

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**  
**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



**Diseño de un dispositivo estacionario para la rehabilitación de pacientes  
adultos con tendinitis de la mano con 3GDL**

**TRABAJO DE INVESTIGACIÓN PARA LA OBTENCIÓN DEL GRADO DE  
BACHILLER EN CIENCIAS CON MENCIÓN EN INGENIERÍA MECATRÓNICA**

**AUTOR:**  
Ruben Limaquispe Miguel

**ASESORA:**  
MSc. Ing. Rocio Liliana Callupe Pérez

**Lima, Agosto, 2020**

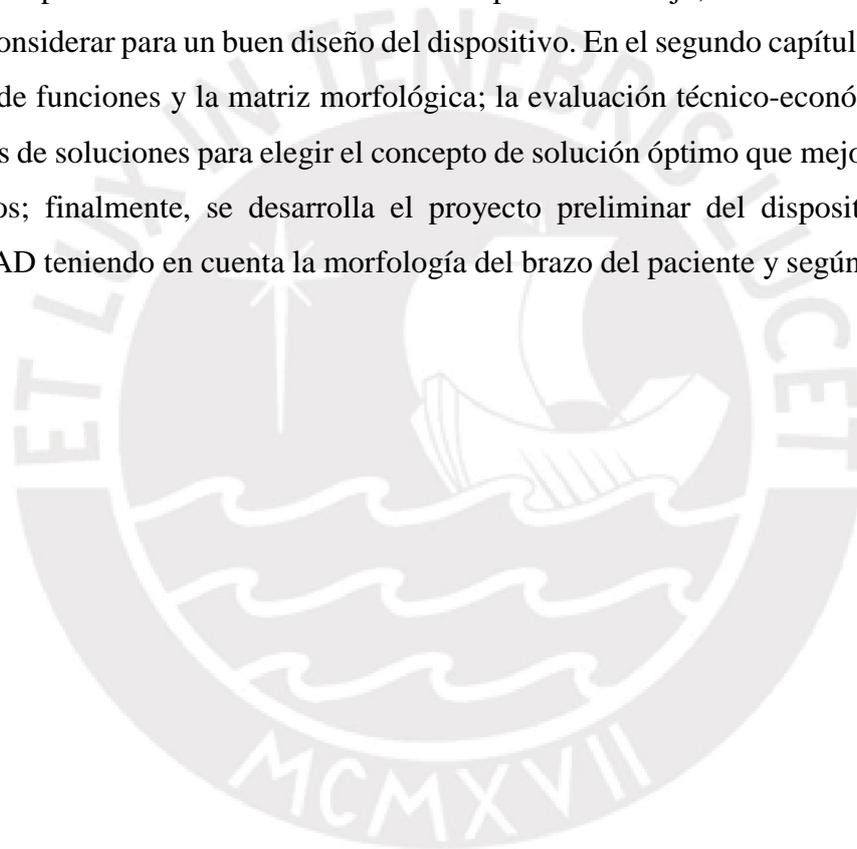
## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar, quisiera agradecer a Dios y a mis padres por su constante apoyo, la motivación y la confianza que me brindan cada día para seguir adelante. Agradezco a mi asesora Rocio Callupe por guiarme durante todo el proceso de investigación, desarrollo y análisis de este trabajo. Además, a las profesoras del curso por brindarme todas las herramientas necesarias que debe tener un profesional. También, agradezco a PUCP por brindarme los profesores para ser un profesional competente y un espacio donde pude encontrar amigos, con quienes compartí los mejores momentos de mi vida universitaria.



## RESUMEN

En el presente trabajo de investigación se desarrolló el diseño preliminar de un dispositivo estacionario para la rehabilitación de pacientes adultos con tendinitis de la mano con 3GDL, este diseño incluye tres movimientos importantes de la mano y muñeca los cuales son flexión-extensión, desviación radial-cubital de la muñeca y la contracción de los dedos. Para ello, el presente trabajo se divide en dos capítulos, los cuales son antecedentes-problemática y diseño conceptual. El primer capítulo, se describen la problemática actual del Perú sobre la rehabilitación; el marco teórico donde se abarca la fisiología de la mano para entender mejor la tendinitis; la propuesta de solución, metodología aplicada y el estado de arte, en esta parte se menciona los productos comerciales similares al presente trabajo; la lista de requerimientos que se debe considerar para un buen diseño del dispositivo. En el segundo capítulo, se muestran la estructura de funciones y la matriz morfológica; la evaluación técnico-económicamente de tres conceptos de soluciones para elegir el concepto de solución óptimo que mejor satisface los requerimientos; finalmente, se desarrolla el proyecto preliminar del dispositivo donde se modela en CAD teniendo en cuenta la morfología del brazo del paciente y según el DIN 3302.



## ÍNDICE DEL CONTENIDO

ÍNDICE DEL CONTENIDO .....	iii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	v
ÍNDICE DE TABLAS .....	vi
CAPÍTULO 1. PROBLEMÁTICA Y ANTECEDENTES.....	1
1.1 Problemática.....	1
1.2 Marco teórico .....	2
1.2.1 Fisiología de la mano.....	2
1.2.2 Tendinitis .....	6
1.2 Propuesta de solución.....	7
1.2.1 Objetivos.....	7
1.2.2 Alcances .....	7
1.2.3 Limitaciones .....	7
1.3 Metodología aplicada .....	8
1.4 Estado del arte .....	8
1.4.1 Productos comerciales .....	8
1.4.2 Patentes y artículos .....	9
1.4.3 Tesis relacionadas.....	11
1.4.4 Sensores .....	13
1.4.5 Actuadores .....	14
1.4.6 Controladores.....	15
1.5 Lista de requerimientos .....	17
CAPÍTULO 2. DISEÑO CONCEPTUAL.....	19
2.1 Estructura de funciones .....	19
2.1.1 Blackbox .....	19
2.1.2 Lista de funciones .....	21
2.2 Matriz morfológica.....	25
2.3 Concepto de solución .....	25
2.3.1 Solución 1 .....	25
2.3.2 Solución 2 .....	26
2.3.3 Solución 3 .....	27
2.4 Evaluación Técnica-Económica de Solución.....	28
2.4.1 Evaluación técnica.....	29

2.4.2 Evaluación económica.....	29
2.5 Proyecto Preliminar.....	31
2.5.1 Objetivos.....	31
2.5.2 Requerimientos del Sistema Mecatrónico.....	32
2.5.3 Configuración del Sistema.....	33
OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES.....	38
CONCLUSIONES.....	39
BIBLIOGRAFÍA.....	40



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Porcentaje de hogares con al menos un miembro que tiene teléfono.....	2
Figura 1.2 Vista anterior (palmar) de la mano derecha. ....	3
Figura 1.3 Flexión, extensión e hiperextensión de la mano.....	4
Figura 1.4 Desviación radial y cubital de la muñeca. ....	4
Figura 1.5 Supinación y pronación de la mano.....	4
Figura 1.6 Extensión y flexión del dedo pulgar.....	5
Figura 1.7 Oposición y reposición del dedo pulgar. ....	5
Figura 1.8 Abducción y aducción del dedo pulgar. ....	5
Figura 1.9 Tendones y ligamentos en la muñeca. ....	6
Figura 1.10 Music Glove (Flint Rehabilitation Devices).....	8
Figura 1.11 Sistema de rehabilitación mano/robotizado.....	9
Figura 1.12 Órtesis robótico para rehabilitación de la mano y muñeca.....	10
Figura 1.13 Dispositivo exoesqueleto de rehabilitación para los dedos de la mano.....	10
Figura 1.14 Diseño de un dispositivo neumático para rehabilitación de mano mediante funda termo retráctil.....	11
Figura 1.15 Diseño del sistema mecánico de un equipo para rehabilitación de la muñeca usando mecanismos paralelos. ....	12
Figura 1.16 Diseño de un mecanismo robótico de dos grados de libertad para rehabilitación del miembro superior en usuarios con post-infarto cerebral.....	13
Figura 1.17 Sensor de Flexión. ....	13
Figura 1.18 Sensor Giroscopio-BMG 250 BOSCH.....	13
Figura 1.19 Módulo Acelerómetro ADXL335. ....	14
Figura 1.20 Sensor de fuerza FSR 402. ....	14
Figura 1.21 Motor Stepper. ....	14
Figura 1.22 Actuador lineal eléctrico.....	15
Figura 1.23 Servomotor Hitec.....	15
Figura 1.24 PLC Siemens. ....	15
Figura 1.25 Arduino Mega 2560.....	16
Figura 1.26 Raspberry Pi 3 .....	16
Figura 1.27 Tiva C launchpad.....	16
Figura 2.1 Blackbox del sistema.....	19
Figura 2.2 Diagrama de funciones del sistema. ....	24
Figura 2.3 Bosquejo de la Solución 1. ....	26
Figura 2.4 Bosquejo de la Solución 2. ....	27
Figura 2.5 Bosquejo de la Solución 3. ....	28
Figura 2.6 Evaluación técnico-económico de las tres soluciones.....	31
Figura 2.7. Diagrama de operaciones del sistema.....	34
Figura 2.8. Diagrama de conexiones entre los dispositivos del sistema.....	35
Figura 2.9. Vista isométrica del sistema. ....	36
Figura 2.10. Mecanismo regulable mediante guía cola de milano. ....	36
Figura 2.11. Configuración del motor stepper 1 en el Sistema.....	37
Figura 2.12. Configuración del motor stepper 2. ....	37

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Tabla comparativa entre los controladores,, .....	16
Tabla 2.1. Evaluación Técnica de cada Solución. ....	29
Tabla 2.2. Evaluación Económica de cada Solución. ....	30



## **CAPÍTULO 1. PROBLEMÁTICA Y ANTECEDENTES**

En esta sección se detallará la problemática de este trabajo de tesis y que abordará una explicación del contexto social. Asimismo, se presenta la base teórica fisiológica de miembros superiores, específicamente la fisiología de la mano y la muñeca y se da un alcance del comportamiento de los tendones. Además, se presentan las causas y efectos de la lesión tendinitis de De Quervain o tenosinovitis.

### **1.1 Problemática**

En los últimos años el avance tecnológico ha sido muy acelerado, tanto así que la gran mayoría de personas tienen un dispositivo electrónico portátil (un celular). Además, los niños también poseen estos dispositivos, por ejemplo, el Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI, 2013) de México reporta que 35% de los niños y jóvenes entre 6-17 años son usuarios de Internet que usan tecnologías asociadas como celulares y computadoras (INEGI, 2013).

Según el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI), 31 por ciento de hogares peruanos tienen al menos una computadora. Así, se obtuvo un incremento de 3.9 puntos porcentuales en comparación con el mismo período de 2011 (EL COMERCIO, 2013). Adicionalmente, la figura 1.1 muestra el aumento de celulares que posee al menos un miembro de una familia, llegando de esta forma en el año 2017 casi todas las familias (90.2%) tienen al menos un teléfono celular. Otro dato muy importante se obtuvo del censo 2017, el 82% de los ciudadanos que usa internet lo hace mediante un teléfono celular. Por lo tanto, estos datos estadísticos demuestran que frecuentemente la mayoría de personas está utilizando sus celulares, lo que está relacionado con el incremento de patologías por movimientos repetitivos, como por ejemplo las personas adultas tienden a tener tendinitis en la muñeca.

Actualmente en Perú, existen 1 millón 575 mil personas que presentan alguna discapacidad, el cual representa el 5.2% de la población total. Y dentro de este grupo, más de 900 mil personas tienen trastorno musculoesquelético (En el Perú 1 millón 575 mil personas presentan algún tipo de discapacidad, 2013). Los datos que el INEI indicó son muy preocupantes ya que solo el 11.4% recibió algún tratamiento o terapia. Esto se debe a que muchos de ellos no cuentan con un presupuesto suficiente para financiar su tratamiento y muchas regiones del país no tienen un centro de rehabilitación especializada por médicos físicos (Gutiérrez, 2018).

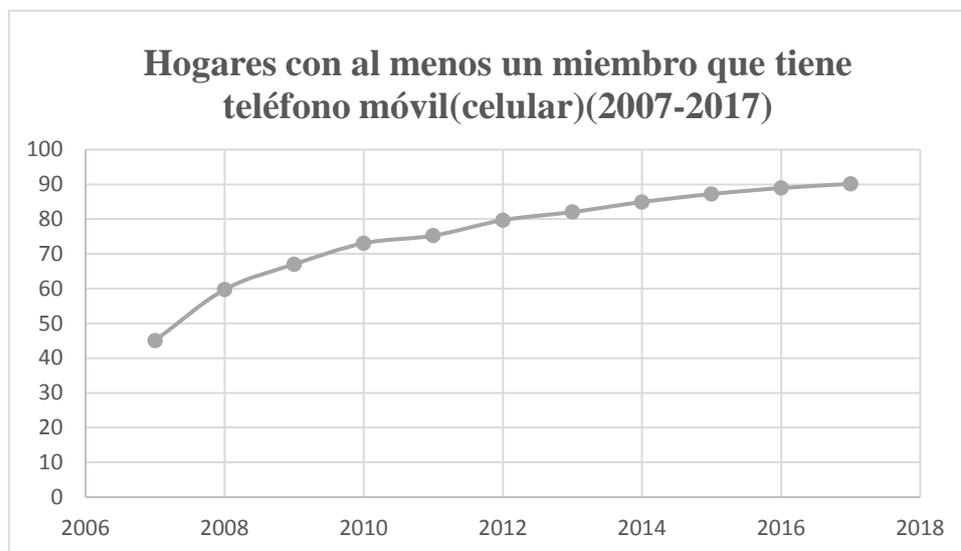


Figura 1.1. Porcentaje de hogares con al menos un miembro que tiene teléfono

Fuente: Extraído de INEI-Encuesta Nacional de Hogares 2017.

## 1.2 Marco teórico

En esta sección se desarrollará la fisiología y los movimientos de la mano, además se explicará sobre la tendinitis en la muñeca. Esto ayudará tener una base teórica para diseñar el dispositivo de forma eficaz.

### 1.2.1 Fisiología de la mano

Las regiones principales del cuerpo son axial y apendicular, este último consiste en miembros superiores e inferiores, también llamados extremidades. El miembro superior está formado por antebrazo, muñeca, mano y dedos. La gran diferencia que presenta los humanos de los primates es la estructura engorrosa de la mano, este es un órgano altamente desarrollado y un sistema muy complejo para tomar y sostener objetos, debido a que presenta 19 grados de libertad y oposición pulgar. Esto permite que tenga un gran rango de movimiento y simultáneamente presenta una mayor rapidez. Además, la mano presenta un gran tacto sensorial que puede percibir objetos que le rodea y también es muy importante para la comunicación interpersonal (gestos). Con todas estas posibilidades la mano juega un rol muy importante en el desarrollo del pensamiento humano ya que requiere una interacción compleja entre el sistema de control central y estructuras anatómicas, tal como huesos y articulaciones, músculos y tendones, entre otros. Así, hacen que la mano sea un órgano extremadamente complejo (CHIM, 2017).

