

**DISPOSITIVO MECATRÓNICO TERAPÉUTICO EN PERSONAS CON  
ARTROSIS EN MANOS**

**MARÍA PAULA HUERTAS NIÑO  
BYRON DANIEL OSPINO ARENILLA**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL CARIBE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA  
BARRANQUILLA – COLOMBIA  
2020**

**DISPOSITIVO MECATRÓNICO TERAPÉUTICO EN PERSONAS CON  
ARTROSIS EN MANOS**

**MARÍA PAULA HUERTAS NIÑO  
BYRON DANIEL OSPINO ARENILLA**

**Trabajo de grado presentado para optar al título de  
Ingeniero Mecatrónico**

**ASESORES DISCIPLINARES:  
ING. CARLOS GABRIEL DÍAZ SAENZ, MSc.  
ING. PABLO DANIEL BONAVERI, PhD.**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL CARIBE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA  
BARRANQUILLA - COLOMBIA  
2020**

**Nota de aceptación**

---

---

---

---

---

---

---

Firma del jurado 1

---

Firma del jurado 2

## DEDICATORIA

## TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS.....	7
LISTA DE TABLAS .....	9
LISTA DE ECUACIONES.....	10
GLOSARIO.....	11
RESUMEN .....	12
ABSTRACT.....	12
INTRODUCCIÓN.....	13
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	14
1.1. ANTECEDENTES.....	15
1.1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	17
1.2. JUSTIFICACIÓN Y ALCANCE.....	17
2. OBJETIVOS.....	19
2.1. OBJETIVO GENERAL .....	19
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	19
3. MARCO DE REFERENCIA .....	20
3.1. ESTADO DEL ARTE.....	20
3.2. MARCO TEÓRICO.....	25
3.2.1 ARTICULACIONES Y SISTEMA ESQUELÉTICO.....	25
3.2.2 ENFERMEDADES REUMÁTICAS .....	26
3.2.3 ARTROSIS EN MANOS .....	30
3.2.4 MÉTODOS DE REHABILITACIÓN PARA LA ARTRÓISIS .....	31
3.2.5 TERAPIAS A PARTIR DE FENÓMENOS FÍSICOS.....	35
3.2.6 TERMOTERÁPIA.....	38
3.2.7 ELECTROTHERÁPIA .....	39
3.2.8 ACTUADORES.....	40
3.2.9 SISTEMAS NEUMÁTICOS.....	41
3.2.10 ACTUADORES BLANDOS.....	42
3.2.11 ROBÓTICA BLANDA.....	43
4. PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO.....	46
4.1. METODOLOGÍA .....	46
4.2. TIPO DE ESTUDIO.....	47
4.3. CRONOGRAMA – PLAN DE TRABAJO .....	47

5.	PRESUPUESTO .....	49
5.1.	PRESUPUESTO GENERAL .....	49
5.2.	PERSONAL CIENTÍFICO Y DE APOYO .....	50
5.3.	CONSULTORIA ESPECIALIZADA .....	51
5.4.	MATERIALES, INSUMOS Y EQUIPOS .....	51
6.	PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	54
6.1.	DISEÑO DEL PROTOTIPO .....	54
6.2.	DISEÑO DISPOSITIVO FINAL.....	58
6.2.1.	Guante .....	59
6.2.2.	Caja de control.....	59
6.3.	MATERIALES.....	60
6.3.1.	COMPRESOR DE AIRE.....	60
6.3.2.	SILICONA + CATALIZADOR.....	61
6.3.3.	MOLDES EN IMPRESIÓN 3D.....	62
6.3.4.	VÁLVULAS SOLENOIDES.....	62
6.4.	RECOLECCIÓN DE DATOS.....	64
6.4.1.	MUESTRA POBLACIONAL .....	64
6.5.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	66
6.5.1.	ANÁLISIS DE LAS PRUEBAS REALIZADAS POR EL PROTOTIPO .....	66
6.5.2.	ANÁLISIS DE LAS PRUEBAS REALIZADAS POR EL DISPOSITIVO FINAL.....	67
6.6.	MANUAL DE USUARIO .....	72
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	73
	BIBLIOGRAFÍA .....	74
	ANEXOS.....	82

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Articulaciones afectadas por la artrosis en manos [33].....	30
Figura 2. Ejercicio de tracción articular para los dedos (propia autoría).....	32
Figura 3. Ejercicio de tracción articular para la muñeca (propia autoría).....	32
Figura 4. Ejercicio de los extensores de los dedos (propia autoría).....	32
Figura 5. Ejercicio de lumbricales para manos (propia autoría).....	33
Figura 6. Ejercicio de apertura y cierre de mano (propia autoría).....	33
Figura 7. Ejercicios de pinzas para manos (propia autoría).....	33
Figura 8. Ejercicio de movilización para dedos (propia autoría).....	34
Figura 9. Ejercicio de movilización para dedos de mayor intensidad (propia autoría).....	34
Figura 10. Diferentes formas de transferencia de calor [29].....	35
Figura 11. Principio de pascal aplicado a una prensa hidráulica [37].....	41
Figura 12. Tentáculo de silicona [54].....	42
Figura 13. Actuador blando [51].....	43
Figura 14. Doblado de actuador blando [52].....	44
Figura 15. Tornillo ventilado en un actuador blando [51].....	45
Figura 16. Plan de trabajo 1 (propia autoría).....	47
Figura 17. Plan de trabajo 2 (propia autoría).....	48
Figura 18. Plan de trabajo 3 (propia autoría).....	48
Figura 19. Vista lateral del actuador blando en su posición inicial (simulación).....	54
Figura 20. Vista lateral del actuador blando en su posición final (simulación).....	54
Figura 21. Vista lateral del actuador blando factor de seguridad.....	55
Figura 22. Vista isométrica del actuador blando factor de seguridad.....	55
Figura 23. Deformación unitaria (vista isométrica).....	56
Figura 24. Moldes para fabricación de los actuadores (SolidWorks).....	57
Figura 25. Prototipo inicial.....	57
Figura 26. Prueba 1 del prototipo inicial.....	57
Figura 27. Prueba 2 del prototipo inicial.....	58
Figura 28. Prueba prototipo inicial 2 (lateral).....	58
Figura 29. Prueba prototipo inicial 2 (inferior).....	58
Figura 30. Dimensiones del guante.....	59
Figura 31. Compresor de aire.....	60
Figura 32. Silicona S830 + catalizador 3%.....	61
Figura 33. Válvulas solenoides.....	62
Figura 34. Fuente conmutada.....	63
Figura 35. Módulo lm2596 reductor de voltaje.....	63
Figura 36. Módulo xl6009 elevador de voltaje.....	64
Figura 37. Shield display lcd 2x16 azul con keypad.....	64
Figura 38. Edades de los encuestados.....	65
Figura 39. Género de los encuestados.....	65
Figura 40. Afirmación No. 1 de la encuesta.....	68
Figura 41. Afirmación No. 2 de la encuesta.....	68
Figura 42. Afirmación No. 3 de la encuesta.....	69

Figura 43. Afirmación No. 4 de la encuesta.....	70
Figura 44. Afirmación No. 5 de la encuesta.....	70
Figura 45. Afirmación No. 6 de la encuesta.....	71
Figura 46. Afirmación No. 7 de la encuesta.....	71
Figura 47. Afirmación No. 8 de la encuesta.....	72

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Presupuesto general. ....	49
Tabla 2. Costo personal científico. ....	50
Tabla 3. Costo personal de apoyo. ....	50
Tabla 4. Costo consultoría especializada. ....	51
Tabla 5. Costo materiales e insumos.....	52
Tabla 6. Costo trabajo de campo. ....	52
Tabla 7. Costo equipos usados.....	53
Tabla 8. Dimensiones del guante.....	59
Tabla 9. Dimensiones caja componentes electropneumáticos .....	60
Tabla 10. Dimensiones caja del compresor de aire.....	60
Tabla 11. Propiedades mecánicas de S830, S835 y S840. [55] .....	61

## LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1. Presión ejercida por una fuerza en un área determinada.....	40
Ecuación 2. Principio de pascal.....	40

## GLOSARIO

**ACTUADOR:** Es un dispositivo que cuenta con un mecanismo para aprovechar un tipo de energía y cumplir una función determinada.

**SILICONA:** Material inorgánico, resistente y maleable, pertenece a la familia de los polímeros.

**TERAPIA:** Conjunto de métodos y técnicas utilizadas para el control o alivio de una enfermedad.

**ELASTOSIL:** Es un tipo especial de silicona que presenta un alto grado de maleabilidad y dureza.

**ARTRÓISIS:** Enfermedad articular producida por el desgaste de las articulaciones de una o varias zonas del cuerpo.

**NEUMÁTICA:** Rama de la física encargada de estudiar el movimiento de los gases y su aprovechamiento en sistemas automáticos.

**MECANISMO:** Es un conjunto de elementos que, a través del aprovechamiento de un tipo de energía, cumplen una función específica.

## RESUMEN

El presente documento contiene información acerca de las enfermedades reumáticas, específicamente la artrosis en manos. También, diferentes métodos de rehabilitación con sus principios físicos para su posterior integración con el área de la mecatrónica. Para brindar una alternativa a las terapias convencionales, se ha desarrollado un dispositivo de rehabilitación que permite al paciente realizar terapias previamente programadas de ejercicios para las manos, terapia de calor y vibraciones.

**Palabras claves:** Mecatrónica, artrosis, dispositivo, rehabilitación.

## ABSTRACT

The following document contains information about rheumatic diseases, specifically hand arthrosis. As well as different rehabilitation methods with their respective physical principles for the post-integration with mechatronics area. For bringing an alternative to conventional therapy, it has been developed a rehabilitation device which allows the patient to carry out previously programmed therapies of hand exercises, heat therapy and vibrations.

**Keyword:** Mechatronics, arthrosis, device, rehabilitation.

## INTRODUCCIÓN

La artrosis (también conocida como osteoartritis) es una enfermedad degenerativa que afecta a más del 70% de la población mundial y es la patología más frecuente a nivel internacional, esta afecta el cartílago articular, el cual se encarga de amortiguar sobrecargas e impactos y permitir el deslizamiento entre los huesos. Dentro de los síntomas principales de esta enfermedad se encuentran: dolor crónico, inflamación en las articulaciones, rigidez y en un estado avanzado puede llevar a la discapacidad. Es más común en adultos mayores (aproximadamente más del 50% de las personas mayores a 65 años y 70% de las mayores a 80 años) y en el año 2013 se registraron más de 242 millones de casos. No hay un factor en concreto al que se le atribuya como causa de la enfermedad, pero sí existen circunstancias que pueden llevar a su desarrollo, como: riesgo genético, obesidad, sedentarismo, fuertes impactos, entre otros.

Al no tener cura, los pacientes se someten a diferentes tratamientos, terapias físicas, medicamentos, dietas y ejercicios físicos para ralentizar la patología. Dentro de los tratamientos más frecuentes están las terapias de calor-frio, guantes de presión para aliviar el dolor, dispositivos para terapias magnéticas, estimulación eléctrica y férulas. Por lo general, los pacientes asisten a centros especializados o compran varios dispositivos que puedan tener en el hogar que les permitan realizar terapia en casa, reemplazando (en parte) la necesidad de un fisioterapeuta.

