



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN SISTEMAS ELECTRÓNICA E  
INDUSTRIAL**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y COMUNICACIONES**

**Tema:**

---

“SISTEMA ELECTRÓNICO PARA LA REHABILITACIÓN DE MANO.”

---

Trabajo de Titulación Modalidad: Proyecto de Investigación, presentado previo a la obtención del título de Ingeniero en Electrónica y Comunicaciones.

**AREA:** Física y Electrónica

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:** Sistemas de Comunicación

**AUTOR:** Lima Arias Luis Alfonso

**TUTOR:** Ing. Mg. Córdova Córdova Edgar Patricio

Ambato – Ecuador

Agosto - 2020

## **APROBACIÓN DEL TUTOR**

En calidad de tutor del Trabajo de Titulación con el tema: “SISTEMA ELECTRÓNICO PARA LA REHABILITACIÓN DE MANO”, desarrollado bajo la modalidad Proyecto de Investigación por el señor Luis Alfonso Lima Arias, estudiante de la Carrera de Ingeniería Electrónica y Comunicaciones, de la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial, de la Universidad Técnica de Ambato, me permito indicar que el estudiante ha sido tutorado durante todo el desarrollo del trabajo bajo su conclusión, de acuerdo a lo dispuesto en el Artículo 15 del Reglamento para obtener el Título de Tercer Nivel, de Grado de la Universidad Técnica de Ambato, y el numeral 7.4 del respectivo instructivo.

Ambato, agosto 2020



Firmado electrónicamente por:  
EDGAR PATRICIO  
CORDOVA CORDOVA

.....

TUTOR

Ing. Mg. Edgar Patricio Córdova

## AUTORÍA

El presente Proyecto de Investigación titulado: “SISTEMA ELECTRÓNICO PARA LA REHABILITACIÓN DE MANO” es absolutamente original, autentico y personal. En tal virtud, el contenido, efectos legales y académicos que se desprenden del mismo son de exclusiva responsabilidad del autor.

Ambato, agosto 2020



AUTOR

Luis Alfonso Lima Arias

C.I. 1500913999

## **APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO**

En calidad de par calificador del Informe Final del Trabajo de Titulación presentado por el señor Lima Arias Luis Alfonso, estudiante de la Carrera de Ingeniería en Electrónica y Comunicaciones, de la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial, bajo la Modalidad Proyecto de Investigación, titulado “SISTEMA ELECTRÓNICO PARA LA REHABILITACIÓN DE MANO”, nos permitimos informar que el trabajo ha sido revisado y calificado de acuerdo al Artículo 17 del Reglamento para obtener el Título de Tercer Nivel, de Grado de la Universidad Técnica de Ambato, y al numeral 7.6 del respectivo instructivo. Para cuya constancia suscribimos, conjuntamente con la señora Presidenta del Tribunal.



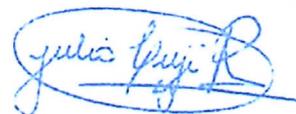
.....  
**Ing. Mg. Elsa Pilar Urrutia Urrutia**

**PRESIDENTE DEL TRIBUNAL**



.....  
**Ing. Giovanni Brito, Mg.**

**DOCENTE CALIFICADOR**



.....  
**Ing. Julio Cuji, Mg.**

**DOCENTE CALIFICADOR**

## **DERECHOS DEL AUTOR**

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que haga uso de este Trabajo de Titulación como un documento disponible para la lectura, consulta y procesos de investigación.

Cedo los derechos de mi Trabajo de Titulación en favor de la Universidad Técnica de Ambato, con fines de difusión pública. Además, autorizo su reproducción total o parcial dentro de las regulaciones de la institución.

Ambato, agosto 2020



AUTOR

Luis Alfonso Lima Arias

C.I. 1500913999

## **DEDICATORIA**

Este trabajo representa la culminación de uno de mis objetivos planteados y se la dedico con mucho cariño a mis padres por el apoyo incondicional durante esta etapa de estudio, y a mi hijo por ser el motor de inspiración, fuerza y sabiduría para dar cumplimiento a una meta

Luis Alfonso Lima Arias

## **AGRADECIMIENTO**

A mis padres por ser quienes me impulsaron cada día a superarme de manera personal y profesional, quienes me han enseñado el valor del trabajo y la responsabilidad.

A todos mis hermanos por sus palabras de aliento en los momentos difíciles, por la compañía en noches de velada de estudios.

A mi hijo por ser quien le da propósito y sentido a mi vida con sus miradas, sus dulces gestos de cariño y sus palabras de amor.

A mis profesores que han sido mis mentores impartiendo sus conocimientos y experiencias personales en el ámbito laboral.

A mis amigos y compañeros por el apoyo y trabajo en equipo que se ha realizado para dar cumplimiento a cada una de las actividades propuestas durante este largo camino de superación profesional.

Luis Alfonso Lima Arias

## ÍNDICE GENERAL

APROBACIÓN DEL TUTOR.....	ii
AUTORÍA .....	iii
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO.....	iv
DERECHOS DEL AUTOR .....	v
DEDICATORIA .....	vi
AGRADECIMIENTO .....	vii
RESUMEN .....	xvi
ABSTRACT.....	xvii
INTRODUCCIÓN .....	xviii
CAPÍTULO I .....	1
EL PROBLEMA.....	1
1.1 TEMA DE INVESTIGACIÓN .....	1
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	1
1.3 DELIMITACIÓN.....	2
1.3.1 DELIMITACIÓN DE CONTENIDO .....	2
1.3.2 DELIMITACIÓN ESPACIAL:.....	3
1.3.3 DELIMITACIÓN TEMPORAL: .....	3
1.4 JUSTIFICACIÓN .....	3
1.5 OBJETIVOS .....	4
1.5.1 OBJETIVOS GENERAL .....	4
1.5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	4
CAPÍTULO II.....	5
MARCO TEÓRICO.....	5
2.1 ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS .....	5
2.2 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA .....	7
2.2.1 ANATOMÍA DE LA MANO .....	7
2.2.2 LESIÓN DE MANO .....	7

2.2.3 RIGIDEZ ARTICULAR .....	8
2.2.4 HUESOS Y ARTICULACIONES DE LA MANO.....	8
2.2.5 MÚSCULOS INTRÍNSECOS Y EXTRÍNSECOS DE LA MANO .....	9
2.2.6 PATOLOGÍAS.....	10
2.2.6.1 ÓSEAS.....	10
2.2.6.2 EN LAS ARTICULACIONES.....	10
2.2.6.3 EN LOS TENDONES .....	10
2.2.6.4 NEUROVASCULARES .....	11
2.2.6.5 PATOLOGÍAS DE LOS DEDOS DE LA MANO .....	11
2.2.7 MANO TRAUMÁTICA .....	11
2.2.7.1 REHABILITACIÓN DE MANO .....	11
2.2.7.2 OBJETIVOS DE LA REHABILITACIÓN.....	12
2.2.8 TRATAMIENTO DE FISIOTERAPIA .....	12
2.2.9 BIOMECÁNICA DE LA MANO .....	13
2.2.10 ARCOS Y ÁNGULOS DE MOVIMIENTO DE LOS DEDOS DE LA MANO .....	14
2.2.11 FLEXIÓN – EXTENSIÓN .....	14
2.2.11.1 Metacarpofalángica: .....	14
2.2.11.2 Interfalángica Proximal: .....	15
2.2.11.3 Interfalángica Distal: .....	15
2.2.11.4 Abducción – Aducción de los dedos: .....	15
2.2.12 TRATAMIENTO.....	16
2.2.12.1 FISIOTERAPIA.....	17
2.2.12.2 ELECTROTERAPIA .....	17
2.2.13 DETERMINACIÓN DEL DAÑO Y DISCAPACIDAD .....	18
2.2.14 MÉTODOS DE DIAGNÓSTICO .....	18
2.2.15 INGENIERÍA EN LA REHABILITACIÓN .....	19
2.2.16 ROBÓTICA DE REHABILITACIÓN.....	19
2.2.17 TECNOLOGÍA EN LA REHABILITACIÓN .....	20
2.2.18 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO .....	20

Editor de código o texto .....	22
Compilador .....	22
Interprete .....	23
Depurador .....	23
GUI .....	23
SERVOMOTOR.....	23
PANTALLA TÁCTIL .....	24
Pantalla TFT LCD.....	25
2.3 PROPUESTA DE SOLUCIÓN.....	26
CAPITULO III.....	27
METODOLOGÍA .....	27
3.1 MODALIDAD DE LA INVESTIGACIÓN .....	27
3.2 RECOLECCIÓN DE LA INFORMACIÓN .....	27
3.3 PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS .....	28
3.4 DESARROLLO DEL PROYECTO.....	28
CAPÍTULO IV .....	30
DESARROLLO DE LA PROPUESTA .....	30
4.1 INTRODUCCIÓN .....	30
4.2 ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD.....	30
4.3 ESTUDIO Y ANÁLISIS DE REQUERIMIENTOS DEL PROTOTIPO.....	31
4.3.1 ANÁLISIS DE REQUERIMIENTOS DEL PROTOTIPO .....	32
Ligamentos .....	33
Músculos.....	33
Tendones.....	33
Mecanismo de lesión.....	35
4.3.1.1 Requerimientos físicos del prototipo.....	36
4.3.2 ANALISIS MATEMÁTICO.....	38
4.3.3 SELECCIÓN DE COMPONENTES .....	48
4.3.3.1 PLACA DE CONTROL.....	48

4.3.3.5 SOLID WORKS.....	57
4.3.4 ETAPA 2: DESARROLLO DEL PROTOTIPO .....	58
4.3.5 ANALISIS DEL PRODUCTO FINAL.....	70
4.3.6 PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO.....	71
4.3.6 ETAPA 3: VALIDACIÓN DEL PROTOTIPO.....	72
4.3.7 DIAGRAMA DEL CIRCUITO .....	73
4.3.8 DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO .....	74
4.3.9 COSTOS DEL PROTOTIPO.....	75
CAPÍTULO V.....	77
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	77
5.1 CONCLUSIONES .....	77
5.2 RECOMENDACIONES .....	78
BIBLIOGRAFÍA .....	79
ANEXO 1 .....	84
ANEXO 2 .....	93
ANEXO 3 .....	110
ANEXO 4 .....	114
ANEXO 5 .....	119
ANEXO 6 .....	120

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Técnicas de la Fisioterapia [22].....	17
Tabla 2: Tipo de estudio para determinar la discapacidad [23]. ....	18
Tabla 3: Métodos de diagnósticos [24].....	19
Tabla 4. Informacion de medidas .....	37
Tabla 5. Comparación características de placas de HL [46].....	50
Tabla 6. Comparación características servomotor [52] [53] [54]. ....	53
Tabla 7. Comparación características pantalla touch [58] [59].....	56
Tabla 8. Costos del prototipo. ....	76

## ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1: Anatomía de la mano [14].....	7
Fig. 2: Huesos de la mano [16]. ....	9
Fig. 3: Músculos extrínsecos [14]. ....	9
Fig. 4: Huesos de la mano derecha [20]. ....	13
Fig. 5: Flexión y Extensión Metacarpofalángica [21]. ....	14
Fig. 6: Flexión y Extensión Interfalángica Proximal [21]. ....	15
Fig. 7 Flexión y Extensión Interfalángica Distal [21].....	15
Fig. 8: Abducción (A) y aducción (B) de los dedos [21].....	16
Fig. 9: Secuencia servomotor [35]. ....	24
Fig. 10 Estructura de una pantalla TFT y la interacción de la luz con las partículas de cristal líquido [38]. ....	25
Fig. 11. Diagrama de requerimientos del prototipo .....	31
Fig. 12: Proyeccion anteroposterior de una mano normal [39]. ....	32
Fig 13. Esquema del aparato extensor de los dedos [39].....	33
Fig 14. Esquema del aparato flexor de los dedos [39].....	34
Fig 15: Inervación sensitiva de los troncos nerviosos de la mano [39].....	35
Fig. 16: Distribución sensitiva de las raices nerviosas cervicales de la mano [39]. ....	35
Fig. 17: Lesión del aparato extensor de los dedos [39].....	36
Fig. 18: Mano con sus medidas .....	37
Fig. 19: Modelado 3D del campo de trabajo de los dedos [40]. ....	38
Fig 20: Plano sagital de movimiento [41]. ....	39
Fig 21: Curvas de extensión de los falanges [41]. ....	39
Fig 22: Curvas de extensión de los falanges [41]. ....	40
Fig. 23: Representación cinemática para el movimiento de los dedos [42]. ....	41
Fig. 24: Curvas del parámetro x [16].....	46
Fig 25: Curva de extencion de las articulaciones .....	46
Fig. 26: Ejes de movimiento para los dedos .....	47
Fig. 27: Base del mecanismo para el movimiento .....	47

Fig. 28: Estructura Arduino IDE [51].....	52
Fig. 29: Module uLCD-28PTU [56].....	54
Fig. 30: Diagrama de bloque de la ILI9341 [57] .....	55
Fig. 31: Componentes interfaz principal [61].....	57
Fig. 32: Página principal CAD SolidWorks [62].....	58
Fig. 33: Esquema de la base de la mano para impresión realizada en SolidWorks para el prototipo de prueba 1 MDF.....	59
Fig. 34: Prototipo realizado en MDF.....	59
Fig. 35 : Prototipo realizado en acrílico .....	60
Fig. 36: Parámetros para la elaboración de los engranajes. ....	60
Fig. 37: Datos de los parámetros para la elaboración de los engranajes. ....	63
Fig. 38: Diseño del engranaje para la impresión en 3D, el cual permite realizar el movimiento del prototipo conjuntamente con los servos.....	64
Fig. 39: Diseño de los dientes que soportan el movimiento de los engranajes. ....	64
Fig. 40: Diseño y dimensiones del guarda cables realizado en SolidWorks .....	65
Fig. 41: Diseño de la estructura para la muñeca .....	65
Fig. 42: Diseño de la estructura que da soporte a los engranajes simultáneamente con los dedos.....	66
Fig. 43: Diseño de la tapa sujetadora de la pantalla.....	66
Fig. 44: Prótesis de los 4 dedos .....	67
Fig. 45: Simulación del mecanismo en estado de flexion.....	68
Fig. 46: Simulación del mecanismo en estado de tracción. ....	68
Fig. 47: Simulación de la estructura para las falanges medio y proximal. ....	69
Fig. 48: Simulación de la estructura para las falanges distal. ....	69
Fig. 49: Montaje total del mecanismo de la prótesis .....	71
Fig. 50: Impresión de los dedos .....	72
Fig. 51: Diagrama del circuito implementado .....	73
Fig. 52: Diagrama de flujo del proceso .....	74
Fig. 53: Mano extendida correspondiente al paciente 1.....	84

Fig. 54: Mano flexionada correspondiente al paciente 1 .....	85
Fig. 55: Mano flexionada correspondiente al paciente 2 .....	86
Fig. 56: Mano extendida correspondiente al paciente 2.....	86
Fig. 57: Mano flexionada correspondiente al paciente 3 .....	87
Fig. 58: Mano extendida correspondiente al paciente 3.....	88
Fig. 59: Mano extendida correspondiente al paciente 4.....	89
Fig. 60: Mano flexionada correspondiente al paciente 4 .....	89
Fig. 61: Mano flexionada correspondiente al paciente 5 .....	90
Fig. 62: Mano extendida correspondiente al paciente 5.....	91
Fig. 63: Mano flexionada correspondiente al paciente 6 .....	92
Fig. 64: Mano extendida correspondiente al paciente 6.....	92
Fig. 65: Montaje final de la prototesis.....	110
Fig. 66: Mensaje de bienvenida.....	111
Fig. 67: Pantalla principal .....	111
Fig. 68: Interfaz opcion tiempo .....	112
Fig. 69: Interfaz grafica opcion ciclo .....	113
Fig. 70: Interfaz grafica sobre informacion de la pròtesis .....	113
Fig. 71: Placa de control Arduino UNO colocada dentro del prototipo.....	114
Fig. 72: Pantalla HMI Nextion.....	114
Fig. 73: Estructura de los dedos ensamblada.....	115
Fig. 74: Mecanismo de movimiento.....	115
Fig. 75: Estructura de los dedos junto con el mecanismo de movimiento. ....	116
Fig. 76: Soporte para la colocacion del antebrazo.....	116
Fig. 77: Puertos de alimentacion.....	117
Fig. 78: Boton de encendido y apagado.....	117
Fig. 78: Protesis Armada.....	118
Fig. 80: Protesis fianal.....	118

## **RESUMEN**

Las lesiones que presenta las manos pueden ser causadas por diferentes patologías como golpes, fracturas o enfermedades que atacan al sistema, estas patologías presentadas necesitan ser tratadas y rehabilitadas, por lo que se procede a realizar un sistema electrónico de rehabilitación de manos que ayude a mejorar el proceso de rehabilitación de los pacientes que la padezcan.

En la investigación se presenta el diseño, construcción y funcionamiento de una prótesis robótica, que está encaminada a mejorar la calidad de vida de las personas que padecen fracturas de mano, dedos, parálisis del nervio radial, artrosis de manos, entre otros, el uso del prototipo mejora el proceso de rehabilitación ya que ayuda a corregir diferentes lesiones que se pueden producir en las manos. El prototipo se compone de dos partes fundamentales, la primera parte es un mecanismo la cual permite la flexión de los dedos y articulaciones de las partes afectadas, la segunda parte es de funcionalidad ya que al ser utilizado permite la recuperación pronta de las lesiones, el prototipo está construido por medio de la impresión 3D, ya que al diseñarla nos permite una adaptación ergonómica según las necesidades del usuario.

Palabras claves: Prótesis articulada, Telemedicina, Rehabilitación de mano, Impresión 3D

## **ABSTRACT**

The injuries that the hands present can be caused by different pathologies such as blows, fractures or diseases that attack the system, these presented pathologies need to be treated and rehabilitated, so we proceed to perform an electronic hand rehabilitation system that helps to improve the process of rehabilitation of patients suffering from it.

The research presents the design, construction and operation of a robotic prosthesis, which is aimed at improving the quality of life of people suffering from hand fractures, fingers, radial nerve paralysis, hand osteoarthritis, among others, the use The prototype improves the rehabilitation process as it helps correct different injuries that can occur in the hands. The prototype is composed of two fundamental parts, the first part is a mechanism which allows the flexion of the fingers and joints of the affected parts, the second part is of functionality since being used allows the early recovery of the lesions, the prototype is built by means of 3D printing, since when designed it allows us an ergonomic adaptation according to the user's needs.

**Keywords:** Articulated Prosthesis, Telemedicine, Hand Rehabilitation, 3D Printing

## INTRODUCCIÓN

En el presente documento se detalla las etapas de diseño y construcción para el desarrollo de la investigación bajo el tema “Sistema Electrónico para la Rehabilitación de Mano”, la cual está controlada por dos servomotores que realizan el movimiento de flexión y extensión de los dedos, ubicados en la parte superior del prototipo, acompañado de una pantalla LCD touch la cual permite una fácil interacción con el usuario para el control manual o automático del funcionamiento de trabajo, todo esto controlado por medio de una placa de control, se ha tomado en cuenta estos modos de operación del prototipo debido a que los pacientes no presentan las mismas lesiones.

En el primer capítulo se detallan los problemas que producen las lesiones de mano y su impacto en las personas que padecen de dichas lesiones, mismas que necesitan ser rehabilitadas, estableciendo los objetivos para el desarrollo del proyecto de investigación.

El segundo capítulo detalla los antecedentes investigativos que fundamentaron la propuesta de diseño del prototipo realizado y la fundamentación teórica que sirvió como sustento para la elaboración de las actividades que debe cumplir el prototipo, basadas según las necesidades de los pacientes.

Dentro del tercer capítulo se hace alusión a las investigaciones aplicadas, los medios por los cuales se recolecto la información tanto físicos como digitales y las actividades que se realizaron para dar cumplimiento a los objetivos planteados.

El cuarto capítulo contiene las etapas del sistema de control, en las que se detalla el tipo de diseño y la construcción que se desarrolló para dar cumplimiento a la propuesta establecida con anterioridad.

Finalmente, en el capítulo cinco se muestra las conclusiones y recomendaciones obtenidas durante el proceso de diseño, elaboración, construcción y pruebas de funcionamiento del proyecto realizado.

## **CAPÍTULO I**

### **EL PROBLEMA**

#### **1.1 TEMA DE INVESTIGACIÓN**

“SISTEMA ELECTRÓNICO PARA LA REHABILITACIÓN DE MANO.”

#### **1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

La calidad de vida según la Organización Mundial de la Salud (OMS) es definida como: "Una forma de percepción de la posición de vida del individuo en el que vive en el contexto cultural, sistema de valores, expectativas y estándares efectivos en su entorno" [1], en nuestro país la calidad de vida está dentro de los objetivos del Plan Nacional de Desarrollo, el cual pretende mejorar el estilo de vida de la población con relación a la vida cotidiana y laboral [2], según el Colegio Americano de Cirujanos el Trauma se define como una lesión física resultante del intercambio de energía sea esta cinética, radiante, química, térmica, eléctrica [3], en el mundo laboral las manos son la parte del cuerpo más vulnerable y expuestas sufriendo mayor cantidad de lesiones, cada año cerca de 100 millones de personas en su mayoría niños sufren de algún tipo de traumatismo o lesión en las mano [4], según la OMS ha definido que este tipo de lesiones forman parte de las principales causas dentro del prematuro ausentismo laboral en el mundo [5].

Según la Agencia Nacional de Tránsito en su Ley Orgánica de Transporte Terrestre, Tránsito y Seguridad Vial establece que América Latina y el Caribe tienen la tasa más alta de mortalidad a causa de traumatismos por accidentes de tránsito, según cifras por cada 100.000 habitantes hay 26 muertes. En este contexto, los accidentes de motocicleta en Ecuador y Latinoamérica causan más lesiones principalmente en las piernas, las caderas, los brazos, las manos y la espalda baja, alguna de estas lesiones puede conllevar a sufrir lesiones de un alto dolor, los accidentes graves pueden causar daño cerebral o paraplejia, parálisis de extremidades inferiores, esto puede conllevar a que las personas que sufren de este tipo de lesiones experimenten problemas psicológicos [6].

En general, las lesiones o traumatismos en las manos no producen un aumento de la mortalidad, pero si produce morbilidad progresiva [2], en este caso con una correcta sesión de terapia y rehabilitación se puede conseguir que la persona padeciente de este trauma pueda volver a realizar sus labores con un alto porcentaje de movilidad, las lesiones o traumatismo en las manos por lo general sucede por medio de un accidente en donde se comprometan dichas extremidades, en este caso puede ser visible o por medio de rayos X según lo crea conveniente el médico, requiere un manejo multidisciplinario por el médico, enfermeras, fisioterapeutas, trabajadores sociales, psicólogos y nutricionistas, donde la gestión en conjunto podría obtener beneficios mejorando la enfermedad y la calidad de vida de los pacientes [7].

### **1.3 DELIMITACIÓN**

#### **1.3.1 DELIMITACIÓN DE CONTENIDO**

- Área académica: Física y Electrónica.
- Línea de investigación: Sistemas de Comunicación.
- Sublínea de investigación: Sistemas Embebidos.

### **1.3.2 DELIMITACIÓN ESPACIAL:**

La presente investigación se desarrolló en el Hospital Municipal “Nuestra Señora de la Merced” de la ciudad de Ambato provincia de Tungurahua.

### **1.3.3 DELIMITACIÓN TEMPORAL:**

La presente investigación se desarrolló en los meses de junio de 2019 a diciembre de 2019 de acuerdo a lo establecido en el Régimen de Graduación para Obtener el Título Terminal de Tercer Nivel de la Universidad Técnica de Ambato, aprobado mediante Resolución 1164-P-CD-FISEI-UTA-2019.

## **1.4 JUSTIFICACIÓN**

Al investigar las principales afectaciones que tienen las personas en su diario vivir, se ha observado que existe un grupo de personas que experimentan algún tipo de lesión en las manos, considerando a esta como una de las causas de limitación en la vida sobre todo en el ámbito laboral, necesitando algún tipo de tratamiento o rehabilitación fisioterapeuta para que pueda llevar una mejor calidad de vida, en base a esta información se ha diseñado un prototipo el cual permite ayudar en la terapia de rehabilitación de manos.

