
7		Uso de energía	2	2	4	2	4	1	2	4	8
8		Control de calidad	3	3	9	2	6	2	6	4	12
9		Complejidad en piezas	2	2	4	3	6	2	4	4	8
10	Factores humanos	Fácil montaje y desmontaje	4	3	12	3	12	3	12	4	16
11		Rápido montaje y desmontaje	4	3	12	2	8	2	8	4	16
12		Transportabilidad	4	3	12	2	8	1	4	4	16
13		Complejidad en su uso	3	2	6	3	9	3	9	4	12
14		Lista de exigencia	4	3	12	3	12	3	12	4	16
15		Ergonomía	4	3	12	2	8	2	8	4	16
Suma			42	150	38	132	34	120	60	208	
Valor técnico Xi				0,72		0,63		0,58		1,00	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2.5: Evaluación económica

ECONOMICO			Solución 1 (S1)			Solución 2 (S2)		Solución 3 (S3)		Solución ideal (SI)	
Nro	Criterio	g	p	pxg	p	pxg	p	pxg	p	pxp	
1	Presentación funcional	Función principal	3	3	9	3	9	3	9	4	12
2		Geometría	3	3	9	3	9	3	9	4	12
3		Señales	3	3	9	2	6	2	6	4	12
4		Control	3	3	9	2	6	2	6	4	12
5		Comunicaciones	4	3	12	3	12	3	12	4	16
6		Seguridad	4	3	12	2	8	1	4	4	16
7		Uso de energía	2	2	4	2	4	3	6	4	8
8		Control de calidad	3	3	9	2	6	2	6	4	12
9		Complejidad en piezas	3	2	6	3	9	2	6	4	12
10	Factores humanos	Fácil montaje y desmontaje	4	3	12	3	12	3	12	4	16
11		Rápido montaje y desmontaje	4	3	12	3	12	3	12	4	16
12		Transportabilidad	3	2	6	3	9	3	9	4	12
13		Complejidad en su uso	3	3	9	3	9	3	9	4	12
14		Lista de exigencia	4	3	12	3	12	3	12	4	16
15		Ergonomía	3	3	9	2	6	2	6	4	12
Suma			42	139	39	129	38	124	60	196	
Valor económico Xi				0,71		0,66		0,63		1,00	

Fuente: Elaboración propia

Donde:

- P: puntaje de 0 a 4 (Escala de valores según VDI2225)
- 0: No satisface
- 1: Aceptable a las justas
- 2: Suficiente
- 3: Bien
- 4: Muy bien (Ideal)
- g: es el peso ponderado y se da en función a la importancia de los criterios de evaluación

Los promedios son plasmados en un gráfico de dispersión presentado en el Grafico 2.1 en el cual se observa que la solución 1 está ligeramente más cerca a la solución ideal. Además, al ubicarse en la parte derecha superior, se evidencia la obtención de un mayor promedio en la evaluación económica.