Por lo anterior, esta investigación se centra en el desarrollo e implementación de un dispositivo mecatrónico para las manos fácil de usar, que se pueda tener en el hogar y con la capacidad de realizar un número de terapias predeterminadas para que los pacientes lleven una mejor calidad de vida.

## 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En el estudio *Incidencia global, regional y nacional, prevalencia y años vividos con discapacidad para 301 enfermedades y lesiones agudas y crónicas en 188 países, 1990–2013: un análisis sistemático para el Estudio Global de la Carga de Enfermedades 2013* mostraron como parte de sus resultados un aumento preocupante en personas diagnosticadas con artrosis a nivel mundial, en el año 1990 se habían registrado aproximadamente 140 millones de pacientes y para el 2013 se registraron 242 millones de pacientes.

Esta patología es la degeneración del cartílago articular en diferentes partes del cuerpo que afecta principalmente a adultos en un promedio de 65 años, genera mucho dolor y en estado avanzado puede causar rigidez, pérdida de movilidad, inflamación en los cartílagos articulares, chasquidos, deformaciones, lo que hace inevitable que interfiera en la vida cotidiana de quienes la padecen.

Esta patología puede ser causada por:

- Sobreesfuerzos constantes
- Actividades repetitivas
- Fracturas intraarticulares
- Golpes continuos
- Antecedentes familiares

En estos momentos en el mercado, existen dispositivos que pueden servir para aliviar el dolor utilizando calor, guantes de presión que ayudan a aliviar el dolor, dispositivos y pulseras para terapias magnéticas, estimulación eléctrica y férulas. Además, existen patentes sobre dispositivos que, a partir del calor, se utilizan guantes que disminuyen el dolor y retardan el desarrollo de las deformaciones de los dedos, aunque este no se encuentra actualmente en el mercado. Esto hace que

las personas tengan la necesidad de comprar varios dispositivos que cumplan una función en cada parte del proceso, lo que conlleva a un gran gasto de dinero.

Los pacientes que sufren de artrosis deben asistir constantemente a terapias con fisioterapeutas y médicos para sobrellevarla, lo que se traduce a una frecuente movilización hacia los centros especializados, generando incomodidad para el paciente si este se encuentra con síntomas avanzados, gastos constantes en tratamientos, terapias y transporte, y aún más cuando no cuentan con el apoyo de terceros.

## **1.1. ANTECEDENTES**

Gracias a estudios realizados por la OAFI FOUNDATION, hoy en día se sabe que la artrosis ha crecido en veinte años más de un 70%. A nivel mundial aproximadamente 242 millones de personas que sufren de artrosis lo cual es bastante preocupante debido al dolor, deformaciones e incapacidad que esta puede llegar a causar. Ésta cifra seguirá en aumento en las próximas décadas [1].

Según la OMS (Organización Mundial de la Salud), la artrosis es la más frecuente de las enfermedades reumáticas, ya que el 20% de los ancianos mayores de 60 años padecen de artrosis. Debido al aumento que se está generando en la esperanza de vida, se estima que para el año 2020 la artrosis se convierta en la cuarta causa de discapacidad. Sólo en España más de 7 millones de personas padecen de artrosis en la columna, rodilla o mano [2].

En América latina la artrosis es una enfermedad muy frecuente, siendo Chile el tercer país con mayor número de personas que presentan esta enfermedad. Los datos presentados por la facultad de medicina de la Universidad Finis Terrae y la facultad de medicina clínica alemana de la Universidad del Desarrollo en la Revista Chilena de Ortopedia y Traumatología, más del 50% de la población mayores de 65 años padecen de artrosis en alguna de sus articulaciones, siendo la rodilla la más común, los datos afirman una incidencia de 240/100.000 personas/año [3].

Según la Fundación Colombiana de Apoyo al Reumático la artrosis es la patología que se presenta con mayor frecuencia y es la segunda causa de incapacidad permanente. La artrosis en la rodilla es la más frecuente de todas afectando a más del 10% de la población mayor de 16 años. Generalmente inicia entre los 40 y 45 años y el 70% de las personas mayores de 80 años la padecen [4].

En Colombia, según el Fondo Colombiano de Enfermedades de alto costo, se reportaron 68.247 casos de personas que sufren de artritis reumatoide, esta cifra fue sacada de población diagnosticada en un periodo que va desde el 1 de julio del 2015 hasta el 30 de junio del 2016. Esto se realizó en los 32 departamentos de Colombia [5].

En un artículo de la revista colombiana de reumatología publicado en ELSEVIER, llamado Percepción de calidad de vida en pacientes con osteoartritis. Características sociodemográficas y clínicas. Estudio de 5 años, en el que de una muestra de 2.787 pacientes y se determinó que esta enfermedad interfiere en la calidad de vida dada la disminución en la capacidad funcional que esta genera y además que puede ser producto de otras enfermedades. Se obtuvo que: el promedio de edad estuvo en 65 años, donde el 65,69% eran mujeres, el 37,82% sufre de osteoartritis en las rodillas y el 72,37% presentó comorbilidad asociada con hipertensión arterial, diabetes y obesidad [6].

En la Revista Cubana de Ortopedia y Traumatología, se hizo una publicación, por el Dr. Jorge Jaime Márquez Arabia y el Dr. William Henry Márquez Arabia (Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia), llamada Artrosis y actividad física en donde hacen énfasis en la importancia de la actividad física en los pacientes con artrosis y fisioterapia para la progresión de la enfermedad. Además, explican que ejercicios podían llegar a ser un riesgo para los pacientes y los ejercicios que no [7].

El Dr. Pascal Hiliquin, en una visita a Colombia, junto con otros médicos y reumatólogos con el fin de hablar sobre los últimos tratamientos para la artrosis e importancia de la alimentación, aunque a pesar eso sigue sin existir una cura se está desarrollando diversos tratamientos para el manejo del dolor, reducción de inflamación y mejora en la capacidad funcional [8].

Una investigación realizada por estudiantes de la Universidad Tecnológica de Pereira, llamada Artrosis y discapacidad, en la cual explican la importancia de tratar la artrosis por medio de los diferentes métodos existentes para evitar su progresión y no llegar al punto de que se vuelva una discapacidad de ningún tipo para los pacientes [9].

Los datos obtenidos del estudio Global Burden of Disease Study 2013 Collaborators, publicado por la revista médica. The Lancet, han mostrado que hay una incremento importante en el número de personas que padecen de artrosis a nivel mundial entre 1990 (140 millones de pacientes) hasta 2013 (242 millones de pacientes) convirtiéndola en una de las principales causas de discapacidad [10].

## **1.1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

¿Cómo la mecatrónica puede asistir a las personas que sufren de artrosis de manos y tienen dificultades para movilizarse a realizar sus terapias con normalidad desde el hogar?

## **1.2. JUSTIFICACIÓN Y ALCANCE**

La presente investigación tuvo como finalidad la creación de un dispositivo mecatrónico con el cual se pueda brindar apoyo a personas que sufren de artrosis en las manos para la realización de terapias físicas desde su hogar y de este modo darles la posibilidad de una mejor calidad de vida. Esto no solo se traduce en una disminución en costos de transporte sino en gastos en terapias que le corresponda asumir al paciente.

El punto anterior toma mayor impulso con la situación que se vive a nivel mundial debido a la emergencia sanitaria ocasionada por el COVID-19, ya que con el dispositivo pueden realizar toda una sesión terapéutica sin salir de sus hogares y así, evitar contaminarse y arriesgar sus vidas. Por otro lado, las personas que sufren de artrosis son en su mayoría personas de la tercera edad y el virus tiene una tasa de mortalidad más elevada en los ancianos.

Además, el dispositivo es práctico gracias a que cuenta con varias opciones de terapia dentro del mismo, disminuyendo el número de dispositivos que pueda llegar a necesitar un paciente en su hogar para poder realizar una sesión completa y efectiva.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. OBJETIVO GENERAL**

Desarrollar un dispositivo terapéutico para personas que sufren de artrosis en las manos.

### **2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

1. Diseñar en herramienta CAD el dispositivo terapéutico para artrosis en las manos y su correspondiente simulación.
2. Construir el dispositivo terapéutico a partir de los estudios y diseños de la herramienta CAD para su posterior implementación.
3. Validar la técnica y funcionamiento del dispositivo terapéutico para dar cumplimiento a la prueba de usabilidad.

### 3. MARCO DE REFERENCIA

#### 3.1. ESTADO DEL ARTE

A continuación, se muestran una serie de investigaciones y dispositivos desarrollados por diferentes entidades e investigadores, especialmente enfocados en métodos de rehabilitación y terapias en las manos, encontrando desde guantes con múltiples funciones, exoesqueletos y estudios que presentaron información necesaria para la materialización de este proyecto.

- **A home-care system for the telemonitoring and telerehabilitation of the hand incorporating interactive biofeedback:** Esta investigación fue publicada en febrero del año 2008 en el Italian Institute of Hand Surgery en Monza Italia por Sandra Morelli, Giovanni Maccioni, Marco Lanzetta, Velio Macellari y Daniele Giansanti, donde se diseñó y construyó un equipo capaz de medir la fuerza que puede hacer una persona por medio de la presión de los dedos. El objetivo de este aparato es hacer seguimiento 5 pacientes quienes tuvieron un trasplante de manos, el aparato cuenta con un software que incluye biofeedback que permite obtener datos en tiempo real. Esta investigación tuvo como resultado un dispositivo fácil de usar tanto para terapeutas como para los pacientes y puede ser usado en centro especializado o desde el hogar, y contribuye a nuestra investigación gracias a su enfoque en las manos y operación desde el hogar [11].
- **Wearable exoskeleton device for hand rehabilitation:** La patente fue publicada en el 2012 por Cempini Marco, Vitiello Nicola, Giovacchini Francesco, De Rossi Stefano, Marco Maria, Chiri Azzura y Carrozza Maria Chiara. Consiste en un exoesqueleto que tiene la función de asistir con el movimiento de la articulación metacarpiano-falangeal, es decir, realiza diferentes movimientos para flexionar y tensionar las articulaciones lo que permite llevar a cabo una serie de diferentes movimientos en los dedos,

ayudando con la rehabilitación. Esta patente es muy importante para la investigación debido a la información que brinda sobre el exoesqueleto especialmente para las manos [12].