Por medio del diseño y construcción de este prototipo se ayudó en la terapia de lesiones y traumatismo específicamente producidas en las manos, al hacer uso constante de este prototipo, se ha conseguido obtener una recuperación más pronta de la persona padeciente de este tipo de lesión, además que brinda una ayuda a médicos, enfermeras, especialistas y personas de la salud que se encargan de realizar las diferentes terapias para controlar y disminuir los niveles de dolor y aumentar la movilidad de las articulaciones afectadas, consiguiendo de esta manera que las personas que sufren de estas lesiones tengan una mejor calidad de vida.

Con el uso de recursos disponibles en nuestro medio, como son elementos electrónicos, Hardware y Software libre, entre otros, se realizó el diseño y construcción del prototipo, el cual por medio de un sistema electrónico que controla el rango de movimiento de cada uno de los dedos y articulaciones de la mano permitiendo establecer rutinas para la terapia controlando el tiempo y ángulo de movimiento establecidos por el especialista encargado del control de cada paciente según sea su necesidad.

## **1.5 OBJETIVOS**

### **1.5.1 OBJETIVOS GENERAL**

- Diseñar e implementar un sistema electrónico para la rehabilitación de mano.

### **1.5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Analizar los diferentes tipos de tratamiento utilizados en la rehabilitación de manos.
- Determinar las características del sistema electrónico de rehabilitación para el control del movimiento de la mano.
- Diseñar e implementar un prototipo para la rehabilitación de mano.

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1 ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS**

Al realizar una búsqueda de documentos relacionados con la fisioterapia y su aplicación en la rehabilitación de manos se analizó los siguientes casos:

Manuel Alejandro Moran-Castañedo en su artículo científico denominado “Fractura de la mano en terapia física y rehabilitación: conceptos básicos, consejos prácticos y visión general” realizada el 3 de marzo de 2014 señala que, la terapia de manos es un factor clave para la recuperación cuando se ha sufrido algún tipo de lesión, ya que al no ser tratado a tiempo este produce que el tratamiento de rehabilitación de mano no sea el óptimo, la evaluación de los resultados del tratamiento del traumatismo de mano se observan principalmente en la fuerza de agarre y el rango de movimiento de las articulaciones comprometidas [8].

En el artículo “Terapia Ocupacional en la rehabilitación de la mano de pacientes tetraplégicos” realizado el 24 de julio de 2007 por la Terapeuta Ocupacional Susana Morin Casellas indica que la rehabilitación es el proceso por el cual una persona se acopla a una discapacidad dentro de su entorno, además señala que uno de los objetivos de la Terapia Ocupacional es que la persona consiga una independencia dentro de las actividades que realiza [9].

Según el Fisioterapeuta y Terapeuta Ocupacional Héctor García López en su trabajo titulado, “Fisioterapia en la artritis reumatoide” concluye que gracias a la intervención

pronta del tratamiento de fisioterapia se consigue prevenir deformidades en una persona con AR en las manos, retrasando así los posibles efectos que provoca este tipo de patología, para lograr que el tratamiento sea exitoso este debe estar formado por un grupo de especialistas (reumatólogo, cirujano ortopédico, enfermero, fisioterapeuta, terapeuta ocupacional, técnico ortopédico, psicólogo, asistente social) los cuales en colaboración conjunta logran el bienestar físico, psicológico y social de la persona paciente de dicha enfermedad [10].

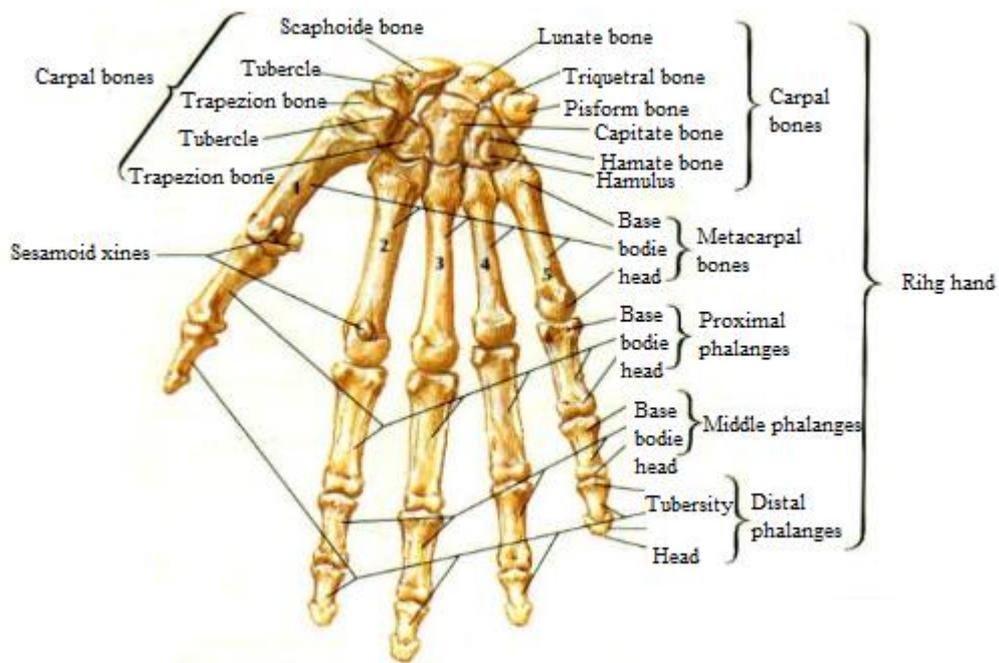
Según Juan Francisco Ayala-Lozano, Guillermo Urriolagoitia-Sosa en su artículo de investigación realizado en marzo de 2015 bajo el tema “Diseño mecánico de un exoesqueleto para rehabilitación de miembro superior”, presentan una máquina diseñada para la rehabilitación de las extremidades superiores (Antebrazo, Brazo, Hombro), utilizando un diseño mecánico logran ejercitar las extremidades superiores basándose en un método de gestión de calidad conocido como QFD este tipo de método consigue reducir los esfuerzo de las extremidades a rehabilitarse, al tratarse de una máquina mecánica y no automatizada esta requiere netamente del esfuerzo del paciente [11].

En el proyecto de investigación realizado por Frank Galan-Cutipa con el tema “Diseño, implementación y control de un exoesqueleto para rehabilitación de extremidades superiores” realizado en la Universidad de Piura en el año 2017, señala la importancia de la rehabilitación permanente en los pacientes, ya que al ser poco frecuente los ejercicios estos no permiten la recuperación total y pronta, al hacer uso del exoesqueleto ayuda a que las personas mantengan una rutina permanente establecida por el terapeuta para una recuperación en los primeros días de las lesiones logrando una recuperación del 80% [12].

## 2.2 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

### 2.2.1 ANATOMÍA DE LA MANO

El esqueleto de los dedos está formado por pequeños huesos largos llamados falanges en número de tres para cada dedo menos el primer dedo que solo tiene dos, la palma de la mano está constituida por cinco huesos largos llamados metacarpianos que se articulan distalmente con las primeras falanges de los dedos y con ocho huesos que constituyen las dos filas del carpo [13]. En la figura 1 se muestra el esqueleto de la mano detallando a cada uno de los huesos que lo conforman tanto de frente como su parte posterior.



**Fig. 1:** Anatomía de la mano [14].

### 2.2.2 LESIÓN DE MANO

Según el Instituto Nacional de Estadística (INE), la segunda parte del cuerpo más afectada en lesiones son las manos, tras una lesión traumática o una intervención

quirúrgica el mayor riesgo para la función de la mano está relacionado con la rigidez articular, las lesiones traumáticas de mano hacen referencia a todo daño ocasionado por un agente externo de forma aguda a la mano [13].

### **2.2.3 RIGIDEZ ARTICULAR**

Se define como la disminución de la capacidad de movimiento que se presentan en diferentes grados y rangos de movimiento ya sean estos en flexión o extensión.

### **2.2.4 HUESOS Y ARTICULACIONES DE LA MANO**

Al revisar la estructura completa de la mano, la cual se muestra en la figura 2, donde se observa que la mano tiene los huesos metacarpianos y las falanges, los dedos índices, medio, anular y meñique se los denomina como trifalángicos ya que están formados por 3 falanges, además que la mano está unida por 8 huesos a la muñeca [15].

Cada una de estas falanges de los dedos está unida por medio de las articulaciones, las cuales permiten que realicen movimientos de flexión y extensión en diferentes posiciones, estas articulaciones se clasifican en [16]:

- Articulación metacarpofalángica (MCF): Encargada de unir los huesos metacarpianos con la falange proximal.
- Articulación interfalángica proximal (PIF): Une las falanges media y proximal.
- Articulación interfalángica distal (DIF): Une las falanges media y distal.



**Fig. 2:** Huesos de la mano [16].

### 2.2.5 MÚSCULOS INTRÍNSECOS Y EXTRÍNSECOS DE LA MANO

Es un pequeño grupo de músculos que están situados en la mano que a pesar de su reducida longitud son muy importantes [16]. En la figura 3 se muestra cada uno del músculo que se encuentra conformando la mano.

- **Músculos Intrínsecos:** Se distribuyen en pequeños grupos en la mano por la cara palmar.
- **Músculos Extrínsecos:** Son los encargados de los movimientos de gran amplitud y potencia de los dedos se encuentran situados en el antebrazo en su tercio superior.



**Fig. 3:** Músculos extrínsecos [14].

## 2.2.6 PATOLOGÍAS

A continuación se enumera las principales patologías óseas, en las articulaciones, en los tendones y neurovasculares [16]:

### 2.2.6.1 ÓSEAS

- **Luxaciones:** Pérdida permanente de contacto en la superficie de una articulación.
- **Fracturas:** Pérdida de continuidad en la estructura de las falanges.
- **Tumores:** Crecimiento anormal de las células en una parte del tejido óseo.
- **Patología infecciosa:** Agentes patógenos en el tejido, la más común es la osteomielitis aguda.
- **Necrosis vascular:** Muerte de las células y tejidos de una zona en particular.

### 2.2.6.2 EN LAS ARTICULACIONES

- **Artrosis:** Alteración degenerativa de las articulaciones.
- **Artropatía inflamatoria:** Enfermedad inflamatoria de las articulaciones que puede provocar deformaciones o destrucción.

### 2.2.6.3 EN LOS TENDONES

- **Tenosinovitis flexora:** Inflamación de los tendones flexores de la mano.
- **Tenosinovitis estenosante:** Inflamación de la polea ubicada en la articulación MCP, conocida también como dedo en resorte.
- **Dedo en Martillo:** Rotura del tendón extensor.
- **Gangliones:** Tumores que se presentan en los tendones.

#### **2.2.6.4 NEUROVASCULARES**

- **Síndrome del Túnel del Carpo:** Producida por la compresión del nervio mediano cuando pasa por el túnel del carpo, afectando los 4 primeros dedos de la mano.
- **Síndrome del Canal de Guyon:** Patología que afecta el anular y meñique, producido por la compresión del nervio cubital cuando pasa por el canal de Guyon.

#### **2.2.6.5 PATOLOGÍAS DE LOS DEDOS DE LA MANO**

Este tipo de patologías de mano puede ser de carácter neurológico, traumatológico o reumatológico, a continuación, se presentan las patologías más comunes que pueden afectar a los dedos de la mano [17].

#### **2.2.7 MANO TRAUMÁTICA**

Al hablar de mano traumática esta consta de [4]:

- Fracturas de la mano.
- Luxaciones de las articulaciones de la mano
- Esguinces de las articulaciones de la mano.
- Lesiones de partes blandas. Piel, músculos ligamentos, articulaciones.
- Lesiones tendinosas
- Quemaduras de la mano
- Lesiones por aplastamiento
- Afecciones Post traumáticas no agudas

##### **2.2.7.1 REHABILITACIÓN DE MANO**

La rehabilitación de la mano se considera como prioridad e indispensable ya que de esta depende que pueda realizar actividades sin ningún tipo de discapacidad.

### **2.2.7.2 OBJETIVOS DE LA REHABILITACIÓN**

Los principales objetivos que tiene la rehabilitación son [18]:

- Reducir o controlar el edema.
- Mantener o aumentar el movimiento.
- Mantener o aumentar la función.
- Mantener o aumentar la sensibilidad.
- Controlar o disminuir el dolor.
- Reducir la incapacidad aumentando la independencia.
- Mantener o mejorar las habilidades físicas de la vida diaria
- Retornar al trabajo.
- Conseguir el máximo nivel de funcionalidad.

### **2.2.8 TRATAMIENTO DE FISIOTERAPIA**

Antes de realizar el tratamiento se debe llevar a cabo una valoración del paciente en donde se observará lo siguiente [19]:

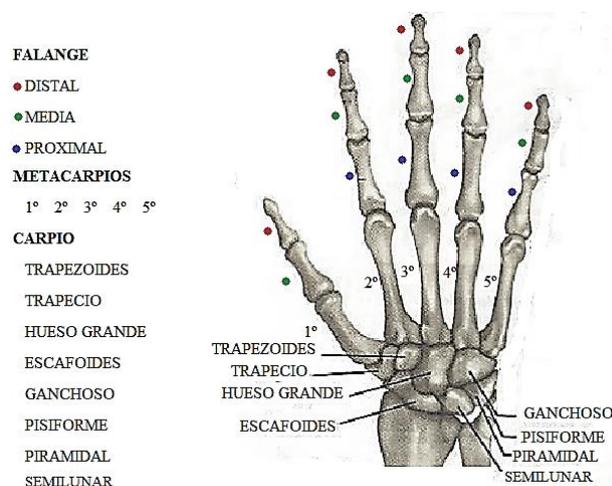
- Estado de la piel
- Problema en articulares.
- Recorrido articular.
- Déficit neurológicos y musculares.
- Deformidades.
- Función de la mano.
- Valoración funcional de la mano.
- Valoración funcional de las extremidades superiores e inferiores.
- Nivel de dependencia o independencia en las actividades.
- Interacciones sociales.
- Estado de ánimo y motivación.

## 2.2.9 BIOMECÁNICA DE LA MANO

En la disposición anatómica de la mano esta permite analizar la versatilidad en la manipulación de los objetos y ajustes de posición de acuerdo a las necesidades [20]. Véase la figura 4 en donde se puede considerar a cada uno de los huesos: falanges, metacarpos y carpos, los cuales conforman los dedos y la muñeca formando la estructura de la mano

La mano está formada por:

- 8 huesos cortos que en conjunto forman el Carpo, estos se hallan colocados en dos hileras superpuestas, una fila proximal constituida por escafoides, semilunar, piramidal y pisiforme. Estos pequeños huesos forman la región que une el antebrazo con la mano
- 5 huesos largos que forman el Metacarpo, ubicados entre las falanges proximales y los del carpo, estos forman la palma de la mano y sus caras laterales sirven de inserción a los músculos interóseos.
- 14 huesos largos que se conoce como Falanges, estos forman el esqueleto de los dedos siendo 2 para el pulgar y 3 para los cuatro dedos restantes, se denominan distal, media y proximal.



**Fig. 4:** Huesos de la mano derecha [20].

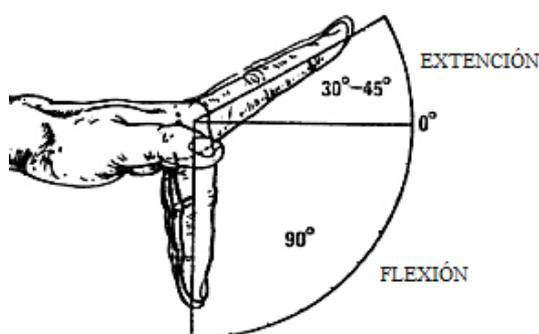
## 2.2.10 ARCOS Y ÁNGULOS DE MOVIMIENTO DE LOS DEDOS DE LA MANO

El dedo pulgar formado por el metacarpiano y 2 falanges tiene un mayor grado de movimiento a comparación de los demás dedos, el posicionamiento y la actividad del pulgar están bajo la influencia de 4 músculos intrínsecos y 4 músculos extrínsecos. El dedo índice formado por las 3 falanges tiene una movilidad relativa cuando la articulación se encuentra en extensión comparados con el tercer, cuarto y quinto dedo, esta consta de 3 músculos intrínsecos y 4 músculos extrínsecos que determinan su movilidad. Dedos medio, anular y meñique esta unidad se comporta como una prensa estabilizadora para sujetar objetos en la manipulación del pulgar y del dedo índice, tiene aproximadamente un movimiento de 30°(grados) en flexión y extensión [20].

## 2.2.11 FLEXIÓN – EXTENSIÓN

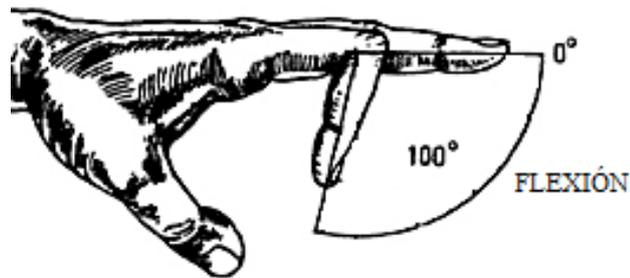
La mano tiene varias formas de movimiento en donde intervienen las articulaciones falángicas entre ellas y con los metacarpos [21].

**2.2.11.1 Metacarpofalángica:** Están ubicadas entre las cabezas convexas de los metacarpianos y las fosillas articulares de la base de las falanges proximales, forma un arco de movimiento de 120° a 135° los cuales 90° son para la flexión y 30° a 45° para la extensión como se muestra en la figura 5.



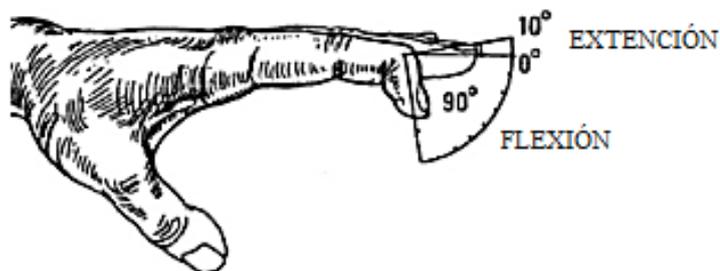
**Fig. 5:** Flexión y Extensión Metacarpofalángica [21].

**2.2.11.2 Interfalángica Proximal:** El radio se mueve alrededor del cubito aumentando las dimensiones de la epífisis distal, forma un arco de movimiento de  $100^\circ$  solo para la flexión, no dispone de movimiento de extensión en esta articulación, como se muestra en la figura 6.



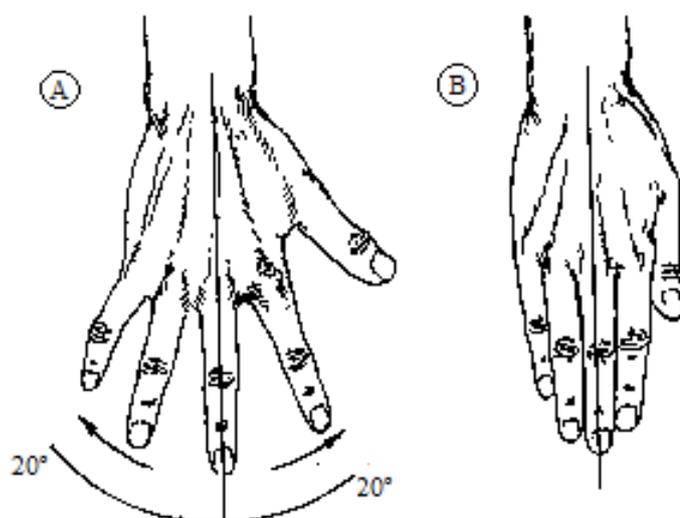
**Fig. 6:** Flexión y Extensión Interfalángica Proximal [21].

**2.2.11.3 Interfalángica Distal:** Constituida por la cara distal de la primera fila del hueso carpo formando la cabeza articular de los dedos, como se muestra en la figura 7, forma un arco de movimiento de  $90^\circ$  a  $100^\circ$ , los cuales  $90^\circ$  son de extensión y  $0^\circ$  a  $10^\circ$  para extensión.



**Fig. 7** Flexión y Extensión Interfalángica Distal [21].

**2.2.11.4 Abducción – Aducción de los dedos:** La figura 8 muestra el movimiento que forman los dedos al justarse o separarse entre sí, formando un ángulo de  $20^\circ$  en abducción y  $0^\circ$  (dedos juntos) en aducción.



**Fig. 8:** Abducción (A) y aducción (B) de los dedos [21].

### 2.2.12 TRATAMIENTO

Para las intervenciones no farmacológicas se toma en cuenta los tratamientos como:

- Comunicación y Educación
- Enfermería especializada
- Fisioterapias

En el tratamiento de la fisioterapia el objetivo es reducir el dolor y la rigidez provocados por enfermedades que limitan la actividad física, en la tabla 1 se indican los tipos más comunes de fisioterapia que se aplica a los pacientes con lesiones, con este tipo de terapia se logra prevenir las deformaciones y mejorar la calidad de vida de las personas.

### 2.2.12.1 FISIOTERAPIA

**Tabla 1:** Técnicas de la Fisioterapia [22].

FISIOTERAPIA	
Hidroterapia Fisioterapia acuática	Actividades aeróbicas Ejercicios de flexibilidad y de fortalecimiento muscular Ejercicios de estabilidad, rehabilitación del balance, promoción de un estilo de vida de actividad física.
Educación del paciente	Estrategias de protección articular, conservación de energía, manejo de la fatiga, manejo de recaídas, estrategias de alivio del dolor, ejercicios de relajación, otros.
Termoterapia	Compresas frías/calientes, baños de parafina, rayos infrarrojos. Microondas, onda corta, ultrasonido.
Electroterapia	Uso de TENS (Transcutaneous Electrical Nerve Stimulation), ultrasonido, pulsos de energía electromagnética (PEME), terapia interferencial (IFT) y aplicaciones Laser.
Provisión y educación de herramientas de asistencia	Férulas, ortosis, plantillas.
Terapia manual	Movilización, manipulación, liberación miofascial, terapia de puntos disparadores de dolor, acupuntura, masaje, tracción manual, estiramiento

### 2.2.12.2 ELECTROTERAPIA

La electroterapia es la aplicación de corrientes eléctricas a baja frecuencia, se utiliza con frecuencia en la rehabilitación física de los pacientes con lesiones para el alivio del dolor.

### 2.2.13 DETERMINACIÓN DEL DAÑO Y DISCAPACIDAD

A continuación, se detalla el tipo de estudio que se realiza para la determinación del daño y discapacidad.

**Tabla 2:** Tipo de estudio para determinar la discapacidad [23].

TIPO	DESCRIPCIÓN
<b>Estudio anatómico</b>	Inflamación de tejidos blandos. Leve disminución espacio articular, quistes subcondrales. Erosiones marginales, deformaciones articulares. Anquilosis fibrosa u ósea.
<b>Clase funcional</b>	Realiza actividades laborales y recreacionales. Realiza actividades laborales pero limitadas en actividades recreacionales. Limitado para actividades laborales y recreacionales. Limitado en actividades laborales, recreacionales y de cuidado personal
<b>Evaluación de capacidad funcional</b>	Utilización del HAQ como instrumento de evaluación de la capacidad funcional Analizando las tareas de: vestirse y asearse, levantarse, comer, caminar y pasear, higiene personal, hacer prehensión y otras actividades.
<b>Capacidad laboral</b>	Un tercio de las personas que padecen de esta enfermedad pierden su trabajo durante el primer año.
<b>Aspectos psicológicos y sociales</b>	Al inicio de la enfermedad los síntomas de depresión o ansiedad son frecuentes. Tienen un mejor pronóstico los pacientes que reciben un notable apoyo social de familiares y amigos.

### 2.2.14 MÉTODOS DE DIAGNÓSTICO

En la tabla 3 se indica los principales métodos que se utilizan para el diagnóstico de personas que padecen de lesiones o traumatismos.

**Tabla 3:** Métodos de diagnósticos [24].

TIPO	DESCRIPCIÓN
<b>Radiografía</b>	Se recomienda realizar radiografías de manos, pies y tórax en la evaluación inicial.
<b>Ecografía</b>	La ecografía permite evaluar sinovitis y detectar erosiones de forma temprana en el diagnóstico de AR.
<b>La resonancia magnética (RM)</b>	La RM identifica sinovitis, tenosinovitis, erosiones óseas y edema óseo en el diagnóstico de AR.
<b>Laboratorio</b>	Se usan pruebas generales, inmunológicas (factor reumatoide, anticuerpos citrulinados cíclicos).