La mano está constituida por tres zonas, estos son el metacarpiano, carpo y falanges. En general, la mano presenta 27 huesos con 36 articulaciones y 39 músculos activos (CHIM,

2017). De los huesos que tiene la mano, 8 de estos se encuentran en el carpo, 5 en el metacarpiano y un total de 14 falanges (ver figura 1.2) (CÁRDENAS, 2003). En la figura 1.2 se puede observar que los 8 huesos del carpo se organizan en dos filas, superior (huesos escafoides, semilunar, piramidal y pisiforme) e inferior (trapecio, trapezoide, hueso grande y ganchoso) (JIMENEZ, 2002). Además, los huesos metacarpianos son cinco, el primero de ellos (metacarpiano I) está ubicado cerca al pulgar y el último se encuentra próximo al dedo meñique. Las falanges son huesos que forman los dedos y cada uno de ellos es identificado por números romanos en forma creciente del uno al cinco, siendo el primero ubicado en el pulgar y el último en el dedo meñique (SALADIN, 2017).

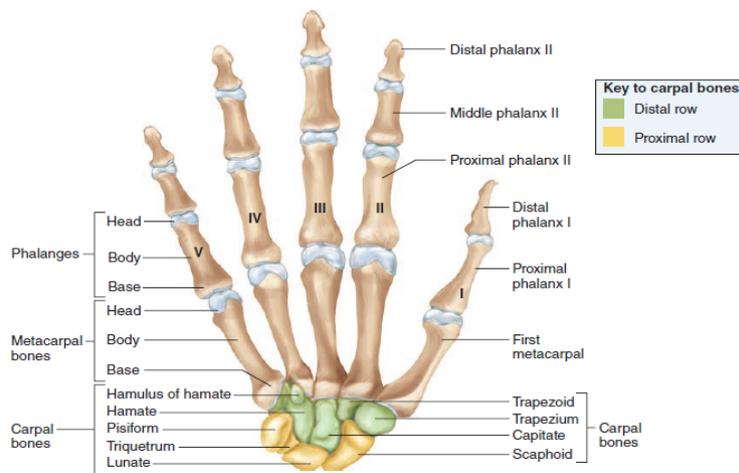


Figura 1.2 Vista anterior (palmar) de la mano derecha.

Fuente: Extraído de (SALADIN, 2017).

La muñeca y mano hacen diferentes movimientos complejos, los cuales son:

- Flexión y extensión de la muñeca (ver fig. 1.3)
- Extensión y flexión del pulgar (ver fig. 1.6)
- Pronación y supinación de la mano (ver fig. 1.5)
- Reposición y oposición del dedo pulgar (ver fig. 1.7)
- Desviación radial y cubital de la muñeca (ver fig. 1.4)
- Aducción y abducción del dedo pulgar (ver fig. 1.8)

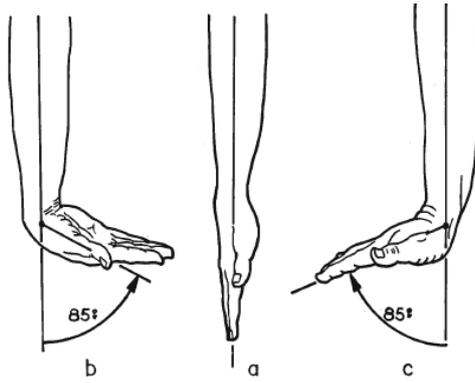


Figura 1.3 Flexión, extensión e hiperextensión de la mano.

Fuente: Extraído de (SALADIN, 2017).

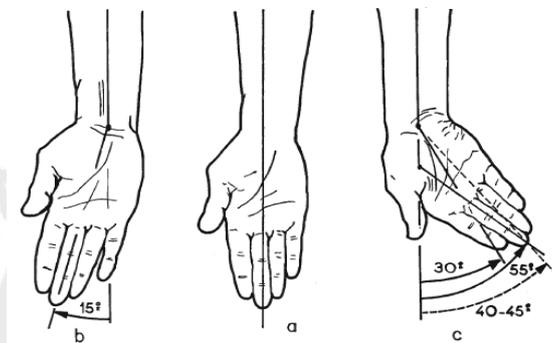


Figura 1.4 Desviación radial y cubital de la muñeca.

Fuente: Extraído de (SALADIN, 2017).

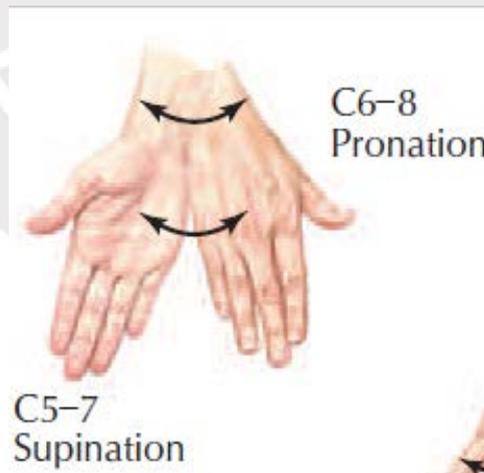


Figura 1.5 Supinación y pronación de la mano.

Fuente: Extraído de (NETTER, 2018).



Figura 1.6 Extensión y flexión del dedo pulgar.

Fuente: Extraído de (NETTER, 2018).

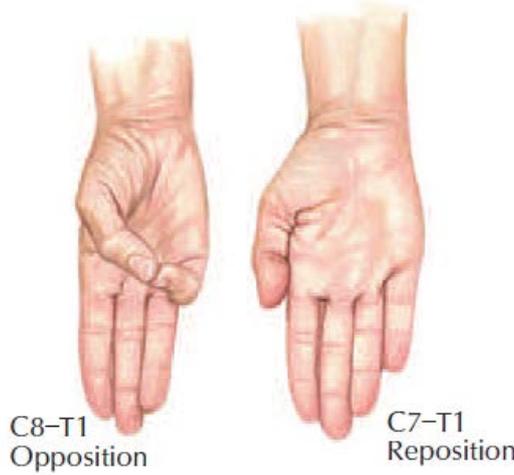


Figura 1.7 Oposición y reposición del dedo pulgar.

Fuente: Extraído de (NETTER, 2018).



Figura 1.8 Abducción y aducción del dedo pulgar.

Fuente: Extraído de (NETTER, 2018).

### 1.2.2 Tendinitis

Según la Real Academia Española (RAE), los tendones son los órganos formados por haces de tejido fibroso, de color blanco brillante y muy resistente a la tracción, que por lo común unen los músculos a los huesos, ver figura 1.9. Este presenta ciertas complicaciones y enfermedades relacionadas, entre ellos la más frecuente es la tendinitis, el cual es una inflamación en los tendones, esto ocurre principalmente cuando hay un fuerte rozamiento continuo entre el ligamento, en la muñeca es conocido como túnel carpeano, y la cubierta del tendón; y cuando los tendones tienen que hacer una angulación fisiológica (Diccionario de la Lengua Española, s.f.).

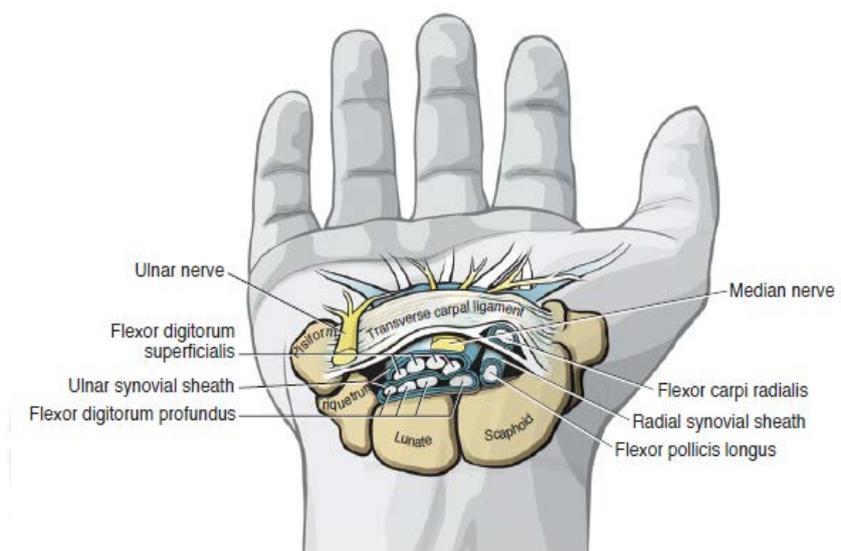


Figura 1.9 Tendones y ligamentos en la muñeca.

Fuente: Extraído de (MANSFIELD, 2009).

Hasta la actualidad, se encontraron diferentes tipos de tendinitis como, por ejemplo; tenosinovitis estenosante de De Quervain, extensor de pollicis largo, síndrome de intersección, cuarto quinta compartimiento de tenosinovitis, extensor carpi ulnaris tenosinovitis y entre otros problemas. Algunas de los Síntomas frecuentes en los pacientes es un dolor en la muñeca, además de esto hay hinchazón alrededor de la articulación de la muñeca, calor y enrojecimiento de los tendones. Existen diferentes tipos de diagnóstico para cada tipo de tendinitis y también con la ayuda de unas pruebas se puede facilitar la localización. Por ejemplo, el tenosinovitis de DeQuervain, uno de los tipos de tendinitis en la muñeca, es diagnosticado con una prueba llamado “prueba de Finkelstein”. Esta prueba consiste cuando el paciente hace puño y la muñeca se retira del pulgar, cuando el paciente siente el dolor significa que hay un tenosinovitis (ADAMS, 2015).

## **1.2 Propuesta de solución**

Para la problemática descrita anteriormente se diseñará un dispositivo estacionario para poder ayudar en el tratamiento de los pacientes que presentan tendinitis en la mano, este contará con tres grados de libertad. Además, facilitará al paciente ya que el tratamiento consiste en algunos movimientos de la mano, los cuales son: flexión, extensión, hiperextensión, flexión radial, flexión cubital, la contracción de los dedos y la oposición del dedo pulgar. Estos movimientos son realizados en forma ordenada y con un tiempo definido lo cual ayudará al paciente recuperarse de forma rápida. Sin embargo, en este diseño no se desarrollará la oposición del dedo pulgar.

### **1.2.1 Objetivos**

A continuación, se menciona el objetivo general y objetivos específicos para una mejor elaboración del presente proyecto.

#### **Objetivo general**

Diseñar un dispositivo estacionario para la rehabilitación de pacientes adultos con 3GDL en un caso de lesión de tendinitis con un costo menor a los productos comerciales.

#### **Objetivos específicos**

- Buscar información sobre fisiología de la mano, lesiones de tendinitis, mecanismo comercial y avances tecnológicos de rehabilitación aplicados a lesiones de tendinitis
- Definir el problema, causas, efectos y lista de requerimientos
- Definir el marco conceptual: determinar la estructura de funciones, elaborar matriz morfológica, proponer, evaluar y mejorar los conceptos de solución
- Diseñar un dispositivo estacionario para rehabilitación de la muñeca en 3GDL en un caso de lesión de tendinitis: determinar la configuración aproximada del sistema (diagrama de operaciones, diagrama de bloques y diagrama de flujo general)
- Desarrollar el diseño preliminar: elaborar el modelamiento CAD aproximado

### **1.2.2 Alcances**

- Se diseñará un dispositivo estacionario para rehabilitación de la muñeca con tres grados de libertad; sin embargo, no se realizará su implementación.
- El dispositivo realizará todos los movimientos del tratamiento de tendinitis con excepción de la oposición y reposición del dedo pulgar.

### **1.2.3 Limitaciones**

- En este diseño no se realizará códigos de programación.

### 1.3 Metodología aplicada

Para el diseño de este proyecto se aplicará la metodología de diseño mecatrónico (VDI 2206) (STANIA, 2009), a continuación, se detallará los pasos cómo se aplicará a este proyecto:

- Definición de la problemática.
- Planteamiento de los objetivos, alcances y limitaciones.
- Desarrollar el estado de arte relacionado al dispositivo a diseñar.
- Establecer requerimientos acordes a las exigencias del paciente.
- Elaborar la matriz morfológica para cada de una de las funciones elaboradas.
- Proponer soluciones diferentes y mediante un análisis económico-técnico elegir una solución óptima.
- Elaborar un diseño preliminar con las medidas aproximadas.

### 1.4 Estado del arte

En esta sección se presenta algunos dispositivos comerciales para tratamiento de rehabilitación de mano. Además, se menciona trabajos de investigación y patentes que ayuda a consolidar la idea para el diseño de este trabajo de tesis.

#### 1.4.1 Productos comerciales

- **Music glove:** Es un dispositivo comercial de la empresa “*Flint Rehabilitation Devices LLC*” (ver figura 1.10), este consiste en unos guantes de mano con una interfaz gráfica (computadora) para simular un juego, el paciente tiene que mover la mano para lograr el objetivo del juego, así ayuda a los pacientes en el tratamiento de una forma interactiva y divertida. Para esto utilizaron sensores de flexión con el objetivo de medir el ángulo de flexión de cada uno de los dedos<sup>1</sup>.



Figura 1.10 Music Glove (Flint Rehabilitation Devices).

Fuente: Extraído de FLINT REHAB.

---

<sup>1</sup> Extraído de MusicGlove Hand Therapy de la compañía FLINT REHAB.

- **Sistema de rehabilitación mano/ robotizado AMADEO:** Construido por la empresa Tyromotion, como se puede observar en la figura 1.11 el dispositivo tiene dos partes importantes, los cuales son: la parte mecánica donde la mano del paciente se apoya y la computadora para ayudar al paciente en su tratamiento mediante juegos divertidos y también puede observar todo el progreso logrado en su tratamiento, esto facilitaría a los especialistas a realizar estadísticas fácilmente<sup>2</sup>.



Figura 1.11 Sistema de rehabilitación mano/robotizado.

Fuente: Extraído de TYROMOTION.

#### 1.4.2 Patentes y artículos

- **“Órtesis robóticas para rehabilitación de mano y muñeca” - PCT/CO20 17/000006:** La presente patente consiste de un diseño robótico que ayuda al paciente en el tratamiento de la mano y muñeca en forma activa y pasiva. Además, el ortesis robótica presenta unas piezas de cuero y neopreno para cuidar la piel del paciente. En la figura 1.12 se muestra que el diseño presenta 7 servomotores que da 7 grados de libertad al diseño (Colombia Patente n° WO 2018/036571, 2018).

---

<sup>2</sup> Extraído de AMADEO de la compañía TYROMOTION.

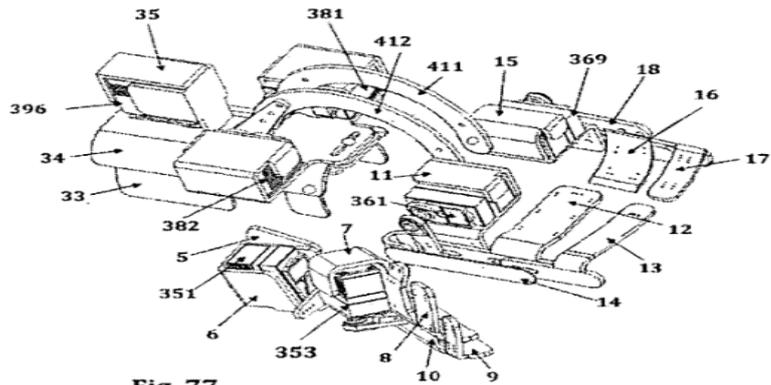


Fig. 77

Figura 1.12 Órtesis robótico para rehabilitación de la mano y muñeca

Fuente: extraído de (Colombia Patente n° WO 2018/036571, 2018).