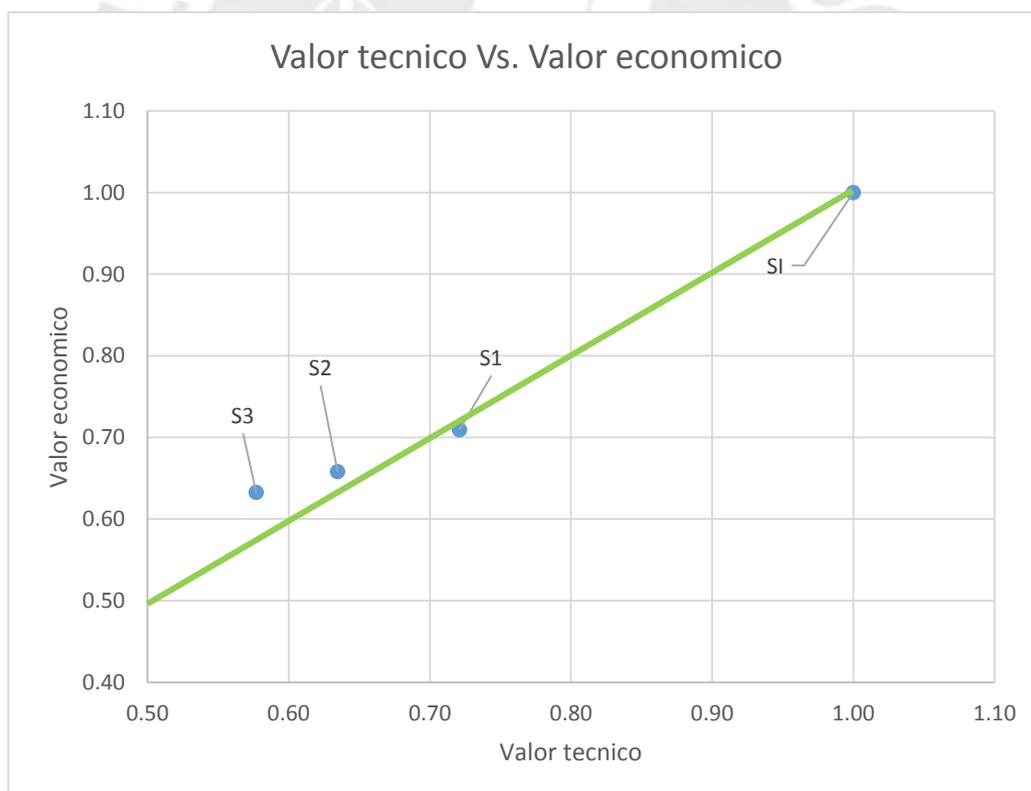


Gráfico 2.1: Valor técnico-económico entre las soluciones

Fuente: Elaboración propia

CONCLUSIONES

- Se cumplió con el objetivo general de diseñar un exoesqueleto de mano y muñeca portátil con más grados de libertad y de menor costo que los exoesqueletos comerciales.
- Según la problemática actual en el tratamiento de manos en personas adultas, el proyecto desarrollado presenta una gran oportunidad de mejora en los tratamientos de mano, tanto a nivel tecnológico como eficacia en el desarrollo de mejora del paciente.
- Se cumplió el objetivo de poseer productos nacionales, excepto por los micromotores, por ese motivo, se sugiere realizar la compra con anticipación.
- Se cumplió con la exigencia de seguridad planteado debido a que la caja de engranajes del motor DC se encuentra cubierta por su propio soporte, el cual es comercial.
- Se cumplió con el objetivo de realizar la evaluación técnica-económica y con esto elegir la mejor concepto de solución.
- El exoesqueleto de mano y muñeca propuesto puede ser utilizado por pacientes no necesariamente adultos mayores que requieran una rehabilitación en su motricidad, pero primero se tendrá que realizar cambios en las dimensiones del exoesqueleto para su correcto funcionamiento.

REFERENCIAS

- Organización Mundial de la Salud. (Mayo de 2017). (OMS) Recuperado el 18 de Abril de 2019, de <https://www.who.int/features/factfiles/ageing/es/>
- (2009). Recuperado el 15 de Junio de 2019, de <https://patents.google.com/patent/US8574178B2/en>
- Allegro Medical. (2017). Recuperado el 20 de 07 de 2020, de <https://www.allegromedical.com/patient-care-c530/kinetec-maestra-cpm-hand-and-wrist-p571062.html>
- Amazon. (23 de Enero de 2019). *Amazon*. Recuperado el 25 de Mayo de 2019, de Amazon: <https://www.amazon.com/uxcell-Encoder-Velocity-Measurement-Balance/dp/B07N1F8B91>
- Asia Research News. (07 de Junio de 2011). Recuperado el 15 de Mayo de 2019, de https://www.asiaresearchnews.com/html/article.php/aid/5744/cid/2/research/medicine/the_hong_kong_polytechnic_university/polyu_wins_four_awards_in_iena_exhibition_of_germany.html
- Banco Mundial/BIRF+AIF. (2018). *Indicador de crecimiento de adultos mayores*. Recuperado el 18 de Abril de 2019, de <https://datos.bancomundial.org/indicador/SP.POP.65UP.FE.IN>.
- Blog Seas*. (27 de Junio de 2013). Recuperado el 18 de Abril de 2019, de <https://www.seas.es/blog/automatizacion/la-robotica-aplicada-a-la-medicina/>