### **2.2.15 INGENIERÍA EN LA REHABILITACIÓN**

Esta data desde la II guerra mundial, según James Reswick uno de los pioneros en la rehabilitación con uso de la ingeniería define que es un campo en el cual se aplica la ciencia y la tecnología para disminuir las limitaciones de individuos con discapacidades. En esta rama de la ingeniería se realiza el diseño y elaboración de instrumentos que tienen como propósito el posibilitar a la persona con discapacidad motora [25]. Fue entonces donde nace la ingeniería como rehabilitación para el ser humano, por medio de máquinas y prótesis que ayudan a mejorar la calidad de vida.

### **2.2.16 ROBÓTICA DE REHABILITACIÓN**

La robótica ha sido definida como la aplicación de dispositivos con sistemas electrónicos o computarizados diseñados para realizar funciones humanas, en esta parte de la ingeniería involucra el uso de robots como ayuda en la terapia (robot terapéutico) en lugar de únicamente como dispositivos de asistencia, estos son dispositivos no invasivos, de fácil control, con poco riesgo para el paciente, y con

buena efectividad para el tratamiento y rehabilitación, un robot terapéutico es un sistema que detecta los movimientos del usuario, utiliza esta información para ajustar parámetros y provee retroalimentación visual y sensitiva, las investigaciones respecto al uso y beneficio de este tipo de terapia han aumentado con el paso de los años y según el desarrollo de dispositivos [26].

### **2.2.17 TECNOLOGÍA EN LA REHABILITACIÓN**

Esta se puede definir como un conjunto de procesos y conocimientos desarrollados a través de los avances en la ingeniería, rehabilitación y las demás especialidades que forman parte del estudio para la rehabilitación de lesiones, la tecnología en la rehabilitación no solo estudia lo relacionado con el desarrollo y producción de equipos, instrumentos o dispositivos que ayuden en el proceso de rehabilitación, sino además se interesa por el impacto que estos dispositivos tienen en el desarrollo de la rehabilitación tanto en el desempeño y la capacidad funcional tomando al ser humano como un emisor de información en respuesta al uso de la tecnología [27].

### **2.2.18 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO**

En este proceso se definen los elementos que conforman la elaboración del prototipo tomando en cuenta la fuerza y movimiento necesarios para el funcionamiento, determinando así el tamaño y el tipo de material para cada elemento y su elaboración, por medio del cálculo cinemático de determina la posición de los elementos para la ejecución de las articulaciones tomando un sistema de referencia fijo [28].

### **SOFTWARE LIBRE**

Se considera como software libre al software que viene acompañado de su código fuente, de forma que el usuario pueda adaptarlo según sean sus necesidades [29].

El software libre es considerado como el tipo de software que respeta la libertad de los usuarios sobre su producto adquirido, según la Free Software Foundation (FSF) determina que el Software libre es cuando el usuario tiene la libertad para modificar, copiar, distribuir un software sin que ninguna compañía o individuo pueda emprender acciones legales contra él [30].

Para que se considere a un software como software libre, este debe cumplir la regla llamada “las cuatro libertades” [29]:

1. Ejecutar el programa, para cualquier propósito.
2. Estudiar el funcionamiento del programa, y adaptarlo a sus necesidades.
3. Redistribuir copias.
4. Mejorar el programa, y poner sus mejoras a disposición del público, para beneficio de toda la comunidad.

## **HARDWARE LIBRE**

Según Rey Martínez en su artículo “El Conocimiento: Su naturaleza y principales herramientas para su gestión” define que el conocimiento es la facultad que tienen los seres humanos para comprender la naturaleza que les rodea [31].

Principalmente basa su filosofía en el concepto de software libre ampliando el espectro de su uso a los dispositivos físico como son sensores, actuadores y elementos de control [32], de esta manera el Hardware Libre (HL) es el diseño que está a disposición del público de tal manera que cualquier persona puede estudiar, modificar, distribuir y vender el diseño del hardware, el HL utiliza elementos y materiales disponibles y estandarizados, con el contenido y la infraestructura abierta, de esta manera garantiza que las personas que utilizan el HL puedan controlar la tecnología mientras que comparten el conocimiento de los diseños [33].

## **ENTORNO DE DESARROLLO INTEGRADO (IDE)**

Un IDE (integrated development environment) es un programa informático que está conformado por un conjunto de herramientas de programación, que puede ser exclusiva o para varios lenguajes de programación, un IDE es un entorno de programación empaquetado como un programa de aplicación que consiste en [34]:

- Editor de código o texto
- Compilador
- Depurador
- Intérprete
- Interfaz gráfica (GUI)

### **Editor de código o texto**

Un editor de código/texto permite crear y modificar archivos digitales compuestos únicamente por texto sin formato, conocidos como archivos de texto o texto plano, el programa lee el archivo e interpreta los bytes leídos según el código de caracteres que usa el editor, estos pueden ser de 7 u 8 bits en ASCII o UTF-8 y rara vez EBCDIC [34].

### **Compilador**

Es un programa informático que su principal función es de traducir el código fuente de un programa en lenguaje de alto nivel a otro lenguaje de programación de nivel inferior, de tal manera que genera un programa que la máquina será capaz de interpretar, por lo general el lenguaje de nivel inferior es lenguaje de máquina, pero puede ser simplemente texto, de esta manera un programador puede diseñar un programa en un lenguaje mucho más cercano a cómo piensa un ser humano y luego compilarlo a un programa más manejable por una computadora, el proceso de traducción se le conoce como compilación [34].

## **Interprete**

Un Intérprete o interpretador es un programa informático con capacidad de analizar y ejecutar otros programas escritos en un lenguaje de alto nivel, la diferencia de los intérpretes con los compiladores es que los intérpretes solo realizan la traducción a medida que sea necesario, típicamente instrucción por instrucción y normalmente no guardan el resultado de dicha traducción [34].

## **Depurador**

Un depurador o debugger, es un programa que permite depurar o limpiar los errores de otro programa informático [34].

## **GUI**

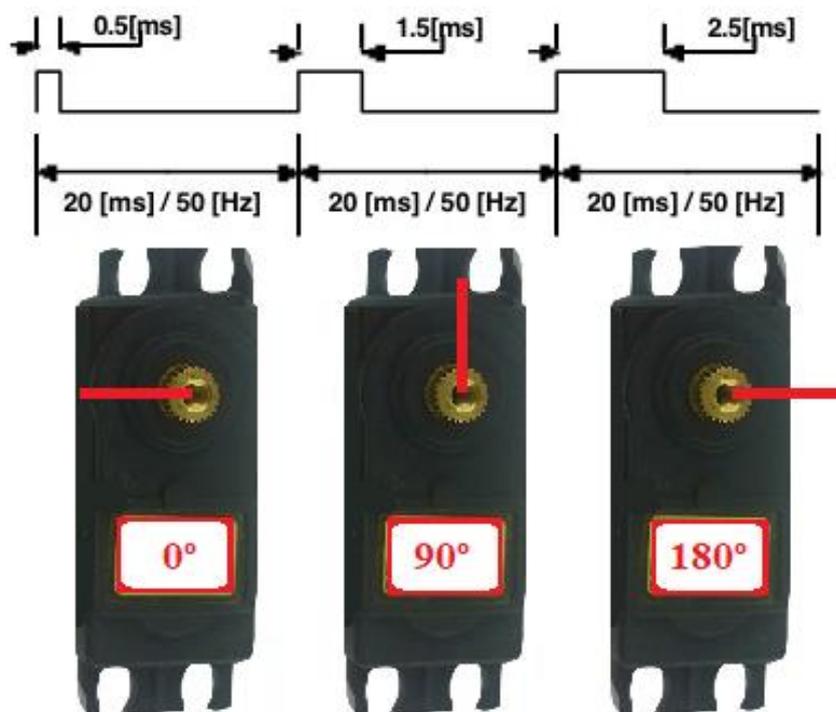
La interfaz gráfica de usuario conocida como GUI (Graphical User Interface) es un programa informático que actúa de interfaz de usuario, al hacer uso de imágenes y objetos gráficos representa la información y acciones disponibles en la interfaz, su principal uso consiste en proporcionar un entorno visual sencillo para permitir la comunicación con el sistema operativo de una maquina o computador [34].

## **SERVOMOTOR**

El servomotor es un dispositivo electromecánico de corriente continua, tiene una capacidad de ubicarse en cualquier posición dentro de un rango de operación generalmente de 180° pero puede ser modificado para tener un giro libre de 360° para ajustarse según sean las necesidades, consiste en un motor eléctrico, un juego de engranes y una tarjeta de control, todo dentro de una carcasa de plástico.

Para su funcionamiento requiere de una alimentación de 5vcc, los servos se suelen utilizar en robótica, automática y modelismo (vehículos por radio-control, RC) debido a su gran precisión en el posicionamiento, los servomotores funcionan por medio de la modulación de ancho de pulso (PWM), la frecuencia usada para mandar la secuencia es de 50Hz eso significa que cada ciclo dura 20ms [35].

A continuación, en la figura 9 se muestran las dimensiones de cada una de las partes principales del servomotor que se tomara en cuenta más adelante para la fabricación del prototipo.



**Fig. 9:** Secuencia servomotor [35].

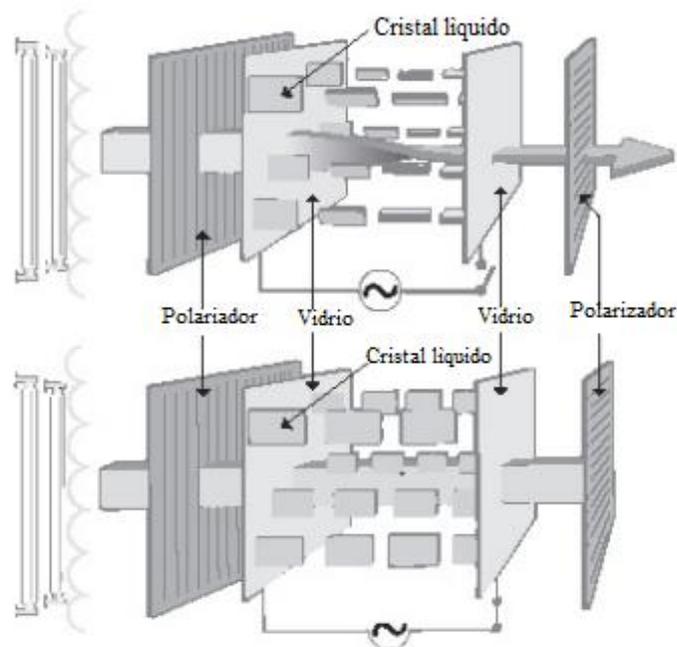
## PANTALLA TÁCTIL

Es un periférico de entrada y salida configurada para visualizar los datos para el dispositivo en el que está instalada, principalmente funciona como un intermediario entre las ordenes (usuario) y la acción que debe realizar [36].

## Pantalla TFT LCD

Es la unión de la electrónica (tft) y la química y cristalografía (LCD), con la aparición de los paneles TFT-LCD se ha revolucionado el desarrollo de las llamadas tecnologías de la información y comunicación permitiendo dar paso a la elaboración de dispositivos como los ordenadores portátiles, teléfonos móviles, PDAs y toda una serie de la llamada tecnología de bolsillo [37].

Las pantallas TFT pueden estar formadas por uno o más tubos de neón los cuales conforman la luz posterior que se encarga de iluminar toda la pantalla, este tipo de pantallas está construida por pequeñas celdas formando así los llamados pixeles, en cada una de estas celdas contiene dos polarizadores de tal forma que su dirección de polarización es perpendicular, entre estos se ubican dos capas de vidrio, llamadas substrato que en estas se encuentra el cristal líquido, cuando se aplica un voltaje los cristales se orientan en el espacio y modifican el plano de oscilación de la luz, de esta manera cada celda permite dejar pasar la luz o bloquearla, de esta manera genera la imagen visible [38].



**Fig. 10** Estructura de una pantalla TFT y la interacción de la luz con las partículas de cristal líquido [38].

### **2.3 PROPUESTA DE SOLUCIÓN**

El diseño del prototipo de un sistema electrónico aplicado a la rehabilitación de la mano facilita la terapia de rehabilitación y recuperación de pacientes que han sufrido algún tipo de lesión, con llevando a mejorar la calidad de vida, salud y presentando un ahorro económico ya que al utilizar el prototipo por si mismos (bajo el criterio de un especialista) no visitan periódicamente el centro de salud para una rehabilitación constante, si no que por medio de la rutina establecida previamente estos pueden tener solo una cita de control según sea la disposición del médico.

Además, con el uso constante del prototipo se consigue reducir el tiempo de recuperación, logrando así que el paciente observara de una forma más rápida y efectiva la rehabilitación de las lesiones.

## **CAPITULO III**

### **METODOLOGÍA**

#### **3.1 MODALIDAD DE LA INVESTIGACIÓN**

Esta investigación se la realizó en base de artículos científicos e investigaciones relacionadas al tema propuesto, las cuales aportaron la información necesaria para el desarrollo del proyecto.

Referente a la investigación bibliográfica, esta ayudó para el diseño del prototipo planteado, ya que, al analizar la base teórica de los métodos principales en la rehabilitación de lesiones en las manos, este prototipo ayuda con dicha rehabilitación, consiguiendo así reducir el tiempo de sesiones con el especialista, duración de la rehabilitación con el personal encargado de brindar dicho servicio, además de que el especialista tenga un mejor control del paciente, gracias a la utilización del prototipo.

En la investigación aplicada se utilizó los conocimientos adquiridos durante la carrera para el diseño, construcción y control del sistema electrónico aplicado para la rehabilitación de manos.

La investigación de tipo campo permitió obtener información de la funcionalidad del proyecto aplicado en los pacientes, obteniendo datos los cuales sirvieron para el diseño y corrección del prototipo y de esta manera cumplir con los objetivos establecidos.

#### **3.2 RECOLECCIÓN DE LA INFORMACIÓN**

Para el desarrollo del proyecto fueron recolectados los datos por medio de técnicas de investigación documental, como artículos científicos, paper y tesis relacionadas con el tema de investigación, tanto físicos como digitales con el fin de obtener la información

requerida para el sustento teórico, además para la adquisición de datos del rango de movimiento del prototipo se utilizó la escala de dolor de cada paciente y la limitación que presentan.

### **3.3 PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS**

Una vez que se obtuvo la información necesaria para el desarrollo del proyecto de investigación, se procedió con el análisis de los datos obtenidos de tal forma que contribuya con el óptimo desarrollo de la siguiente manera:

- Eficiencia de los componentes utilizados en el diseño del proyecto de investigación.
- Pruebas de funcionamiento del prototipo.
- Verificación de la información obtenida sobre el ángulo de movimiento de las articulaciones de los dedos de la mano durante el uso del prototipo.
- Interpretación de los resultados obtenidos durante el uso del prototipo en pacientes mediante el criterio del especialista.

### **3.4 DESARROLLO DEL PROYECTO**

A continuación, se presentan las actividades que se realizaron para el desarrollo del proyecto de investigación:

- Análisis de los tratamientos utilizados en la fisioterapia para la rehabilitación de lesiones en las manos.
- Descripción del tipo de movimiento realizado por las articulaciones en los dedos de la mano.
- Descripción de la fuerza necesaria aplicada sobre las articulaciones de la mano para su movimiento.
- Diseño de la estructura para ejercer el movimiento de los dedos.

- Análisis de los requerimientos técnicos del prototipo electrónico utilizado en la rehabilitación.
- Simulación de los componentes del prototipo.
- Construcción del prototipo diseñado para la rehabilitación de las manos.
- Corrección y ajuste del prototipo en base a los datos obtenidos durante las pruebas.
- Establecer rutinas de rehabilitación bajo el criterio del especialista.
- Pruebas de funcionamiento con los pacientes bajo observación del especialista encargado.
- Análisis y tabulación de datos obtenidos durante las pruebas de funcionamiento.

## **CAPÍTULO IV**

### **DESARROLLO DE LA PROPUESTA**

#### **4.1 INTRODUCCIÓN**

Para el desarrollo del proyecto se analiza el avance que la robótica ha tenido en la parte de la medicina en el área de rehabilitación, con la orientación del médico especialista en fisioterapia para determinar las características que debe tener el prototipo. Bajo este sustento se propone realizar un sistema electrónico para la rehabilitación de mano, por medio del uso de elementos electrónicos disponibles en el mercado y de bajo costo.

El prototipo en la parte técnica realiza movimientos alternados de flexión y extensión con los dedos de la mano, mediante el sistema electrónico se puede controlar el tiempo de trabajo, así también el número de movimientos que se realiza como ejercicios de rehabilitación.

#### **4.2 ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD**

##### **Factibilidad Técnica**

El proyecto de investigación es factible ya que al hacer uso de componentes disponibles en nuestro medio se llevó a cabo el diseño y construcción del prototipo para la rehabilitación de mano.

##### **Factibilidad Económica**

El presente proyecto fue económicamente factible debido a que el financiamiento de la investigación se solventó con los recursos del investigador.

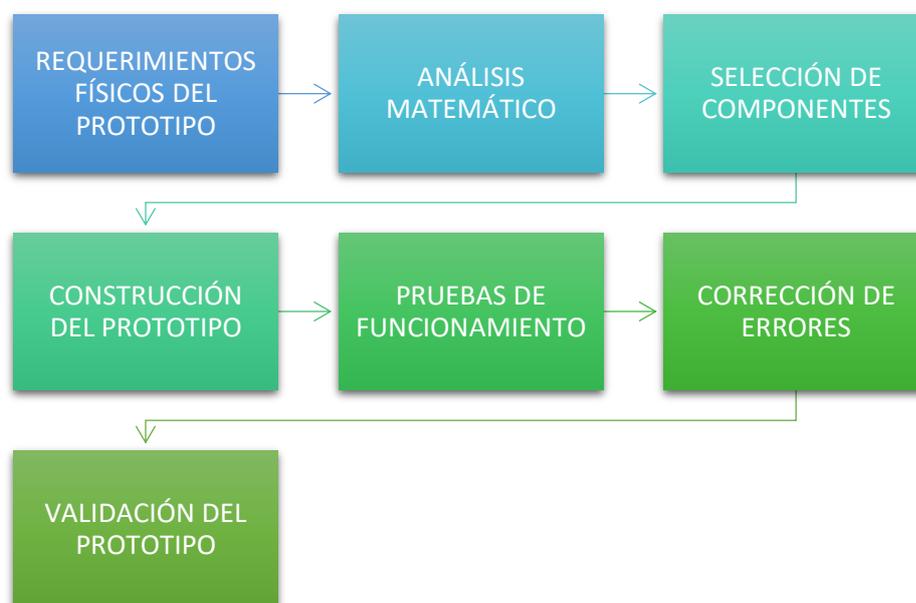
## Factibilidad Bibliográfica

En la investigación del proyecto se utilizó varias fuentes bibliográficas como apoyo en la elaboración del sistema electrónico aplicado a la rehabilitación, ya que al analizar las diferentes investigaciones se pudo comprender los parámetros principales tanto para el diseño, construcción y funcionamiento del prototipo.

### 4.3 ESTUDIO Y ANÁLISIS DE REQUERIMIENTOS DEL PROTOTIPO

En base a los requerimientos establecidos con la ayuda del especialista encargado de la rehabilitación (fisioterapeuta) y del tutor de tesis se procedió con el diagrama de los requerimientos del prototipo diseñado los cuales son:

- El control de flexión y extensión de los dedos de forma natural
- Selección de materiales utilizados
- Modo de funcionamiento de forma manual y automática para un mejor control
- Material para la construcción del prototipo



**Fig. 11.** Diagrama de requerimientos del prototipo

**Elaborado por:** Investigador

- En los tres primeros pasos del diagrama se realizo un análisis previo a la construcción del prototipo teniendo en cuenta los componentes para cumplir con los requerimientos establecidos.
- En los siguientes tres pasos se detalla el proceso de elaboracion, diseño y correcciones del prototipo.
- Finalmente, en el ultimo paso se valido el funcionamiento del prototipo tomando en consideracion las correcciones para el optimo funcionamiento de la prótesis.

#### **4.3.1 ANÁLISIS DE REQUERIMIENTOS DEL PROTOTIPO**

Se analizo la anatomia de la mano para determinar los requerimientos del prototipo:

##### **Huesos**

En la figura siguiente se muestra que la mano esta compuesta por 27 huesos se tubo encuentra la ubicación y como trabajan cada uno para que el prototipo trabajara de manera eficaz.



**Fig. 12:** Proyeccion anteroposterior de una mano normal [39].

## Ligamentos

Los dedos se mantienen estables debido a los ligamentos colaterales y la placa volar que impide que los dedos se flexionen hacia atrás, las lesiones de estos ligamentos pueden no cicatrizar de forma rápida.

## Músculos

En la mano se distinguen tres zonas:

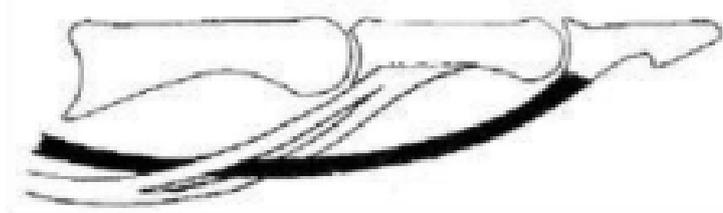
- Una radial, compuesta por tres músculos que movilizan el pulgar.
- Un cubital, con otros tres músculos que movilizan el meñique.
- Una deprimida entre estas dos con los músculos intrínsecos de la mano cuya función es la regulación fina de los movimientos de los dedos.

## Tendones

Los tendones extensores y flexores de los dedos entre el segundo y el quinto falange se originan de un mismo músculo que tracciona simultáneamente hacia los cuatro dedos.



**Fig 13.** Esquema del aparato extensor de los dedos [39].



**Fig 14.** Esquema del aparato flexor de los dedos [39].

## **Inervación**

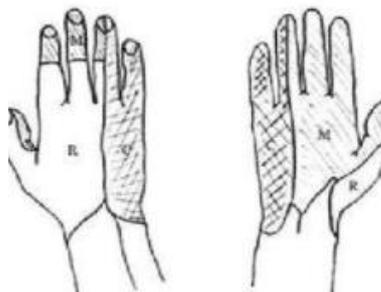
Son los troncos nerviosos que tiene la mano, a continuación se muestra el nervio radial y mediano que constituye su estructura.

### **1. Nervio Radial**

Rodea el dorso de la mano en el lado radial del cuarto metacarpiano, superficies dorsales del pulgar, índice, medio y mitad radial del dedo anular, este nervio radial es sensitivo puro.

### **2. Nervio mediano**

Se encuentra en una posición radial de la palma y las superficies palmares de los dedos pulgar, índice, medio y mitad radial del dedo anular.



**Fig 15:** Inervación sensitiva de los troncos nerviosos de la mano [39].



**Fig. 16:** Distribución sensitiva de las raíces nerviosas cervicales de la mano [39].

### **Mecanismo de lesión**

- **Hiperextensión de la muñeca**

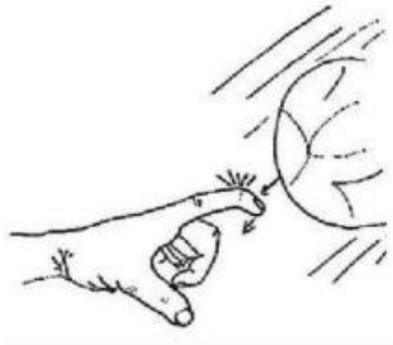
Se presenta mas frecuentemente en caídas de forma que la mano soporte el peso del cuerpo lo que provoca que la articulación radiocarpiana, el labio dorsal del radio choque con la fila proximal del carpo y produzca una lesión en el radio.

- **Hiperextensión de las articulaciones de los dedos**

Se producen cuando se intenta coger objetos lanzados al aire produciendo esguinces en los ligamentos y pueden llegar a producir luxaciones de las articulaciones

- **Flexión o extensión contraarresistencia de las articulaciones interfalángicas distales**

Se debe al impacto de un objeto lanzado al aire contra el dedo, la tracción del tendón extensor o flexor hace que este se rompa.