- **“Dispositivo exoesqueleto de rehabilitación para los dedos de la mano” – PCT/IB2015/053605:** En la figura 1.13 se observa un diseño para la rehabilitación de un dedo. Este consta de tres motores pequeños que da movilidad al dedo en tres grados de libertad con mecanismos fáciles de implementar (Colombia Patente n° WO 2015/177701, 2015).

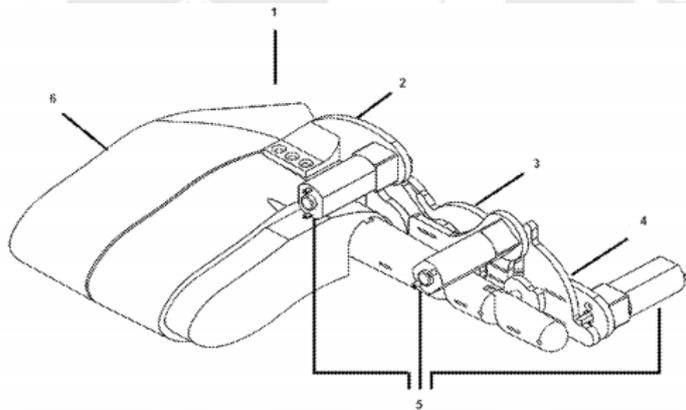


Figura 1.13 Dispositivo exoesqueleto de rehabilitación para los dedos de la mano.

Fuente: extraído de (Colombia Patente n° WO 2015/177701, 2015).

- **“Diseño de un dispositivo neumático para rehabilitación de mano mediante funda termo retráctil”.**

Este diseño e implementación de un dispositivo para la rehabilitación de la mano, en una persona que sufrió una lesión cerebrovascular realizado por Narváez et al (2014), utilizaron un actuador neumático que accionará inyectando aire en la funda termo retráctil, así generaron un diseño viable económicamente y con cinco grados de libertad. Además, el diseño puede ser utilizado por personas de diferentes edades, ver figura 1. 14 (NARVÁEZ, 2014).



Figura 1.14 Diseño de un dispositivo neumático para rehabilitación de mano mediante funda termo retráctil.

Fuente: extraído de (NARVÁEZ, 2014).

### 1.4.3 Tesis relacionadas

- **“Diseño del sistema mecánico de un equipo para rehabilitación de la muñeca usando mecanismos paralelos” – Brian Pajares Correa**

El autor utilizó mecanismos paralelos (uno de los casos es la plataforma de Gough) para el diseño de este dispositivo. En la figura 1.15 se observa que el diseño que cuenta con dos actuadores lineales, los cuales son los principales actuadores del mecanismo paralelo. Además, el diseño presenta un apoyo fijo, en el cual el codo del paciente estará apoyado (PAJARES, 2017).

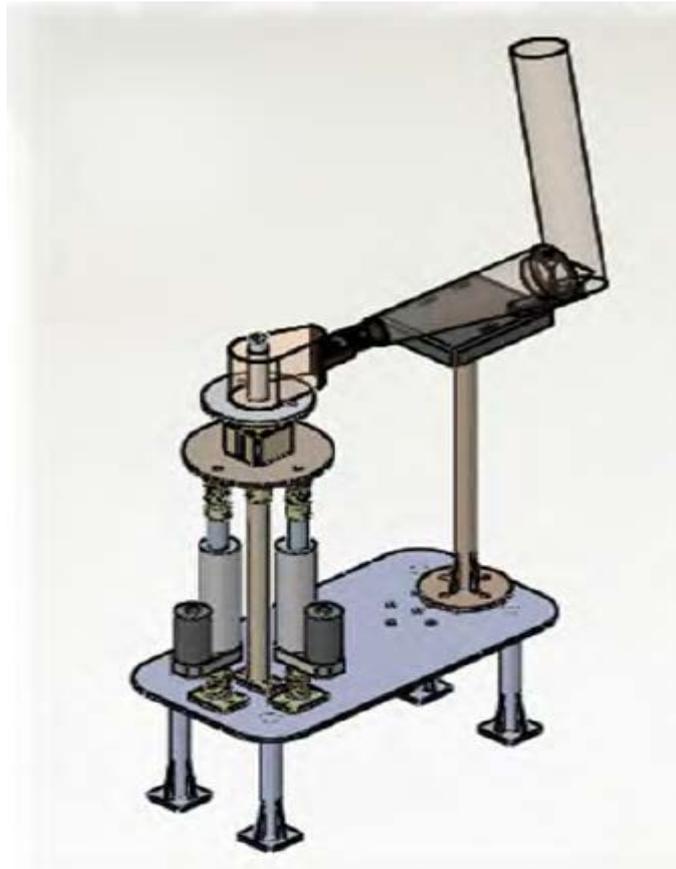


Figura 1.15 Diseño del sistema mecánico de un equipo para rehabilitación de la muñeca usando mecanismos paralelos.

Fuente: extraído de (PAJARES, 2017).

- **“Diseño de un mecanismo robótico de dos grados de libertad para rehabilitación del miembro superior en usuarios con post-infarto cerebral”- Wilberth, Virhuez Delgado**

El dispositivo desarrollado por Virhuez (2018) cuenta con dos grados de libertad (movimientos de flexo/extensión o de pronosupinación), las velocidades máximas que deberán ejercer los actuadores para estos movimientos serán  $90^{\circ}/s$  y  $60^{\circ}/s$  para evitar daños o dolores en la mano del paciente. En la figura 1.16 se observa que el dispositivo tiene dos motores DC, uno de ellos realiza el movimiento de flexo/extensión mientras que el otro, el movimiento de pronosupinación (VIRHUEZ, 2018).

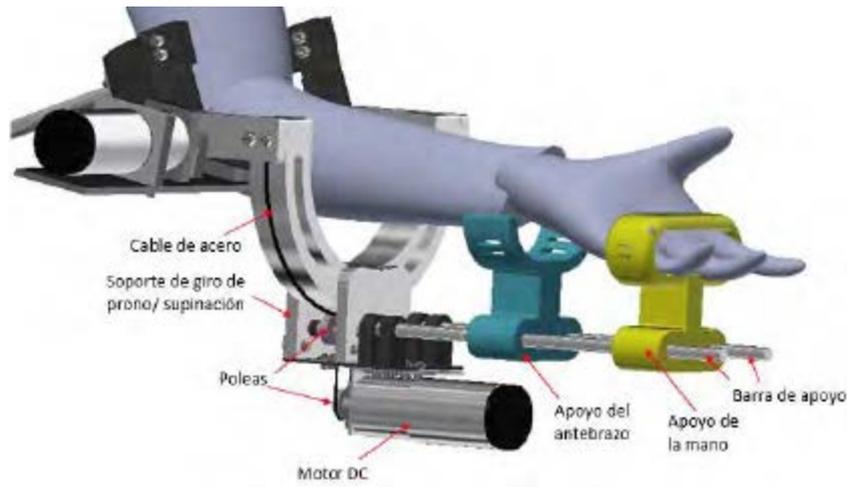


Figura 1.16 Diseño de un mecanismo robótico de dos grados de libertad para rehabilitación del miembro superior en usuarios con post-infarto cerebral.

Fuente: Extraído de (VIRHUEZ, 2018).

#### 1.4.4 Sensores

- **Sensor de flexión:** Puede detectar la flexión de un material en una dirección mediante el cambio de resistencia que se produce al doblar o flexionar el sensor, la salida de resistencia es proporcional al radio de curvatura. Es ampliamente usado en los dispositivos médicos, terapia física, instrumentos musicales, entre otras aplicaciones<sup>3</sup>.



Figura 1.17 Sensor de Flexión.

- **Sensor Giroscopio:** Es un instrumento de medición del ángulo en tres dimensiones<sup>4</sup>.

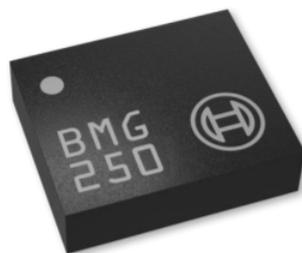


Figura 1.18 Sensor Giroscopio-BMG 250 BOSCH.

<sup>3</sup> Extraído de Datasheet: Flex sensor - SPARKFUN

<sup>4</sup> Extraído de Datasheet: BMG 250 - BOSCH

- **Módulo Acelerómetro:** Es un dispositivo de medición en un plano (dos dimensiones)<sup>5</sup>.



Figura 1.19 Módulo Acelerómetro ADXL335.

- **Sensor de Fuerza:** es un sensor resistivo que permite medir la fuerza de apoyo en el sensor. Está constituido por el elemento de carbono, el cual varía la resistencia del sensor en función a la presión ejercida<sup>6</sup>.



Figura 1.20 Sensor de fuerza FSR 402.

#### 1.4.5 Actuadores

- **Motor Stepper:** Estos tipos de motores fueron usados en los diseños de los productos comerciales, patentes, artículos y tesis que han sido mencionados anteriormente. Ya que se pueden controlar el ángulo de giro mediante un encoder, lo cual está dentro del motor, esto permite que se puede hacer un control de lazo cerrado<sup>7</sup>.



Figura 1.21 Motor Stepper.

<sup>5</sup> Extraído de Datasheet: Accelerometer ADXL335-SPARKFUN.

<sup>6</sup> Extraído de Datasheet: Sensor de fuerza FSR 402-ADAFRUIT.

<sup>7</sup> Extraído de Datasheet: Motor NEMA 17-ADAFRUIT.

- **Actuador lineal eléctrico:** está constituido por un motor DC y un sistema de engranajes, el cual permite cambiar un movimiento giratorio en un movimiento lineal. Además, la carrera del actuador se puede controlar mediante un potenciómetro y una lógica de control por lazo cerrado<sup>8</sup>.



Figura 1.22 Actuador lineal eléctrico.

- **Servomotor:** está constituido por un motor DC y una caja de engranajes, con una señal PWM se puede controlar el ángulo de giro y además el sentido de giro<sup>9</sup>.



Figura 1.23 Servomotor Hitec.

#### 1.4.6 Controladores

- **PLC (Programmable logic control):** son considerados los controladores más robustos en la industria, ya que pueden funcionar con altas corrientes y con temperaturas muy extremas. Además, tienen su propio lenguaje de programación (Ladder) y se pueden conectar con interfaz HMI<sup>10</sup>.



Figura 1.24 PLC Siemens.

<sup>8</sup> Extraído de la compañía LINAK

<sup>9</sup> Extraído de la página web NYLAMP MECHATRONICS

<sup>10</sup> Extraído de la compañía SIEMENS Industry.

- **Microcontrolador:** está constituido por un CPU (unidad de central de proceso), ROM (memoria de solo lectura), RAM (memoria de acceso aleatorio) y periféricos. Además, es considerado como una mini computadora por poseer las mismas partes. En la actualidad, es muy utilizado para diversos propósitos ya que es programable. A continuación, se presenta la tabla 1.1 donde se detalla las características y desventajas entre 3 tipos de microcontroladores: un tiva C launchpad, Raspberry Pi 3 y arduino.

Tabla 1.1 Tabla comparativa entre los controladores. (ARDUINO, Arduino Mega 2560 REV3, s.f.) (RASPERRY, s.f.) (INSTRUMENTS)

Microcontrolador	Características	Desventajas
<p><b>Arduino Mega</b></p>  <p>Figura 1.0.25 Arduino Mega 2560</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La facilidad de programar el microcontrolador.</li> <li>• Es estándar en el mercado y se integra a diversos tipos de sensores.</li> <li>• Voltaje Operativo: 5V.</li> <li>• Pines digitales de Entrada/Salida: 54 (de los cuales 15 proveen salida PWM).</li> <li>• Pines analógicos de entrada: 16.</li> <li>• Corriente DC por cada Pin Entrada/Salida: 40 mA.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No presenta conexión wifi nativa. Por tanto, si se necesitara, tendría que colocarse un adaptador.</li> </ul>
<p><b>Raspberry Pi 3</b></p>  <p>Figura 1.0.26 Raspberry Pi 3</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Procesador: Chipset Broadcom BCM2387. 1,2 GHz de cuatro núcleos ARM Cortex-A53.</li> <li>• GPU. Dual Core VideoCore IV @ Multimedia Co-procesador.</li> <li>• RAM: 1GB.</li> <li>• Ethernet socket Ethernet 10/100 BaseT. 802.11 b / g / n LAN inalámbrica y Bluetooth 4.1 (Classic Bluetooth y LE)</li> <li>• Es muy útil para hacer procesamiento avanzado para el tema de ROS. Elaborar y procesar un diagrama de comportamientos ligados a la inteligencia artificial.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No presenta pines analógicos, por lo cual necesita un dispositivo adicional</li> <li>• Su costo es mayor que los demás.</li> </ul>
<p><b>Tiva C Launchpad</b></p>  <p>Figura 1.0.27 Tiva C launchpad</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• CPU ARM Coter-M4F.</li> <li>• Frecuencia 80 MHz</li> <li>• Memoria de Programa de hasta 256 KBytes</li> <li>• Memoria RAM de 32 KBytets.</li> <li>• EEPROM de 2 KBytes.</li> <li>• Memoria ROM cargada con TivaWare.</li> <li>• RTC (Real Time Clock)</li> <li>• Timers y Watchdog Timer.</li> <li>• 4 Interfaces Serial Síncronas (SSI)</li> <li>• 8 UART, SPI, I2C, USB.</li> <li>• Conversor Analógico para Digital de 12 bits (ADC). 2 Comparadores Analógicos</li> <li>• GPIOs con capacidad de interrupción.</li> <li>• Bajo consumo, ideal para equipos a batería.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No presenta conexión wifi nativa. Por tanto si se necesitara, tendría que colocarse un adaptador que brinde esta opción o conectarse a otro microcontrolador que sirva como antena.</li> </ul>

## 1.5 Lista de requerimientos

En esta sección se mencionará los requerimientos que debe tener el diseño de acuerdo a los clientes y usuarios con el fin de cumplir con el objetivo principal, lo cual es el diseño de un dispositivo estacionario para la rehabilitación de pacientes adultos con tendinitis. Además, los requerimientos tendrán dos denominaciones, exigencia y deseo; el primero, se deberá cumplir obligatoriamente mientras que el segundo será una opción.