Blouin, C. (2018). Recuperado el 20 de Julio de 2020, de <https://cdn01.pucp.education/idehpucp/wp-content/uploads/2018/11/23160106/publicacion-virtual-pam.pdf>

Gómez, P. (Abril de 2019). *Premium Madrid*. Recuperado el 20 de Junio de 2019, de <https://rehabilitacionpremiummadrid.com/blog/patricia-gomez/terapia-activa-tratamiento-en-fisioterapia-a-traves-del-ejercicio-terapeutico-y-fisico-parte-i/>

Hand of Hope. (2018). Recuperado el 20 de Abril de 2019, de <https://exoskeletonreport.com/product/hand-of-hope/>

Kaser medical. (2014). Recuperado el 20 de Abril de 2019, de <http://theratechequip.com/wp-content/uploads/2014/04/DigiGlide-XT-hand.pdf>

Kinetec. (2009). Recuperado el 20 de Abril de 2019, de http://www.andover.cl/wp-content/uploads/2018/10/kinetec_br.pdf

Lopez, J. (20 de Octubre de 2013). Recuperado el 20 de Abril de 2019, de <https://www.slideshare.net/josedaniellopez77/fractura-de-escafoides-27391550>

MINSA. (2010). Recuperado el 18 de Abril de 2019, de <http://www.minsa.gob.pe/dggdrh/libros/pdf/s1/l-12.%20Necesidades%20%20de%20Medicos%20Especialistas%20en%200el%20Sector%20Salud%2004.07.11.pdf>

National Geographic. (2018). (National Geographic HD) Recuperado el 18 de Abril de 2019, de https://www.youtube.com/watch?v=ApJ_WPANEqU

Naylamp Mechatronics. (2018). *Naylamp Mechatronics*. Recuperado el 25 de Mayo de 2019, de Naylamp Mechatronics - Microcontroladores: <https://naylampmechatronics.com/espressif-esp/384-placa-de-desarrollo-para-esp32-nodemcu-32.html>

Naylamp Mechatronics. (2018). *Naylamp Mechatronics*. Recuperado el 25 de Mayo de 2019, de Naylamp Mechatronics - Microcontroladores: https://naylampmechatronics.com/arduino-tarjetas/402-arduino-mega-2560-embebido.html?search_query=Arduino+Mega+embebido&results=281

Neofect. (2010). Recuperado el 20 de Mayo de 2019, de <https://www.neofect.com/us>

Organización Mundial de la Salud. (2015). Recuperado el 20 de Julio de 2020, de <https://www.who.int/ageing/publications/world-report-2015/es/>

Plata, I. C. (Ed.). (10 de Noviembre de 2014). *Ingeniería Creativa*. Recuperado el 25 de Mayo de 2019, de <http://carolina-sp.blogspot.com/2014/11/contador-de-pulsos-de-encoder-con.html>

(2012). *Porcentaje de personas con discapacidad que poseen dificultad para ingresar a un servicio público*. Encuesta Nacional, INEI, Lima, Lima. Recuperado el 20 de Junio de 2019, de https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1171/ENEDIS%202012%20-%20COMPLETO.pdf

Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud. (2014). *El accidente cerebrovascular en el Perú: una enfermedad prevalente olvidada y desatendida*. Recuperado el 20 de Julio de 2020, de http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1726-46342014000200040

Tecnosfera. (27 de Junio de 2013). (El tiempo Televisión) Recuperado el 18 de Abril de 2019, de <https://www.youtube.com/watch?v=WCOsmWZmeY0>