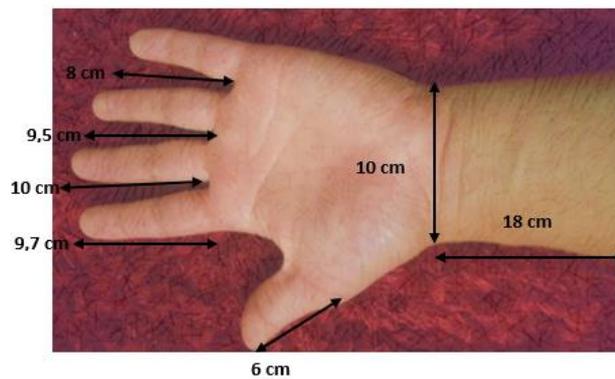


**Fig. 17:** Lesión del aparato extensor de los dedos [39].

#### **4.3.1.1 Requerimientos físicos del prototipo**

Para determinar cuales son los requerimientos físicos para la construcción del prototipo se investigó acerca de los exoesqueletos utilizados en la rehabilitación. En los artículos analizados se encontró varios utilizados para la rehabilitación, pero no existen exoesqueletos que trabajen de forma individual para cada dedo.

La investigación desarrollada tiene como finalidad incorporar un exoesqueleto para la mano, de tal manera que ayude en la rehabilitación de lesiones, se tomó un promedio de las medidas de cada uno de los dedos que se deberá tener en cuenta para la construcción del prototipo, en la siguiente figura se observa las dimensiones de una mano promedio.



**Fig. 18:** Mano con sus medidas

**Elaborado por:** Investigador

La tabla 1 muestra la recolección de medidas promedio que se aplica en el diseño y la construcción del mecanismo, para la obtención de estos datos se trabaja con personas de 18 años en adelante entre hombres y mujeres.

Se toma cinco medidas que corresponden a cada uno de los dedos de la mano, también se mide el ancho de la palma, la cual se utilizó como base para sujetar los dedos, y finalmente la distancia desde el codo hacia la palma, esta nos permitió tener una base en la cual se sujeta toda la estructura del prototipo.

**Tabla 4.** Información de medidas

Edad del paciente	18 años en adelante	
Sexo	Femenino	Masculino
<b>Medida 1 (Tomada desde la muñeca hasta el codo)</b>	18 cm	18 cm
<b>Medida 2 (Tomado el ancho de la palma)</b>	10 cm	10 cm
<b>Medida 3 (Tomada del dedo meñique)</b>	8 cm	9,5 cm
<b>Medida 4 (Tomada del dedo anular)</b>	9,5 cm	10,8
<b>Medida 5 (Tomada del dedo medio)</b>	10 cm	12,2
<b>Medida 6 (Tomada del dedo indice)</b>	9,7 cm	10,6
<b>Medida 7 (Tomada del dedo pulgar)</b>	6 cm	8 cm

**Elaborado por:** Investigador

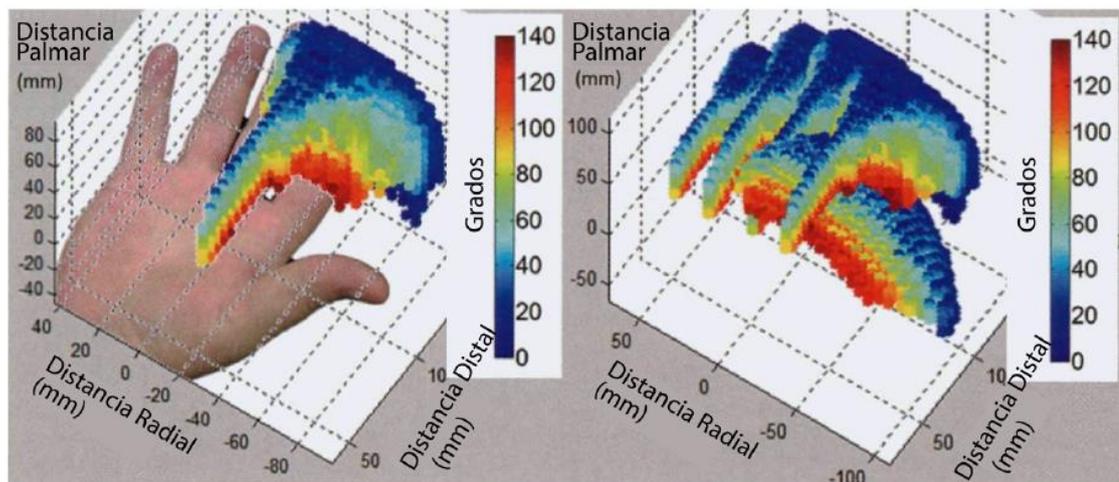
Cada medida se toma desde la punta del dedo hasta su respectivo nudillo, que es donde se genera el movimiento de flexión y extensión de cada uno de ellos, con estas medidas se realiza el diseño del prototipo teniendo en cuenta que no afecte el movimiento natural de los dedos, para que al utilizarlo su funcionamiento sea adecuado.

Dentro del diseño se toma en cuenta el movimiento de los dedos, así como el movimiento del prototipo, logrando que el funcionamiento se ajuste de manera óptima al movimiento natural de los dedos y realizar los ejercicios de rehabilitación.

### 4.3.2 ANALISIS MATEMÁTICO

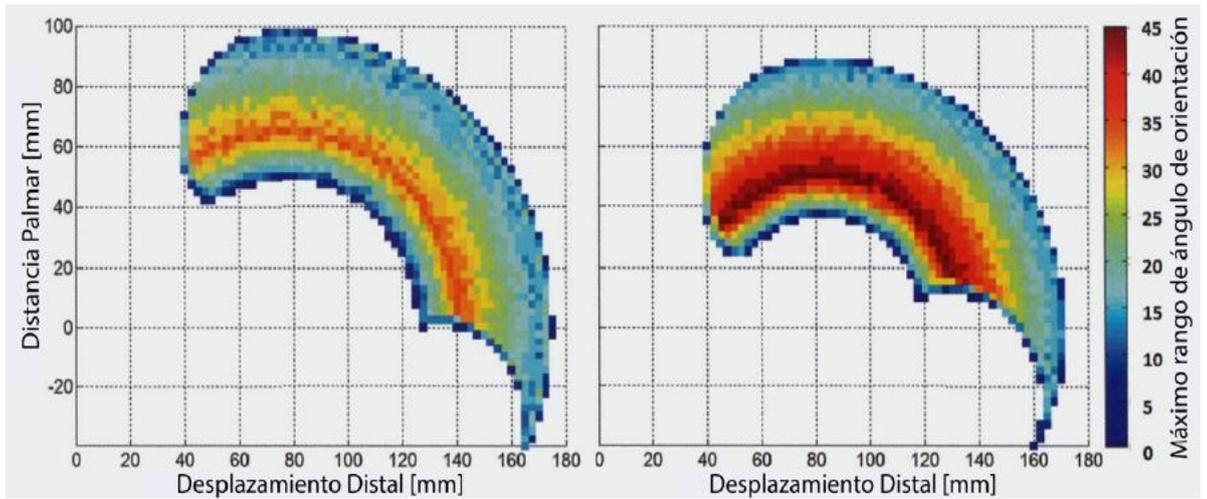
#### 4.3.2.1 Análisis Cinético

Para el diseño de la prótesis es necesario conocer el rango de movimiento de cada uno de las articulaciones de los dedos, teniendo en cuenta que el rango de movimiento de una mano con lesión esta limitado dependiendo su afectación o traumatismo, en la siguiente figura se puede observar el movimiento de los dedos por medio de la simulación en Matlab.



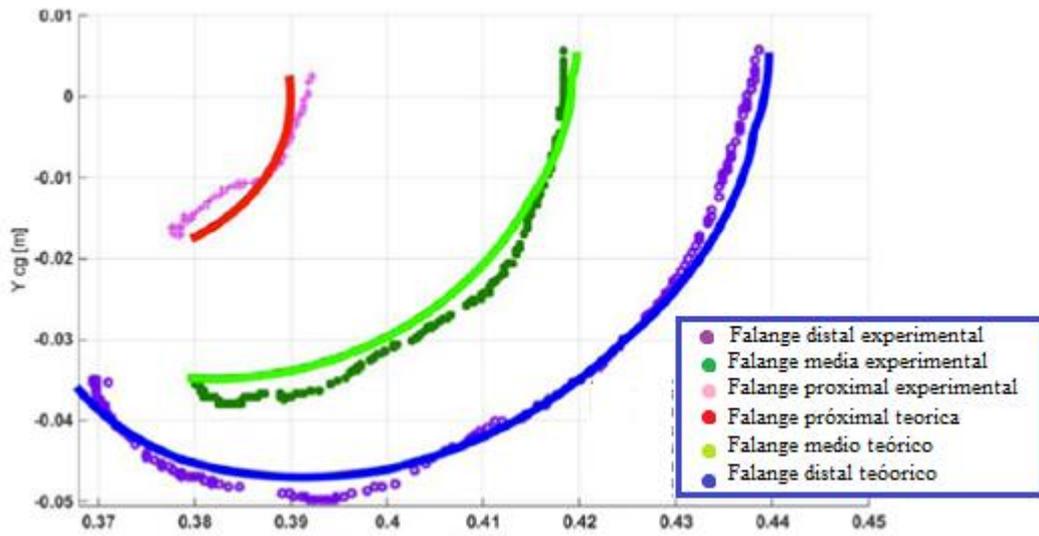
**Fig. 19:** Modelado 3D del campo de trabajo de los dedos [40].

A continuación se muestra el rango de trabajo de uno de los dedos de la mano el mismo está simulado en el software, cabe recalcar que el espacio debió ser analizado para cada uno de los dedos de la mano ya que son diferente de uno y otro.

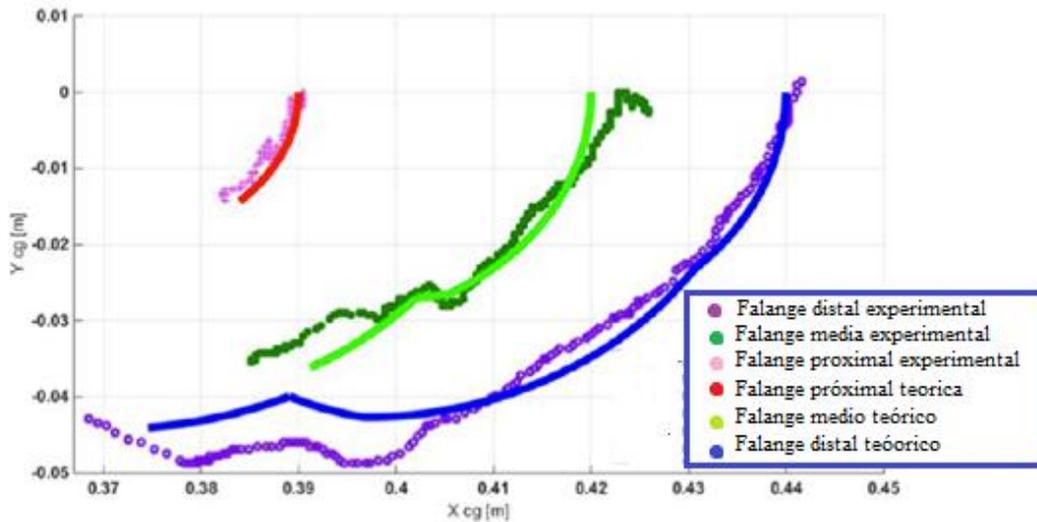


**Fig 20:** Plano sagital de movimiento [41].

Después de haber determinado el espacio o rango de movimiento de trabajo de los dedos se obtuvo la trayectoria de los falanges, los cuales generan unas curvas teóricas y experimentales de desplazamiento.



**Fig 21:** Curvas de extensión de los falanges [41].



**Fig 22:** Curvas de extensión de los falanges [41].

Las gráficas de flexión y extensión se obtiene a partir del movimiento de las articulaciones de los dedos, con un rango aproximado de  $45^{\circ}$  a  $60^{\circ}$ , el seguir la trayectoria de los dedos, este limita la flexión, es decir que reduce en el momento de flexión ya que la prótesis ocupa lugar en el espacio de trabajo de cada uno de ellos [16].

#### 4.3.2.2 Análisis Dinámico

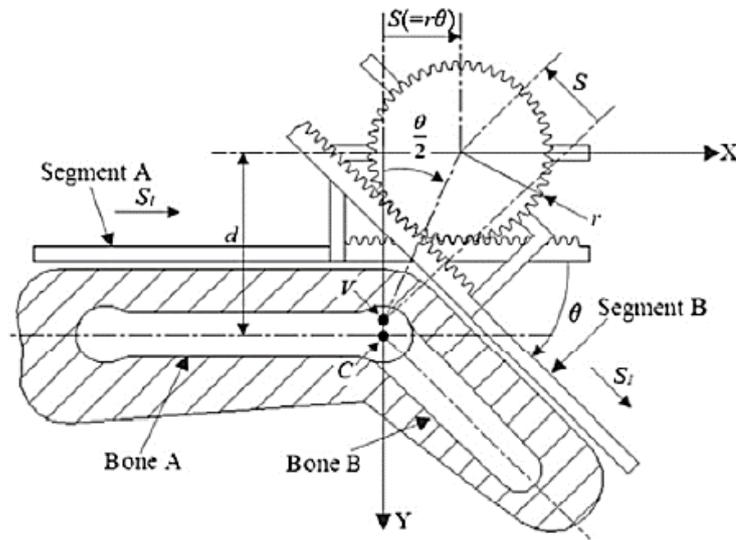
Para el análisis dinámico se tomo como base el diseño mostrado en la figura 23, ya que se acerca a la idea principal de movimiento que posee el prototipo a realizar, en esta estructura se analiza los ejes de rotación, los rangos de movimiento de los falanges (distal y medio) y el peso del dispositivo.

Los rangos y ángulos de movimiento son diferentes para cada dedo por lo que se debe tener en consideración al momento de realizar el diseño de la estructura para el prototipo.

En la figura 23 se muestra el mecanismo que se considero como base de estudio para el análisis dinámico y cinético de la prótesis a construir, en la que se considera la optimización de los parámetros que interactuan en el mecanismo para realizar la

movilización del prototipo, haciendo que el centro instantáneo de la velocidad en el mecanismo coincida con el centro de rotación de los falanges [42].

Además, se analiza el eje de movimiento de rotación que aplica los engranajes para realizar la flexión y la tracción de los dedos



**Fig. 23:** Representación cinemática para el movimiento de los dedos [42].

El desplazamiento producido por el engranaje se denota por  $S$ , para el ajuste de los tamaños de los dedos se tiene  $S_1$  la misma que esta relacionada con el parámetro anterior, la distancia entre el centro de rotación del falange y el punto de flexión del mecanismo corresponde a  $d$  la cual se encuentra en el centro de los engranajes; de este modo el radio del engranaje  $r$  puede ser modificado.

El centro de velocidad del mecanismo no coincide con el eje de rotación de los dedos del paciente  $C$  durante el movimiento de flexión y extensión se denomina  $P$  entre esa distancia la cual se puede representar por la ecuación 1:

$$P = d - \frac{S}{\operatorname{tg}\left(\frac{\theta}{2}\right)} = d - r \frac{\theta}{\operatorname{tg}\left(\frac{\theta}{2}\right)} \quad \text{Ec. 1}$$

Los datos para el análisis de la ecuación se obtienen de la siguiente manera:

$S$  medición de el largo del proximal de cada uno de los dedos de la mano

$r$  el radio del engranaje a utilizar en el prototipo

$\theta$  el ángulo de movimiento

$d$  distancia desde el centro del falange hasta la prótesis

### **DATOS**

$$S_1 = 5,5 \text{ cm} \text{ dedo índice}$$

$$S_2 = 6,4 \text{ cm} \text{ dedo medio}$$

$$S_3 = 6 \text{ cm} \text{ dedo anular}$$

$$S_4 = 5 \text{ cm} \text{ dedo meñique}$$

$$d = 12 \text{ cm}$$

$$r = 1.5 \text{ cm}$$

**Con  $\theta = 0$**

$$P = 12 - 1.5 \frac{0}{\operatorname{tg}\left(\frac{0}{2}\right)}$$

$$P = 12 - 1.5 \frac{0}{\operatorname{tg}(0)}$$

$$P = 12 - 1.5 \frac{0}{0} \text{ Indeterminación}$$

Levantando la indeterminación:

$$P = d - r \frac{\theta}{\operatorname{tg}\left(\frac{\theta}{2}\right)}$$

$$P = d - r \frac{\theta}{\operatorname{tg}\left(\frac{\theta}{2}\right)} \cdot \frac{\operatorname{tg}\left(\frac{\theta}{2}\right)}{\operatorname{tg}\left(\frac{\theta}{2}\right)}$$

$$P = d - r \frac{\theta \operatorname{tg}\left(\frac{\theta}{2}\right)}{\operatorname{tg}^2\left(\frac{\theta}{2}\right)}$$

$$\operatorname{tg}^2\left(\frac{\theta}{2}\right) = \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) + \cos\left(\frac{\theta}{2}\right)$$

$$\operatorname{tg}^2\left(\frac{\theta}{2}\right) = \sin(90^\circ) + \cos(90^\circ)$$

$$\operatorname{tg}^2\left(\frac{\theta}{2}\right) = 1 + 0$$

$$\operatorname{tg}^2\left(\frac{\theta}{2}\right) = 1$$

$$P = d - r \frac{\theta \operatorname{tg}\left(\frac{\theta}{2}\right)}{1}$$

$$P = d - r\theta \operatorname{tg}\left(\frac{\theta}{2}\right)$$

$$P = 12 - 1.5 (0) \operatorname{tg}\left(\frac{0}{2}\right)$$

$$P = 12 - 0$$

$$P = 12$$

**Con  $\theta = 90^\circ$**

$$P = 12 - 1.5 \frac{\frac{\pi}{2}}{\operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{4}\right)}$$

$$P = 12 - 1.5 \frac{\frac{\pi}{2}}{0.5578}$$

$$P = 12 - 1.5 \frac{\pi}{1.1157}$$

$$P = 12 - 1.5 (2.8158)$$

$$P = 12 - 1.5 (2.8158)$$

$$P = 7.7763$$

La optimización del radio  $r$  se lo hace mediante el parámetro  $x$ , que se encuentra en función de la distancia  $d$ , en la cual:

$$r = xd \quad \text{Ec. 2}$$

Para el parámetro de la distancia  $P$  la dimensión debe ser lo mas pequeña posible se toma encuentra el intervalo de funcionamineto  $\theta = [0,90]$  en donde el valor de  $\theta$  debe estar entre cero y  $90^0$  [43].

De la ecuacion 2 se obtiene que:

$$r = xd$$

$$x = \frac{r}{d}$$

$$x = \frac{1.5}{12}$$

$$x = 0.125$$

$$x = 0.5$$

Esto quiere decir que el parámetro de optimización  $x$  se encuentra dentro del intervalo de  $x = [0.125 , 0.5]$ . De esta forma la relación entre  $S$  y  $\theta$  se puede escribir mediante la ecuación 2.

$$S = d * tg\left(\frac{\theta}{2}\right) - S_i$$

$$S = d\left(tg\left(\frac{\theta}{2}\right)\right) - x\theta \quad \text{Ec. 3}$$

A partir de la ecuación 2 se busca los valores de los parámetros que minimice la distancia de  $P$ .

$$S = d \left( \operatorname{tg} \left( \frac{\theta}{2} \right) \right) - x\theta$$

Ec. 3

**Con  $\theta = 0^\circ$  y  $x = 0.125$**

$$S = 12 \left( \operatorname{tg} \left( \frac{0}{2} \right) \right) - 0.125(0)$$

$$S = 12(\operatorname{tg}(0)) - 0$$

$$S = 0$$

**Con  $\theta = 0^\circ$  y  $x = 0.5$**

$$S = 12 \left( \operatorname{tg} \left( \frac{0}{2} \right) \right) - 0.5(0)$$

$$S = 12(\operatorname{tg}(0)) - 0$$

$$S = 0$$

**Con  $\theta = 90^\circ$  y  $x = 0.125$**

$$S = 12 \left( \operatorname{tg} \left( \frac{90}{2} \right) \right) - 0.125(90)$$

$$S = 12(1.6197) - 0.1963$$

$$S = 19.2401$$

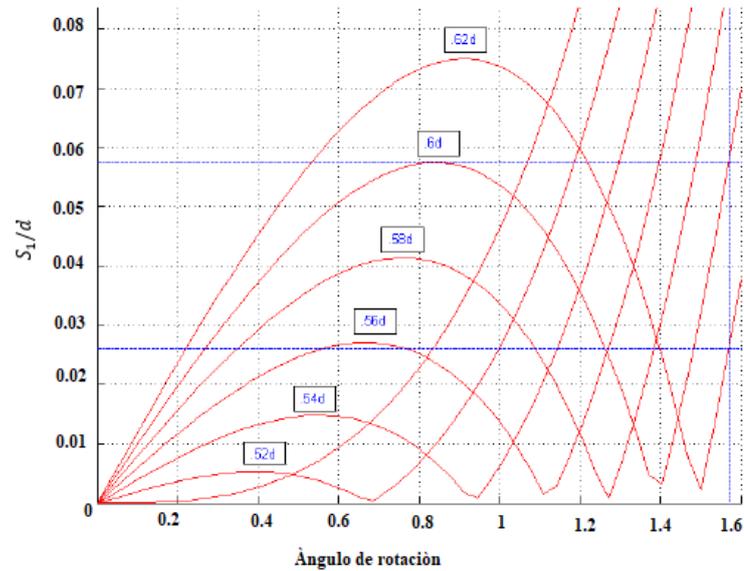
**Con  $\theta = 90^\circ$  y  $x = 0.5$**

$$S = 12 \left( \operatorname{tg} \left( \frac{90}{2} \right) \right) - 0.5(90)$$

$$S = 12(1.6197) - 1.5708$$

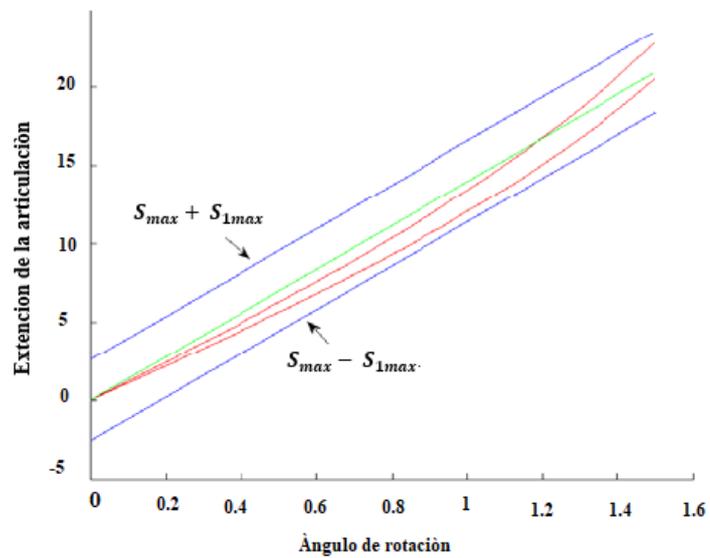
$$S = 17.8656$$

En la siguiente figura se muestra un análisis gráfico del parámetro  $x$  en función del ángulo de rotación y la distancia ( $d$ ) entre la estructura y el dedo conjuntamente con la longitud del primer falange  $S_1$ .



**Fig. 24:** Curvas del parámetro  $x$  [16].

La relación de desplazamiento angular y lineal del movimiento de los dedos se representa en la figura 25 las cuales están representadas por:  $S_{max} + S_{1max}$  y  $S_{max} - S_{1max}$ .

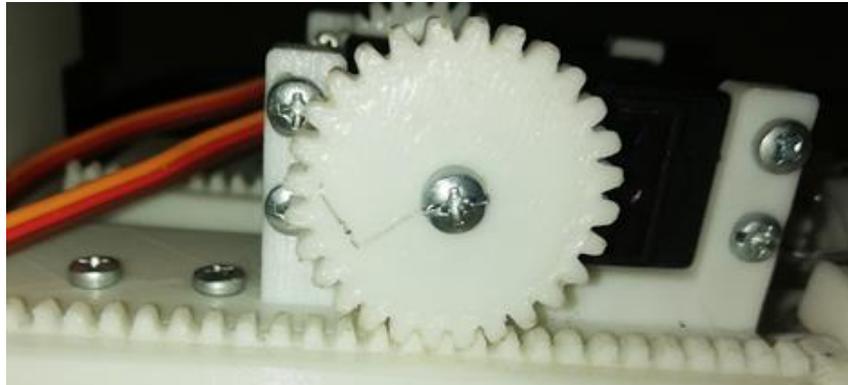


**Fig 25:** Curva de extensión de las articulaciones

**Elaborado por:** Investigador

## Mecanismo del prototipo

A continuación se presenta la base del mecanismo y los ejes de movimiento para el prototipo que se aplicó.