- a) **Función principal:** El diseño permitirá al paciente mover su mano y muñeca de manera eficiente para terminar el tratamiento en menor tiempo posible. Además, el diseño realizará todos los movimientos que requiera el tratamiento del paciente los cuales son flexión-extensión, desviación radial-cubital de la muñeca y la contracción de los dedos. Sin embargo, el dispositivo no realiza el movimiento de la oposición y reposición del dedo pulgar.
- b) **Materia (“E”):**
  - De entrada: mano y/o muñeca sin rehabilitar.
  - De salida: mano rehabilitada.
- c) **Energía (“E”):**
  - Entrada: 220VAC
  - Salida: calor, vibración, ruido.
- d) **Señal (“E”):**
  - De entrada: fuerza y presión de la mano; ángulo de articulación de la muñeca.
  - De salida: energía luminosa, sonora y el progreso de rehabilitación.
- e) **Tiempo (“E”):** plazo de entrega: 17/07/2020 (8 meses aproximadamente).
- f) **Presupuesto (“E”):** Dependerá de cada tipo de dispositivo utilizado y debe ser de bajo costo con referencia a los equipos comerciales para que el proyecto sea fiable comercialmente.
- g) **Uso (“E”):** El dispositivo podrá ser utilizado en lugares específicos ya que debe ser instalado en un lugar fijo y con una mesa. La altura de la mesa de la estatura del paciente, de esta forma, no afecte a la ergonomía del usuario.
- h) **Transporte (“E”):** El dispositivo deberá ser transportado por una máquina ya que será ligeramente pesado y estático.
- i) **Montaje (“E”):** La máquina no requerirá ningún montaje especial, y podrá ser colocada sobre cualquier superficie plana presente en una habitación.

- j) Control (“E”):** Variables que se controlarán en el sistema: El ángulo de flexión-extensión y desviación radial-cubital; y el ángulo de flexión de los dedos.
- k) Geometría (“E”):** Las dimensiones del dispositivo serán de acuerdo a las medidas de la mano de una persona adulta, para ello se utilizará medidas estandarizadas por DIN 32. Además, el dispositivo permite diferentes longitudes de brazo del paciente ya que el sistema tiene un apoyo de brazo móvil regulable.
- l) Control de calidad (“E”):** los ángulos de los movimientos realizados deberán estar dentro de un rango anatómicamente permitido y así evitar lesiones.
- m) Fabricación (“D”):** La fabricación del dispositivo se planea en talleres locales y de materiales comunes, y fáciles de conseguir con excepción de las partes que requieran un tipo de material especial debido a su función. Asimismo, las piezas que se consideran complejas en su forma geométrica se desarrolla en las impresiones 3D.
- n) Cinemática (“E”):** El dispositivo presentará diferentes elementos rotativos para controlar el ángulo de la mano en flexión y extensión. Además, contará con elementos de movimiento lineal para controlar la posición de los dedos.
- o) Ergonomía (“E”):** El dispositivo estará sujetado sobre una mesa de altura estandarizada según las normas de ergonomía para que el paciente esté cómodo con la altura de esta.
- p) Seguridad (“E”):** Las partes del dispositivo que estarán en constante movimiento lineal o giratorio estarán cubiertos por unas placas de modo que no se exponga el peligro al paciente. Y para no excederse del rango de ángulo anatómico tendrá unos mecanismos de topes mecánicos. Además, los materiales que estarán en contacto con la piel del paciente serán de neopreno y acero inoxidable para proteger la piel del paciente. Se contará con los siguientes tipos de seguridad; tal como, aislamiento eléctrico, parada de emergencia y un manual de uso.
- q) Mantenimiento (“E”):** El dispositivo requerirá de mantenimientos preventivos; así, las piezas que serán lubricadas o reemplazadas deberán ser de fácil acceso para el operario. El mantenimiento será mensualmente para los actuadores y para los mecanismos, semanalmente.

## CAPÍTULO 2. DISEÑO CONCEPTUAL

En este capítulo se desarrolla el diseño conceptual, para ello se presenta un diagrama que muestra entradas y salidas generales del diseño. Además, se detalla cada una de las funciones que presenta el diseño para elaborar un buen diseño preliminar y también se identifican tres soluciones de mecanismos o dispositivos para cada función del diseño.

### 2.1 Estructura de funciones

En esta sección se desarrolla la estructura de funciones del diseño de este trabajo para cumplir con los requerimientos mencionados en el capítulo anterior. Para ello, primero se presenta un bloque con entradas y salidas sin considerar señales internas (*Blackbox*). Además, se explica en qué consiste cada una de estas funciones.

#### 2.1.1 Blackbox

En la siguiente figura se observa las entradas y salidas del sistema sin tener en cuenta los procesos internos que presenta el diseño. Además, las entradas y salidas se dividen en tres tipos: materia, energía y señal de información. A continuación, se detalla cada una de estas partes.

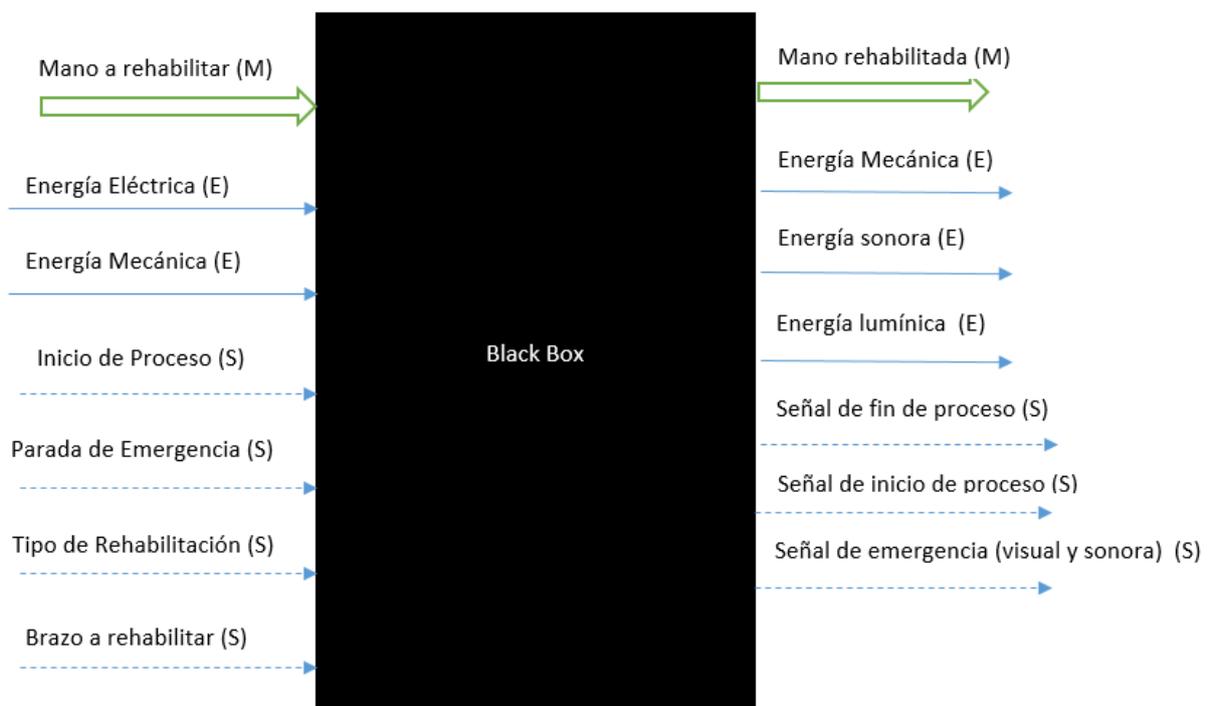


Figura 2.1 *Blackbox* del sistema.

- **Entradas**

1. **Materia:** Al sistema ingresará la mano a rehabilitar como materia.

2. **Energía:** El tipo de energía que alimentará al sistema será eléctrica para energizar los actuadores, sensores y controladores. Además, se tiene energía mecánica por los movimientos de la muñeca y mano.

3. **Señal:**

- **Inicio de proceso:** Esta señal indicará el inicio del proceso de rehabilitación, para esto se utilizará un sensor para detectar la presencia de la mano.
- **Tipo de rehabilitación:** Antes de iniciar el proceso de rehabilitación, el paciente indicará el tipo de rehabilitación (mano y/o muñeca) que desea realizar.
- **Parada de emergencia:** Cuando ocurre algún incidente inesperado que afecte la seguridad del paciente, el sistema se detendrá abruptamente para evitar alguna lesión al paciente.
- **Brazo a rehabilitar:** El usuario seleccionará el brazo derecho o izquierdo que necesita la sesión de rehabilitación.

• **Salidas**

1. **Materia:** El sistema tendrá como salida solo a mano rehabilitada y además no se producirá ningún desecho.

2. **Energía:**

- **Sonora:** El sistema presentara diferentes tipos de actuadores; por ejemplo, motores DC, actuadores lineales, servomotores entre otros. Estos generarán ruido al momento de funcionar.
- **Mecánica:** Se refiere a los movimientos de la mano producida por el sistema.
- **Lumínica:** El sistema emitirá luces cuando se desea mostrar una señal de salida.

3. **Señal:**

- **Señal de inicio de proceso:** Esta señal indicará que el proceso de rehabilitación ha iniciado y se realizará cuando reciba la señal de inicio de proceso (señal de entrada). Además, se mostrará en forma de luz.
- **Señal de fin de proceso:** Esta señal indicará que el proceso de rehabilitación ha finalizado satisfactoriamente y se mostrará mediante luces.
- **Señal de emergencia:** Esta señal se emitirá solo cuando el sistema presente falla mientras está en funcionamiento, o cuando se reciba la señal de parada de emergencia (señal de entrada).

### 2.1.2 Lista de funciones

En esta subsección se detalla la lista de funciones involucradas en el diseño a través de un diagrama, que está dividido en cuatro dominios, los cuales interactúan con el usuario, control, sensores, actuadores, energía y materia. En la figura 2.2 se muestra dicho diagrama relacionadas cada una de estas funciones en el sistema.

#### Dominios de funciones

##### a) Dominio con interacción con el usuario

- **Función recibir el tipo de rehabilitación:** Esta función se encarga de recibir el tipo de rehabilitación del paciente, los cuales son mano y/o muñeca.
- **Función recibir el tipo de brazo a rehabilitar:** Esta función se encarga de recibir el tipo de brazo (Derecho o izquierdo) que el paciente requiera.
- **Función recibir el inicio del proceso:** Esta función se encarga de recibir la señal de inicio del proceso dada por el paciente, y enviarla al controlador.
- **Función recibir parada de emergencia:** Esta función se encarga de recibir la señal de parada de emergencia requerida por el paciente o por la misma máquina.
- **Función mostrar inicio de proceso:** Esta función se encarga de indicar al paciente que el proceso de rehabilitación ha iniciado y será mediante una fuente de luz.
- **Función mostrar el fin de proceso:** Esta función se encarga de indicar al paciente que el proceso de rehabilitación ha finalizado y será mediante una fuente luminosa y sonora.
- **Función mostrar la señal de emergencia:** Esta función se encarga de indicar al paciente que hay presencia de funcionamiento incorrecto del sistema.

##### b) Dominio de control

- **Función controlar:** Esta función se encarga de recibir y enviar las señales de información entre los diferentes subdominios del sistema (interacción con el usuario, sensores y actuadores). Además, será el principal centro de procesamiento de los valores medidos por los sensores y será capaz de desarrollar lazos de control cerrado.

##### c) Dominio de energía

- **Función acondicionar energía de control:** Esta función se encarga de energizar una corriente DC al controlador.
- **Función acondicionar energía de sensores:** Esta función se encarga de energizar corriente a los diferentes sensores utilizados en el sistema. En algunos casos será

necesario utilizar un convertidor AC-DC ya que algunos sensores funcionan con corriente DC.

- **Función acondicionar energía de actuadores:** Esta función se encarga de energizar a los diferentes actuadores; por ejemplo, motores DC, actuadores lineales, servomotores, entre otros.

#### d) Dominio de sensado

- **Función Sensor Presencia de la mano:** Esta función se encarga de analizar si hay presencia de la mano en el dispositivo. Luego, enviará una señal al controlador para comenzar con el proceso de rehabilitación.
- **Función sensor el ángulo de flexión de los dedos:** Esta función se encarga de medir el ángulo de flexión de los dedos y el dato medido será enviado al controlador para ser procesado por este.
- **Función sensor el ángulo de flexión y extensión de la mano:** Esta función se encarga de medir el ángulo de flexión de la mano y enviar al controlador. Esto ayudará que el movimiento de la flexión y extensión de la mano esté en el rango permitido.
- **Función sensor el ángulo de flexión radial y cubital de la muñeca:** Esta función se encarga de medir el ángulo de flexión radial y cubital de la muñeca. Esto ayuda a que todos los movimientos estén dentro de un rango permitido y además permitirá al controlador realizar lazos de control cerrado.

#### e) Dominio de actuadores

- **Función accionar mecanismos sujeción:** Al momento de recibir una señal del controlador, se accionará un mecanismo para sujetar la mano del paciente cumpliendo con todos los patrones de seguridad. Esto se realizará cuando se reciba una señal del controlador.
- **Función accionar mecanismo de movimiento de flexión y extensión de la mano:** Esta función se encargará de accionar el mecanismo para realizar el movimiento de flexión y extensión de la mano, los cuales estarán dentro de un rango permitido.
- **Función accionar mecanismo de movimiento de flexión radial y cubital de la muñeca:** Esta función se encargará de accionar el mecanismo para realizar el movimiento de flexión radial y cubital de la muñeca. El controlador será el responsable para que el movimiento se realice dentro de un rango permitido.

- **Función accionar mecanismo del movimiento de contracción de los dedos:** Esta función se encargará de accionar el mecanismo para contraer los dedos de la mano en un rango permitido.

f) **Dominio de flujo másico**

- **Función sujetar/liberar el brazo:** Esta función se encargará de sujetar liberar el brazo para iniciar el proceso de rehabilitación y cuando termine liberará el brazo del paciente.
- **Función sujetar los dedos de la mano:** Esta función se encargará de sujetar todos los dedos con excepción del pulgar, para luego accionar el mecanismo de contracción de los dedos.
- **Función contraer los dedos:** Esta función se encargará de contraer los dedos como una parte del proceso de rehabilitación de la mano.
- **Función realizar el movimiento de flexión radial y cubital de la muñeca:** Esta función se encargará de flexionar radial y cubitalmente la muñeca como parte del proceso de rehabilitación de la muñeca, y se realizará dos veces por un ciclo.
- **Función realizar el movimiento de flexión y extensión de la mano:** Esta función se encargará de realizar el movimiento de flexión y extensión de la mano como una parte del proceso de rehabilitación. Se realizará dos veces por un ciclo de rehabilitación.