- **Therapeutic arthritis glove with expandable gold rings:** El investigador Jeffrey P. Hendrick de Estados Unidos, fue el autor de esta patente registrada el 20 de noviembre del año 2012, donde presenta un dispositivo terapéutico y ortopédico para ser usado en las manos. Consiste en un guante el cual ayuda a prevenir las deformaciones causadas por la artritis reumatoide. Este también cuenta con unos anillos expandibles que son usados para aliviar el dolor durante las diferentes etapas de la enfermedad. Al realizar un guante que ataca directamente un tipo de artritis en las manos, abarca muchos los parámetros de este proyecto. [13].
- **Tratamiento del paciente con artrosis:** En enero del año 2014 fue presentado este artículo publicado por Francisco Vargas, María Medina, Juan Hermosa y Ricardo de Felipe Medina. Este documento introduce al manejo terapéutico de pacientes que sufren artrosis en diferentes partes del cuerpo, esto con el fin de disminuir la aceleración de esta, contrarrestar dolores y minimizar deformaciones. Para realizar el plan terapéutico se cuenta con una participación del paciente en cuestión. Además, explica cómo comprender la enfermedad, ejercicio, ayudas simples, medicamentos, dieta, que hacer y qué no hacer. Incluye información no sólo de terapias físicas, sino también sobre qué analgésicos ayudar al control de la artrosis, además como dato extra incluye elementos diseñados para sobrellevar la enfermedad. Esta es una investigación descriptiva, la cual tiene como finalidad evidenciar los diferentes aspectos que implica tener artrosis y contribuyó en el proyecto en el entendimiento de esta enfermedad para tomar las medidas y precauciones necesarias [14].

- **Device for treating arthritis and osteoarthritis in extremities and chronic inflammations and for reducing muscular pain and tension:** En Corea del Sur, el inventor José Luis de la Torre Barreiro en su patente presentada internacionalmente el 26 de enero de 2016 y publicada internacionalmente el 2 de marzo de 2017, diseñó un dispositivo que tiene como finalidad tratar la artrosis y la osteoartritis en extremidades, consiste en un guante o media compuesto de diferentes materiales y elementos como diferentes tipos de telas, férula de teflón, alambres, resistencias, entre otros. Dicho dispositivo cuenta con sistema de control encargado de controlar la temperatura y la corriente aplicada al usuario, lo que permite una reducción del dolor e inflamación crónica y relajación muscular en las extremidades. La férula de teflón es ajustable permitiendo el enderezamiento de los dedos progresivamente y además el artefacto es capaz de generar un campo electromagnético, gracias a todas sus funciones puede realizar diferentes tipos de terapias para esta enfermedad desde el hogar y presenta etapas de control y ajuste que fueron de utilizad para linvestigación. [15].
- **Wearable hand exoskeleton device:** En China, en el año 2016 se publicó esta patente por parte de los investigadores Li Jianfeng y Zhang Zhaojing. Se trata de un dispositivo que consta de un exoesqueleto portátil con una base empotrable, contiene mecanismos el dedo pulgar, índice, medio, anular y meñique. Cada uno de estos mecanismos es idéntico en cuanto a fabricación y cada uno consta con un par de varillas para la unión y una barra deslizante hasta los extremos. Gracias a la estructura realizada, el exoesqueleto fabricado posee un número de grados de libertad que coincide con el número de articulaciones presentes en la mano, además cuenta con flexibilidad en los movimientos y en los dedos. Esta investigación realiza aportes como la mecánica de los dedos y los mecanismos para la fabricación del exoesqueleto en estos [16].

- **Diseño, implementación y control de un exoesqueleto para miembros superiores:** El ingeniero Frank Galán Cutipa, al momento de realizar su máster en ingeniería mecánico-eléctrica con mención en automática y automatización, publicó este trabajo en mayo del 2017, el cual tiene como finalidad diseñar un exoesqueleto para miembros superiores con 6 grados de libertad hecho a base de materiales ligeros y comerciales. En primera instancia abarcan la problemática de la discapacidad, haciendo alusión a sus posibles causas, seguidamente de su impacto a nivel mundial y local. Después realizaron investigaciones relacionadas con exoesqueletos que se hayan fabricado para los miembros superiores. Todo esto con el fin de crear una herramienta de bajo peso que pueda simular los ejercicios de rehabilitación y que pueda ser controlada por los terapeutas y lograr así aumentar la constancia de los pacientes en sus ejercicios. Este proyecto muestra la creación de un dispositivo a través de materiales ligeros lo cual fue importante a la hora de decidir de qué manera se llevaría a cabo esta investigación [17].
- **Effects of a finger exercise program on a hand function in automobile workers with hand osteoarthritis:** Para septiembre 27 del año 2017 fue publicado este artículo desarrollado por T. -W. Kang, J.-H. Lee, D.-H. Park y H.-S. Cynn. Estos investigadores introducen lo introducen hablando de las consecuencias de padecer osteoartritis, haciendo énfasis en la pérdida de capacidad de realizar actividades laborales y ocupaciones matutinas. Esto los motivó a investigar el efecto que tienen los programas de ejercicio en los dedos, en términos de fuerza, dolor, funcionalidad física, empuñadura y rigidez. Se realizó una prueba con 29 sujetos de los cuales 15 recibieron un programa de ejercicio en los dedos con baños de parafinas, mientras que los 14 sujetos restantes recibieron sólo el baño de parafinas. Esta investigación abrió la posibilidad de incluir los diferentes tipos de terapia en el proyecto debido a que estudia los efectos que causan diferentes ejercicios (como los realizados en la fisioterapia) en los dedos. [18].

- **Hand exoskeleton for rehabilitation therapies with integrated optical force sensor:** El 5 de febrero del 2018, los investigadores Jorge A Díez, Andrea Blanco, José María Catalán, Francisco J Badesa, Luis Daniel Lledó y Nicolás García, desarrollaron en España- Elche un exoesqueleto para las manos que cuenta con características modulables y un sensor de fuerza integrado. La ajustabilidad es lograda gracias a la división del exoesqueleto en unidades separadas. Este proyecto tiene como objetivo ayudar a personas que necesiten realizar diferentes ejercicios de terapéuticos de rehabilitación en las manos, fabricando así un exoesqueleto que sea bastante simple de manejar y lo suficientemente flexible para permitir los diferentes tipos de movimientos como se realizó en esta investigación [19].
- **Design of a Series Elastic Transmission for hand exoskeletons:** Los estudiantes M. Bianchi, M. Cempini, R. Conti, E. Meli, A. Ridolfi, N. Vitiello, B. Allota de la Universidad de Florencia (Italia) llevaron a cabo un trabajo de investigación realizado en mayo del 2018, en donde diseñaron un exoesqueleto, basado en una nueva SET (Transmisión elástica en serie) que facilita la transmisión de potencia a un exoesqueleto manual, dentro de este campo solo muy pocos dispositivos son realmente empleados en el sector hospitalario, debido a los motores y sensores existentes. Este dispositivo tiene la función de ayudar a personas que han sufrido de lesiones en las manos o han perdido la fuerza y movilidad por diferentes razones [20].

Con base a lo anterior, se tomaron los diseños mecánicos y circuitos electrónicos como referencia al momento de realizar el diseño final del dispositivo, además de extraer de la misma manera, los efectos, ventajas y desventajas que tienen las terapias y programas de ejercicio en las articulaciones de la mano si se emplean exoesqueletos que cubran los miembros superiores ya sea para recuperación pasiva o métodos de prevención de la enfermedad.

## **3.2. MARCO TEÓRICO**

Para el desarrollo de esta investigación, fue necesaria de la integración de diferentes teorías en la que se basan los dispositivos de control y automatización, sin embargo, también fueron requeridos los conocimientos del área de la salud, concretamente de la artrosis en las manos y todo lo que involucra. Por lo cual, la integración de estos dos conocimientos fundamenta la teoría detrás del proyecto.

### **3.2.1 ARTICULACIONES Y SISTEMA ESQUELÉTICO**

Las articulaciones son un conjunto de partes duras y blandas que forman la unión entre dos o más huesos. Visto desde el punto de vista ingenieril, son los pasadores o tornillos que unen dos eslabones de un mecanismo y se encuentran ligadas al sistema músculo esquelético el cual está formado por huesos, músculos y articulaciones y es el encargado de brindarle protección, movimiento y estabilidad al cuerpo humano. El sistema esquelético cuenta con 206 huesos que cumplen su función como estructura para los músculos y protegen zonas sensibles como el cerebro o el corazón. Este sistema brinda aspectos tanto funcionales como estructurales al cuerpo humano y puede verse debilitado por diferentes enfermedades. Para esto se utilizan dispositivos llamados ortesis, las cuales brindan a los pacientes esa funcionalidad o movilidad que ha sido perjudicada en su vida cotidiana. Estas al contrario de las prótesis, NO reemplazan órganos o partes del cuerpo que presenten incapacidad, sino ayudan a la curación de estas [22].

Las dos funciones principales de las articulaciones son [34]:

- Teniendo la cuenta el principio de funcionamiento de las palancas desde el punto de vista físico (punto de apoyo, distancia y fuerza aplicada), las articulaciones son el punto de apoyo (fulcro) que les permite a las palancas óseas realizar movimientos.
- Brindar estabilidad al área del cuerpo sin interferir con su movimiento.

Estas se clasifican según su estructura y grado de movilidad:

- Articulaciones fibrosas: Presentan una movilidad nula. En estas los huesos se mantienen unidos gracias al tejido fibroso. El más claro ejemplo son las articulaciones del cráneo
- Articulaciones cartilagosas: Son aquellas que presentan poca movilidad sin llegar a ser mucha ni poca. No hay cavidad articular y los huesos se mantienen unidos por cartílagos.
- Articulaciones sinoviales: Estas son las más abundantes en el cuerpo humano y se caracterizan por poseer un gran grado de movilidad. Poseen cavidad articular y ligamentos que unen las articulaciones.

### **3.2.2 ENFERMEDADES REUMÁTICAS**

Estas enfermedades se caracterizan por causar la inflamación de las articulaciones y demás tejidos del cuerpo humano. Esto perjudica la salud a lo largo de su desarrollo y son tratadas por especialistas llamados reumatólogos. Existen más de 100 tipos diferentes de enfermedades reumáticas, aunque entre las más frecuentes encontramos la artritis reumatoide, artrosis, hiperuricemia, lupus y osteoporosis. Estas pueden causar efectos como:

- Dolor y deformidad en las zonas afectadas
- Discapacidad para realizar labores
- Daños a los órganos
- Muerte

Además, estas enfermedades generan gastos importantes en la sociedad, dinero que se debe invertir en medicamentos y medidas de control.

Estas enfermedades afectan principalmente a las personas que se encuentren en la tercera edad o próximas, lo que implica un cambio radical en su estilo de vida. No obstante, estas enfermedades también se pueden presentar en niños y jóvenes, teniendo el mismo efecto destructivo en sus vidas si no se trata con el cuidado debido [29].

La artritis, de acuerdo con Arthritis Foundation, es un grupo de enfermedades que afectan de manera diversas formas a las articulaciones del cuerpo, puesto que se pueden encontrar más de 100 tipos y puede presentarse a cualquier edad. Entre los síntomas más frecuentes encontramos:

- Hinchazón
- Dolor
- Rigidez
- Disminución del rango del movimiento

Dichos síntomas pueden variar según la persona, tipo de artritis y los cuidados que tengan. Se pueden apreciar dos casos, el primero, en donde la enfermedad avanza muy rápido y en el segundo, el tiempo de avance de la enfermedad es muy lento. En ambos casos se puede presentar de manera leve, moderada o severa.