Texas Instrument. (2013). En *Manual de usuario* (pág. 27). Texas Instruments Incorporated. Recuperado el 25 de Mayo de 2019, de <https://www.ti.com/lit/ug/spmu296/spmu296.pdf>

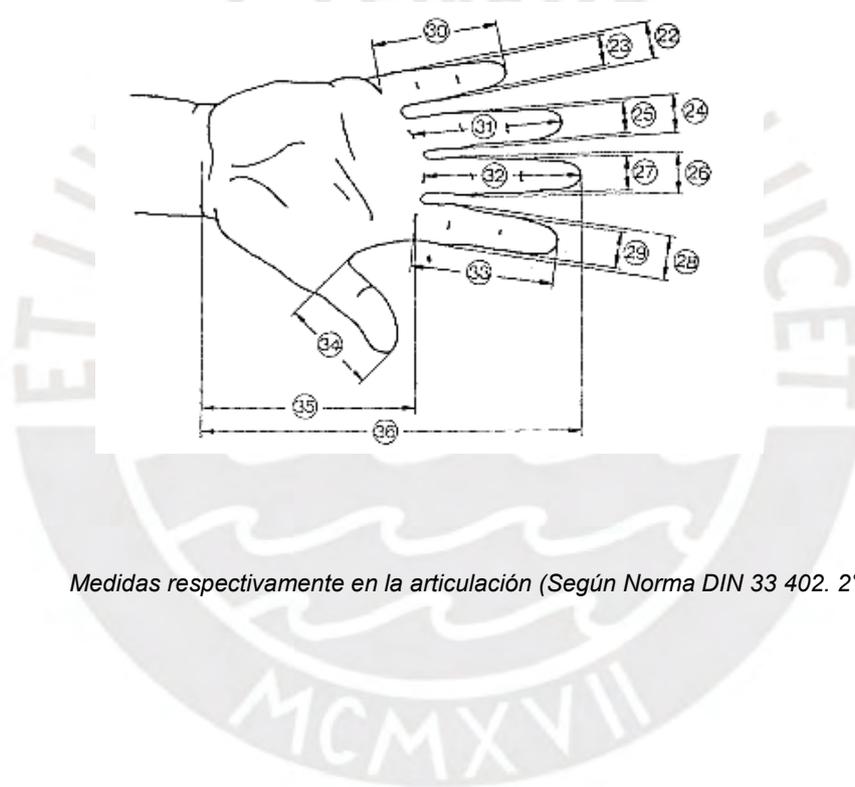
Wang, J., Li, J., Zhang, Y., & Wang, S. (2009). Recuperado el 20 de Mayo de 2019, de <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5334779/>



Anexo A: Norma DIN 33402

Las dimensiones de las manos tienen una gran importancia para el diseño de herramientas, utillaje y mandos. Ante tal necesidad se estableció la norma DIN 33402 con el fin de estandarizar estas medidas y poder ser utilizadas en la industria.

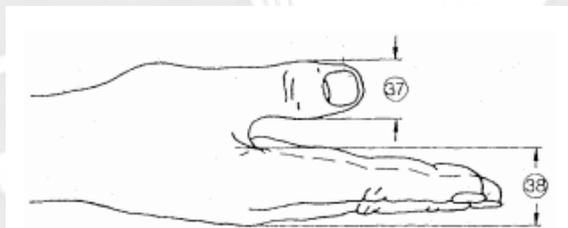
A continuación se muestran las medias para las manos que esta norma dicta.