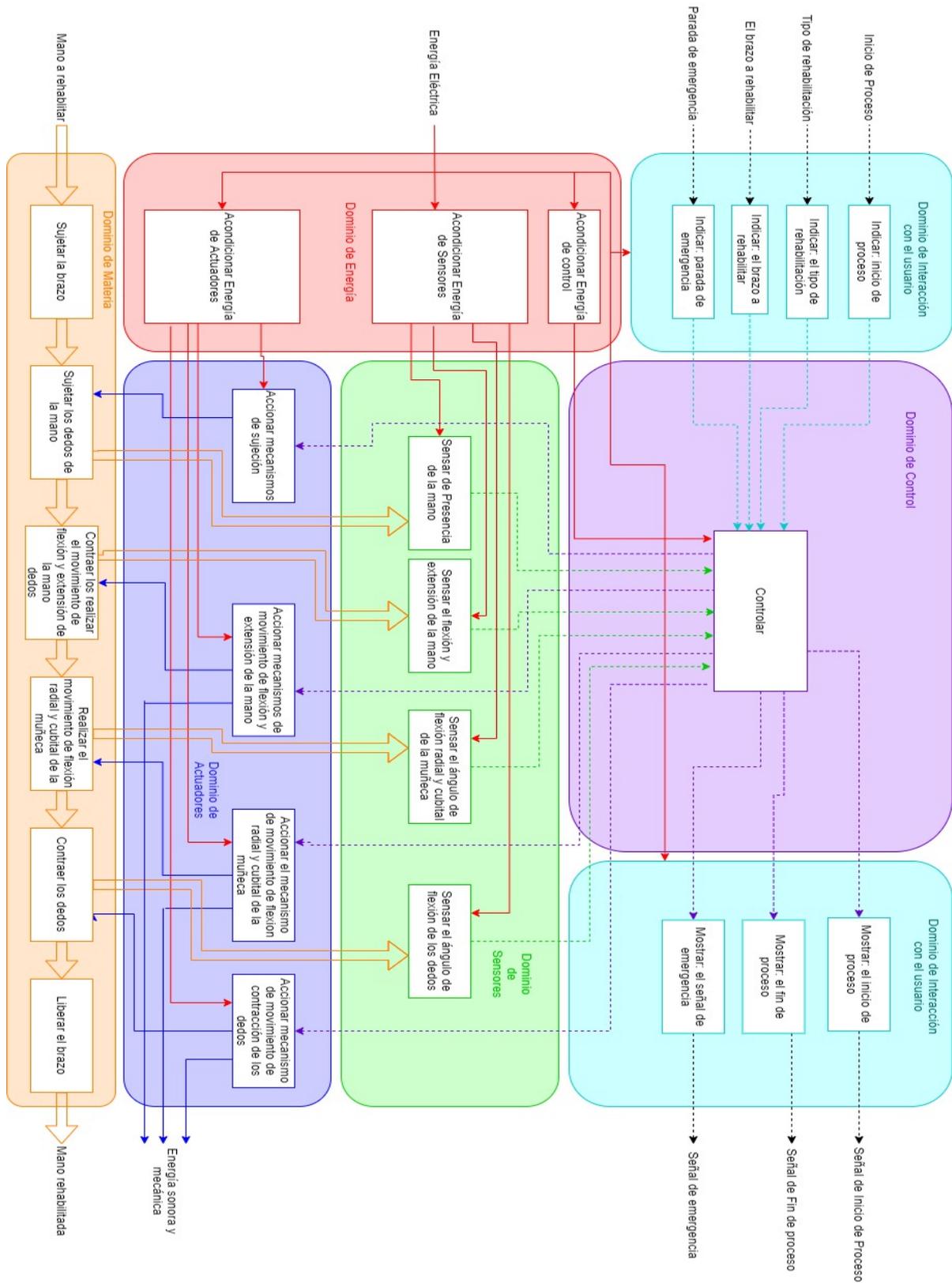


Figura 2.2 Diagrama de funciones del sistema.

## **2.2 Matriz morfológica**

En esta sección, se desarrollará tres soluciones para cada función del sistema en base a la tecnología encontrada en el estado de arte y se muestra en el ANEXO A de esta tesis.

## **2.3 Concepto de solución**

En esta sección, con el *blackbox*, diagrama de funciones y la matriz morfológica realizada se procederá a elaborar tres posibles conceptos de soluciones para desarrollar el diseño con todos los requerimientos que se establecieron en las secciones anteriores. A continuación, se explicará cada una de las soluciones propuestas.

### **2.3.1 Solución 1**

La primera solución propuesta se muestra en la figura 2.3, en esta solución el paciente ingresa su brazo en los apoyos y luego un sensor de fuerza indicará que existe un usuario en el sistema. Luego, se energizará a los dispositivos del sistema. Después, el paciente indicará cuál de sus brazos desea recibir el tratamiento y además ingresará el tipo de rehabilitación. Para realizar el movimiento de flexión cubital y radial de la muñeca se diseñó con dos motores *stepper* y una barra rígida en forma circular, el motor generará un movimiento circular el cual transmitirá el movimiento hacia la mano. La elección de los motores *stepper* para este propósito fue principalmente por su alto torque de retención ( *Holding torque*) que presentan. Además, el sistema presentará con un acelerómetro ubicado en el soporte de brazo, lo cual permitirá medir el ángulo de flexión de la muñeca para que pueda ser controlado. Y la contracción de los dedos será accionado por un servomotor, el cual permitirá transmitir el movimiento hacia los dedos mediante un mecanismo de estructuras. Para controlar el ángulo de flexión de los dedos se utilizará un sensor, así se puede controlar el ángulo con el objetivo de evitar algunas lesiones en la mano del paciente. Finalmente, el diseño presentará una interfaz gráfica para mostrar el progreso que se realizó durante el tratamiento.

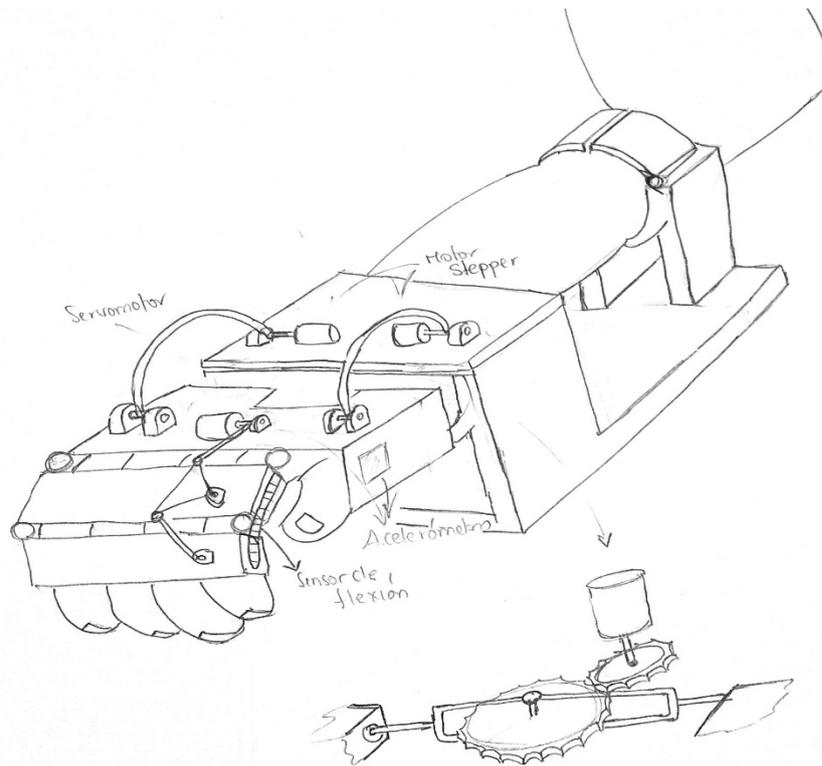


Figura 2.3 Bosquejo de la Solución 1.

### 2.3.2 Solución 2

La segunda solución propuesta se muestra en la siguiente gráfica (ver figura 2.4), esta solución está constituido principalmente por partes, el primero es sobre el apoyo y soporte que tendrá el paciente y el otro parte consiste en los mecanismos que permite realizar el tratamiento. El apoyo y soporte del brazo del paciente será mediante una correa ajustable, lo cual será colocado manualmente. Además, en esta parte habrá un sensor de fuerza para detectar la presencia del brazo del paciente, con esta señal se energizará todo el sistema. La otra parte importante es el mecanismo que permite realizar todos los movimientos de la rehabilitación. Entre ellos se tiene el mecanismo de realizar los movimientos de flexión y extensión de la muñeca, lo cual será accionado mediante un motor *stepper* y tendrá una guía para sea posible realizar el movimiento de flexión radial y cubital de la muñeca. Análogamente, para realizar el movimiento de flexión radial y cubital, el mecanismo contará con un motor *stepper* y una guía. Además, el sistema tendrá un acelerómetro para controlar el ángulo de los movimientos. Finalmente, el sistema contará con un mecanismo para realizar el movimiento de la contracción de los dedos, lo cual estará constituido por un servomotor y barra rígida curvaada.

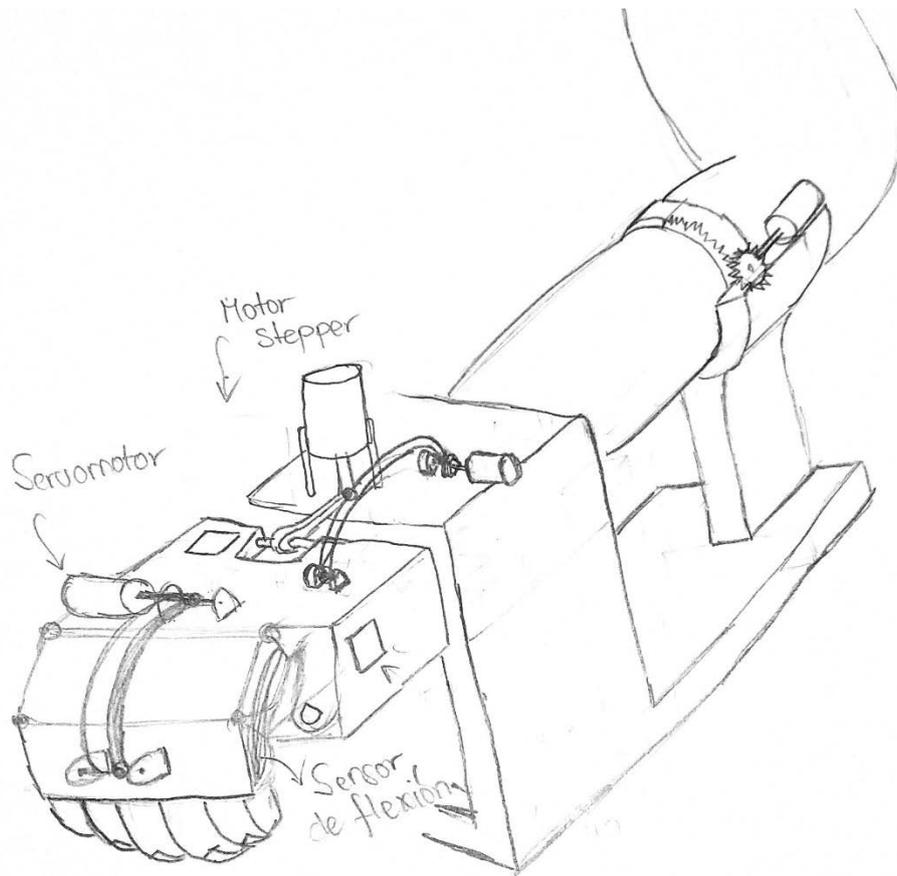


Figura 2.4 Bosquejo de la Solución 2.

### 2.3.3 Solución 3

La tercera solución se muestra en la figura 2.5, se nota que presenta un soporte para el brazo del paciente y, además, el sistema usa un sensor láser para detectar la presencia del brazo del paciente y luego se energizará todo el sistema. Por otra parte, los mecanismos para realizar los movimientos de la rehabilitación serán accionados por un actuador lineal y un motor paso a paso. Además, como en las soluciones anteriores, el sistema presentará dos acelerómetros para medir el ángulo de rotación que deben realizar los actuadores. Finalmente, el sistema presentará una pantalla LCD, en el cual se mostrará el progreso de la rehabilitación.

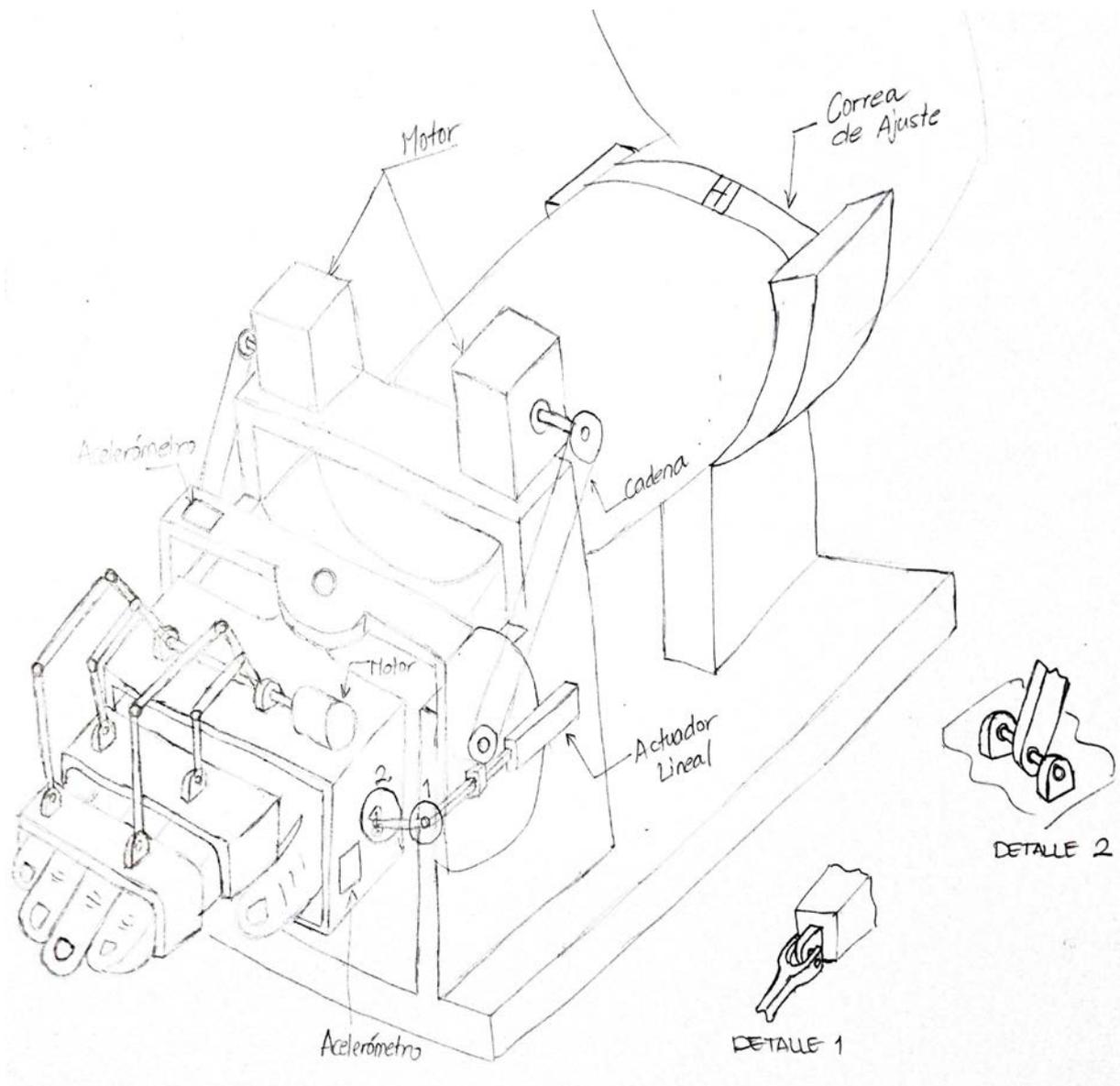


Figura 2.5 Bosquejo de la Solución 3.