Cuando se llega a una etapa avanzada de la enfermedad puede ocasionar dolor crónico, extrema dificultad para realizar labores diarias hasta el punto de incapacitar al paciente por los cambios permanentes de sus articulaciones. Para retrasar el paso la enfermedad, disminuir inflamaciones y dolores, dependiendo del tipo, se le recetan diferentes medicamentos. Para los pacientes con artritis es común el uso de: AINE, esteroides, DMARD y agentes biológicos. También, se recomienda a los pacientes realizar terapias autorizadas por fisioterapeutas para disminuir la pérdida de fuerza y la rigidez. En última instancia, si los medicamentos y las terapias no muestran resultados positivos en los pacientes, si el médico lo aprueba, el paciente se puede someter a cirugías como: reparación del tendón, reemplazo total de la articulación, fusión de la articulación o sinovectomía (extirpación del tejido inflamado).

Existen diferentes tipos de artritis y causas son:

- **Artritis degenerativa:** también se conoce como osteoartritis y es la más común. Esta es el producto del desgaste del cartílago hasta el punto en el que los huesos empiezan a rozarse entre sí provocando mucho dolor, hinchazón y rigidez. Puede darse por sobrepeso, edad, actividades

repetitivas y lesiones previas. Aunque se puede sobrellevar la enfermedad con diferentes terapias, tratamientos, ejercicios y buena alimentación no se puede evitar su progreso y puede llegar al punto de que el paciente necesite un reemplazo articular.

- **Artritis inflamatoria:** Ocurre cuando el sistema inmune, al tratar de eliminar una infección, empieza a atacar las articulaciones provocando inflamación y erosión en las articulaciones e incluso puede llegar a dañar órganos internos y otras partes del cuerpo. La razón de este tipo de artritis no está clara, pero se cree que es debido a la genética junto con factores ambientales (como fumar). Este tipo de artritis es importante tratarlo a tiempo, mediante medicamentos, para poder prevenir daños permanentes en las articulaciones.
- **Artritis infecciosa:** Es ocasionada por un virus, bacteria u hongo y provoca inflamación en las articulaciones. Algunos ejemplos son: (intoxicación alimentaria o contaminación), clamidia y gonorrea (enfermedades de transmisión sexual) y hepatitis C (una infección de sangre a sangre, a menudo a través de agujas o transfusiones compartidas). Existe la posibilidad de eliminar por completo la enfermedad, pero también puede darse el caso de que se vuelva crónica.
- **Artritis metabólica:** Se produce cuando el cuerpo produce altos niveles de ácido úrico, el cual se encarga de descomponer toxinas, y no se puede expulsar a tiempo. Este ácido se empieza a cristalizar en las articulaciones en forma de aguja lo que produce mucho dolor y si no se evacua el ácido puede convertirse en crónica [30].

De la misma manera, se tiene la osteoartrosis, la cual es una enfermedad reumática la cual consiste en el desgaste del cartílago articular, es el que se encarga de amortiguar sobre cargas y permitir el deslizamiento entre los huesos, ocasionando dolor crónico, rigidez, pérdida de movilidad, inflamación en las articulaciones de las zonas afectadas y en etapas avanzadas se puede convertir en incapacidad o incluso discapacidad [31].

Aún se desconoce la causa concreta de la enfermedad, pero hay factores que llevan a desencadenarla:

- Hereditario: se han observado casos de familias o personas que viven en las mismas condiciones ambientales.
- Edad: puede ser por sobre uso y sobrecarga de las articulaciones durante periodos largos de tiempo y con el paso de los años va empeorando.
- Obesidad: a un paciente tener sobrepeso, provoca una sobrecarga sobre las articulaciones que tienen que soportarlo que son principalmente rodillas, cadera, columna.
- Trauma articular: son lesiones que logran afectar el cartílago articular ya sea de forma directa o por una fractura de un hueso subcondral.
- Enfermedades metabólicas.

La OA se clasifica en:

- Primaria (idiopática)
  - Manos
  - Hallux valgus
  - rodilla
  - Cadera
  - Columna vertebral
  - otras localizaciones
  -
- Secundaria:
  - Traumatismos
  - Congénita
  - Metabólicas
  - Endócrinas
  - Depósito de calcio
  - Otras enfermedades óseas y articulares [32].

### 3.2.3 ARTROSIS EN MANOS

Esta es una enfermedad producida por el desgaste del cartilago en las articulaciones de las manos, lo cual ocasiona rigidez, deformidad, dolor y dificultad para mover los dedos. Normalmente empieza entre los 40 y 50 años. Se presenta en ambos sexos, aunque es más común en mujeres.

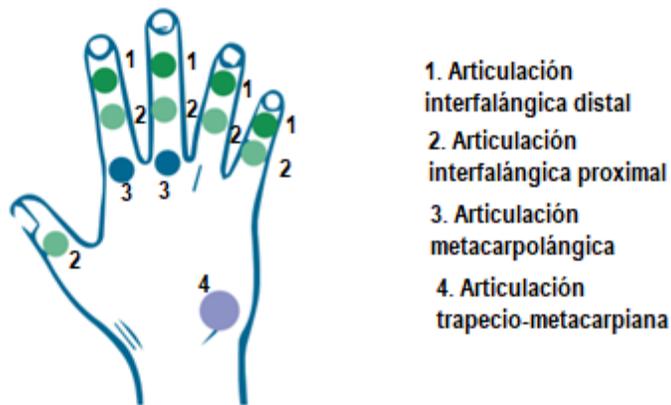


Figura 1. Articulaciones afectadas por la artrosis en manos [33].

Estas son las articulaciones que son afectadas con más frecuencia.

Es muy frecuente que una misma persona presente artrosis en varias de las articulaciones de la *figura 1*.

La causa de esta enfermedad es una suma de factores genéticos y ambientales, principalmente el hereditario ya que la mayoría de las personas que sufren de esta enfermedad aseguran que sus padres y/o abuelos sufrían también de la misma. En cuanto al componente ambiental, personas que realicen trabajos manuales repetitivos presenten artrosis en la articulación interfalángica proximal y trapecio-metacarpiana.

Se puede diagnosticar de varias maneras, ya sea por los síntomas que el paciente explica, tales como la rigidez, dolor, pérdida de funcionalidad y deformidad en las manos, también por observación del médico al momento de examinar las

articulaciones ya que estas pueden presentar dolor al aumentar la presión, crujidos al mover la articulación, o en casos más avanzados la deformidad de estas.

También se puede detectar a través de radiografías, al observar la disminución de espacio que hay entre hueso y hueso, quistes y proliferaciones óseas en forma de pico [33].

Un paciente con osteoartritis de mano debe presentar los síntomas 1,2 y 3 y, además, debe presentar el 4 y/o 5 de acuerdo con el American College of Rheumatology:

1. Dolor en una o ambas manos la mayoría del día
2. Engrosamiento en las estructuras óseas de las articulaciones de las manos (segunda y tercera proximal, segunda y tercera interfalángica distal y trapeciometacarpiana)
3. Tumefacción (inflamación) en al menos un trapecio metacarpiano.
4. Engrosamiento en 3 o más interfalángicas distales.
5. Deformidad ósea en dos o más de las articulaciones nombradas en el punto [43].

#### **3.2.4 MÉTODOS DE REHABILITACIÓN PARA LA ARTRÓSIS**

Uno de los métodos más efectivos para disminuir la progresión de la artrosis es a través de la fisioterapia, la cual consiste en series de ejercicios que se realizan periódicamente y tienen como fin brindar fortalecimiento a los músculos que se encuentran alrededor de la articulación, mejorar la flexibilidad y reducir el dolor en las arcuaciones afectadas [44].

Los ejercicios que se presentan a continuación son para personas que desean prevenir la enfermedad o pacientes diagnosticados que están en una etapa temprana:

- **Tracción:** Permite mitigar la presión y las cargas a las que se someten las articulaciones afectadas. Se debe apoyar la palma de la mano en una superficie plana con los dedos por fuera, se procede a tirar suavemente

sujetando el hueso cercano a la articulación por unos 10 a 30 segundos aproximadamente por cada articulación. Se puede hacer tanto en las articulaciones metacarpofalángicas como en las interfalángicas proximales y distales. También se puede realizar en la muñeca.



Figura 2. Ejercicio de tracción articular para los dedos (propia autoría).



Figura 3. Ejercicio de tracción articular para la muñeca (propia autoría).

- **Movilización:**

**Ejercicio 1:** Se posiciona toda la mano sobre una superficie plana con la palma hacia abajo y los dedos extendidos, luego se procede a levantar los dedos sin sobre esforzarlos, realizando entre 8 a 10 repeticiones en 3 series con cada dedo. Los pacientes que se encuentren en una fase aguda no podrán realizar este ejercicio.



Figura 4. Ejercicio de los extensores de los dedos (propia autoría).

**Ejercicio 2:** Se posiciona toda la mano sobre una superficie plana con la palma hacia abajo y los dedos extendidos, luego se procede a abrir los dedos a manera

de separación entre 8 a 10 repeticiones en 3 series. Entre cada repetición se descansa 30 segundos aproximadamente.



Figura 5. Ejercicio de lumbricales para manos (propia autoría).

**Ejercicio 3:** Se posiciona la mano sobre una superficie plana con la palma hacia arriba con los dedos estirados y luego se recogen los dedos formando un puño repitiendo el movimiento entre 8 a 10 repeticiones en 3 series.



Figura 6. Ejercicio de apertura y cierre de mano (propia autoría).

**Ejercicio 4:** Se posiciona la mano sobre una superficie plana con la palma hacia arriba con los dedos estirados y se procederá a tocar las yemas de los dedos índice, medio, anular y meñique uno a la vez con la yema del pulgar, siempre estirando de nuevo los dedos entre cada repetición. Se puede aumentar la dificultad haciendo que el pulgar toque cada articulación de los dedos.

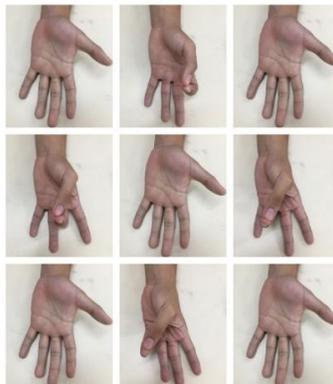


Figura 7. Ejercicios de pinzas para manos (propia autoría).

**Ejercicio 5:** Se posiciona la mano sobre una superficie plana con la palma hacia arriba con los dedos estirados y con la otra mano se toma dedo por dedo y se dobla hacia la palma sin sobre esforzar los dedos. Se hace uno por uno, 10 repeticiones.



*Figura 8. Ejercicio de movilización para dedos (propia autoría).*

**Ejercicio 6:** Se posiciona la mano sobre una superficie plana con la palma hacia arriba con los dedos (índice, medio, anular y meñique) estirados que sobresalgan de la superficie, con la mano contraria se tomará dedo por dedo para doblarlo hacia la palma de la mano y con el mismo dedo estirarlo y llevarlo lo más atrás posible sin lastimarlos [55].