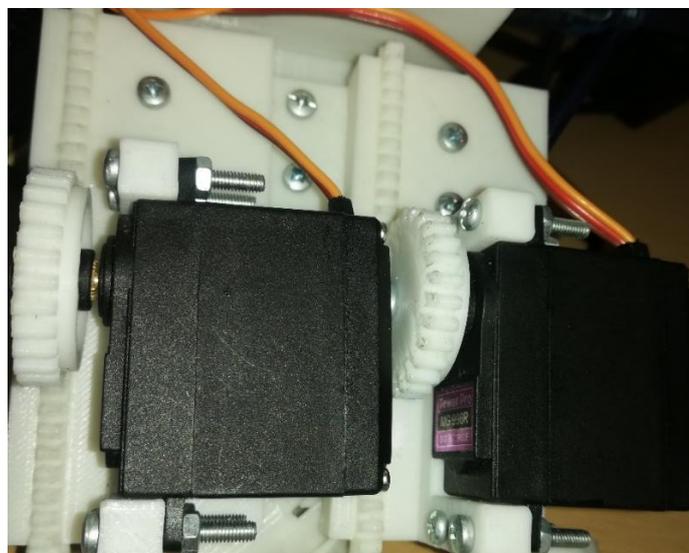


**Fig. 26:** Ejes de movimiento para los dedos

**Elaborado por:** Investigador

En esta figura se observa el engranaje y la base, el mismo que permite que el prototipo realice el movimiento de flexión y tracción de los 4 dedos de forma simultánea.

En la siguiente figura se muestra el montaje de los engranajes con la base para los servomotores, los cuales realizan el movimiento del prototipo.



**Fig. 27:** Base del mecanismo para el movimiento

**Elaborado por:** Investigador

### **4.3.3 SELECCIÓN DE COMPONENTES**

#### **4.3.3.1 PLACA DE CONTROL**

Para el desarrollo del prototipo se analizaron 3 tipos de Hardware Libre:

##### **ARDUINO**

Arduino es una plataforma de hardware libre basada en un microcontrolador y un entorno de desarrollo que facilita la programación en proyectos de electrónica o multidisciplinarios, por medio del microcontrolador se pueden usar sensores y actuadores los cuales realizan la función de adquisición de señales (sensores) e interacción con el mundo (actuadores).

El hardware consiste en una placa con un microcontrolador Atmel AVR y puertos de entrada/salida, los principales microcontroladores utilizados en las plataformas Arduino son el Atmega168, Atmega328, Atmega1280, ATmega8 [44].

El AVR fue diseñado desde un comienzo para la ejecución en código C compilado, los microcontroladores AVR son diseñados para sistemas embebidos, cuentan con una eficiencia de energía, optimiza el tiempo de ejecución y facilidad de programación, en la actualidad la familia de microcontroladores AVR es muy numerosa, incluye 71 dispositivos que comparten el núcleo, pero difieren en recursos [45].

##### **FREEDOM FRDM-K64F**

La plataforma Freedom es la apuesta de Freescale (actualmente NXP) para entrar en el segmento de los sistemas de desarrollo de bajo costo, es un sistema de desarrollo de bajo consumo, de diseño compacto, perfecto para realizar un prototipo de aplicación rápido, interfaz de depuración y serial de estándar abierto integrado OpenSDA, compatible con varias placas de expansión de terceros, esta plataforma ofrecen un programador flash de modo de dispositivo de almacenamiento masivo y fácil de usar,

un puerto serial virtual y capacidades de programación clásica y de control de ejecución, la placa FRDM-K64 es compatible con sistemas operativos de código abierto para el desarrollo de la Internet de las cosas como Arm, Mbed y el sistema operativo Zephyr [46].

### **TEXAS INSTRUMENTS MSP430 LAUNCHPAD**

La plataforma Launchpad ha sido la respuesta de Texas Instruments a la necesidad de tener un sistema de bajo coste, ampliable y que atienda a la filosofía iniciada por Arduino [47], los MSP430 (Mixed Signal Processor) son procesadores de Señales Mixtas de Texas Instruments.

Son una familia de microcontroladores con capacidad añadida para operaciones de procesamiento analógico de complejidad simple a media, consumo de corriente ultra bajo, integrada por una muy amplia gama de dispositivos con el mismo núcleo y diferentes capacidades de memoria y periféricos, principalmente estos dispositivos están enfocados para aplicaciones embebidas de bajo costo y baja potencia [48]. En la tabla 2 se presenta las principales características de las 3 placas de Hardware Libre.

**Tabla 5.** Comparación características de placas de HL [46].

Características	ARDUINO UNO	FREEDOM – NXP FRDM-K64F	MSP430 LAUNCHPAD (Texas Instruments)
<b>Precio</b>	\$17.00	\$37.19	\$23.40
<b>Microcontrolador</b>	ATMEL	K63F	MSP430G2553
<b>Núcleo</b>	AVR	ARM Cortex-M4F	MSP430
<b>Resolución</b>	8 bit	32 bit	16 bit
<b>Velocidad</b>	16 MHz	120 MHz	16 MHz
<b>Flash</b>	32K	1M	16k
<b>RAM</b>	2k	256K	0.5k
<b>Número de Pines</b>	32	64	20
<b>E/S Digitales</b>	14	40	16
<b>PWM</b>	6	12	7
<b>Formato</b>	DIP	SMD	DIP
<b>Aplicaciones</b>	Shields	Shields	Boosterpacks
<b>Extras</b>	led (1)	Acelerómetro/magnetómetro Led tricolor, Usb, Ethernet	Leds (2) botón (1)

### Selección

Luego de comparar las 3 distintas placas se decidió utilizar la placa Arduino por su bajo costo y de disponer una mayor cantidad de pines de E/S, además de ser más accesible dentro de nuestro medio.

### **4.3.3.2 IDE ARDUINO**

#### **Definición**

El Entorno de desarrollo integrado (IDE) es un software libre introducido por Arduino, que principalmente se utiliza para editar, compilar y cargar el código en el dispositivo que es compatible con todos los módulos de Arduino y está disponible para instalar y comenzar a compilar el código sobre la marcha [49].

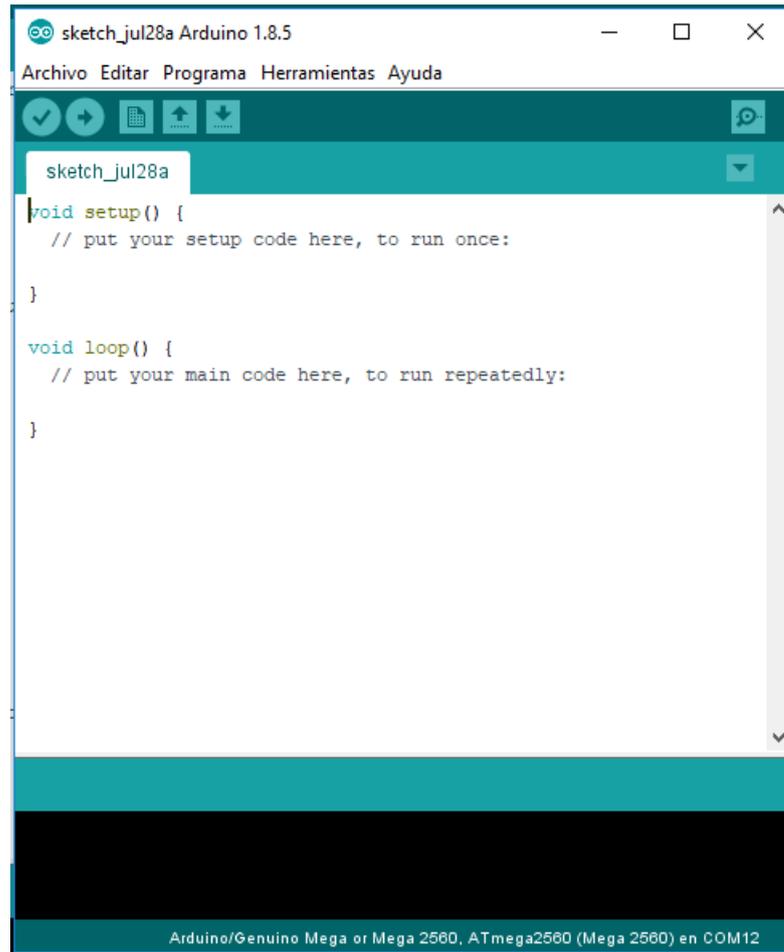
#### **Características**

A continuación se describe las principales características que ofrece el Software libre de Arduino IDE [49]:

- Software de código abierto
- Facilita que la compilación de códigos sea fácil.
- Disponible para sistemas operativos MAC, Windows, Linux
- Dispone de una gran gama de módulos arduino disponibles.
- Cada módulo arduino contiene un microcontrolador.
- El código principal generará un archivo hexadecimal, luego se transfiere y se carga en el controlador en la placa.
- El entorno IDE contiene dos partes básicas que son el editor en donde el usuario escribe el código y compilador que se usa para cargar en los módulos arduino.
- El entorno IDE de Arduino es compatible con lenguajes C y C ++.

#### **Estructura**

La estructura básica del lenguaje de programación Arduino consta de dos partes o funciones que encierran bloques de declaraciones [50].



**Fig. 28:** Estructura Arduino IDE [51].

### **Setup ()**

En el bloque de declaración setup contiene las declaraciones de cualquier tipo de variable, ubicada al principio del programa, es la primera función que se ejecuta y es usada para asignar pinMode o inicializar las comunicaciones serie [50].

### **Loop ()**

En la función loop se ejecuta después de la función setup, en este se incluye el código que se ejecuta continuamente, leyendo las entradas y activando salidas, esta función es el núcleo de todos los programas, realizando la mayor parte del trabajo [50].

### 4.3.3.3 SERVOMOTOR

Tomando en cuenta que en el mercado actual existen varias marcas de servomotores se analizaron tres tipos que a continuación se detallan, en donde se indican las diferentes características entre ellas [52] [53] [54].

**Tabla 6.** Comparación características servomotor [52] [53] [54].

Características	Futaba S3003	Tower Pro Mg996R	Hitech HS422
<b>Precio</b>	\$14.50	\$11.99	\$16.49
<b>Peso</b>	37.2 gr	55 gr	45.5 gr
<b>Torque</b>	4.1 Kg/cm (6v)	9,4 kg / cm (4,8 v) 11kg / cm (6.0v)	4,1 kg / cm (6v)
<b>Dimensión</b>	40.4 x 19.8 x 36 mm	40,7 × 19,7 × 42,9 mm	40,6 x 19,8 x 36,6 mm
<b>Velocidad</b>	0.22 seg / 60 grados	0.19sec / 60degree (4.8v) 0.15sec / 60degree (6.0v)	0,16 Seg 60 grados sin carga
<b>Voltaje de operación</b>	4.8v – 6v	4.8 ~ 6.6v	4.8v – 6v
<b>Tipo de engranaje</b>	Metálico / Plástico	Metálico	Metálico / Plástico
<b>Longitud del cable</b>	300mm	320mm	300mm
<b>Color Cables</b>	(+) Rojo (-) Negro (Blanco) Control	(+) Rojo (-) Marrón (Naranja) Control	(+) Rojo (-) Negro (Amarillo) Control

### Selección

Al analizar los servomotores se decidió implementar los Tower Pro Mg996R ya que, al estar contruidos en metal, tener un mayor torque y un amplio rango de velocidad son los indicados para ejercer el trabajo propuesto.

#### 4.3.3.4 PANTALLA TOUCH

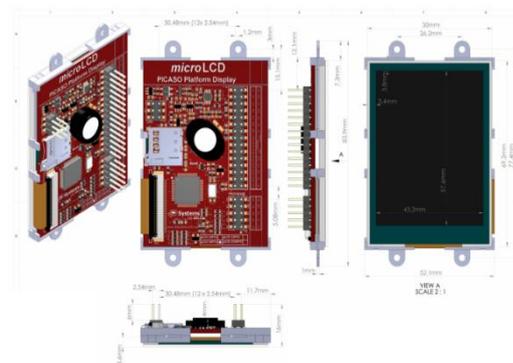
A continuación, se analizaron tres tipos de pantallas.

##### **Pantalla TFT de 2,8” HMI Nextion**

La pantalla TFT HMI (Human Machine Interface) de nextion permite visualizar y controlar entre el operador y un proceso o máquina, este tipo de tecnología se utiliza en el campo de la electrónica y aplicada para el IoT (Internet of Things), el modelo Nextion Hmi de 2,8” es un pantalla táctil diseñada para la interfaz gráfica del sistema, funciona con un voltaje de 5V a una corriente de 65mA, pantalla de alto rendimiento, consta de una memoria flash, GPU, ranura para tarjeta SD (en caso de que el computador no detecte la pantalla) [55].

##### **Arduino Display Module uLCD-28PTU**

Es un módulo de pantalla inteligente multifuncional, diseñado para aplicaciones que requieren una interfaz gráfica, para sistemas embebidos, consta de un procesador gráfico PICASO, el  $\mu$ LCD-28PTU es la combinación de una pantalla LCD de 2,8 ”, amplificador de audio y Altavoz, conector de tarjeta micro-SD, Soporte de batería de polímero (LiPo), pines de entrada / salida de uso general (GPIO's), incluye comunicación I 2C y serial, este módulo se puede programar en su lenguaje 4DGL nativo (similar a C) o puede ser configurado como un dispositivo esclavo [56].



**Fig. 29:** Module uLCD-28PTU [56].

## TFT 320QVT ILI9341

La pantalla ILI9341 es un controlador SOC de un solo chip de 262.144 colores diseñada para una pantalla de cristal líquido a-TFT, el módulo ILI9341 es compatible con la interfaz MCU paralela del bus de datos de 8, 9, 16, 18 bits, la interfaz RGB del bus de datos de 6, 16, 18 bits y la interfaz periférica en serie de 3/4 líneas (SPI), la ILI9341 funciona con un voltaje de E/S de 1.65V a 3.3V, ideal diseño portátil para pequeños o medias proyectos [57].

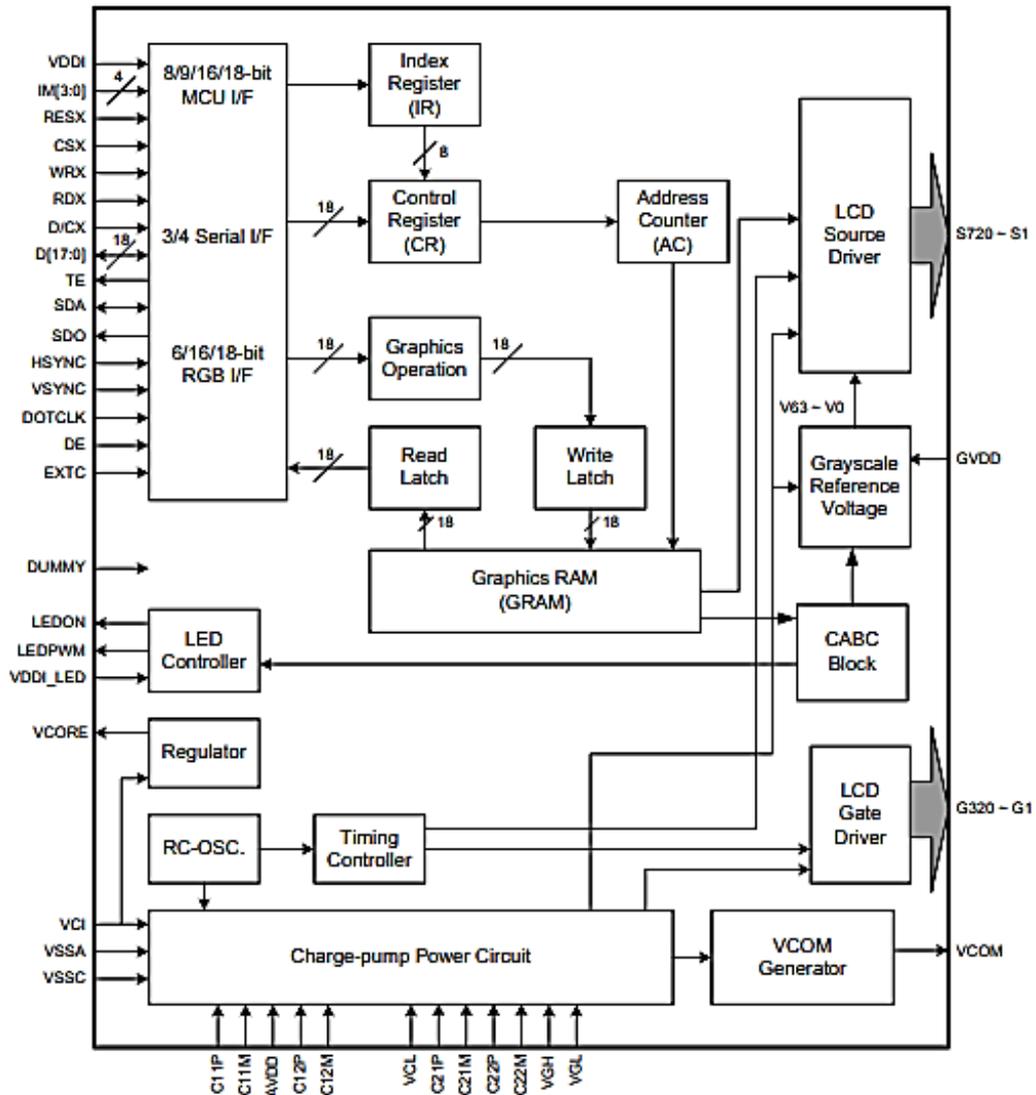


Fig. 30: Diagrama de bloque de la ILI9341 [57]

En la siguiente tabla se indican las características principales de las tres pantallas touch.

**Tabla 7.** Comparación características pantalla touch [58] [59].

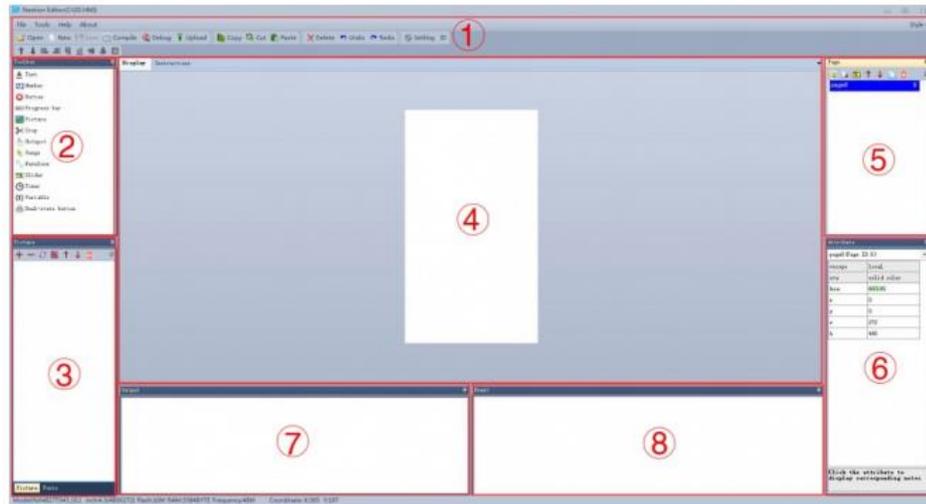
Características	TFT HMI Nextion	uLCD-28PTU	TFT 320QVT ILI9341
<b>Precio</b>	\$23.498	\$80.58	\$29.99
<b>Peso</b>	29.5 gr	43 gr	45.5 gr
<b>Capacidad de color</b>	65K	65K	65K
<b>Tamaño Pantalla</b>	2.8"	2.8"	3.2"
<b>Dimensión</b>	(58 × 50 × 5) mm	(50.8 x 69.8 x 12) mm	(94 x 65 x 16) mm
<b>Resolución</b>	320x240 pixeles	320x240 pixeles	320x240 pixeles
<b>Voltaje de operación</b>	5v; 65mA	5V; 130mA	1.65v – 3.3v
<b>Temperatura de trabajo</b>	25°C	-15°C a 65°C	40 °C a 85°C
<b>Pines</b>	4	40	40
<b>Backlight</b>	LED	LED	LED
<b>Slot de tarjeta SD</b>	Micro SD	Micro SD	SI

Al analizar las características de las tres opciones de pantallas se decido utilizar las Nextion HMI de 2,8" por su bajo costo y peso, además requiere una menor cantidad de pines para conectar a la placa de control.

### **Editor Nextion**

El editor de nextion es un software que permite diseñar y programar la pantalla TFT, consta de elementos como texto, botones, sliders, entre otros, este tipos de herramientas permiten el diseño de la interfaz gráfica, de manera que facilita el monitoreo de las variables que se encuentran en proceso, la interfaz del editor nextion

consta del menú principal (1), componentes (2), librería de imágenes (3), área de display (4), área de página (5), área de edición (6), ventana de salida del compilador (7), área de eventos (8), una vez que se desarrolla la programación de la pantalla, esta permite realizar una prueba del proceso por medio de la herramienta de depuración la que permite la simulación en tiempo real y examinar si el funcionamiento es correcto [60].

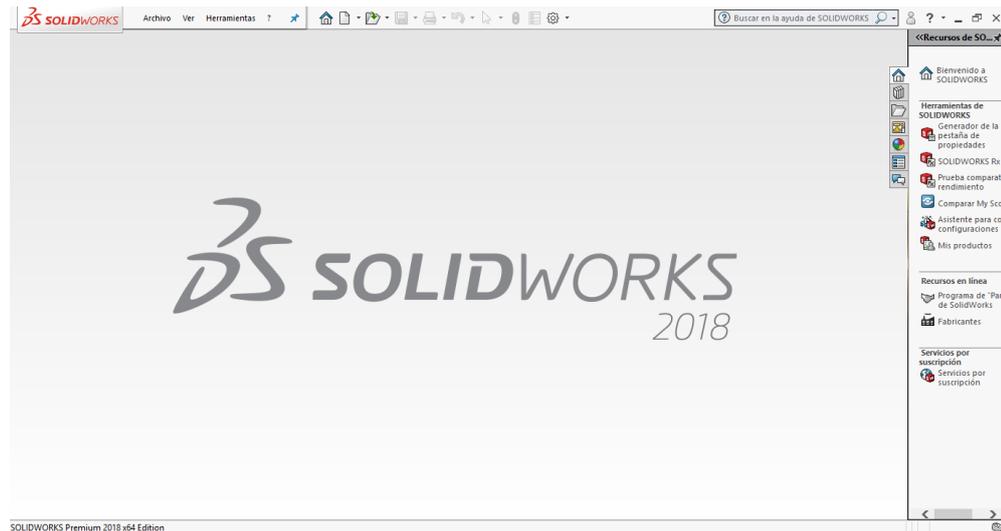


**Fig. 31:** Componentes interfaz principal [61].

El lenguaje de programación del editor Nextion es un conjunto de instrucciones que no son compatible con ningún otro lenguaje de programación [60].

#### 4.3.3.5 SOLID WORKS

SolidWokrs es un software aplicado al diseño de automatización mecánico que permite croquizar de una manera rápida las ideas de los diseñadores, produciendo modelos y dibujos detalladamente, este software funciona en base a las nuevas técnicas de modelado con sistemas CAD [62].



**Fig. 32:** Página principal CAD SolidWorks [62].

## **4.3.4 ETAPA 2: DESARROLLO DEL PROTOTIPO**

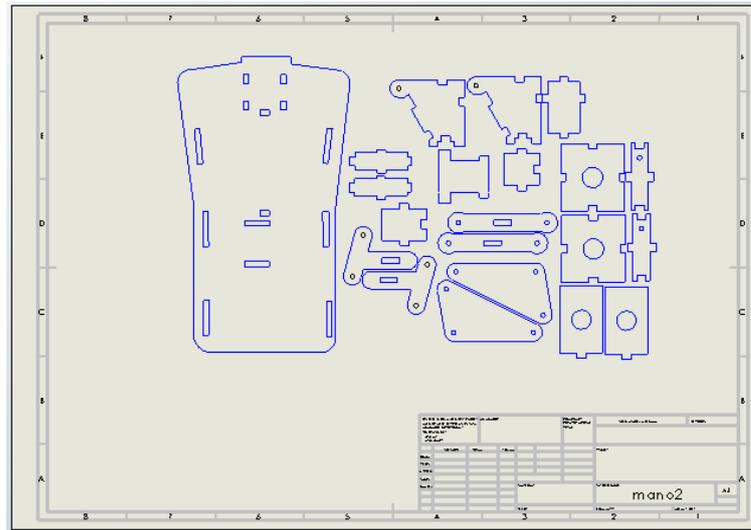
### **4.3.4.1 Cosntrucción del prototipo**

Para la construcción del prototipo se desarrollo el modelo de cada una de las piezas en solidworks, los cuales fueron cortados mediante laser en MDF, acrilico y posteriormente impresos en 3D, las piezas constan de tres parte para cada uno de los dedos de la mano, estos se mueven gracias a los dos servomotores ubicador por la parte superior de la mano, cada servomotor controla dos dedos, permitiendo así tener el mismo torque para un mejor movimiento de los dedos.