## 2.4 Evaluación Técnica-Económica de Solución

En esta sección se analizará las tres soluciones mediante una evaluación técnica y económica, en el cual se tendrá que asignar un puntaje de 0 a 4, donde el valor más alto tendrá la solución ideal. Además, cada una de los criterios analizados tendrá diferentes pesos enfocándose en la seguridad del paciente y la eficiencia de la máquina. Y luego se calcula el promedio general de cada solución con respecto a la solución ideal.

### 2.4.1 Evaluación técnica

En esta parte se analiza la parte técnica tomando en cuenta los siguientes puntos: Consumo de energía, seguridad, rapidez, confiabilidad, Facilidad de manejo, transportabilidad, complejidad, lista de exigencias y uso de fuerza como lo muestra la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Evaluación Técnica de cada Solución.

Evaluación Técnica		Solución 3			Solución 2		Solución 1		Ideal	
Criterio	Descripción	g	p	pxg	p	pxg	p	pxg	p	pxg
Consumo de Energía	La cantidad de energía que se consume por cada uno de los dispositivos utilizados (Actuadores, sensores y controladores).	3	3	9	2	6	1	3	4	12
Seguridad	Se refiere si los dispositivos o mecanismos usados en el sistema pueden afectar en la salud del paciente.	4	3	12	2	8	2	8	4	16
Rapidez	Se refiere a la cantidad de rehabilitaciones que puede realizar el sistema en un tiempo determinado.	2	2	4	3	6	3	6	4	8
Confiabilidad	Se refiere al rendimiento de la máquina, el cual está determinado por la rapidez y la precisión que tienen los actuadores utilizados.	2	3	6	2	4	3	6	4	8
Facilidad de manejo	Se refiere a la facilidad de manejo que puede presentar un usuario nuevo, el cual está relacionado con el interfaz que presenta la máquina.	3	3	9	3	9	3	9	4	12
Complejidad	Se refiere a la complejidad de los mecanismos utilizados en el diseño.	2	3	6	2	4	1	2	4	8
Lista de exigencias	Se refiere qué tanto se desarrolló la lista de exigencias requeridas por el usuario.	4	3	12	3	12	3	12	4	16
Uso de fuerza	Se refiere qué cantidad de fuerza debe agregar el usuario para que la máquina pueda funcionar.	2	3	6	2	4	1	2	4	8
<b>Total</b>			25	66	21	55	19	50	36	92
<b>Promedio</b>			0.72		0.60		0.54		1	

### 2.4.2 Evaluación económica

En esta parte se analiza las tres soluciones con un enfoque económico, ver tabla 2.2, para ello se toma en cuenta los siguientes criterios: cantidad de piezas, adquisividad, montaje y mantenimiento.

Tabla 2.2. Evaluación Económica de cada Solución.

Evaluación Económica		Solución 3			Solución 2		Solución 1		Ideal	
Criterio	Descripción	g	p	pxg	p	pxg	p	pxg	p	pxg
Cantidad de piezas	Se refiere a la cantidad aproximada de piezas que se utilizaron para desarrollarse el proyecto.	4	3	12	2	8	2	8	4	16
Adquisividad	Se refiere a la facilidad de adquisición que presentan los componentes de la máquina; es decir, si los componentes son comerciables o tendrán que importarse.	3	3	9	2	6	2	6	4	12
Montaje	Se refiere a la facilidad de montaje que presenta la máquina.	3	3	9	3	9	1	3	4	12
Mantenimiento	Se refiere a la cantidad de mantenimientos que se debe realizar en un periodo dado para su buen funcionamiento.	2	3	6	2	4	2	4	4	8
<b>Total</b>		12	36	9	27	7	21	16	48	
<b>Promedio</b>			0.75	0.56	0.44	1				

Con los promedios técnicos y económico obtenidos de cada solución presentados en las tablas 2.1 y 2.2, se realiza un gráfico mediante esto se elegirá la solución óptima. En la figura 2.6 se observa que la solución ideal está justo en la recta y tiene los puntajes máximos, por lo tanto, la solución óptima tendrá que estar lo más cercano posible a la recta y a la solución ideal. Con este criterio se descartaría la solución 1 ya que está alejado a la recta en comparación con las otras dos, como la solución 2 y 3 están cercanos a la recta entonces se analizará si uno de ellos está más cerca a la solución ideal. Así, la solución óptima sería la solución 3 por estar más cerca a la recta y a la solución ideal.

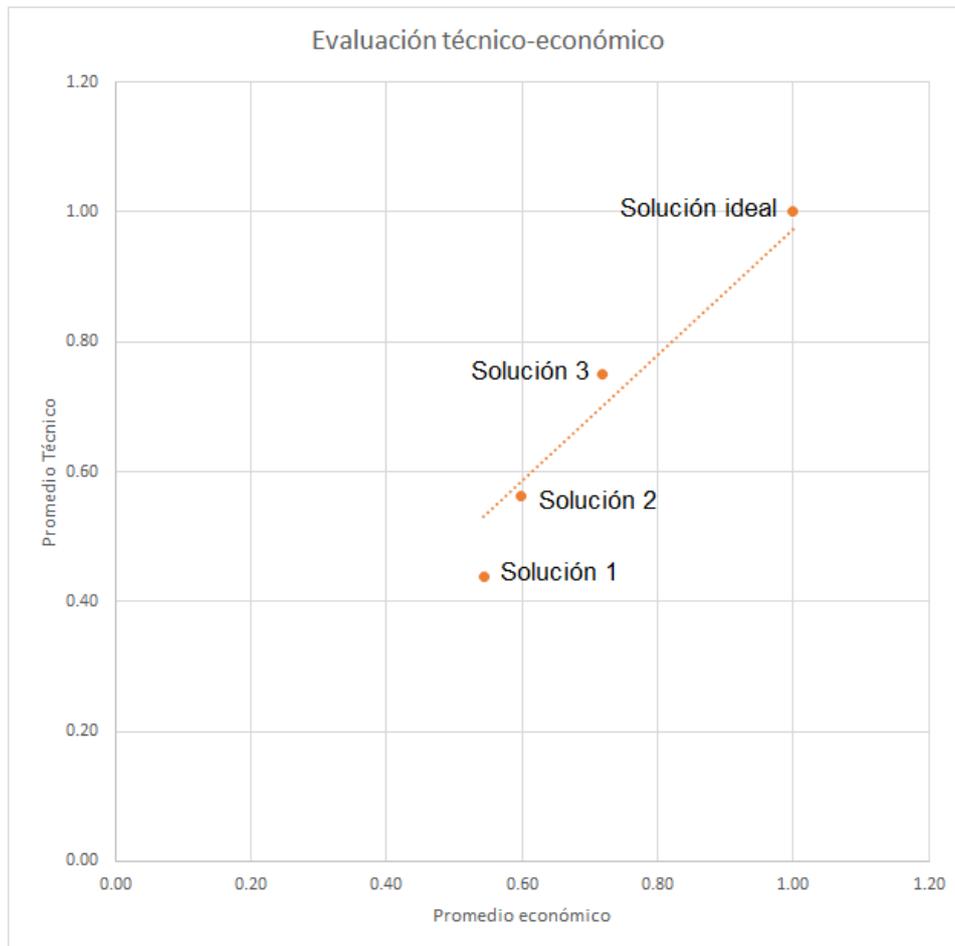


Figura 2.6 Evaluación técnico-económico de las tres soluciones.

## 2.5 Proyecto Preliminar

En este ítem se desarrolla los siguientes puntos: primero, se presentan los objetivos generales y específicos; segundo, los requerimientos del sistema mecatrónico y finalmente, la configuración del sistema.

### 2.5.1 Objetivos

El objetivo general de este trabajo es diseñar un dispositivo estacionario para la rehabilitación de pacientes adultos con tendinitis de muñeca con 3GDL con un costo menor en comparación a equipos comerciales. A continuación, se menciona los objetivos específicos para lograr el objetivo de este trabajo.

- Identificar la estructura funcional de un dispositivo estacionario para la rehabilitación de pacientes adultos con tendinitis de muñeca con 3GDL.
- Diseñar dispositivo estacionario para la rehabilitación de pacientes adultos con tendinitis de muñeca con 3GDL.

- Realizar un análisis de costos para implementar un dispositivo estacionario para la rehabilitación de pacientes adultos con tendinitis de muñeca con 3GDL.
- Realizar simulaciones de funcionamiento del sistema.

### **2.5.2 Requerimientos del Sistema Mecatrónico**

Los requerimientos mecánicos del dispositivo son los siguientes:

- Debe ser usado por personas adultas, quienes deben tener una longitud del antebrazo en un rango de 24-40cm y de peso máximo a 80 Kg.
- Debe ser de tres grados de libertad para realizar los movimientos de la muñeca (2 grados) y de los dedos (1 grado).
- Debe tener correas flexibles para que el antebrazo de la persona ingrese y salga fácilmente.
- Debe tener unos topes mecánicos de seguridad que ayuden a parar el movimiento de la muñeca cuando el dispositivo no obedezca al control del movimiento de los motores para evitar lesiones en el brazo de la persona.

Los requerimientos electrónicos del sistema son los siguientes:

- La alimentación del dispositivo será 220VAC y se usará un convertidor AC/DC para conectar los actuadores y sensores.
- Los actuadores deben tener un torque mínimo de 0.1 Nm necesario para superar la inercia, el peso de la mano, y el efecto de los actuadores acoplados en el mecanismo.
- Todos los movimientos serán a una velocidad constante y moderadamente suave aproximadamente de 12 °/s.

Los requerimientos de control del sistema son los siguientes:

- El control de las posiciones angulares de los actuadores debe ser continuo para realizar un movimiento fino y evitar posibles lesiones al sujeto.

Los requerimientos de seguridad del sistema son los siguientes:

- El sistema debe tener botones de emergencia, el cual deshabilitará el ingreso de corriente eléctrica a todos los actuadores.
- El sistema debe contar con aislamiento eléctrico.

### **2.5.3 Configuración del Sistema**

En esta sección, se abarca el diagrama de operaciones con el fin de mostrar el funcionamiento del sistema al usuario, también se muestra el diagrama de bloques, en donde se determina las conexiones que existen entre los diferentes dispositivos utilizados en el sistema. Además, se desarrolla el diagrama de flujo general del sistema, el cual facilita entender la operación del controlador. Finalmente, se da las dimensiones generales aproximadas del sistema con todos los actuadores utilizados.

#### **2.5.3.1 Diagrama de Operaciones**

El usuario debe contar con un sistema mecatrónico para tratamiento de rehabilitación que cumpla la norma ASME en su diagrama de operaciones, mostrado en la figura 2.7, donde para realizar el tratamiento de rehabilitación se sigue las siguientes acciones: primero, se debe energizar el sistema y luego se presiona un interruptor de encendido de sistema. Segundo, se ingresa el brazo del paciente y las señales de programación de tratamiento por medio de botones de control, esto es, seleccionar el tipo de rehabilitación y el tipo de brazo a rehabilitar. Tercero, se presiona el botón de inicio y luego se acciona los actuadores para empezar con la rehabilitación de muñeca del paciente. Finalmente, cuando la rehabilitación ha finalizado se mostrará las diferentes señales de salida (fin de rehabilitación y estado de agarre entre los dedos y la muñeca). Además, en el diagrama de operaciones en caso que ocurra una falla en el sistema, en la figura 2.7 se muestra el bloque con las líneas rojas.

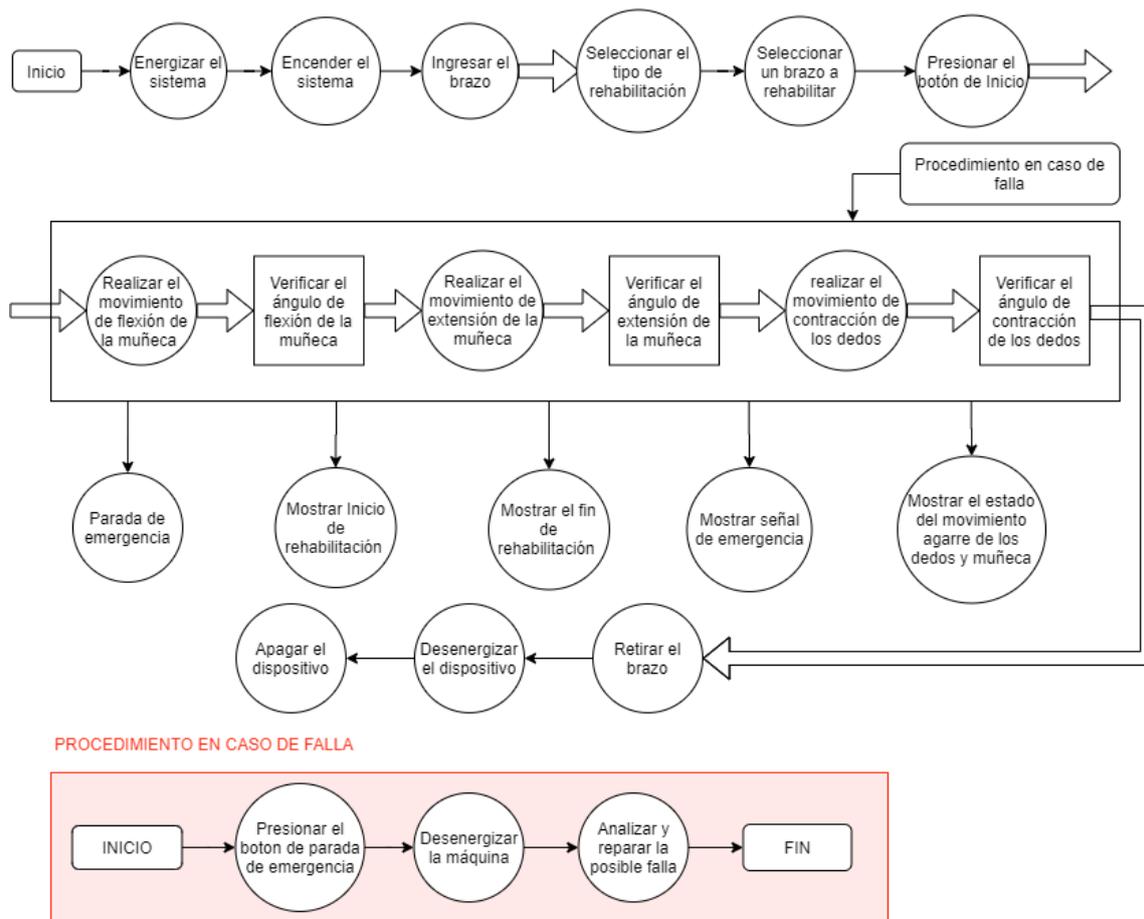


Figura 2.7. Diagrama de operaciones del sistema.

### 2.5.3.2 Diagrama de Bloques

En la figura 2.8 se muestra todas las conexiones del sistema entre los diferentes dispositivos utilizados (actuadores, sensores y controlador). Además, para el motor DC (micromotor) se añadirá un módulo relé para que pueda girar en los dos sentidos y para los motores paso a paso se añadirá un motor driver para controlar el sentido de giro y la posición angular.