*Figura 9. Ejercicio de movilización para dedos de mayor intensidad (propia autoría).*

Cuando un paciente sufre de artrosis en alguna área de su cuerpo, se recomienda que este realice ejercicios de estiramiento, ejercicios para fortalecer la postura y ejercicios para mejorar la movilidad de las articulaciones. Todos estos ayudan a mantener a las articulaciones en un estado óptimo y mejorar los músculos circundantes ya que estos son los encargados de absorber las cargas que recaen en las articulaciones. También se recomienda realizar ejercicios dentro del agua, ya

que esta aliviana las cargas que recaen en las articulaciones. Los resultados obtenidos gracias a los ejercicios son la detención y, en ocasiones, la reversión de la enfermedad para los pacientes que padecen la enfermedad en la cadera o rodilla

Se debe evitar producir tirantez en las articulaciones, razón por la cual no se deben colocar las articulaciones almohadas debajo de estas. También se pueden aplicar medidas para aliviar el dolor, entre las cuales encontramos:

- Masajes
- Acupuntura
- Órtesis
- Estimulación eléctrica
- Terapia [45].

### 3.2.5 TERAPIAS A PARTIR DE FENÓMENOS FÍSICOS

En las terapias se emplea lo que se conoce como terapia de calor (termoterapia), la cual se basa en la teoría del calor. A esta se le conoce como termoterapia y es explicada detalladamente en el Manual de Medicina Física escrito por J.M Pastor Vega, M. Martínez Morillo y F. Sendra Portero. El calor es la energía producida por el movimiento de las moléculas y explican la conservación de este fenómeno en el cuerpo humano. Pese a que la temperatura interna del cuerpo humano es constante (37°C aproximadamente), la superficie cutánea (piel) varía entre los 29 y 34°C y sus aplicaciones termoterápicas se dan gracias a la transferencia de calor con el ambiente por medio de evaporación, convección, conducción y radiación [23].



Figura 10. Diferentes formas de transferencia de calor [29].

De la misma manera, existe otro tipo de terapia llamado magnetoterapia y consiste esencialmente, de acuerdo con una teoría aceptada por investigadores en un aumento de la permeabilidad de las membranas celulares a los iones, esto ocasiona que aumente la actividad de las membranas celulares en el tejido blando, permitiendo ayudar en la regeneración de tejidos, inflamaciones crónicas.

En el estudio Eficacia de la Magnetoterapia en Pacientes con Osteoartrosis, realizado por Abadía Cunillo y Mesén Aguilar Priscila, se utilizan campos magnéticos para disminuir el dolor crónico benigno (osteoartrosis, síndromes miofasciales y artritis reumatoidea. Para el estudio utilizaron campos magnéticos de baja frecuencia (inferior a 100 Hz) y de baja intensidad (inferior a 100 gauss) teniendo como resultados: el 88% de los pacientes (30 pacientes) presentaron una disminución del dolor, 8% no presentó ningún cambio (3 pacientes) y 1% de los pacientes dijo sentir más dolor que antes (1 paciente) [21].

Una de las terapias más utilizadas es la terapia electroconvulsiva, esta técnica consiste en utilizar electricidad para activar las neuronas del sistema nervioso central a través de estimuladores de pulsos de energía eléctrica. Esta es aplicada en diferentes enfermedades desde finales de los años 30, entre ellas incluida la artrosis. Para la aplicación de este tipo de terapia se requiere una previa relajación muscular completa para evitar riesgos sobre fracturas. Así explica el Jefe de Servicio de Psiquiatría del Hospital General Universitario Reina Sofía de la Universidad de Murcia llamado Pedro Pozo Navarro [26].

Estas terapias se aplican junto con ejercicios físicos para complementar la rehabilitación y estos van ligados mucho a la motricidad del cuerpo. Al momento de realizar los ejercicios terapéuticos, se debe tener en cuenta los Principios de Protección Articular y Ahorro de energía. Estas son técnicas para la protección y cuidado correcto de las articulaciones teniendo en cuenta los movimientos y actividades cotidianas. Explican varias estrategias para mantener balance entre actividades y descanso, posturas del cuerpo, realización de labores, distribución de

peso y muchas más. Todo esto con el fin de tener un mejor aprovechamiento de la energía al momento de realizar los diferentes movimientos, lo cual beneficia a la motricidad fina encargada del movimiento articular en las manos [24].

El Doctor en Ciencias de la Actividad Física y el Deporte de la Universidad Pública de Navarra, Javier Agurre Zabaleta, explica cómo el movimiento voluntario se puede dar de tres formas diferentes, la movilidad global, la motricidad de la pinza digital y la motricidad de la mano. Cada una de estas enfocadas en sectores del cuerpo diferentes y para funciones diferentes. La motricidad de la pinza digital (también conocida como motricidad fina) es la encargada de la habilidad motriz en las manos y dedos, es decir, en la habilidad de ejecutar movimientos y manipular objetos con diferentes propósitos. Ya sea lanzar, recortar, vestirse, comer, asearse, dibujar, escribir, entre otras cosas básicas [25].

El fisioterapeuta Marcos Sacristan Puig de la clínica les Feuilaides y Physio Network Español, recomienda diferentes ejercicios para las terapias de artrosis en manos, entre estos se encuentran ejercicios de tracción, movilización, apertura y cierre, lumbricales, y pinzas. Todo esto con el fin de aliviar el dolor producido en cualquier etapa de esta enfermedad [27].

En un artículo publicado en la revista Journal of Arthritis llamado Manipulación/terapia manual en el tratamiento de la osteoartritis (fecha de publicación: enero 22, 2013), realizado por Vernon Howard del Canadian Memorial Chiropractic College en Ontario, Canadá, habla sobre el efecto que tiene la terapia física en personas con artrosis de rodilla, cadera y manos basado en diversos estudios en donde se demuestra la efectividad que tiene este tipo de terapia como en el estudio realizado en Reino Unido por Bronfort G, Haas M, Evans R, Leininger B, Triano J (2010) llamado Efectividad de la terapia manual: Reporte de evidencia del Reino Unido y en el Capítulo 3. Directrices europeas para la manejo del dolor lumbar agudo inespecífico en atención primaria por van Tulder M, Becker A, Bekkering T, Breen A, del Real MT (2006) en donde los estudios demostraron una disminución del dolor

y en la rigidez para pacientes que no tenían la necesidad de intervenciones quirúrgicas para corregir postura o desviamiento de la columna o manos [28].

### **3.2.6 TERMOTERÁPIA**

Las terapias de calor y frío son las más utilizadas actualmente en los tratamientos terapéuticos, dependiendo de la situación que se presente se debe utilizar uno u otro ya que cada uno posee propiedades puntuales. Se suele aplicar el frío en fases agudas y el calor en fases crónicas. Al momento de emplearlas tenemos lo siguiente [46]:

- Ambas ayudan a disminuir la rigidez y el dolor en las articulaciones
- A todas las personas NO les afecta el frío y el calor de la misma manera, lo que quiere decir que para algunas será más eficaz uno u otro.
- El calor se puede aplicar de varias maneras, desde baños en agua tibia hasta bolsas de agua caliente.
- El frío disminuye los espasmos musculares y la hinchazón e inflamación aguda en las zonas afectadas.
- El frío se puede aplicar de diferentes maneras, desde bolsas de hielo hasta compresas frías
- Si se desea realizar una terapia combinada, primero se debe sumergir la zona afectada en agua caliente y luego en agua fría, luego se sumerge en agua caliente nuevamente.

Ambas son eficientes y tienen sus ventajas, sin embargo, se debe tener precauciones para cualquiera de las dos, entre ellas [47]:

- No se debe utilizar ninguna de las dos durante más de 15 - 20 min seguidos.
- No se debe aplicar directamente sobre la piel, se debe aplicar con una toalla o un trozo de tela entre el paciente y la fuente.
- Para el calor, no se deben utilizar ungüentos ya que esto puede ocasionar quemaduras.

### 3.2.7 ELECTROTERÁPIA

La electroterapia se define como el uso de la electricidad para tratar las enfermedades, esto se logra a través de estímulos físicos gracias a la corriente eléctrica. Esta corriente produce un efecto terapéutico en el paciente a partir de las respuestas fisiológicas causadas por la interacción entre la electricidad (corriente) y el cuerpo humano. Esta se puede aplicar de diferentes maneras, entre ellas encontramos:

- TENS
- Iontoforesis
- Microondas
- Electroestimulación
- Ultrasonidos

La corriente eléctrica genera calor, el efecto electroquímico y electromagnético, y cada uno de estos es necesario dependiendo de las necesidades que presente la persona afectada. Normalmente se utiliza como respuesta a la inflamación y mejoramiento de la actividad muscular, además también ayuda a eliminar el dolor [48].

La electricidad realiza contracciones en los músculos, lo que equivale a que una persona realice ejercicios, esto mediante electrodos que llevan la corriente eléctrica hasta los músculos. Puede que los pacientes al momento de realizar sus actividades presenten unidades motoras que se encuentren inactivas y la estimulación eléctrica ayuda a reclutar dichas unidades [49].

El grado de movilidad de cada articulación depende directamente de la estructura de sus carillas articulares. Regresando al punto de vista de la ingeniería, existen articulaciones que realizan movimientos en un determinado eje, por lo que encontramos articulaciones uniaxiales, biaxiales y multiaxiales [35].

### 3.2.8 ACTUADORES

Para generar movimientos dentro de un dispositivo que deba realizar una función específica, es necesario contar con actuadores, los cuales se seleccionan de acuerdo con criterios que se deban tener en cuenta para las tareas que deban realizar. Se pueden encontrar tres tipos basado en el origen de la fuerza: hidráulico, eléctrico o neumático [36].

Los actuadores hidráulicos generan trabajo mecánico partiendo de líquidos comprimidos y los neumáticos tienen un funcionamiento similar, pero emplean aire comprimido, estos actuadores se basan en el principio de pascal, se define como: la presión aplicada a un fluido confinado se transmite de manera uniforme en todas las direcciones, lo que da con resultado. Partiendo de este principio se tiene [37]:

$$P = \frac{F}{A} \quad (1)$$

Donde “P” es presión del fluido, “F” es la fuerza y “A” es el área.

Este principio permite el funcionamiento de la prensa hidráulica, en la que se tienen 2 cilindros de diferentes áreas transversales conectados entre sí y contiene un líquido el cual puede ser agua o aceite. Cada cilindro cuenta con un émbolo, su objetivo es aumentar la fuerza de salida F2 aplicando otra fuerza en el émbolo del cilindro de menor área transversal A1, dando una fuerza de entrada F1 y una presión P1, esta se transite por el fluido llegando a el cilindro con mayor área transversal A2 manteniendo la misma P1. Partiendo de la fórmula anterior se obtiene:

$$P_1 = P_2 \Rightarrow \frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2} \quad (2)$$

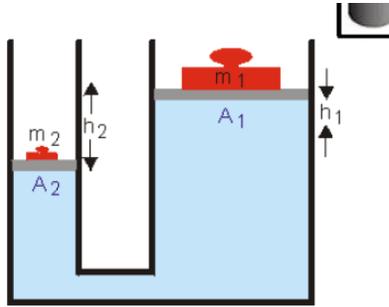


Figura 11. Principio de pascal aplicado a una prensa hidráulica [37].