A continuación se puede observar los primeros diseños que se realizaron para la prueba y corrección del funcionamiento del prototipo:

#### **Parte 1:**

**Estructura del prototipo en MDF:** Se diseña cada una de las piezas que constituye el primer y segundo prototipo, al ser una prueba la medidas de referencia se las tomo de mano del investigador; estos diseños estan realizados en la herramienta solidwork.



**Fig. 33:** Esquema de la base de la mano para impresión realizada en SolidWorks para el prototipo de prueba 1 MDF  
**Elaborado por:** Investigador



**Fig. 34:** Prototipo realizado en MDF  
**Elaborado por:** Investigador

## **Parte 2:**

En la figura mostrada a continuación se puede ver la estructura realizada mediante acrílico.

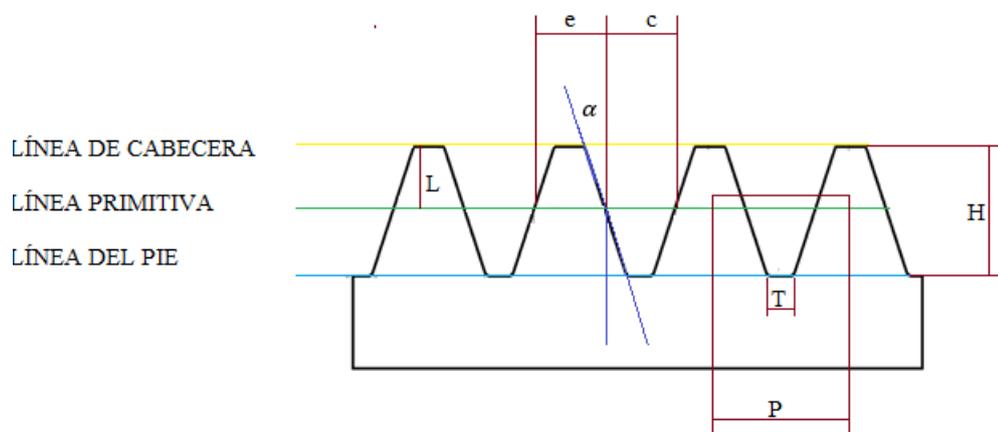


**Fig. 35 :** Prototipo realizado en acrílico  
**Elaborado por:** Investigador

En base a las dos primeras estructuras mostradas anteriormente con las que se realizó las primeras pruebas se determinó que el mecanismo a implementarse es adecuado, sin embargo el prototipo final esta elaborado mediante impresión 3 D.

#### 4.3.4.2 Estudio de los engranajes

Para el análisis de los engranajes se utiliza las fórmulas de trazado métricas para engranajes en las cuales encontramos las siguientes fórmulas:



**Fig. 36:** Parámetros para la elaboración de los engranajes.  
**Elaborado por:** Investigador

**Módulo: (M)**

**Paso:**

$$P = \pi M \quad \text{Ec. 4}$$

**Altura total del diente:**

$$h = 2.167 M \quad \text{Ec. 5}$$

**Espesor del diente:**

$$e = 0.5 P \quad \text{Ec. 6}$$

**Espacio entre dientes:**

$$c = 0.5 P \quad \text{Ec. 7}$$

**Altura de la cabeza del diente**

$$L = M \quad \text{Ec. 8}$$

**Ángulo de diente:**

$$\alpha = 20^\circ \quad \text{Ec. 9}$$

**Radio del diente:**

$$r = 0.3 M \quad \text{Ec. 10}$$

**Ancho del fondo del diente:**

$$T = \frac{P-4(L)(\text{tg } \alpha)}{2} \quad \text{Ec. 11}$$

**Resolución de fórmulas:**

Por efectos de cálculo para este proyecto  $M = 5$

**Paso:**

$$P = \pi M$$

$$P = 3.1416 (5)$$

$$P = 15.708$$

**Altura total del diente:**

$$h = 2.167 M$$

$$h = 2.167 (5)$$

$$h = 10.835$$

**Espesor del diente:**

$$e = 0.5 P$$

$$e = 0.5 (15.708)$$

$$e = 7.854$$

**Espacio entre dientes:**

$$c = 0.5 P$$

$$c = 0.5 (15.708)$$

$$c = 7.854$$

**Altura de la cabeza del diente**

$$L = M$$

$$L = 5$$

**Radio del diente:**

$$r = 0.3 M$$

$$r = 0.3 (5)$$

$$r = 1.5$$

**Ancho del fondo del diente:**

$$T = \frac{P - 4(L)(\operatorname{tg} \alpha)}{2}$$

$$T = \frac{15.708 - 4(5)(\text{tg } 20^\circ)}{2}$$

$$T = \frac{15.708 - 4(5)(0.364)}{2}$$

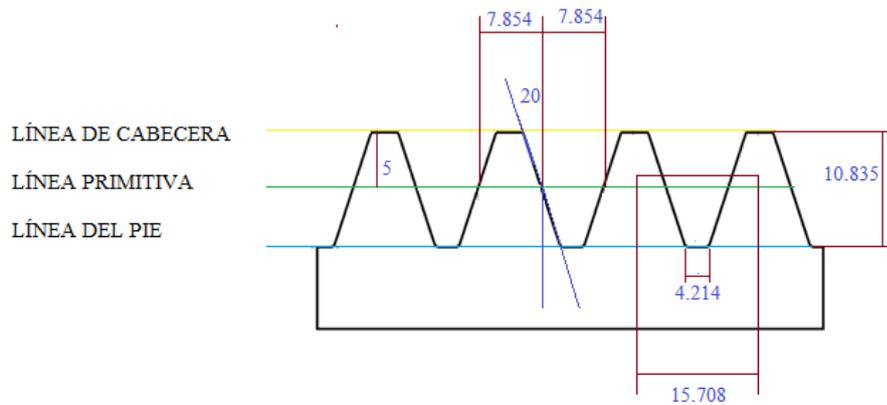
$$T = \frac{15.708 - 4(5)(0.364)}{2}$$

$$T = \frac{15.708 - 7.28}{2}$$

$$T = \frac{15.708 - 7.28}{2}$$

$$T = \frac{8.428}{2}$$

$$T = 4.214$$

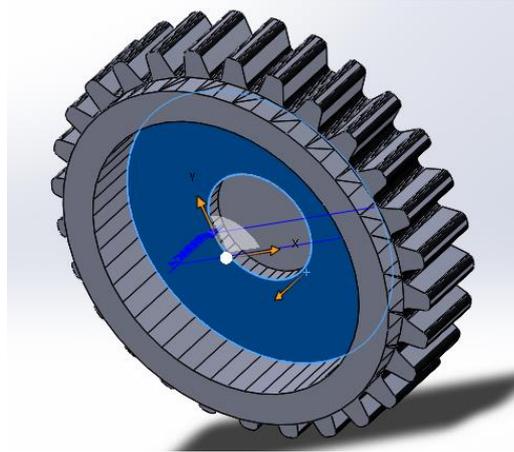


**Fig. 37:** Datos de los parámetros para la elaboración de los engranajes.

**Elaborado por:** Investigador

### Parte 3:

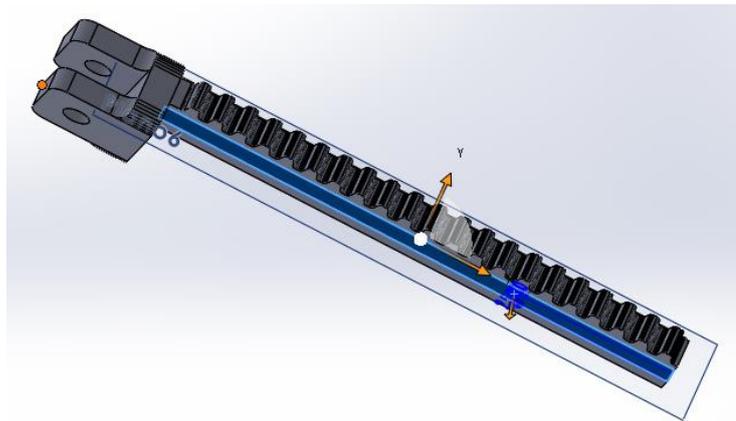
**Construcción de los engranajes:** Después de realizar el análisis de engranajes para el prototipo se diseñan dos engranajes los cuales poseen 28 dientes:



**Fig. 38:** Diseño del engranaje para la impresión en 3D, el cual permite realizar el movimiento del prototipo conjuntamente con los servos

**Elaborado por:** Investigador

La base que soporta el movimiento de los engranajes esta constituida por 28 dientes con diametro de 10 centimetros, distancia con la que se puede realizar con total normalidad el movimiento de flexión y extensión del prototipo.

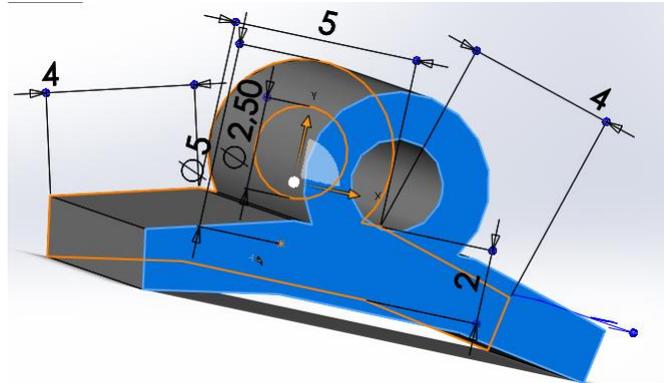


**Fig. 39:** Diseño de los dientes que soportan el movimiento de los engranajes.

**Elaborado por:** Investigador

**Construcción guarda cables:** La construcción de esta pieza fundamental para el movimiento del prototipo, debido a que permite sujetar los engranajes con los dedos

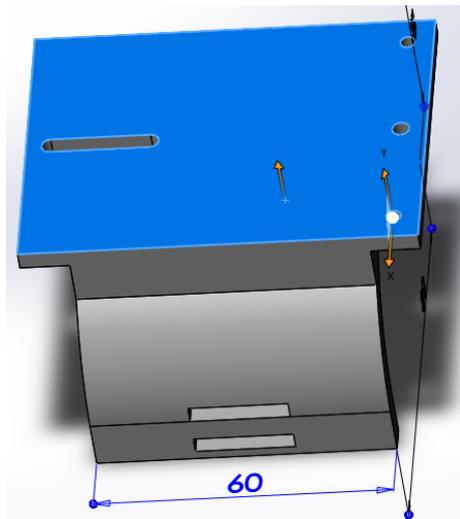
haciendo posible su funcionamiento. La dimensión se relaciona con el módulo del engranaje en este caso  $M=5$



**Fig. 40:** Diseño y dimensiones del guarda cables realizado en SolidWorks

**Elaborado por:** Investigador

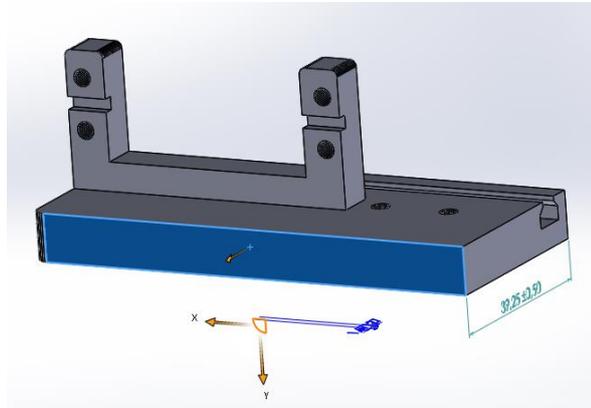
**Construcción de la base:** Base que sujeta el mecanismo de movilización conjuntamente con el sistema de control, es la que permite mantener firme al mecanismo.



**Fig. 41:** Diseño de la estructura para la muñeca

**Elaborado por:** Investigador

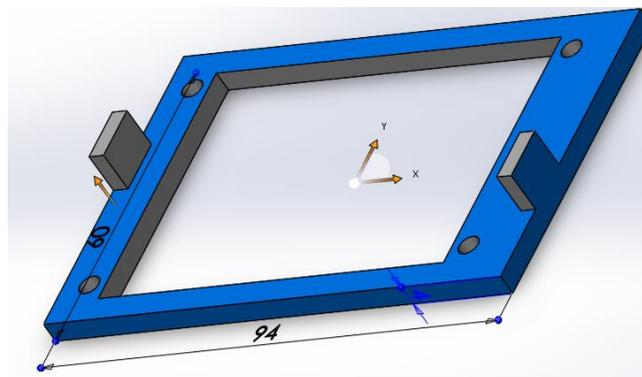
**Construcción de soporte:** Permite dar ajuste a los servomotores y los engranajes en un solo conjunto de la estructura.



**Fig. 42:** Diseño de la estructura que da soporte a los engranajes simultáneamente con los dedos

**Elaborado por:** Investigador

**Construcción de la base para la pantalla:** da firmeza a la pantalla de control del prototipo, las dimensiones se basan en las medidas del tipo de pantalla que se desea aplicar.



**Fig. 43:** Diseño de la tapa sujetadora de la pantalla

**Elaborado por:** Investigador

A continuación se puede observar el prototipo final que esta construido por medio de impresión 3D, ya que este material es más resistente y permitió una moldura más ergonómica para el uso en la rehabilitación de pacientes.



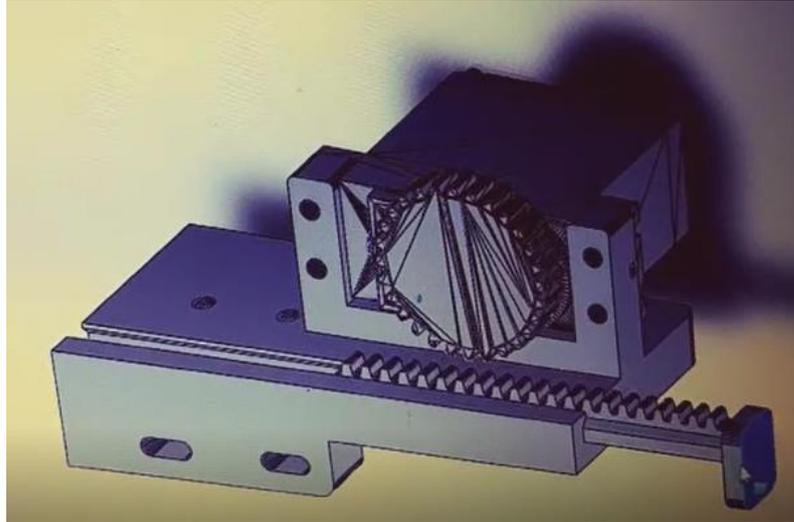
**Fig. 44:** Prótesis de los 4 dedos

**Elaborado por:** Investigador

#### **4.3.4.3 Simulación de los componentes para el prototipo**

En las siguientes imágenes se muestra la simulación de los movimientos que realiza los servomotores sobre el mecanismo que ejerce el movimiento de la mano en estado de flexión y tracción.

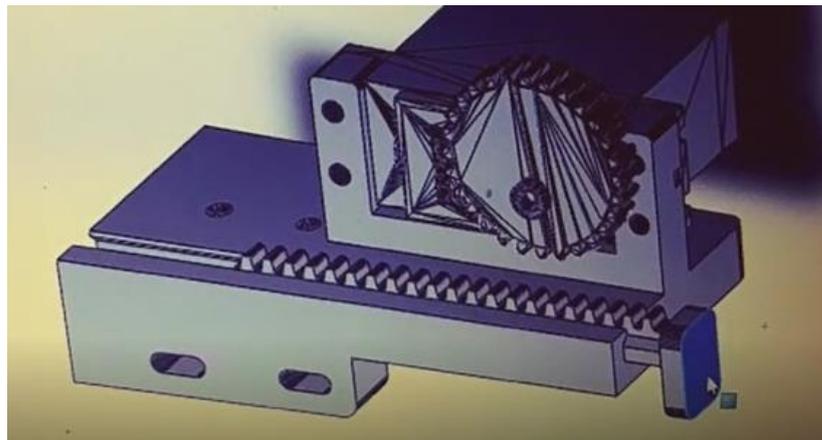
En la primera imagen se puede observar el mecanismo de engranajes en conjunto con los servomotores, permitiendo el movimiento del prototipo en estado de flexión de la mano del paciente.



**Fig. 45:** Simulación del mecanismo en estado de flexion.

**Elaborado por:** Investigador

Así también en esta imagen se puede apreciar el mecanismo en interacción con los servomotores los cuales realizan el movimiento del prototipo en el momento que se encuentra en estado de tracción.

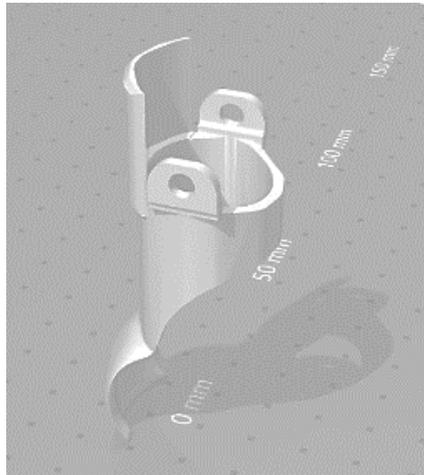


**Fig. 46:** Simulación del mecanismo en estado de tracción.

**Elaborado por:** Investigador

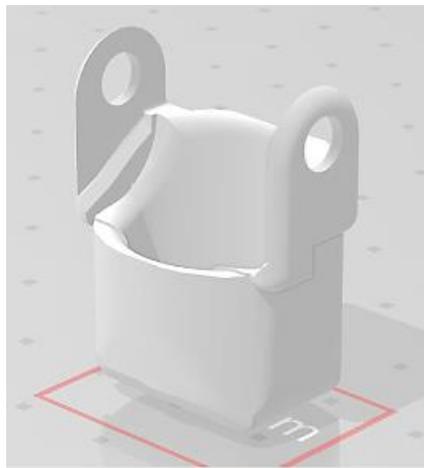
La simulación de este mecanismo en sus dos estados (flexión y tracción), se lo realiza mediante la herramienta de solidworks.

Una vez realizada la base del prototipo se procede con la simulación de cada una de las partes de los dedos que constituirá la estructura para dar forma a los dedos, esta se realiza en dos partes: la parte de las falanges media y proximal tendrán básicamente el mismo modelo variando su longitud de uno a otro, y la parte de la falange distal que cubrirá la cabeza de cada uno de los dedos, esto se puede observar en las siguientes imágenes.



**Fig. 47:** Simulación de la estructura para las falanges medio y proximal.

**Elaborado por:** Investigador



**Fig. 48:** Simulación de la estructura para las falanges distal.

**Elaborado por:** Investigador

Una vez terminado el diseño y simulación de los componentes que forman parte del prototipo a utilizar se procede a la impresión en 3D de cada una de las piezas, se empezó primero por la impresión de la base debido a que es la parte más robusta y grande que se encuentra en el prototipo, luego se imprimió las estructuras de las falanges.

#### **4.3.5 ANALISIS DEL PRODUCTO FINAL**

##### **4.3.5.1 Tiempo**

El tiempo de duración de cada sesión con la utilización del prototipo se establece mediante los requerimientos del médico especialista fisioterapeuta, quien analiza el grado de inmovilidad de cada paciente y de acuerdo a ello se determina cuanto tiempo debería durar la rehabilitación por sesión. Es decir, mientras el paciente tenga alto grado de dificultad el tiempo de movimiento será mayor, mientras que para un paciente de bajo grado de dificultad en el movimiento el tiempo será menor esto quiere decir que la rehabilitación va teniendo resultados efectivos.

##### **4.3.5.2 Modos**

###### **Manual**

Se establece modo manual debido al criterio del fisioterapeuta, porque existen casos en que después de un determinado número de repeticiones el paciente debe tener un tiempo de descanso, esto se presenta más a menudo en personas que han perdido la movilidad de la mano o su lesión fue de alta gravedad ya que en estos casos las primeras sesiones de rehabilitación las personas pueden presentar dolor.

###### **Automático**

El modo automático se encuentra definido para personas que ya tienen algún tiempo en rehabilitación, por lo que no requieren tiempo de reposo, sino que la sesión de

movimientos es de forma continua hasta culminar con lo requerido por parte del médico especialista quien supervisa cada caso.

### **Velocidad**

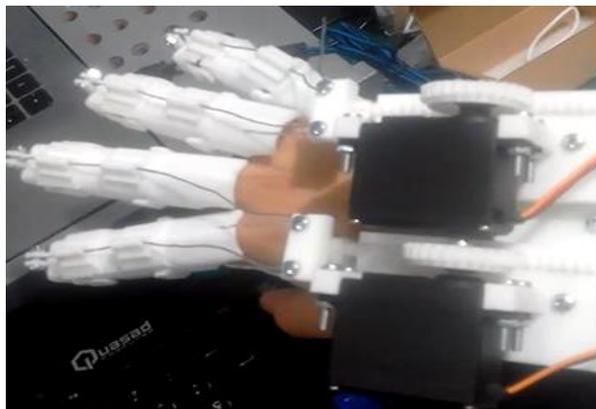
Al igual que los modos la velocidad con la cual se va a trabajar se establece después de un análisis realizado por el especialista hacia cada uno de los pacientes que requieren rehabilitación.

Por lo general las lesiones llegan en un rango grave, es por ello que la velocidad con la que se empieza es la mínima, mientras se vaya obteniendo resultados positivos la velocidad de trabajo se aumenta hasta que finalmente el paciente se encuentre recuperado al 100 por ciento en este caso la velocidad de las últimas sesiones de rehabilitación serán con velocidad máxima la cual permite al médico verificar que el paciente ha recuperado totalmente la movilidad.

## **4.3.6 PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO**

### **4.3.5.1 Montaje del prototipo**

Una vez impreso cada una de las piezas de la estructura se procede con el montaje final de la prótesis y posteriormente cargar la programación que permitió realizar los movimientos, dicha programación se encuentra en un arduino uno, acompañada de una pantalla touch de 2,8” para una mejor interfaz para el usuario.



**Fig. 49:** Montaje total del mecanismo de la prótesis

**Elaborado por:** Investigador

#### 4.3.5.2 Corrección de Errores

El mecanismo realizado al igual que la programación no tuvieron inconvenientes en el momento de hacer las prácticas necesarias. Lo que se presentó fue que el primer juego de dedos dado que para algunos pacientes esté estuvo muy pequeño, es por ello que se realizó un juego de dedos más grandes que se adapten a manos grandes.



**Fig. 50:** Impresión de los dedos

**Elaborado por:** Investigador

#### 4.3.6 ETAPA 3: VALIDACIÓN DEL PROTOTIPO

Para la realización del prototipo se trabajó en el Hospital Municipal de la Merced en el área de Terapia Física bajo la supervisión del fisioterapeuta. Se trabajó con 6 pacientes quienes presentan problemas en el movimiento de los dedos de las manos independientemente de la razón que haya producido dicho problema.