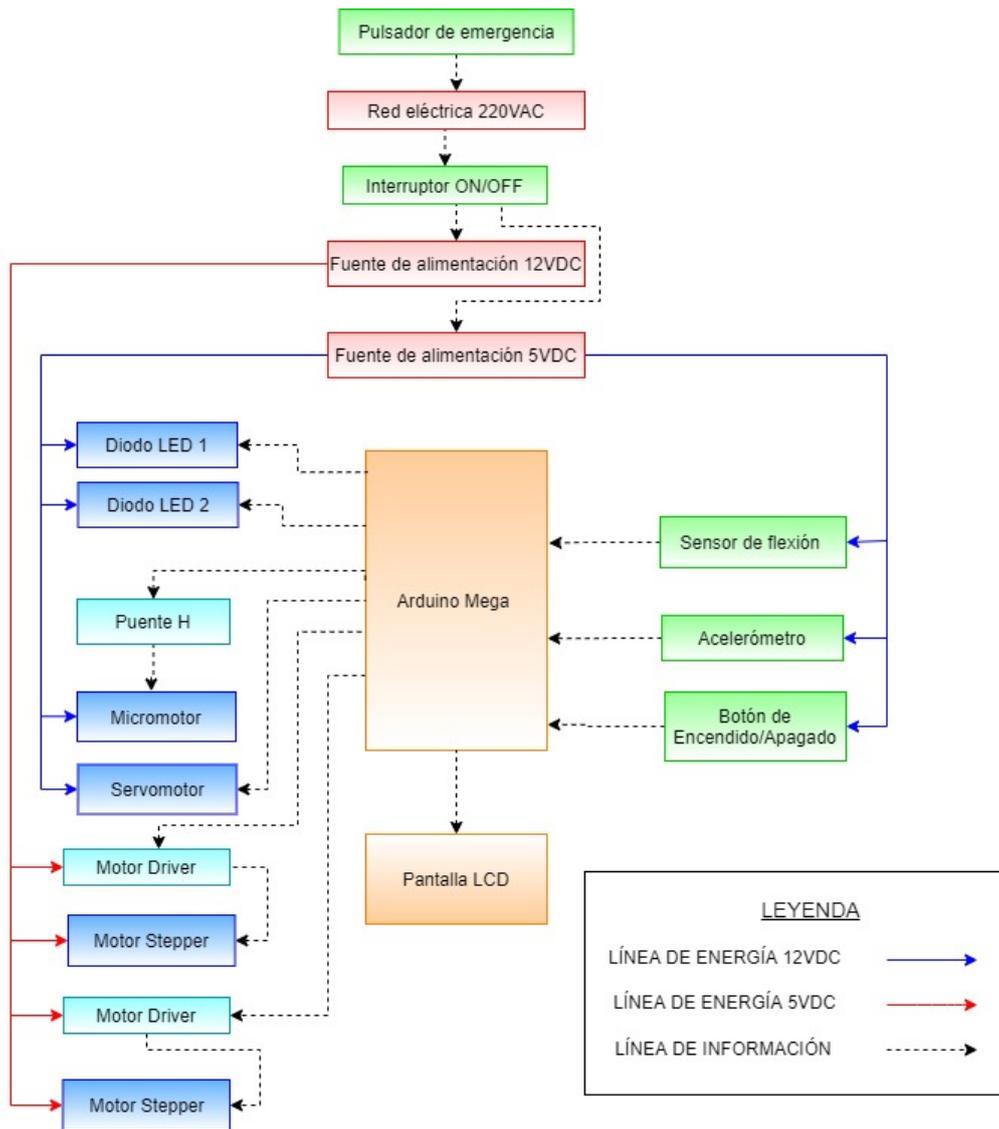


Figura 2.8. Diagrama de conexiones entre los dispositivos del sistema.

### 2.5.3.3 Dimensiones Generales

El modelamiento CAD se realizó en el *Autodesk Inventor 2020* y en la figura 2.9 se muestra esto con los actuadores ensamblados y una base de apoyo. Según el DIN 3302 (medidas morfológicas de la mano), las dimensiones generales del modelo CAD del sistema son 523 mm de largo, 300mm de ancho y 236 mm de altura. Asimismo, en este modelo CAD no se consideró el interfaz usuario y los dispositivos de control.

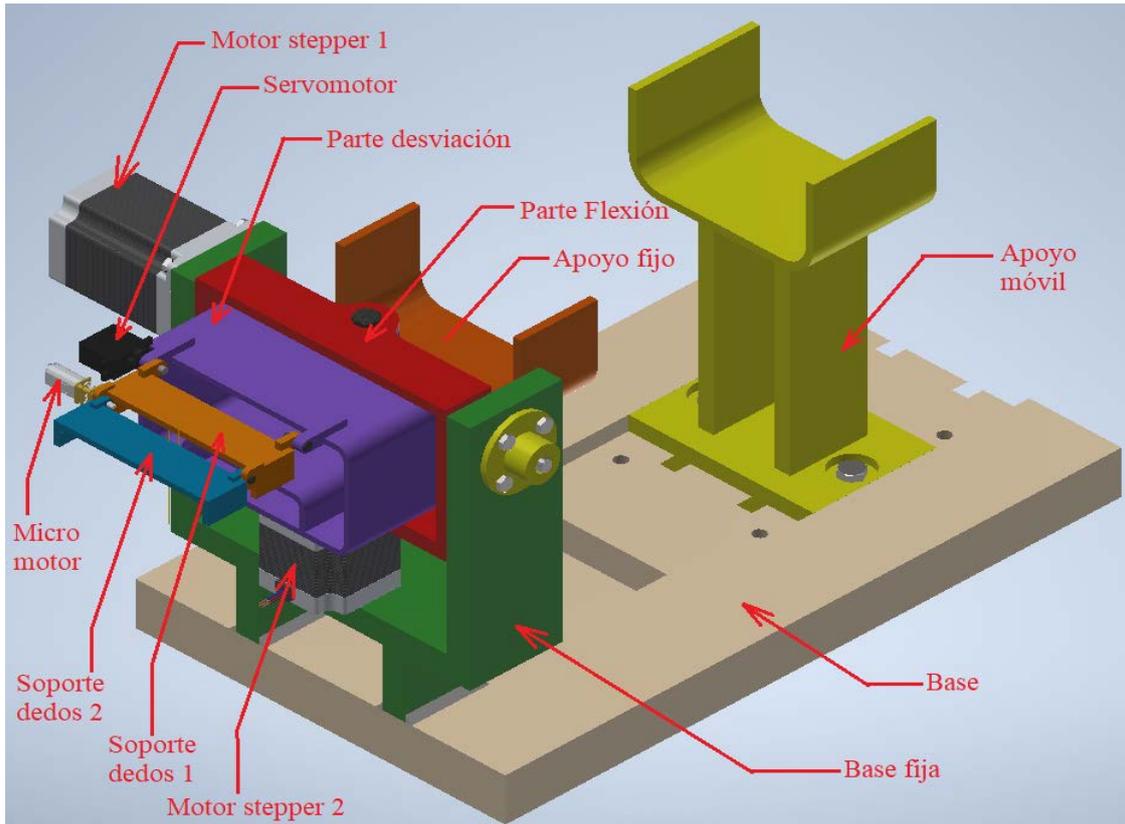


Figura 2.9. Vista isométrica del sistema.

Para regular el apoyo, el sistema tiene una guía cola de milano y un perno para fijar a una distancia adecuada según la longitud del brazo del paciente, mostrado en la figura 2.10.

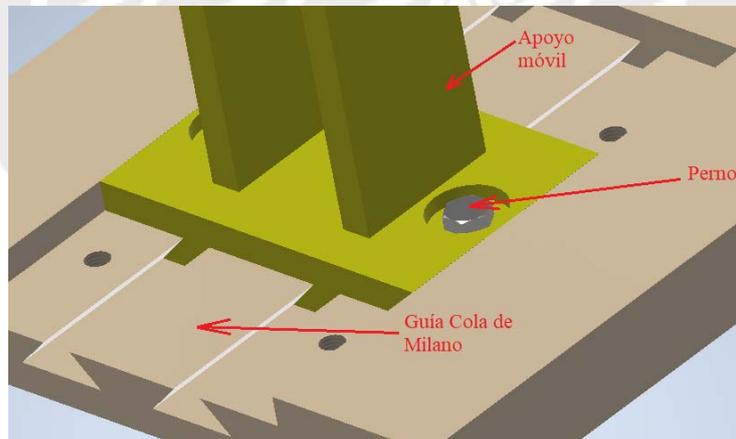


Figura 2.10. Mecanismo regulable mediante guía cola de milano.

El movimiento de flexión y extensión de la muñeca será accionado mediante un motor *stepper*, donde este está fijado mediante cuatro pernos, en la figura 2.11 se muestra la configuración de esto.

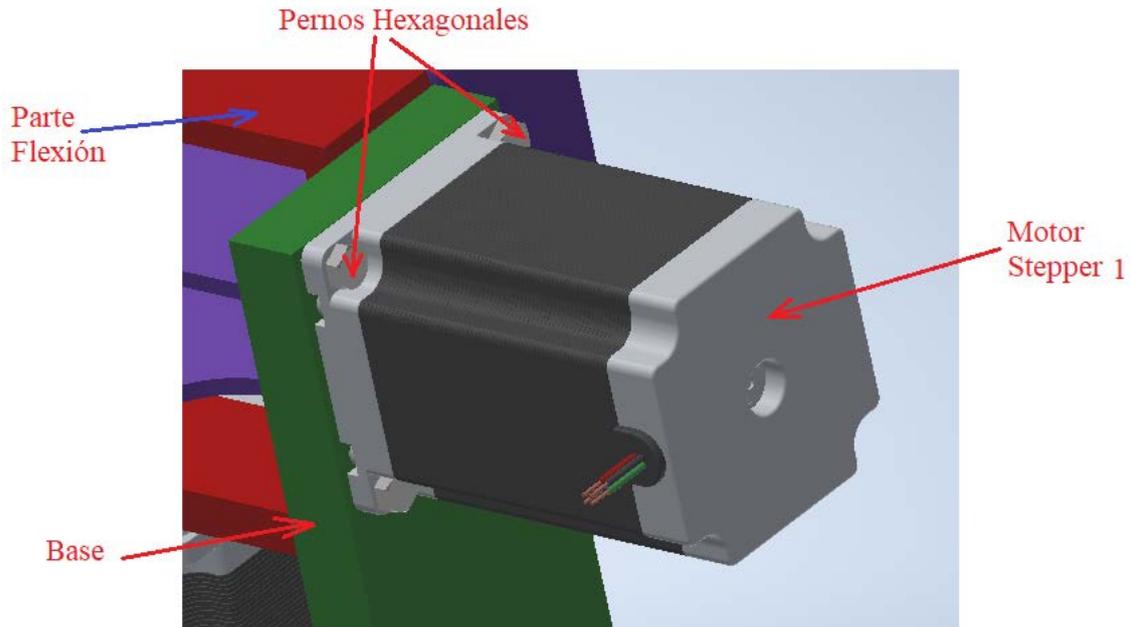


Figura 2.11. Configuración del motor stepper 1 en el Sistema.

Asimismo, para realizar el movimiento de desviación radial y cubital de la muñeca se utiliza motor *stepper 2* con dimensiones menores que el motor *stepper 1*, pues se necesita menos torque para realizar el movimiento y para que el sistema no sea muy pesado. En la figura 2.12 se muestra la configuración de este motor; además, se utiliza dos engranajes para permitir mayor libertad al movimiento de la mano y no choque con la mano del paciente.

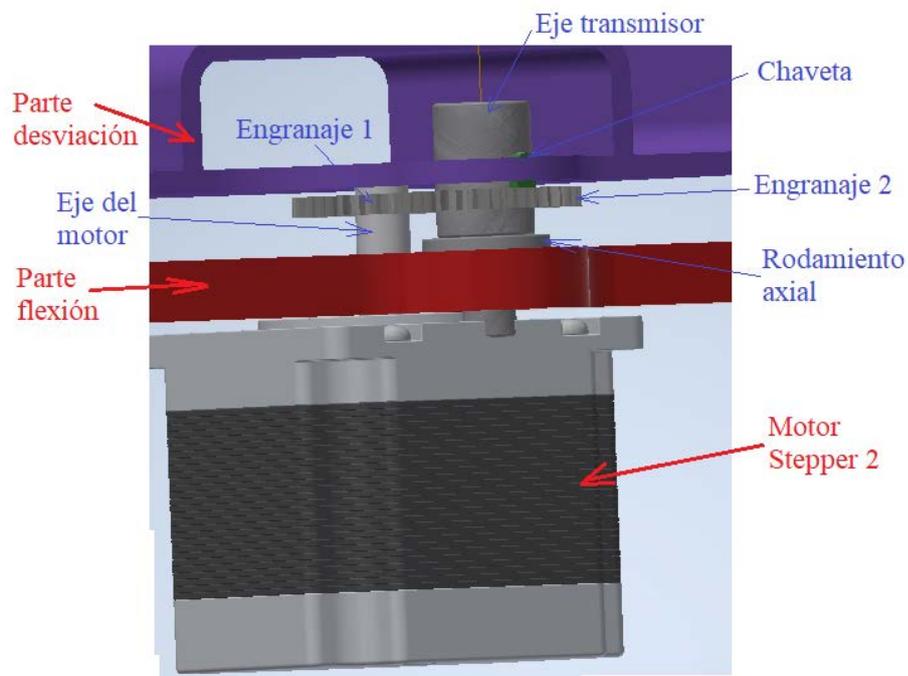


Figura 2.12. Configuración del motor stepper 2.

## OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES

- Según la revisión del marco teórico de este trabajo de tesis, específicamente el estudio de los movimientos de la muñeca de una persona, se observó que dichos movimientos son flexión-extensión, desviación radial-cubital y supinación-pronación. Sin embargo, en este trabajo se alcanzó un diseño preliminar de un sistema de asistencia para rehabilitación que realiza los dos primeros movimientos de muñeca y el movimiento de contracción de los dedos. Por ello, se recomienda hacer un estudio sobre el movimiento de supinación-pronación y determinar si afecta o no a la rehabilitación de movimientos de muñeca.
- El trabajo de tesis desarrollado puede contribuir en futuros estudios o diseños de dispositivos de rehabilitación de muñeca y mano. Se recomienda inicialmente no variar la parte mecánica y si la parte electrónica y control, de tal forma que el sistema considere mejoras en precisión del movimiento de la muñeca y de mejores resultados de rehabilitación.
- La selección de los motores se realizó considerando una carga máxima que deberán mover, esto es, el peso máximo de una persona igual a 100kg como lo muestra el estado del arte de este trabajo.
- Finalmente, los topes mecánicos de seguridad inhabilitan los movimientos fuera de rango anatómico del paciente para los movimientos de flexión-extensión y desviación radial-cubital. Sin embargo, solo cubre el ángulo mayor entre la desviación radial y cubital de la muñeca ya que los desplazamientos angulares son diferentes en cada movimiento.