Por otra parte, los actuadores eléctricos funcionan a partir de corriente eléctrica, ya sea alterna o directa [38]. Los motores de corriente alterna operan gracias a un campo magnético giratorio y en su interior pueden contar con un electroimán o un embobinado [40].

El número de pares de polos corresponde al número de bobinas enrolladas en núcleos de hierro y siempre es un número par, generando fuerzas electromotrices las cuales hacen girar el motor [39].

Por otra parte, los motores asíncronos cuentan con un circuito estatórico con bobinados que generan el flujo giratorio y, a diferencia de los síncronos, su rotor gira a una velocidad diferente a la de campo magnético giratorio. Su funcionamiento se basa en la Ley de Faraday [41].

Otro tipo de actuadores eléctricos son los motores paso a paso, al igual que los motores mencionados anteriormente, cuentan con un estator conformado por varios bobinados que se alimentan para generar un desplazamiento angular, sin usar un campo magnético permanente [42].

### 3.2.9 SISTEMAS NEUMÁTICOS

Al igual que los sistemas eléctricos e hidráulicos, los sistemas neumáticos se nos brindan soluciones para diferentes problemas de control, pero en lugar de usar líquidos o electricidad, utilizan diferentes tipos de gases para la transmisión de potencia o señales. Estos sistemas son principalmente empleados en el área de la automatización industrial y control automático de maquinaria. Generan energía

mecánica utilizando la energía de los gases al comprimirlos y pueden tener muchas otras aplicaciones [50].

Actualmente, se han venido trabajando diferentes tipos de tecnologías que logren imitar el comportamiento humano, donde se encuentran las redes neuronales artificiales, “machine learning” y demás. Sin embargo, esto no se ha limitado a solo software, ya que gracias a la neumática se han podido producir movimientos con mayor grado de similitud a los seres vivos. A esto se le conoce como robótica blanda.

### **3.2.10 ACTUADORES BLANDOS.**

Se diferencian principalmente de los actuadores convencionales, en no ser estar compuestos principalmente de estructuras rígidas, sino que presentan una gran versatilidad, eficiencia, seguridad y adaptabilidad a la hora de ser empleados. Esta clase de actuadores con un módulo de elasticidad es entre 3 y 10 veces menos rígido que los robots convencionales.

Debido a su mecanismo de adaptabilidad, pueden interactuar con múltiples entornos. Los robots creados a partir de los actuadores clásicos realizan movimientos muy rígidos y precisos, lo cual es necesario para la mayoría de las áreas de producción donde se requiere la repetición de cierta actividad con la mayor uniformidad posible (por ejemplo, empresas automatizadas). Sin embargo, a la hora de recrear una mecánica más acorde a la de un ser vivo (como por ejemplo el tentáculo de un pulpo), estos se encuentran limitados.

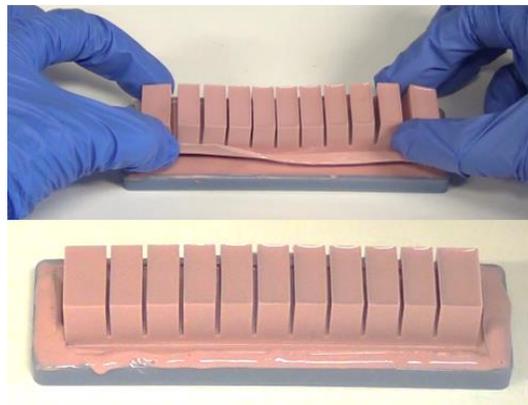


*Figura 12. Tentáculo de silicona [54].*

Por esto, se vio la necesidad de recrear movimientos más acordes a la realidad, tarea para la cual los actuadores blandos cumplen su función de la mejor manera, aprovechando la energía de los líquidos o gases para operar [53].

### 3.2.11 ROBÓTICA BLANDA

La robótica blanda es una tecnología que utiliza para crear lo que se conoce como robots blandos o “soft robots”, estos robots están creados a partir de un material especial (generalmente silicona elastosil) flexible que le varían su volumen y forma a medida que se les suministra presión. Se utilizan los sistemas neumáticos para suministrar la presión y lograr así que los actuadores tomen la forma deseada [52].



*Figura 13. Actuador blando [51].*

Para la materialización de un actuador blando se deben pasar por diferentes etapas, las cuales son:

- Diseño
- Fabricación
- Verificación

Es posible realizar diferentes tipos de movimientos, esto depende de cómo se envuelva el actuador al momento de su fabricación. Los movimientos posibles son: Flexión, giro y extensión, y estos se efectuarán al momento de suministrar aire a una determinada presión en los actuadores.

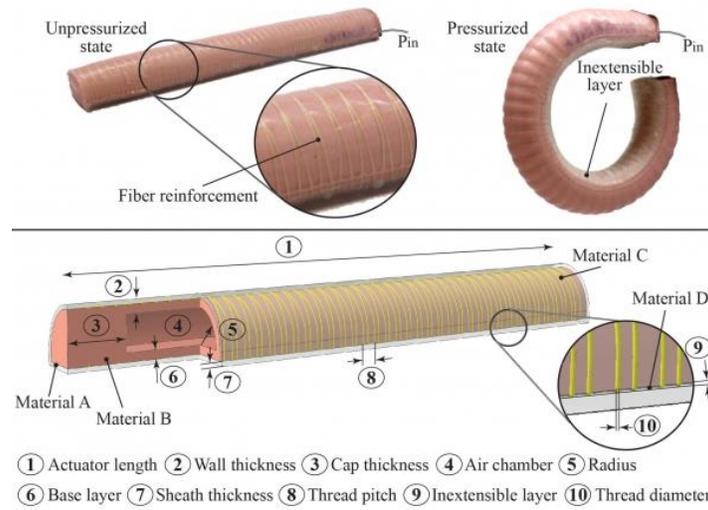


Figura 14. Doblado de actuador blando [52].

En esta etapa se tiene en cuenta la morfología, debido a que los actuadores necesitarán mayor o menor presión dependiendo de esta. Por ejemplo, el actuador de la figura 23 tiene una forma semicircular, para estos casos, incrementar el radio de la circunferencia disminuirá la presión requerida para lograr ese mismo grado de flexión. Una longitud mayor disminuye la presión requerida para lograr el mismo grado de flexión y aumentar el grosor de los bordes aumenta la presión requerida.

Para terminar la etapa de diseño se deben construir los planos ya sea a mano o con la ayuda de un software de diseño asistido por computadora, donde se deben realizar los moldes de los actuadores y así utilizar la silicona seleccionada para su fabricación.

En la etapa de fabricación se realizan los moldes de los actuadores, y de la misma manera, se realiza la envoltura de estos para que efectúen el tipo de movimiento deseado (flexión, giro o extensión). Estos movimientos son combinables y el actuador puede realizar hasta dos tipos de movimientos simultáneamente en la misma sección, todo esto dependerá del propósito final del producto. Una vez realizado esto se encapsulan y se les debe insertar un tornillo ventilador, que posteriormente será utilizado para suministrarle aire al actuador.



*Figura 15. Tornillo ventilado en un actuador blando [51].*

En la etapa de verificación se deben suministrar aire comprimido con el fin de observar el comportamiento de los actuadores y comprobar que los resultados sean los deseados [51].

## 4. PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO

### 4.1. METODOLOGÍA

El paradigma de investigación es de tipo cuantitativo, debido a que toman mediciones de variables puntuales como velocidad, fuerza, posición, temperatura y aceleración para que el dispositivo mecatrónico pueda realizar sus funciones terapéuticas de manera correcta.

El método de investigación es analítico puesto que la efectividad se presenta con un grado de parcialidad, lo que proporciona suficiente espacio para el planteamiento de nuevas hipótesis y estudios sobre cómo mejorar el proyecto dependiendo de los resultados obtenidos en las diferentes secciones de la muestra.

Para la obtención de información y monitoreo de los resultados se tuvo como fuentes primarias a médicos y fisioterapeutas especialistas en el área, mientras que las fuentes secundarias para desarrollar el proyecto se basaron en diferentes libros, estudios, artículos, publicaciones y páginas web con fundamentos teóricos.

Esta información fue suministrada tanto por parte de los profesionales encargados de tratar la enfermedad como los pacientes que la padecen y pueden expresar la situación con mayor claridad.

El proyecto tuvo tres fases. La primera fase consistió en crear el diseño del dispositivo en un software CAD, para esto se tuvo que consultar las diferentes terapias a incluir en el dispositivo, teniendo en cuenta la dificultad, relación costo-beneficio y efectividad de cada una de estas. Una vez seleccionadas las terapias, se seleccionaron los diferentes componentes y se modelaron basados en sus características mecánicas y físicas.

En la segunda fase, se seleccionaron y adquirieron los materiales y componentes necesarios para el dispositivo, se ensamblaron realizando constantes pruebas para garantizar su correcto funcionamiento.

Finalmente, se validó el dispositivo con un grupo de paciente a quienes se les realizó una encuesta al terminar una sesión de terapia para evaluar funcionamiento, practicidad y comodidad.

## 4.2. TIPO DE ESTUDIO

El tipo de estudio es exploratorio en vista de la poca información que se tienen y la falta de cura de la enfermedad, además los mismos estudios no dan certeza de que los tratamientos, medicamentos y terapias sean efectivos en su totalidad puesto que varía en cada paciente.

## 4.3. CRONOGRAMA – PLAN DE TRABAJO

A continuación, se presenta los entregables y actividades necesarias para cumplir cada objetivo del proyecto, junto con su respectivo tiempo de entrega partiendo desde una fecha inicial hasta una final. De la misma manera, se especifica el responsable de cada uno con el fin de tener un mejor control del proyecto en general.

Universidad Autónoma del Caribe Proyecto de Grado - Ingeniería Mecatrónica PLAN DE TRABAJO					
Componentes	Descripción	FECHA INICIO	FECHA FINAL	DURACIÓN (DÍAS)	RESPONSABLE
OBJETIVO 1	Diseñar en herramienta CAD el dispositivo terapéutico para artrosis en las manos y su correspondiente simulación.	1/11/2019	22/12/2019	52	BYRON OSPINO Y MARÍA PAULA HUERTAS
Entregable # 1	Listado los software CAD que brinden las herramientas necesarias para el diseño y simulación pertinente.	1/11/2019	5/11/2019	5	MARÍA PAULA HUERTAS
Actividad 1	Investigar, indentificar y comparar diversos softwares CAD para el diseño del dispositivo mecatrónico.	1/11/2019	3/11/2019	3	MARÍA PAULA HUERTAS
Tarea 1	Investigar los softwares actuales en el mercado.	1/11/2019	1/11/2019	1	MARIA PAULA HUERTAS
Tarea 2	Identificar las diferentes cualidades, alcance y limitaciones para cada uno de los diferentes softwares investigados.	2/11/2019	3/11/2019	2	MARIA PAULA HUERTAS
Actividad 2	Seleccionar el software CAD para la realización del diseño del dispositivo mecatrónico.	4/11/2019	5/11/2019	2	MARÍA PAULA HUERTAS
Tarea 3	Evaluar la funcionalidad, la pertinencia del software y su forma de adquisición.	4/11/2019	4/11/2019	1	MARIA PAULA HUERTAS
Tarea 4	Comparar las características de todos los softwares.	5/11/2019	5/11/2019	1	MARIA PAULA HUERTAS
Tarea 5	Seleccionar el software CAD más adecuado.	5/11/2019	5/11/2019	1	MARIA PAULA HUERTAS
Entregable # 2	Selección los componentes electrónicos que harán parte del dispositivo.	6/11/2019	21/11/2019	16	BYRON OSPINO
Actividad 3	Escoger los componentes electrónicos que se integrarán al dispositivo.	6/11/2019	21/11/2019	16	BYRON OSPINO
Tarea 6	Enlistar los componentes electrónicos existentes apropiados para el dispositivo mecatrónico.	6/11/2019	12/11/2019	7	BYRON OSPINO
Tarea 7	Consultar las diferentes características de los componentes que se predenten implementar, con sus respectivos precios, lugares de compra y tiempo de entrega.	13/11/2019	19/11/2019	7	BYRON OSPINO
Tarea 8	Seleccionar los componentes con base a la elección de relación costo/beneficio de los dispositivos.	20/11/2019	21/11/2019	2	BYRON OSPINO

Figura 16. Plan de trabajo 1 (propia autoría).