Medidas respectivamente en la articulación (Según Norma DIN 33 402. 2° parte)

Tabla con las medidas respectivamente en la articulación (Según Norma DIN 33 402. 2° parte)

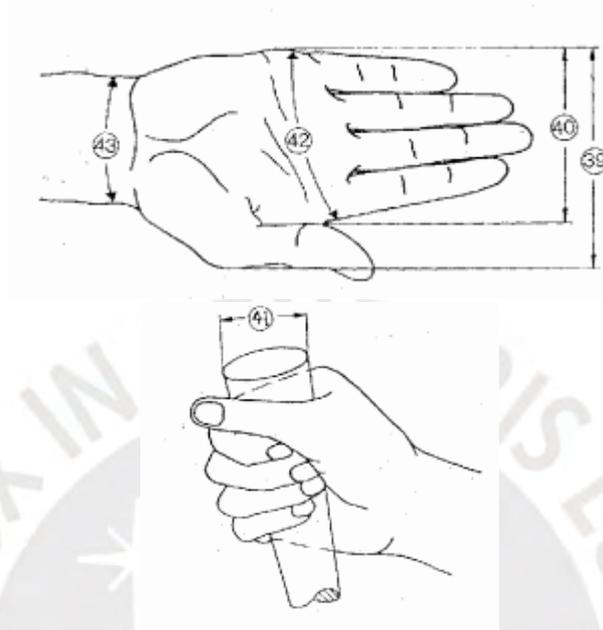
Dimensiones en cm		Percentil					
		Hombres			Mujeres		
		%	0%	5%	%	0%	5%
22	Ancho del meñique en la palma de la mano	1,8	1,7	1,8	1,2	1,5	1,7
23	Ancho del meñique próximo de la yema	1,4	1,5	1,7	1,1	1,3	1,5
24	Ancho del dedo anular en la palma de la mano	1,8	2,0	2,1	1,5	1,6	1,8
25	Ancho del dedo anular próximo a la yema	1,5	1,7	1,9	1,3	1,4	1,6
26	Ancho del dedo mayor en la palma de la mano	1,9	2,1	2,3	1,6	1,8	2,0
27	Ancho del dedo mayor próximo a la yema	1,7	1,8	2,0	1,4	1,5	1,7
28	Ancho del dedo índice en la palma de la mano	1,9	2,1	2,3	1,6	1,8	2,0
29	Ancho del dedo índice próximo a la yema	1,7	1,8	2,0	1,3	1,5	1,7
30	Largo del dedo meñique	5,6	6,2	7,0	5,2	5,8	6,6
31	Largo del dedo anular	7,0	7,7	8,6	6,5	7,3	8,0
32	Largo del dedo mayor	7,5	8,3	9,2	6,9	7,7	8,5
33	Largo del dedo índice	6,8	7,5	8,3	6,2	6,9	7,6
34	Largo del dedo pulgar	6,0	6,7	7,6	5,2	6,0	6,9
35	Largo de la palma de la mano	10,1	10,9	11,7	9,1	10,0	10,8
36	Largo total de la mano	17,0	18,6	20,1	15,9	17,4	19,0



Medidas desde la articulación (Según Norma DIN 33 402. 2° parte)

Dimensiones en cm		Percentil					
		Hombres			Mujeres		
		5%	50%	95%	5%	50%	95%
37	Ancho del dedo pulgar	2,0	2,3	2,5	1,6	1,9	2,1
38	Grosor de la mano	2,4	2,8	3,2	2,1	2,6	3,1

Valores medios X e intervalos de referencia 90° percentil. Estudio basado en 8000 hombres de 20 años y una muestra de control femenina realizada en Alemania por Jurgens.



Medidas de la mano (Según Norma DIN 33 402. 2ª parte)

Dimensiones en cm		Percentil					
		Hombres			Mujeres		
		5%	50%	95%	5%	50%	95%
39	Ancho de la mano incluyendo dedo pulgar	9,8	0,7	1,6	8,2	9,2	0,1
40	Ancho de la mano excluyendo el dedo pulgar	7,8	8,5	9,3	7,2	8,0	8,5
41	Diámetro de agarre de la mano	11,9	13,8	15,4	10,8	13,0	15,7
42	Perímetro de la mano	19,5	21,0	22,9	17,6	19,2	20,7
43	Perímetro de la articulación de la muñeca	16,1	17,6	18,9	14,6	16,0	17,7

***Las medidas corresponden al anillo descrito por los dedos pulgar e índice**