## CONCLUSIONES

Este trabajo tiene las siguientes conclusiones:

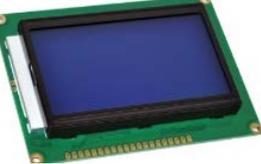
- Se ha logrado diseñar preliminarmente un dispositivo estacionario para la rehabilitación de la muñeca en pacientes adultos con 3GDL en un caso de lesión de tendinitis. De esta forma, los tres movimientos alcanzados fueron flexión-extensión y desviación radial-cubital de muñeca, y contracción de los dedos.
- Según la indagación realizada del estado de arte, se identificó que los productos comerciales similares no incluyen los tres movimientos de la muñeca. Por ello, el objetivo general de este trabajo de investigación es diseñar preliminarmente un dispositivo con dos movimientos de muñeca y un movimiento de mano. Además, se encontró que estos productos tienen un protector de seguridad sobre los actuadores; por ello, en el diseño de este dispositivo se incluyó una carcasa de seguridad que lo cubra para evitar posibles lesiones del paciente.
- Se consiguió realizar la estructura de funciones donde se muestra la conexión entre las funciones del dominio de materia, control, energía, sensores, actuadores y con interacción con el usuario.
- Se determinó el concepto de solución óptimo que satisface los requerimientos planteados en base a una evaluación económico-técnico.
- Finalmente, se obtuvo el modelamiento CAD aproximado considerando las medidas estandarizadas del brazo y mano de una persona según la norma DIN 3302.

## BIBLIOGRAFÍA

- ADAFRUIT. (2018, August 22). *Force Sensitive Resistor FSR: Datasheet*. Retrieved Abril 15, 2019, from <https://cdn-learn.adafruit.com/downloads/pdf/force-sensitive-resistor-fsr.pdf?timestamp=1587356106>
- ADAFRUIT Ind. (n.d.). Retrieved Abril 15, 2019, from <https://www.adafruit.com/product/324>
- ADAMS. (2015). Tendinopathies of the Hand and Wrist. *American Academy of Orthopedic Surgeons*, 23(12).
- ARDUINO. (n.d.). *Arduino Mega 2560 REV3*. Retrieved Abril 15, 2019, from <https://store.arduino.cc/usa/mega-2560-r3>
- AVILÉS. (2015, Noviembre 26). *Colombia Patent No. WO 2015/177701*.
- BOSCH. (2019, Octubre). *Triaxial Gyroscope BMG 250: datasheet*. Retrieved Enero 15, 2020, from <https://www.bosch-sensortec.com/media/boschsensortec/downloads/datasheets/bst-bmg250-ds000.pdf>
- Budynas. (2008). Tornillos, sujetadores y diseño de uniones no permanentes. In *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley* (pp. 395-455). México: McGraw-Hill.
- CÁRDENAS, J. (2003). Anatomía Clínica del Aparato Locomotor: Mano - Muñeca. *ARS MEDICA*.
- CHIM, H. (2017). Hand and Wrist Anatomy and Biomechanics: A Comprehensive Guide. In *Plastic and reconstructive surgery* (p. 865).
- EL COMERCIO. (2013, marzo 26). Retrieved marzo 20, 2019, from <https://gestion.pe/tecnologia/inei-100-hogares-peruanos-31-computadora-34873>
- FLINT REHAB. (n.d.). Retrieved Marzo 25, 2019, from Flint Rehab: Tools to spark recovery: <https://www.flintrehab.com/product/musicglove-hand-therapy/>
- Gutiérrez. (2018, Agosto). *INEI*. Retrieved Marzo 20, 2019, from [https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones\\_digitaless/Est/Lib1538/index.html](https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitaless/Est/Lib1538/index.html)
- INEG. (2013). Retrieved Marzo 20, 2019, from [http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/Productos/prod\\_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/metodologias/MODUTIH/MODUTIH2013/MODUTIH2013.pdf](http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/Productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/metodologias/MODUTIH/MODUTIH2013/MODUTIH2013.pdf)
- INEI. (2013, Diciembre 02). Retrieved Marzo 20, 2019, from <https://www.inei.gob.pe/prensa/noticias/en-el-peru-1-millon-575-mil-personas-presentan-alg/>
- INSTRUMENTS, T. (n.d.). *Tiva C Launchpad*. Retrieved Abril 15, 2019, from <http://www.ti.com/lit/ml/spmt281a/spmt281a.pdf>
- JIMENEZ. (2002). *Anatomía Humana General*. Universidad de Sevilla.
- LINAK. (n.d.). *Techline: Product Overview*. Retrieved Marzo 15, 2019, from <https://ipaper.ipapercms.dk/Linak/ENGLISH/BROCHURE/TECHLINEProductOverviewBrochureEng/?page=1>
- MANSFIELD. (2009). *Essentials of Kinesiology for the Physical Therapist Assistant* (Second ed.). China: Elsevier Inc.
- MORENO. (2018, Marzo 01). *Colombia Patent No. WO 2018/036571*.

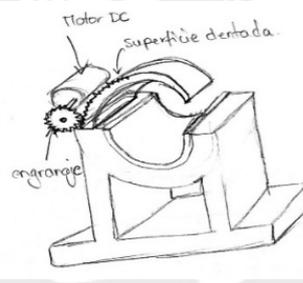
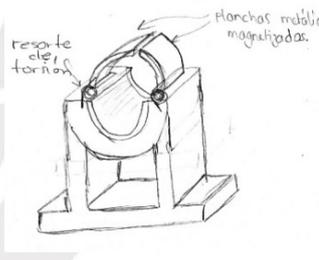
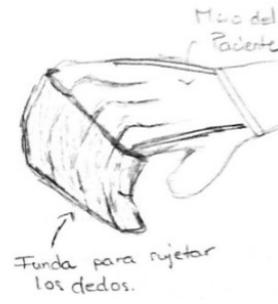
- NARVÁEZ. (2014). Diseño de un Dispositivo Neumático para Rehabilitación de Mano mediante funda Termoretractil. *Actas de las XXXV Jornadas de Automática*, 423-429.
- NETTER. (2018). *Atlas of Human Anatomy* (7th ed.). España: Elsevier.
- NYLAMP MECHATRONICS. (n.d.). Retrieved Abril 15, 2019, from <https://naylampmechatronics.com/servomotores/22-servo-sg-5010-6kg.html>
- PAJARES. (2017). *Diseño del sistema mecánico de un equipo de rehabilitación de la muñeca usando mecanismos paralelos*. Lima.
- Paulsen. (2015). Uniones entre eje y cubo. In *Elementos de máquinas*.
- Plagenhoef. (1983). Anatomical data for analyzing human motion. *Research quartely for exercise and sport*, 2(54), 169-178.
- RAE. (n.d.). Retrieved Marzo 25, 2019, from <http://www.rae.es/>
- RASPBERRY. (n.d.). *Raspberry Pi 3*. Retrieved Abril 15, 2019, from <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b/>
- Ricky. (n.d.). *Weill Cornell medicine*. Retrieved Abril 25, 2020, from <https://www.rickysinghmd.com/wrist-tendonitis/>
- SALADIN, K. (2017). *Human Anatomy* (Fifth ed.). New York: Mc Graw Hill Education.
- SIEMENS Industry Inc. (n.d.). Retrieved Abril 15, 2019, from <https://new.siemens.com/global/en/products/automation/systems/industrial/plc/s7-1200.html>
- SPARKFUN. (2009). *Accelerometer ADXL335*. Retrieved Abril 15, 2019, from <https://www.sparkfun.com/datasheets/Components/SMD/adx1335.pdf>
- SPARKFUN. (n.d.). *Flex Sensor FS: Datasheet*. Retrieved Abril 15, 2019, from <https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/ForceFlex/FLEXSENSORREVA1.pdf>
- STANIA, M. (2009). Mechatronics engineering on the example of a multipurpose mobile robot. *Solid State Phenomena*, 147, 61-66.
- TYROMOTION. (n.d.). Retrieved Marzo 25, 2019, from <https://tyromotion.com/produkte/amadeo/>
- TYROMOTION. (2013, October). *The Clever Therapy*. Graz, Austria: TYROMOTION GMBH. Retrieved March 25, 2019, from <http://pdf.medicalexpo.es/pdf-en/tyromotion/tyromotion-product-catalogue/70389-148993.html#open>
- VIRHUEZ, W. J. (2018). *Diseño de un mecanismo robótico de dos grados de libertad para rehabilitación del miembro superior en usuarios con post-infarto cerebral*. Tesis de licenciatura en Ingeniería Mecatrónica. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de Ciencias e Ingeniería.
- Westenskow, D. R. (1997). Fundamentals of Feedback Control: PID, Fuzzy Logic, and Neural Networks. *Journal of Clinical Anesthesia*(9), 33S-35S.

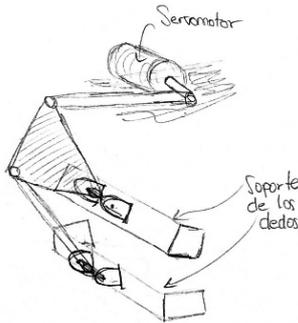
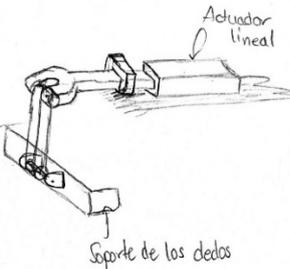
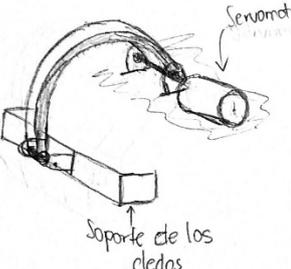
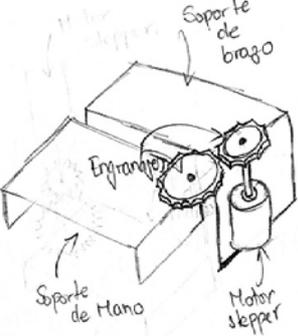
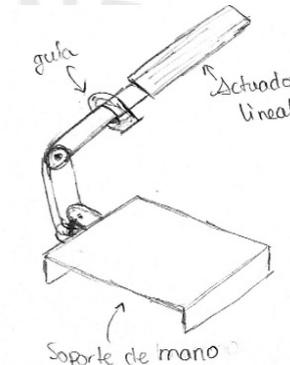
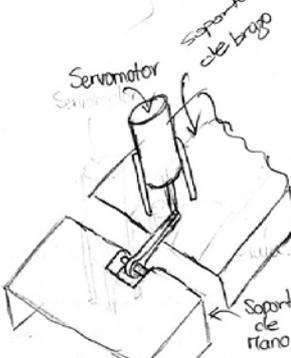
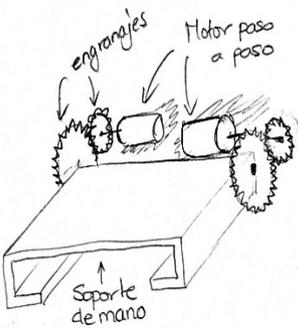
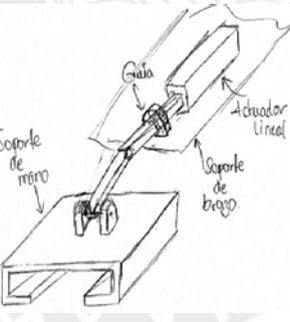
## ANEXO A: MATRIZ MORFOLOGICA

Función Parcial	Principio de Solución 1	Principio de Solución 2	Principio de Solución 3
Iniciar el Proceso	 Interruptor simple	 Botón pulsador	 Pantalla HMI
Indicar el Tipo de Rehabilitación	 Interruptor de palanca	 Botón con selector	 Pantalla HMI
Indicar el Parada De Emergencia	 Interruptor simple	 Botón pulsador	 Pantalla HMI
Señal el Inicio de Proceso	 Indicador led	 Pantalla LCD 128x64	 Pantalla HMI
Señal el Fin de Proceso	 Indicador led	 Pantalla LCD 128x64	 Pantalla HMI

Mostrar el progreso de rehabilitación	 Pantalla LCD 128x64	 Pantalla LCD 128x64	 Pantalla HMI
<b>Función Parcial</b>	<b>Principio de Solución 1</b>	<b>Principio de Solución 2</b>	<b>Principio de Solución 3</b>
Señal de Emergencia	 Indicador led	 Pantalla LCD 128x64	 Pantalla HMI
Acondicionar energía de control	Rectificador-regulador 	Fuentes switching 	Regulador rectificador 
Acondicionar energía de sensores	Transformador rectificador 	Rectificador regulador 	Transformador AC-DC 
Acondicionar energía de actuadores	Transformador AC-DC 	Fuentes switching 	Regulador rectificador 

Sensar el ángulo de flexión de los dedos	 Sensor de flexión	 Módulo Acelerómetro	 Módulo Giroscopio
<b>Función Parcial</b>	<b>Principio de Solución 1</b>	<b>Principio de Solución 2</b>	<b>Principio de Solución 3</b>
Sensar el ángulo de flexión y extensión de la mano	 Sensor de flexión	 Módulo Acelerómetro	 Módulo Giroscopio
Sensar el ángulo de flexión radial y cubital de la muñeca	 Sensor de flexión	 Módulo Acelerómetro	 Módulo Giroscopio
Accionar mecanismo de sujeción	 Motor DC	 Magnetizador/desmagnetizador	 Manual
Accionar mecanismo de movimiento de flexión y extensión de la mano	 Actuador lineal eléctrico	 Servomotor	 Motor paso a paso

<p>Accionar mecanismo de movimiento de flexión radial y cubital de la muñeca</p>	 <p>Motor paso a paso</p>	 <p>Servomotor</p>	 <p>Actuador lineal eléctrico</p>
<p><b>Función Parcial</b></p>	<p><b>Principio de Solución 1</b></p>	<p><b>Principio de Solución 2</b></p>	<p><b>Principio de Solución 3</b></p>
<p>Accionar mecanismo del movimiento de contracción de los dedos</p>	 <p>Servomotor</p>	 <p>Motor paso a paso</p>	 <p>Actuador lineal eléctrico</p>
<p>Sujetar el brazo del paciente</p>	<p>Correa</p>	<p>Engranaje-superficie dentada</p> 	<p>Resorte de tensión</p> 
<p>Sujetar los dedos de la mano</p>	<p>Soporte para cada falange</p> 	<p>Soporte para los dedos</p> 	<p>Guantes</p> 

<p>Contraer los dedos</p>	<p>Mecanismo de barras</p> 	<p>Movimiento lineal</p> 	<p>Movimiento circular</p> 
<p><b>Función Parcial</b></p>	<p><b>Principio de Solución 1</b></p>	<p><b>Principio de Solución 2</b></p>	<p><b>Principio de Solución 3</b></p>
<p>Realizar el movimiento de flexión radial y cubital de la muñeca</p>	<p>Ruedas dentadas</p> 	<p>Movimiento lineal</p> 	<p>Movimiento giratorio</p> 
<p>Realizar el movimiento de flexión y extensión de la mano</p>	<p>Ruedas dentadas</p> 	<p>Movimiento lineal</p> 	<p>Movimiento giratorio</p> 