<b>Entregable # 3</b>	<b>Diseño del dispositivo basado en las terapias que realizarán y hacer su respectiva simulación en el software CAD escogido.</b>	22/11/2019	22/12/2019	31	BYRON OSPINO Y MARÍA PAULA HUERTAS
<b>Actividad 4</b>	<b>Seleccionar las terapias que se van a integrar al dispositivo mecatrónico.</b>	22/11/2019	29/11/2019	8	BYRON OSPINO Y MARÍA PAULA HUERTAS
Tarea 9	Identificar las diferentes terapias y ejercicios existentes para el tratamiento de la artrosis en manos.	22/11/2019	27/11/2019	6	BYRON OSPINO Y MARÍA PAULA HUERTAS
Tarea 10	Seleccionar las terapias y ejercicios que serán incorporados en el dispositivo mecatrónico.	28/11/2019	29/11/2019	2	BYRON OSPINO Y MARÍA PAULA HUERTAS
<b>Actividad 5</b>	<b>Escoger el diseño más apropiado para el dispositivo basado en los componentes electrónicos seleccionados.</b>	30/11/2019	22/12/2019	23	BYRON OSPINO Y MARÍA PAULA HUERTAS
Tarea 11	Realizar el diseño del dispositivo de acuerdo con las terapias y ejercicios seleccionados.	30/11/2019	15/12/2019	16	BYRON OSPINO Y MARÍA PAULA HUERTAS
Tarea 12	Realizar la simulación del diseño en el software CAD seleccionado.	16/12/2019	22/12/2019	7	BYRON OSPINO Y MARÍA PAULA HUERTAS
<b>OBJETIVO 2</b>	<b>Construir el dispositivo mecatrónico de rehabilitación para su implementación en personas con artrosis en manos.</b>	11/01/2020	11/03/2020	61	BYRON OSPINO Y MARÍA PAULA HUERTAS
<b>Entregable # 4</b>	<b>Adquisición de los componentes electrónicos elegidos previamente.</b>	11/01/2020	16/01/2020	6	BYRON OSPINO
<b>Actividad 6</b>	<b>Escoger el lugar de compra basado en los precios, ciudad y tiempo de entrega.</b>	11/01/2020	16/01/2020	6	BYRON OSPINO
Tarea 13	Enlistar diferentes tiendas electrónicas para la adquisición de los componentes electrónicos.	11/01/2020	14/01/2020	4	BYRON OSPINO
Tarea 14	Pedir los componentes electrónicos de acuerdo a la relación costo beneficio.	15/01/2020	16/01/2020	2	BYRON OSPINO
<b>Entregable # 5</b>	<b>Adquisición de los materiales que harán parte del dispositivo basado en los requerimientos físicos.</b>	17/01/2020	2/02/2020	17	BYRON OSPINO Y MARÍA PAULA HUERTAS
<b>Actividad 7</b>	<b>Seleccionar los materiales a implementar para la fabricación del dispositivo.</b>	17/01/2020	25/01/2020	9	BYRON OSPINO Y MARÍA PAULA HUERTAS
Tarea 15	Investigar los tipos de materiales existentes y pertinentes para el dispositivo a construir.	17/01/2020	20/01/2020	4	BYRON OSPINO Y MARÍA PAULA HUERTAS
Tarea 16	Identificar las diferentes propiedades físicas, mecánicas y térmicas para cada uno de los materiales.	21/01/2020	23/01/2020	3	BYRON OSPINO Y MARÍA PAULA HUERTAS
Tarea 17	Seleccionar los materiales que se implementarán de acuerdo a las necesidades.	24/01/2020	25/01/2020	2	BYRON OSPINO Y MARÍA PAULA HUERTAS
<b>Actividad 8</b>	<b>Comprar los materiales con base a los precios, ciudad y tiempo de entrega.</b>	26/01/2020	2/02/2020	8	MARÍA PAULA HUERTAS
Tarea 18	Enlistar diferentes tiendas, talleres o locales para la adquisición de los materiales.	26/01/2020	31/01/2020	6	MARÍA PAULA HUERTAS
Tarea 19	Pedir los materiales seleccionados de acuerdo a la relación costo/beneficio.	1/02/2020	2/02/2020	2	MARÍA PAULA HUERTAS

Figura 17. Plan de trabajo 2 (propia autoría).

<b>Entregable # 6</b>	<b>Selección el software de programación más adecuado basado en las necesidades y funciones que tendrá el dispositivo mecatrónico.</b>	3/02/2020	8/02/2020	6	BYRON OSPINO
<b>Actividad 9</b>	<b>Elegir Softwares para la programación del dispositivo mecatrónico.</b>	3/02/2020	8/02/2020	6	BYRON OSPINO
Tarea 20	Identificar los diferentes lenguajes de programación funcional comercialmente eficientes.	3/02/2020	4/02/2020	2	BYRON OSPINO
Tarea 21	Identificar las diferentes características y funcionalidades de los lenguajes de programación funcional incluyendo su facilidad de integración con dispositivos electrónicos.	5/02/2020	7/02/2020	3	BYRON OSPINO
Tarea 22	Seleccionar el software de programación funcional pertinente.	8/02/2020	8/02/2020	1	BYRON OSPINO
<b>Entregable # 7</b>	<b>Realización pruebas de acoplamiento y funcionamiento de los materiales junto con los componentes electrónicos para verificar su funcionamiento.</b>	9/02/2020	20/02/2020	12	BYRON OSPINO Y MARÍA PAULA HUERTAS
<b>Actividad 10</b>	<b>Validar del correcto funcionamiento de los componentes</b>	9/02/2020	20/02/2020	12	BYRON OSPINO Y MARÍA PAULA HUERTAS
Tarea 23	Realizar pruebas y caracterización individuales para cada componente.	9/02/2020	10/02/2020	2	BYRON OSPINO Y MARÍA PAULA HUERTAS
Tarea 24	Realizar pruebas en conjunto para verificar el acoplamiento.	11/02/2020	19/02/2020	9	BYRON OSPINO Y MARÍA PAULA HUERTAS
Tarea 25	Registrar los resultados de las pruebas.	20/02/2020	20/02/2020	1	BYRON OSPINO Y MARÍA PAULA HUERTAS
<b>Entregable # 8</b>	<b>Realizar respectivo ensamblaje del dispositivo mecatrónico y desarrollar su programación con sus diferentes pruebas.</b>	21/02/2020	11/03/2020	20	BYRON OSPINO Y MARÍA PAULA HUERTAS
<b>Actividad 9</b>	<b>Ensamblar el dispositivo de acuerdo a los planos de fabricación.</b>	21/02/2020	29/02/2020	9	BYRON OSPINO Y MARÍA PAULA HUERTAS
Tarea 26	Incorporar las piezas con los componentes electrónicos.	21/02/2020	27/02/2020	7	BYRON OSPINO Y MARÍA PAULA HUERTAS
Tarea 27	Realizar pruebas para verificar la correcta integración entre materiales y componentes electrónicos durante el ensamble y después del ensamble.	28/02/2020	29/02/2020	2	BYRON OSPINO Y MARÍA PAULA HUERTAS
<b>Actividad 10</b>	<b>Desarrollar la programación funcional del dispositivo.</b>	1/03/2020	11/03/2020	11	BYRON OSPINO
Tarea 28	Escribir los códigos para la programación funcional del dispositivo.	1/03/2020	7/03/2020	7	BYRON OSPINO
Tarea 29	Probar el código para su validación.	8/03/2020	8/03/2020	1	BYRON OSPINO
Tarea 30	Desarrollar la interfaz hombre-máquina para el dispositivo.	9/03/2020	11/03/2020	3	BYRON OSPINO
<b>OBJETIVO 3</b>	<b>Validar la técnica y funcionamiento del dispositivo terapéutico para dar cumplimiento a la prueba de usabilidad.</b>	11/03/2020	3/04/2020	24	BYRON OSPINO Y MARÍA PAULA HUERTAS
<b>Entregable # 9</b>	<b>Realizar pruebas de validación y utilidad al dispositivo para garantizar su correcto funcionamiento.</b>	11/03/2020	3/04/2020	24	BYRON OSPINO Y MARÍA PAULA HUERTAS
<b>Actividad 11</b>	<b>Probar del dispositivo mecatrónico en funcionamiento con uno o varios pacientes diagnosticados con artrosis en manos.</b>	11/03/2020	3/04/2020	24	BYRON OSPINO Y MARÍA PAULA HUERTAS
Tarea 31	Desarrollar pruebas/error en personas con artrosis en manos.	11/03/2020	22/03/2020	12	BYRON OSPINO Y MARÍA PAULA HUERTAS
Tarea 32	Realizar programación para generar un informe correcto en los resultados obtenidos en la utilización del dispositivo.	23/03/2020	29/03/2020	7	BYRON OSPINO Y MARÍA PAULA HUERTAS
Tarea 33	Validar el dispositivo de manera teórica, práctica y experimental en dispositivos de simulación.	30/03/2020	3/04/2020	5	BYRON OSPINO Y MARÍA PAULA HUERTAS

Figura 18. Plan de trabajo 3 (propia autoría).

## 5. PRESUPUESTO

A continuación, se presenta el presupuesto que corresponde a la realización de esta investigación.

### 5.1. PRESUPUESTO GENERAL

Tabla 1. Presupuesto general.