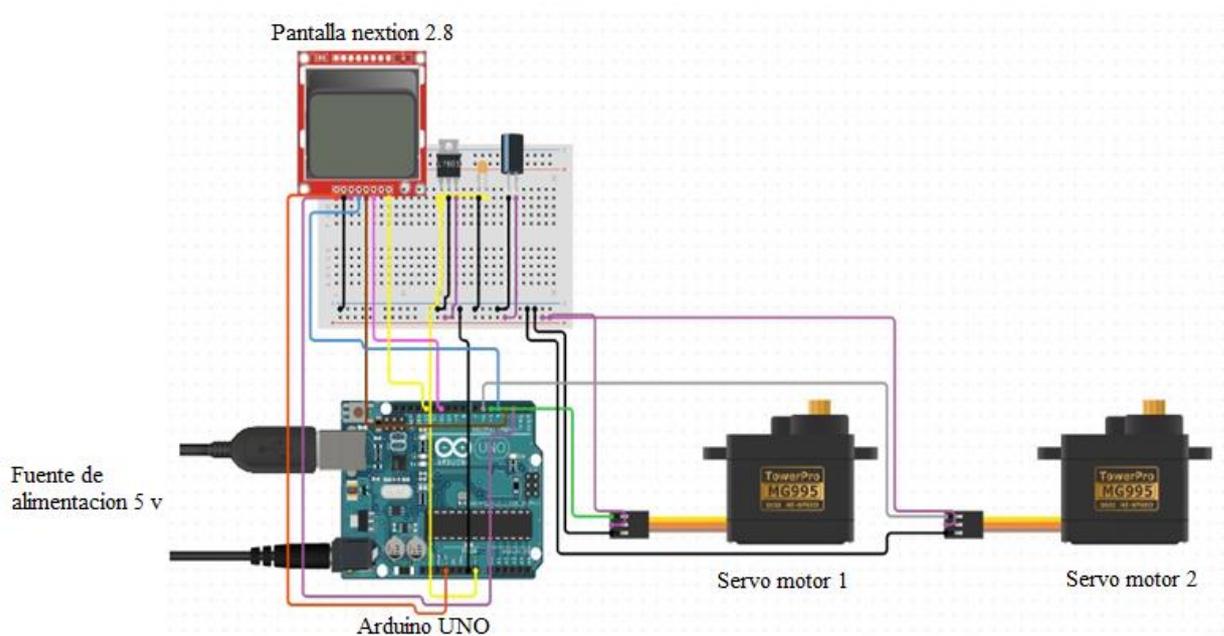
La identidad de los pacientes es reservada por lo que se los denotaron como paciente 1, 2, 3, 4, 5 y 6. Cada uno de ellos accedió de forma voluntaria a probar la prótesis.

El tiempo de uso por cada paciente está destinado por el médico fisioterapeuta de turno y se aplica hasta que el paciente recupere por lo menos en su 80% su movilidad y en casos llegar hasta el 100%.

Las pruebas fueron realizadas con personas de entre los 20 años a los 90 años de edad entre hombres y mujeres.

La rehabilitación se la realiza todos los días en un tiempo de 30 minutos entre los cuales se realiza 10 minutos de compresión y 20 minutos para rehabilitación ocupacional durante un lapso de 30 días, después de todo este proceso el médico encargado será quien haga un análisis del avance del paciente e indicando que si se debe continuar con el proceso o finalizarlo. Sin embargo todos los pacientes con este tipo de lesión tendrán el mismo mecanismo de rehabilitación durante el mes.

#### 4.3.7 DIAGRAMA DEL CIRCUITO



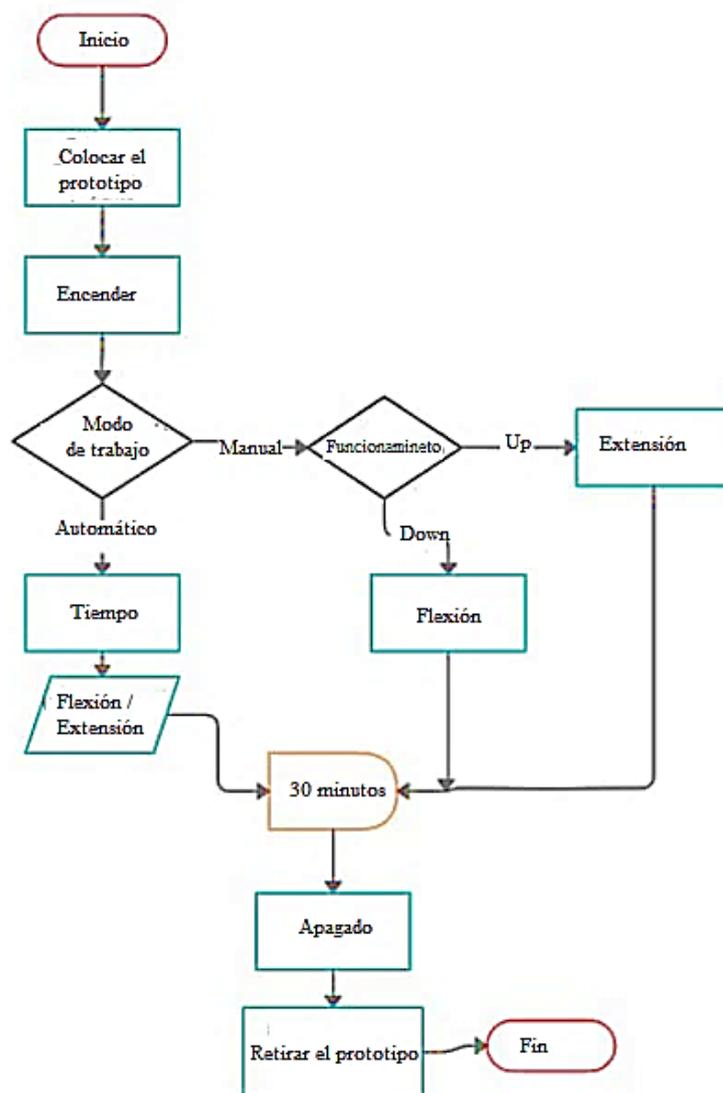
**Fig. 51:** Diagrama del circuito implementado

**Elaborado por:** Investigador

Para el diagrama del circuito se indica la conexión del Arduino UNO, Pantalla Nextion y Servomotores.

La interconexión entre estos tres elementos se las hace tomando en cuenta los data sheet de cada uno, logrando así un funcionamiento acorde a lo establecido y no causar daños al momento de conectarlos a la fuente de alimentación, estos tres elementos son las partes fundamentales del prototipo ya que de estas depende el correcto funcionamiento, la interacción con el usuario y el control por medio de la placa.

#### 4.3.8 DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO



**Fig. 52:** Diagrama de flujo del proceso

**Elaborado por:** Investigador

Para iniciar con los ejercicios de rehabilitación, en primera instancia se debe colocar el prototipo en la mano afectada, ajustarlo a la mano del paciente y encenderlo; luego se elige la forma de trabajo la cual puede ser manual o automático.

En modo manual se elige el número de veces que se desea realizar los movimientos, una vez establecido el movimiento al igual que la velocidad, el mecanismo empieza a funcionar, realizando movimientos de flexión y extensión hasta que concluya el ciclo establecido de repeticiones o hasta que el paciente lo detenga.

En modo automático se establece el tiempo de duración de la sesión conjuntamente con la velocidad de movimiento, en este modo el paciente no puede detener el funcionamiento mientras el tiempo no se haya cumplido.

En los dos modos el tiempo máximo de uso es de 30 minutos los cuales estableció el especialista (fisioterapeuta). Concluido la terapia de rehabilitación se procede a apagar por completo el prototipo y a su vez retirarlo de la mano del paciente de forma cuidadosa

#### **4.3.9 COSTOS DEL PROTOTIPO**

Al utilizar componentes existentes en nuestro medio y haciendo uso de Software y Hardware libre, se realizó la construcción del prototipo, cabe recalcar que el presente proyecto fue financiado por el investigador.

**Tabla 8.** Costos del prototipo.

N.º	ÍTEM	UNIDAD	VALOR INDIVIDUAL	VALOR	VALOR TOTAL
<b>1</b>	Sistema de control				
	Pantalla Nextion 2.0	1	\$ 25	\$ 25	\$ 50
	Arduino Uno	1	\$ 17	\$ 17	
	Tarjeta SD	1	\$ 8	\$ 8	
<b>2</b>	Materiales y Componentes				
	Servo motor	2	\$ 8	\$ 16	\$ 224
	Impresión laser	2	\$ 4	\$ 8	
	Impresión 3D	1	\$ 200	\$ 200	
<b>3</b>	Material de oficina				
	Lápiz	1	\$ 0.50	\$ 0.50	\$ 91.25
	Borrador	1	\$ 0.25	\$ 0.25	
	Regla	1	\$ 0.50	\$ 0.50	
	Papel	2	\$ 10	\$ 10	
	Impresiones	2	\$ 40	\$ 80	
<b>4</b>	Internet	300 horas	\$ 80		\$ 80
<b>5</b>	Transporte	60 días	\$ 1,50		\$ 90
<b>6</b>	Alimentación	60 días	\$ 2.50		\$ 150
			<b>Sub Total</b>		<b>\$ 685,25</b>
			<b>IVA (12%)</b>		<b>\$ 82,23</b>
			<b>TOTAL</b>		<b>\$ 767,48</b>
			<b>Imprevistos (10%)</b>		<b>\$ 76,75</b>
			<b>TOTAL</b>		<b>\$ 844.23</b>

## **CAPÍTULO V**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

#### **5.1 CONCLUSIONES**

Al terminar el diseño del prototipo se obtuvo como resultado un sistema compacto, ergonómico y de fácil uso para personas con poco conocimiento de aparatos utilizados para la rehabilitación, gracias a su pantalla touch el usuario pudo manipular con facilidad el sistema.

En las pruebas de funcionamiento del prototipo se observó que al utilizarlo en la rehabilitación de lesiones en las manos, por medio de los movimientos de flexión y extensión de los dedos, este permitió brindar una ayuda al especialista logrando así una mejor atención a los pacientes y un rápido servicio.

Por medio del uso del prototipo en el modo automático permite que el especialista determine el tiempo a utilizar el dispositivo en la rehabilitación, consiguiendo de esta manera que la persona a rehabilitarse tenga un mayor control.

Al final los pacientes que se beneficiaron del uso del prototipo mostraron con agrado el uso del sistema electrónico para la rehabilitación, de esta manera se brindó una ayuda a los pacientes y al fisioterapeuta.

## **5.2 RECOMENDACIONES**

Para la seccion de rehabilitacion el prototipo de estar sobre una superficie plana fija, ya que al funcionar los mecanismos del prototipo estos generan un movimiento no controlado por el sistema.

Para uso personal del paciente en el hogar, el dispositivo permita que el especialista tenga un acceso remoto para observar el tiempo de uso de las secciones programadas para los pacientes.

Al observar los resultados positivos del prototipo en pacientes mayores, en lo posterior desarrollar un sistema basado en el implementado para el uso de la rehabilitación de la mano en niños.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] R. Wittenauer, L. Smith, and K. Aden, “Update on 2004 Background Paper 6.12 Osteoarthritis,” pp. 2–23, 2013.
- [2] R. C. N. Prada Hernandez Dinorah, “Revista Cubana de,” *Rev. Cuba. Artritis Septica*, vol. 8, no. 1817–5996, p. 8, 2011.
- [3] D. Carolina and V. León, “Trauma en base a los reportes de los principales diarios de la ciudad de Cuenca,” 2014.
- [4] D. D. A. Javier, “Lesiones tendinosas de mano y muñeca en el ambito laboral,” *Articulo*, p. 45, 2008.
- [5] A. F. B. Azevedo *et al.*, “Quality of life of patients with rheumatoid arthritis under biological therapy,” *Rev. Assoc. Med. Bras.*, vol. 61, no. 2, pp. 126–131, 2015.
- [6] Asamblea Nacional del Ecuador, “Ley Orgánica de Transporte Terrestre, Tránsito y Seguridad Vial.,” *Ley Constituyente del Ecuador*, pp. 1–66, 2014.
- [7] OMS, “World report on child injury prevention,” *Inj. Prev.*, vol. 14, no. 1, pp. 69–69, 2008.
- [8] “Fracturas de la mano en la terapia física y rehabilitación: conceptos básicos, conceptos prácticos y visión general,” *El Resid.*, vol. 9, no. 1, pp. 4–8, 2014.
- [9] “Terapia ocupacional en la rehabilitación de la mano de pacientes tetrapléjicos = Occupational therapy in the rehabilitation of the hand quadriplegic patients,” *TOG Rev. Ter. Ocup. la APGTO*, no. 6, pp. 1–22, 2007.
- [10] H. García López and Universidad Católica San Antonio de Murcia (UCAM), “Fisioterapia en la artritis reumatoide,” *eFisioterapia.net*, 2009.
- [11] J. F. Ayala Lozano, G. Urriolagoitia Sosa, B. Romero Ángeles, C. R. Torres San-Miguel, L. A. Aguilar-Pérez, and G. M. Urriolagoitia-Calderón, “Diseño mecánico de un exoesqueleto para rehabilitación de miembro superior,” *Rev. Colomb. Biotecnol.*, vol. 17, no. 1, pp. 79–90, 2015.

- [12] F. Gal, “CONTROL DE UN EXOESQUELETO EXTREMIDADES SUPERIORES Frank Galán-Cutipa,” 2017.
- [13] R. Hernández, “Manejo rehabilitatorio temprano de mano traumática con amputaciones parciales de dedos,” *El Resid.*, vol. III, no. 44, pp. 43–52, 2008.
- [14] G. Chavarría León, “Anatomía de mano,” 2016.
- [15] P. Clave, “A. I. Kapandji FISIOLOGÍA ARTICULAR,” pp. 2–4, 2012.
- [16] F. D. E. I. Mecánica, “Escuela politécnica nacional,” 2018.
- [17] B. Carri-, “De Traumatolog ~ a Y Ortopedia,” 2001.
- [18] P. Heo, G. M. Gu, S. jin Lee, K. Rhee, and J. Kim, “Current hand exoskeleton technologies for rehabilitation and assistive engineering,” *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, vol. 13, no. 5, pp. 807–824, 2012.
- [19] I. Balears, “Artrosis de mano y fisioterapia,” *High. Educ.*, vol. 2008, pp. 1–3, 2007.
- [20] L. Amparo, A. López, M. Segundo, S. Maestría, and H. Departamento, “ARTÍCULO ORIGINAL B biomecánica y patrones funcionales de la mano,” vol. 4, no. 1, pp. 14–24, 2012.
- [21] E. L. Perfil and P. Del, “Universidad Nacional Autónoma de México Facultad de Estudios Superiores Iztacala SEXUAL,” vol. 2014, 2011.
- [22] P. Mesa del Castillo, “De La Mano Hacia La Enfermedad Reumatica,” 2016.
- [23] M. A. M. Gignac, D. Sutton, and E. M. Badley, “Reexamining the arthritis-employment interface: Perceptions of arthritis-work spillover among employed adults,” *Arthritis Care Res.*, vol. 55, no. 2, pp. 233–240, 2006.
- [24] I. Raudales Díaz, “Imágenes diagnósticas: conceptos y generalidades,” *Rev. Fac. Ciencias Médicas*, pp. 35–43, 2014.
- [25] M. Martínez Matheus and A. Rios Rincón, “Revisiones La tecnología en rehabilitación: una aproximación conceptual,” *Rev. Ciencias la Salud*, vol. 4, no. 2, pp. 98–108, 2006.

- [26] P. L. Magaña, “Para El Tratamiento De La Enfermedad Vascul ar Cerebral : Revisión,” vol. 27, no. 2, pp. 44–48, 2015.
- [27] S. Edition, *Introduction to Biomedical Engineering Technology, Second Edition*. 2018.
- [28] C. Universitario, U. Texcoco, P. D. E. Instalacion, D. E. U. N. A. Red, and I. Para, “UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO. Centro Universitario UAEM Texcoco.,” *Director*, pp. 2006–2012, 2012.
- [29] Daniel González, “Software libre en los institutos,” vol. 1, pp. 1–147, 2004.
- [30] G. Valencia, “Unidad 1. Software Libre y el Sistema Operativo Ubuntu,” p. 29, 2015.
- [31] M. A. Martínez, “El conocimiento: su naturaleza y principales herramientas de su gestión,” *Encuentros Multidiscip.*, no. 36, pp. 1–16, 2016.
- [32] I. González, J. González, and F. Gómez Arribas, “Hardware Libre : Clasificación y Desarrollo de Hardware Reconfigurable en Entornos GNU / Linux,” *Univ. Autónoma Madrid, Spain*, pp. 1–13, 2003.
- [33] A. Lazalde, J. Torres, and D. Vila-Viñas, “Hardware libre Recomendaciones para el fomento de la innovación ciudadana,” *Proy. Buen Conoc. / FLOK Soc. Inst. Altos Estud. Nac. Quito*, 2015.
- [34] J. Luis and A. Velázquez, “Lenguaje de Programación: Introducción a C/C++(IDE),” 2010.
- [35] U. Departamento de Electrónica de la Universidad Técnica Federico Santa María, “Utfsm diciembre 2003,” pp. 2–4, 2003.
- [36] R. El and P. D. E. Mushuñan, “Escuela politécnica nacional,” 2017.
- [37] D. Waelder, L. – E3086221, T. L. Periféricos, and L. Página, “Tecnología LCD,” 2002.
- [38] D. Berthelette and D. Berthelette, “Pantallas de visualizacion de datos.”
- [39] H. En and L. Las, “las lesiones de la mano en urgencias,” pp. 363–372.

- [40] S. Brorsson, *Biomechanical studies of finger extension function*. .
- [41] R. Conti, E. Meli, and A. Ridolfi, “A novel kinematic architecture for portable hand exoskeletons Mechatronics A novel kinematic architecture for portable hand exoskeletons,” no. May, 2016.
- [42] E. Lugo, “Resumen,” no. October, 2017.
- [43] O. Sandoval-Gonzalez *et al.*, “Design and development of a hand exoskeleton robot for active and passive rehabilitation,” *Int. J. Adv. Robot. Syst.*, vol. 13, no. 2, 2016.
- [44] J. P. Baeza, “Manual de arduino,” *Grup. Innovación Educ. en Automática. Univ. Alcalá. España*, vol. 1, p. 2, 2009.
- [45] Ing. Marone José, “Microcontroladores de Atmel Familia AVR,” p. 25.
- [46] M. A. Perales, F. J. Barrero, and S. L. Toral, “Análisis comparativo de distintas plataformas para la enseñanza de Sistemas Electrónicos Digitales,” *TAAE 2016 XII Congr. Tecnol. Apl. a la Enseñanza la Electrónica Libr. Actas*, no. June, pp. 26–33, 2016.
- [47] S. Guide, “Getting Started with the MSP430 Launchpad,” *Get. Started with MSP430 Launchpad*, no. October, 2016.
- [48] P. Aguayo, “Introducción al microcontrolador,” pp. 1–15, 2004.
- [49] M. Fezari and A. Al Dahoud, “Integrated Development Environment ‘ IDE ’ For Arduino,” *ResearchGate*, no. October, pp. 1–12, 2018.
- [50] R. ENRIQUEZ HERRADOR, “Guía de Usuario de Arduino,” *Univ. Cordoba*, vol. 1, pp. 8–10, 2009.
- [51] Arduino, “Arduino IDE,” *Internet*, p. 1, 2017.
- [52] Futaba, “S3003 futaba servo,” p. 3003, 2016.
- [53] H. Torque, “MG996R High Torque Metal Gear Dual Ball Bearing Servo,” *Electonic Caldas*, no. 6 V, pp. 1–10, 2015.

- [54] dfrobot.com, “Hitec HS422 Servo (SKU:SER0002),” pp. 2–4, 2017.
- [55] ITEAD Wiki, “Nextion HMI Solution,” pp. 7–9, 2017.
- [56] P. Brief, “2.8” microLCD.”
- [57] ILITEK, “Datasheet ILI9341,” no. 38, pp. 1–233, 2015.
- [58] D. Date and D. Revision, “2.8” micro LCD PICASO Display,” no. May, pp. 1–23, 2017.
- [59] L. C. D. Module, “Specifications, product: LCD module, model No. TJC-9341-032.”
- [60] L. A. Producción and D. E. A. Caliente, “ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación “ CONTROL DE TEMPERATURA DEL SISTEMA AUXILIAR DE UN PROCESO SOLAR TÉRMICO PARA Previo a la obtención del Título de : INGENIERO EN ELECTRICIDAD , ELECTRÓNICA Y AU,” 2018.
- [61] T. Bars, “Nextion Editor Quick Start Guide - ITEAD Wiki,” pp. 1–16, 2016.
- [62] SolidWorks Corporation, “Introducción a Solidworks,” *Solidworks*, p. 134, 2015.

## ANEXO 1

A continuación, se detalla el diagnóstico médico que recibieron los pacientes en el momento de ser atendidos por el personal especializado.

### **Paciente 1:**

**Paciente:** Mujer de 45 años

**Diagnóstico:** Lesión del gancho ganchoso producida por una caída.

**Tratamiento:** Utilización de un inmovilizador (yeso) durante 8 semanas con un control periódico cada 15 días.

**Resultado:** Presenta un rango limitado de movilidad ocasionada por la utilización del inmovilizador, por lo cual la paciente requiere de terapia física para ayudar a la rehabilitación.



**Fig. 53:** Mano extendida correspondiente al paciente 1

**Elaborado por:** Investigador



**Fig. 54:** Mano flexionada correspondiente al paciente 1

**Elaborado por:** Investigador

## **Paciente 2:**

***Paciente:*** Hombre de 87 años

***Diagnóstico:*** Dificultad para mover los dedos y deformidad producida por una enfermedad degenerativa conocida por artrosis.

***Tratamiento:*** Consumo de medicamentos conjuntamente con rehabilitación.

***Resultado:*** Disminuir el dolor y mejorar la movilidad de la mano por cada sesión de terapia física. El paciente inicia hace 3 semanas el proceso de rehabilitación con el prototipo y asegura que los movimientos regresan, sin embargo, al ser una enfermedad en estado agudo la rehabilitación será de un aproximado de 6 meses.



**Fig. 55:** Mano flexionada correspondiente al paciente 2

**Elaborado por:** Investigador



**Fig. 56:** Mano extendida correspondiente al paciente 2

**Elaborado por:** Investigador

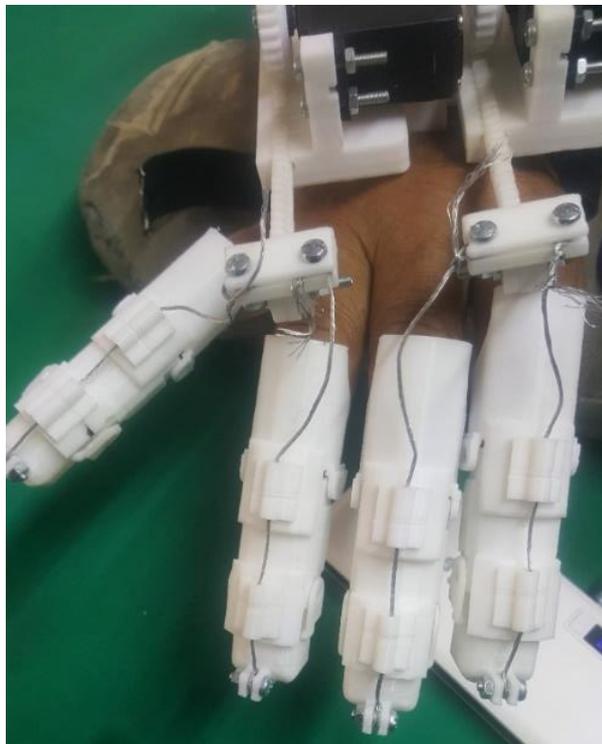
**Paciente 3:**

***Paciente:*** Hombre de 69 años

***Diagnóstico:*** Dolor y rigidez en los dedos causada por la artrosis

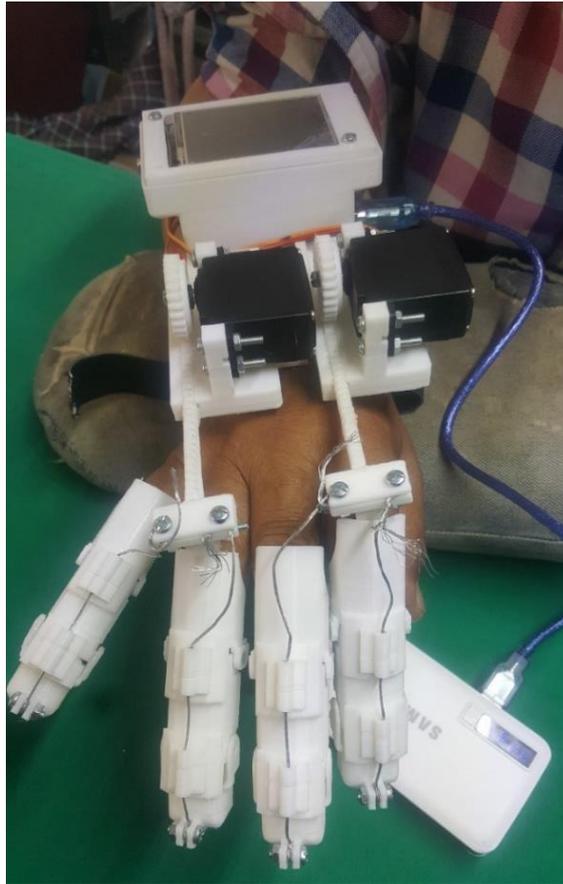
***Tratamiento:*** Asistir a terapia física y consumo de analgésicos

***Resultado:*** Pérdida de dolor con el consumo de los fármacos medicados y movimiento de los dedos asistiendo a rehabilitación siendo que la rigidez fue tratada a tiempo el tiempo estimado de rehabilitación es de 3 meses. El paciente lleva 8 semanas de rehabilitación 5 semanas con equipos disponibles en la entidad y 3 semanas con el uso del prototipo observando en estos últimos días resultados satisfactorios.



**Fig. 57:** Mano flexionada correspondiente al paciente 3

**Elaborado por:** Investigador



**Fig. 58:** Mano extendida correspondiente al paciente 3  
**Elaborado por:** Investigador

#### **Paciente 4:**

***Paciente:*** Mujer de 57 años

***Diagnóstico:*** Herida corto punzante causando parálisis del nervio radial provocando la inmovilidad de mano y dedos

***Tratamiento:*** Una vez cicatrizada la herida asistir a rehabilitación

***Resultado:*** la paciente empieza con terapia 3 meses después cicatrizar la herida por que ya no presenta dolor en el momento de empezar con los ejercicios de rehabilitación, en las 6 primeras semanas se nota un ligero avance en el movimiento después de ello se adopta el uso del prototipo en la que en las 2 semanas siguientes se observa que se mejora notablemente la movilidad.



**Fig. 59:** Mano extendida correspondiente al paciente 4  
**Elaborado por:** Investigador



**Fig. 60:** Mano flexionada correspondiente al paciente 4  
**Elaborado por:** Investigador

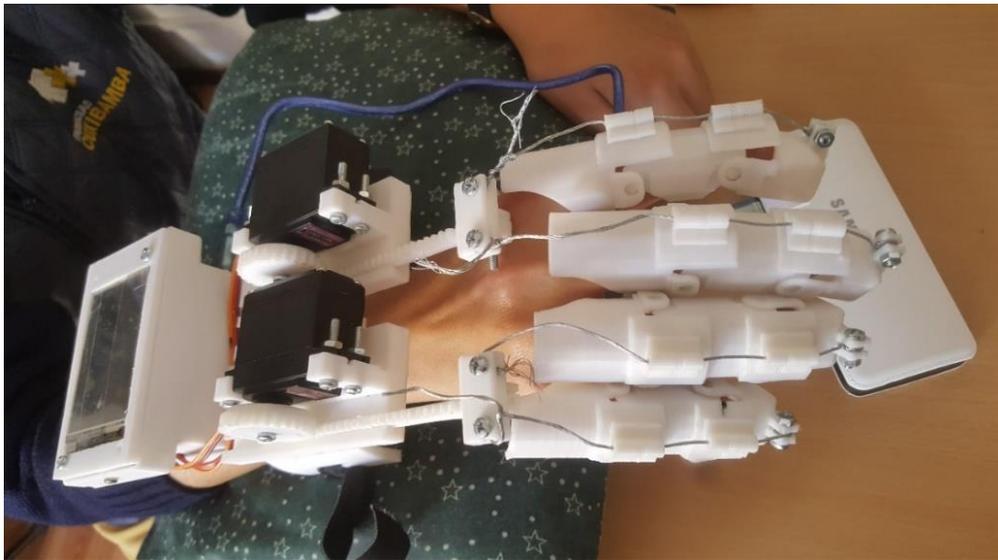
**Paciente 5:**

***Paciente:*** Hombre de 22 años

***Diagnóstico:*** Fractura de mano catalogada como lesión aguda por haber sufrido varias lesiones de los cartílagos en la misma.

***Tratamiento:*** Colocar yeso sobre la mano y muñeca por 2 meses.

***Resultado:*** Mantener firme una extremidad por largos periodos de tiempo provoca perdida de movimiento en la parte afectada por lo que se recomienda tomar rehabilitación, el tiempo estimado para este caso estará ligado a los resultados que se vayan obteniendo mes a mes después de haber cumplido con el horario establecido. El paciente usa el prototipo por 1 semana en tratamiento.



**Fig. 61:** Mano flexionada correspondiente al paciente 5

**Elaborado por:** Investigador



**Fig. 62:** Mano extendida correspondiente al paciente 5

**Elaborado por:** Investigador

### **Paciente 6:**

***Paciente:*** Mujer de 39 años

***Diagnóstico:*** Fisura del dedo medio e índice catalogado como lesión leve de mano.

***Tratamiento:*** Mantener los dos dedos de la mano con una férula asistiendo a control cada 3 semanas.

***Resultado:*** Rigidez en el dedo medio y en el dedo índice de la mano, lo que propone recibir rehabilitación. Este paciente empieza su tratamiento usando el prototipo con un tiempo de 3 semanas en las que se ha notado que se ha recuperado en un 80% su movilidad.



**Fig. 63:** Mano flexionada correspondiente al paciente 6  
**Elaborado por:** Investigador



**Fig. 64:** Mano extendida correspondiente al paciente 6  
**Elaborado por:** Investigador

## ANEXO 2

### PROGRAMACIÓN

```
#include <Nextion.h>
```

```
#include <Servo.h>
```

```
Servo myservo1;
```

```
Servo myservo2; // crea el objeto servo
```

```
int pos = 0; // posicion del servo
```

```
int counter = 0;
```

```
int secuencia = 0;
```

```
long tiempo=5;
```

```
int ciclos=1;
```

```
int aux=0;
```

```
int ciclos2=0;
```

```
NexDSButton bt10 = NexDSButton(1, 10, "bt0");
```

```
NexButton b12 = NexButton(1, 3, "b2");
```

```
NexButton b13 = NexButton(1, 4, "b3");
```

```
NexSlider h10 = NexSlider(1, 5, "h0");
```

```
NexNumber n10 = NexNumber(1,2,"n0");
```

```
NexNumber n11 = NexNumber(1,8,"n1");
```

```
NexNumber n12 = NexNumber(1,11,"n2");
```

```
NexDSButton bt20 = NexDSButton(2, 11, "bt0");
```

```
NexButton b22 = NexButton(2, 3, "b2");
```

```
NexButton b23 = NexButton(2, 4, "b3");
```

```
NexSlider h20 = NexSlider(2, 5, "h0");
```

```
NexNumber n20 = NexNumber(2,2,"n0");
```

```
NexNumber n21 = NexNumber(2,8,"n1");
```

```
NexNumber n22 = NexNumber(2,12,"n2");
```

```
NexPage page1 = NexPage(1, 0, "page1");
```

```
NexPage page2 = NexPage(2, 0, "page2");
```

```
NexTouch *nex_listen_list[] =
```

```
{
```

```
    &bt10, // Boton
```

```
    &b12,
```

```
    &b13,
```

```
    &h10,
```

```
    &n10,
```

```
    &n11,
```

```
    &n12,
```

```
    &bt20, // Boton
```

```
    &b22,
```

```
    &b23,
```

```
&h20,  
&n20,  
&n21,  
&n22,  
  
&page1,  
&page2,  
NULL  
};
```

```
void pos1(){  
//varia la posicion de 0 a 180, con esperas de 15ms  
for (pos = 0; pos <= 180; pos += 1)  
{  
myservo1.write(pos);  
myservo2.write(pos);  
delay(tiempo);  
}  
delay(2000);  
}
```

```
void pos2(){
```

```

//varia la posicion de 0 a 180, con esperas de 15ms

for (pos = 180; pos >= 0; pos -= 1)
{
    myservo1.write(pos);
    myservo2.write(pos);
    delay(tiempo);
}

delay(2000);
}

```

```

void bt10PopCallback(void *ptr)
{
    while(aux=1 && secuencia<ciclos){
        uint32_t number5 = 0;
        bt10.getValue(&number5);
        if(number5 == 1){
            digitalWrite(13, HIGH);
            bt10.setText("STOP");
            switch(counter){
                case 1:
                    tiempo=30;
                    break;
                case 2:

```

```
    tiempo=25;

    break;

    case 3:

    tiempo=20;

    break;

    case 4:

    tiempo=15;

    break;

}

aux=1;

pos1();

pos2();

secuencia = secuencia + 1;

n12.setValue(secuencia);

//repetir1();

}else{

    digitalWrite(13, LOW);

    secuencia=0;

    aux=0;

    n12.setValue(0);

    bt10.setText("PLAY");

}

}

n12.setValue(0);
```

```

    bt10.setText("PLAY");

    bt10.setValue(0);

}

void bt20PopCallback(void *ptr) // Release event for dual state button bt0

{

    aux=1;

    while(aux=1){

        uint32_t number5 = 0; // Create variable to store value we are going to get

        bt20.getValue(&number5); // Read value of dual state button to know the state (0
or 1)

        if(number5 == 1){ // If dual state button is equal to 1 (meaning is ON)...

            digitalWrite(13, HIGH); // Turn ON internal LED

            bt20.setText("STOP");

            switch(counter){

                case 1:

                    tiempo=10;

                    break;

                case 2:

                    tiempo=20;

                    break;

                case 3:

                    tiempo=30;

```

```

    break;

    case 4:

    tiempo=40;

    break;

    }

    aux=1;

    pos1();

    pos2();

    secuencia = secuencia + 1;

    n12.setValue(secuencia);

}else{ // Since the dual state button is OFF...

    digitalWrite(13, LOW); // Turn OFF internal LED

    bt20.setText("PLAY");

    secuencia=0;

    aux=0;

    n22.setValue(0);

    }

    }

    n22.setValue(0);

    bt20.setText("PLAY");

    bt20.setValue(0);

}

```

```
void b13PushCallback(void *ptr)
```

```
{  
  
    counter = counter - 1;  
  
    n10.setValue(counter);  
  
    if (counter<=1){  
        counter=5;  
    }  
}
```

```
void b23PushCallback(void *ptr)
```

```
{  
  
    counter = counter - 1;  
  
    n20.setValue(counter);  
  
    if (counter<=1){  
        counter=5;  
    }  
}
```

```
void b12PushCallback(void *ptr)
```

```
{  
  
    counter = counter + 1;  
  
    n10.setValue(counter);  
  
    if (counter>=4){  
        counter=0;  
    }  
}
```

```

    }
}

void b22PushCallback(void *ptr)
{
    counter = counter + 1;
    n20.setValue(counter);
    if (counter>=4){
        counter=0;
    }
}

```

```

void h10PopCallback(void *ptr)
{
    uint32_t number2 = 0;
    h10.getValue(&number2);
    if(number2==0){
        h10.getValue(&number2);
    }
    if(number2==0){
        h10.getValue(&number2);
    }
    if(number2==0){
        h10.getValue(&number2);
    }
}

```

```
}  
  
if(number2==0){  
    h10.getValue(&number2);  
}
```

```
}  
  
if(number2==0){  
    h10.getValue(&number2);  
}
```

```

}

if(number2==0){

    h10.getValue(&number2);

}

if(number2==0){

    h10.getValue(&number2);

}

ciclos=number2;

}

void h20PopCallback(void *ptr)

{

    uint32_t number2 = 0;

    h20.getValue(&number2);

if(number2==0){

    h20.getValue(&number2);

}

if(number2==0){

    h20.getValue(&number2);

}

if(number2==0){

    h20.getValue(&number2);

}

```

```
if(number2==0){  
    h20.getValue(&number2);  
}  
  
if(number2==0){  
    h20.getValue(&number2);  
}
```

```
if(number2==0){  
    h20.getValue(&number2);  
}  
  
if(number2==0){  
    h20.getValue(&number2);  
}
```

```
if(number2==0){  
    h20.getValue(&number2);  
}  
  
if(number2==0){  
    h20.getValue(&number2);  
}  
  
ciclos=number2;  
}
```

void page1PushCallback(void \*ptr) // If page 1 is loaded on the display, the following is going to execute:

```
{  
counter =0;  
secuencia=0;  
aux=0;  
}
```

void page2PushCallback(void \*ptr) // If page 1 is loaded on the display, the following is going to execute:

```
{  
counter =0;  
secuencia=0;  
aux=0;  
}
```

```
void setup() {  
  
  Serial.begin(9600);  
  
  delay(500);  
  
  Serial.print("baud=115200");  
  
  Serial.write(0xff);  
  
  Serial.write(0xff);  
  
  Serial.write(0xff);  
  
  Serial.end();  
  
  Serial.begin(115200);  
  
  
  bt10.attachPop(bt10PopCallback);  
  
  b12.attachPush(b12PushCallback);  
  
  b13.attachPush(b13PushCallback);  
  
  h10.attachPop(h10PopCallback);  
  
  
  bt20.attachPop(bt20PopCallback);  
  
  b22.attachPush(b22PushCallback);  
  
  b23.attachPush(b23PushCallback);  
  
  h20.attachPop(h20PopCallback);  
  
  
  page1.attachPush(page1PushCallback);  
  
  page2.attachPush(page2PushCallback);  
  
}
```

```
pinMode(13, OUTPUT);

myservo1.attach(9);

myservo2.attach(10); // vincula el servo al pin digital 9

myservo1.write(0);

myservo2.write(0);

}

void loop() {

delay(30);

nexLoop(nex_listen_list);

}
```

## ANEXO 3

### MANUAL PARA USUARIO

### SISTEMA ELECTRÓNICO PARA LA DE REHABILITACIÓN DE MANO



**Fig. 65:** Prototipo

**Elaborado por:** Investigador

### COLOCAR LA PRÓTESIS

Introduzca la mano afectada en la estructura.

Coloque los dedos del paciente en la prótesis de forma que se colocara un guante

Ajuste la prótesis a la altura adecuada y ajústela.

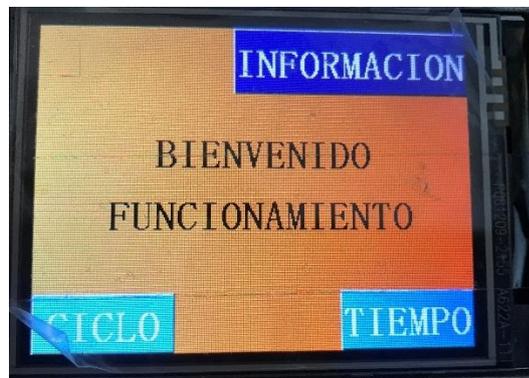


**Fig. 66:** Mensaje de bienvenida  
**Elaborado por:** Investigador

## **ENCENDIDO**

Conecte el cable de alimentación al dispositivo, luego mueva el interruptor a la posición de ON.

En la pantalla se mostrará un mensaje de bienvenida, además de opciones de trabajo.



**Fig. 67:** Pantalla principal  
**Elaborado por:** Investigador

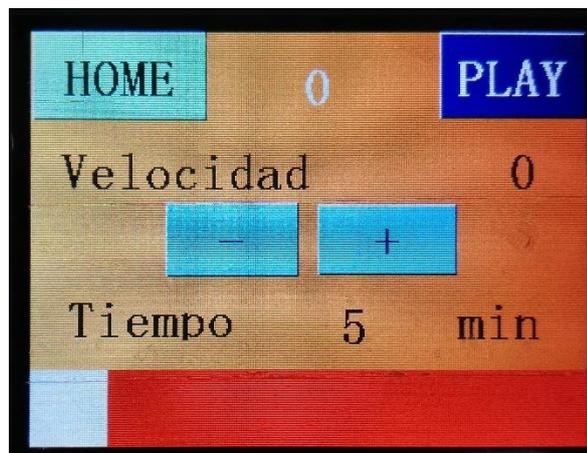
## **FUNCIONAMIENTO**

### **Opción 1: TIEMPO**

El usuario determinara el tiempo que desea trabajar con la prótesis hasta un estimado de treinta minutos los cuales son establecidos por el médico especialista.

La prótesis empezara a realizar los movimientos de forma automática hasta cumplir con el tiempo establecido anteriormente.

Completado el tiempo establecido el mecanismo se detendrá automáticamente.



**Fig. 68:** Interfaz opcion tiempo

**Elaborado por:** Investigador

### **Opción 2: CICLOS**

El usuario controla la velocidad a la que desea trabajar con la prótesis; es decir que los movimientos sean más rápidos o más lentos.

Además de controlar el número de repeticiones que se requiera.



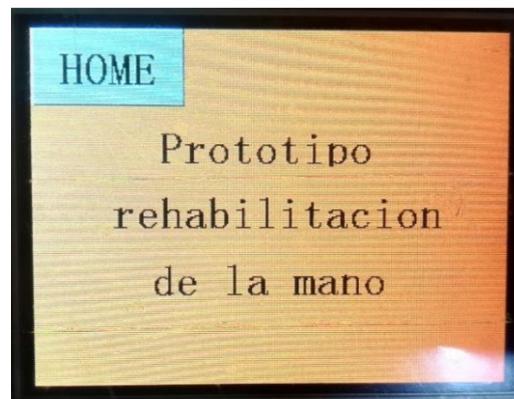
**Fig. 69:** Interfaz grafica opcion ciclo

**Elaborado por:** Investigador

## INFORMACIÓN

Presenta el mensaje de ingreso al sistema de rehabilitación.

Presione home para regresar al menú principal



**Fig. 70:** Interfaz grafica sobre informacion de la prótesis

**Elaborado por:** Investigador

## APAGADO

Con precaución mueva el interruptor en la posición de OFF para apagar el dispositivo, luego desconecte el cable de alimentación.

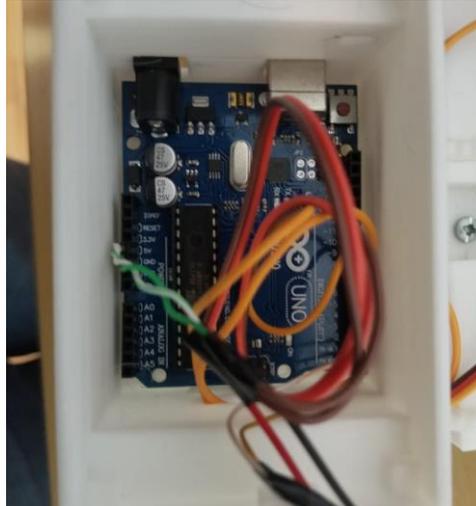
Retire cada uno de los dedos cuidadosamente.

Retire la prótesis de la mano del paciente.

Guarde con cuidado.

## ANEXO 4

### MONTAJE FINAL DEL PROTOTIPO



**Fig. 71:** Placa de control Arduino UNO colocada dentro del prototipo.

**Elaborado por:** Investigador

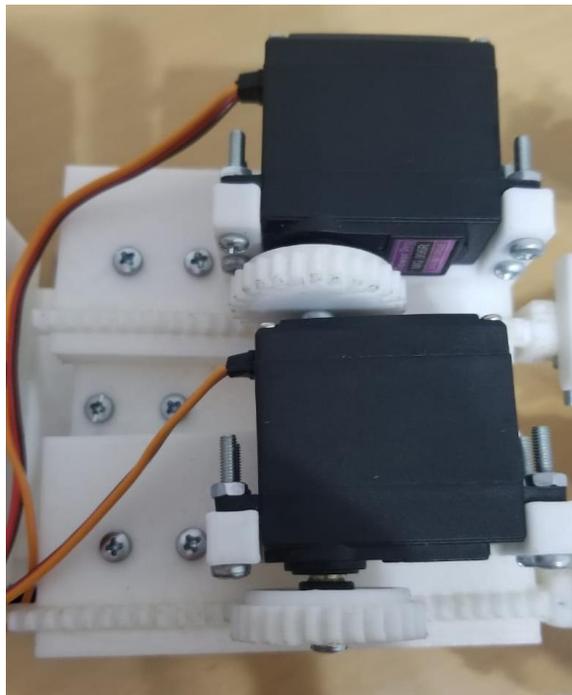


**Fig. 72:** Pantalla HMI Nextion.

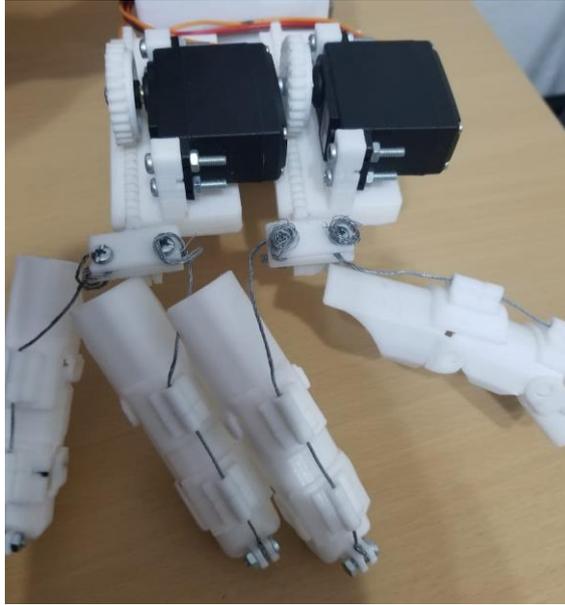
**Elaborado por:** Investigador



**Fig. 73:** Estructura de los dedos ensamblada.  
**Elaborado por:** Investigador



**Fig. 74:** Mecanismo de movimiento.  
**Elaborado por:** Investigador



**Fig. 75:** Estructura de los dedos junto con el mecanismo de movimiento.  
**Elaborado por:** Investigador



**Fig. 76:** Soporte para la colocación del antebrazo.  
**Elaborado por:** Investigador



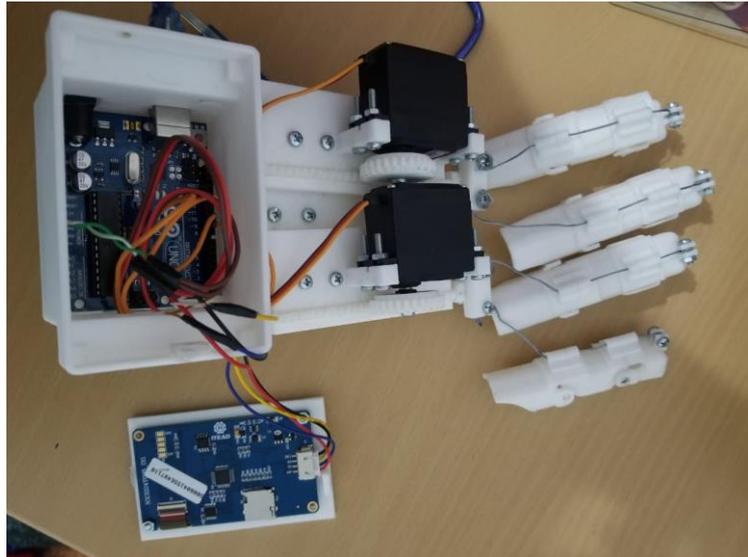
**Fig. 77:** Puertos de alimentacion.

**Elaborado por:** Investigador



**Fig. 78:** Boton de encendido y apagado.

**Elaborado por:** Investigador



**Fig. 78:** Protesis Armada  
**Elaborado por:** Investigador



**Fig. 80:** Protesis final.  
**Elaborado por:** Investigador

## ANEXO 5

Ambato, 10 de diciembre de 2019

### INFORME MEDICO

Previo al análisis realizado por el fisioterapeuta del Hospital Municipal Nuestra Señora de la Merced en base a la evaluación que se realizó sobre la prótesis propuesta por el estudiante como proyecto de titulación con el tema "SISTEMA ELECTRÓNICO PARA LA REHABILITACIÓN DE MANO", se considero que el prototipo es apto para tratar lesiones de:

- Fractura de Muñeca
- Parálisis del nervio radial
- Recuperación y funcionamiento en pacientes con artrosis de manos



## ANEXO 6

Ambato, 13 de diciembre de 2019

### INFORME

Los pacientes que necesitan rehabilitación deben acudir a la terapia un día por semana durante un mes completo.

Cada sesión tiene un tiempo estimado de 30 minutos de los cuales 10 minutos son para compresión y los 20 minutos restantes se hace rehabilitación ocupacional.