	<b>FORMATO DE PRESUPUESTO PARA PRESENTACIÓN DE PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN EN CONVOCATORIAS INTERNAS</b>				GI-02-PR-03-F02
					Versión 1
					12/06/2019
<b>PRESUPUESTO GENERAL DEL PROYECTO</b>					
<b>RUBROS</b>	<b>Fuentes de Financiamiento</b>				<b>Total</b>
	<b>Vicerrectoría de Investigaciones y transferencia</b>	<b>INVESTIGADORES</b>	<b>Otras fuentes Externas</b>	<b>Contrapartida UAC</b>	
1. Personal Científico	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 12.531.456,00	\$ 12.531.456,00
2. Personal de Apoyo	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 1.713.408,00	\$ 1.713.408,00
3. Consultoría especializada y Servicios Técnicos externos	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 0,0
4. Materiales e Insumos	\$ 0,00	\$ 133.000,00	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 133.000,00
5. Trabajo de Campo	\$ 0,00	\$ 1.000.000,00	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 1.000.000,00
6. Equipos	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 2.902.000,00	\$ 0,00	\$ 2.902.000,00
7. Bibliografía	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 100.000,00	\$ 0,00	\$ 100.000,00
8. Material de difusión y Promoción de resultados	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 4.600.000,00	\$ 0,00	\$ 4.600.000,00
<b>TOTAL, PRESUPUESTO DEL PROYECTO</b>	\$ 0,00	\$ 1.133.000,00	\$ 7.602.000,00	\$ 14.244.864,00	<b>\$ 22.979.864</b>

## 5.2. PERSONAL CIENTÍFICO Y DE APOYO

El presupuesto invertido en este rubro consiste en el costo del tiempo empleado por el personal de investigación vinculados a este proyecto, que incluye a los directores y a los auxiliares de investigación.

Tabla 2. Costo personal científico.

1. PERSONAL CIENTÍFICO										
Nombres y Apellidos	Tipo de Contrato	Función dentro del Proyecto	Valor Hora (\$)	Dedicación Horas/semana	No. de Semanas	Fuentes de Financiamiento				
						Vicerrectoría de Investigaciones y transferencia	INVESTIGADORES	Otras Fuentes Externas	Contrapartida UAC	SUB-TOTAL
1. Ingeniero Carlos Gabriel Díaz Saenz	Titular	Investigador Principal	\$ 41.935	4	48	\$ 0			\$ 8.051.520	\$ 8.051.520
2. Ingeniero Pablo Bonaveri	Asociado	Co-Investigador	\$ 46.666	2	48				\$ 4.479.936	\$ 4.479.936
	N/A									
4. Utilizar en caso de no ser Docente de Planta de la UAC	N/A									
<b>SUB-TOTAL</b>										\$ 12.531.456

Tabla 3. Costo personal de apoyo.

2. PERSONAL DE APOYO										
Nombres y Apellidos	Tipo de Vinculación	Función dentro del Proyecto	Valor Hora (\$)	Dedicación Horas/semana	No. de Semanas	Fuentes de Financiamiento				
						Vicerrectoría de Investigaciones y transferencia	INVESTIGADORES		SUB-TOTAL	

1. Estudiante María Paula Huertas Niño	Practicante	Auxiliar de Investigación	\$ 2.231	8	48		\$ 856.704	\$ 856.704
2. Estudiante Byron Daniel Ospino Arenilla	Practicante	Auxiliar de Investigación	\$ 2.231	8	48		\$ 856.704	\$ 856.704
3.	N/A							
4.	N/A							
<i>SUB-TOTAL</i>								\$ 1.713.408

### 5.3. CONSULTORIA ESPECIALIZADA

Tabla 4. Costo consultoría especializada.

3. CONSULTORIA ESPECIALIZADA Y SERVICIOS TECNICOS EXTERNOS				
Descripción	Justificación	Fuentes de Financiamiento		
		Vicerrectoría de Investigaciones y transferencia	INVESTIGADORES	SUB-TOTAL
1. Prueba de usabilidad del dispositivo.	Comprobación del correcto funcionamiento del dispositivo.			\$ 0
2.				\$ 0
3.				\$ 0
<i>SUB-TOTAL</i>		\$ 0	\$ 0	\$ 0

### 5.4. MATERIALES, INSUMOS Y EQUIPOS

El presupuesto dedicado a esta sección incluye los costos de los materiales e insumos utilizados para la realización de este proyecto.

Tabla 5. Costo materiales e insumos.

4. MATERIALES E INSUMOS					
Descripción	Justificación	Fuentes de Financiamiento			
		Vicerrectoría de Investigaciones y transferencia	INVESTIGADORES	Contrapartida UAC	SUB-TOTAL
1. Licencia software CAD.	Funcionalidades del software para el diseño y simulación del dispositivo.		\$ 133.000,00		\$ 133.000,00
2. Documentación de los componentes	Papelería con las especificaciones de los componentes		\$ 0		\$ 0
3. Investigaciones y estudios	Consultas necesarias para la información funcional del dispositivo		\$ 0		\$ 0
4. Materiales electrónicos y neumáticos.	Componentes utilizados para la fabricación y control del dispositivo		\$ 716.579		\$ 716.579
5.					
6.					
7.					
8. I					
<i>SUB-TOTAL</i>					\$ 849.579

Tabla 6. Costo trabajo de campo.

5. TRABAJO DE CAMPO									
Descripción	Justificación	No. De días	No. De personas	Costo/día de estadía por persona	Transporte por persona (ida/vuelta)	Fuentes de Financiamiento			
						Vicerrectoría de Investigaciones y transferencia	INVESTIGADORES	Contrapartida UAC	SUB-TOTAL
1. Simulación de la programación	Comprobar que los resultados simulados sean igual a los teóricos.	14	1	\$ 0	\$ 0	\$ 0			\$ 0

2. Análisis prueba y error	Se debe someter al dispositivo pruebas para verificar que cumpla con los requerimientos en laboratorios .	10	3	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 1.000.000		\$ 1.000.000
3. Comprobación funcional del dispositivo.	Se debe llevar el dispositivo a un hospital y medir su efectividad con pacientes.	5	1	\$ 0	\$ 20.000	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 20.000
<i>SUB-TOTAL</i>						\$ 0	\$	\$ 0	\$ 1.020.000

Tabla 7. Costo equipos usados

6. EQUIPOS						
Descripción	Justificación	Cantidad	Fuentes de Financiamiento			
			Vicerrectoría de Investigaciones y transferencia	INVESTIGADORES	Contrapartida UAC	SUB-TOTAL
1. Computador	Realizar diseño y simulación CAD.	1		\$ 2.850.000		\$ 2.850.000
2. Impresora 3D	Impresión de moldes para fabricar actuadores	1		\$ 1.340.000		\$ 1.340.000
3.						\$ 0
4.						\$ 0
5.						\$ 0
<i>SUB-TOTAL</i>			\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 4.190.000

## 6. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 6.1. DISEÑO DEL PROTOTIPO

A continuación, se presenta la simulación del actuador blando con el fin de comprobar el diseño seleccionado del actuador, geometría y espesor de las paredes, basado en los artículos *Mechanically Programmable Bend Radius for Fiber-Reinforced Soft actuator* y *Automatic design of fiber-reinforced soft actuators for trajectory matching* y en el estudio *Dimensiones antropométricas de población latinoamericana* para sus dimensiones. Esta simulación se realizó con el software SolidWorks.

#### Simulación

Para la simulación de los actuadores blandos se crearon primero los materiales (hilo para costura – tela de poliéster – silicona S830 shore A30) basados en las propiedades mecánicas y físicas dentro del software. Luego se creó el sólido y se realizó el ensamble de las piezas para llevar a cabo la simulación.

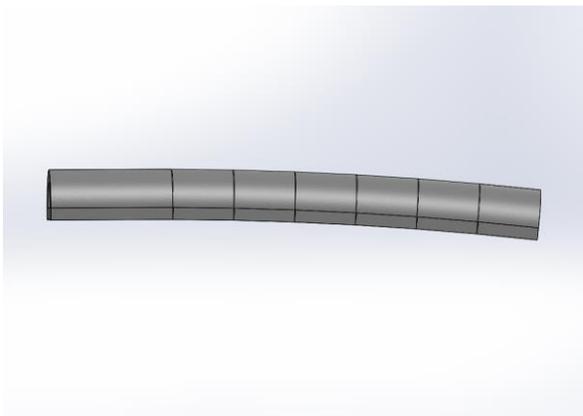


Figura 19. Vista lateral del actuador blando en su posición inicial (simulación)

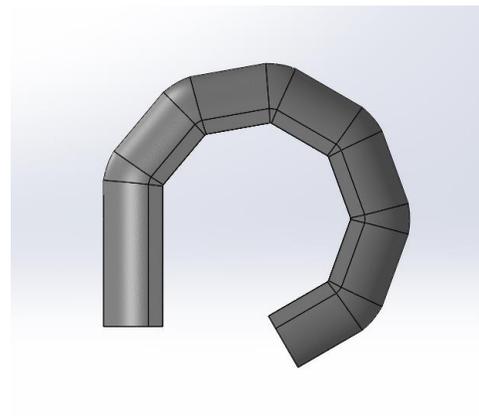
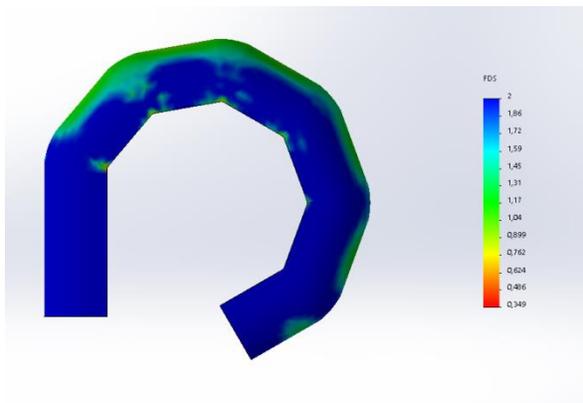


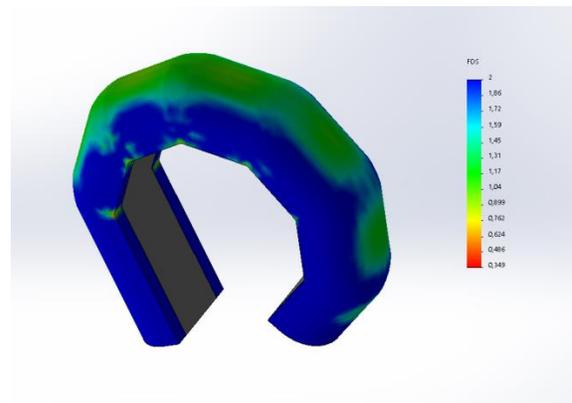
Figura 20. Vista lateral del actuador blando en su posición final (simulación)

Para realizar la simulación, se escogió como punto de anclaje la sección con más longitud del actuador, ya que esta se encontrará sujeta por el guante sobre el dorso de la mano. Luego, se procedió a establecer los parámetros de la simulación en la posición más crítica del actuador blando, flexión total, colocando como cargas externas una presión que recibe el actuador en la superficie interna ocasionada por el aire comprimido que se le suministra.

Dicha presión se varió en un rango de 20 psi a 35 psi, tomadas de los estudios mencionados previamente, con el fin de comprobar la presión necesaria empleando la silicona S830. Luego, se procedió a escoger un factor de seguridad de 2 y crear la malla ni muy fina ni muy gruesa, esto fue posible gracias a que el sistema está bien definido por la creación de los nuevos materiales, disminuyendo el tiempo de la simulación.

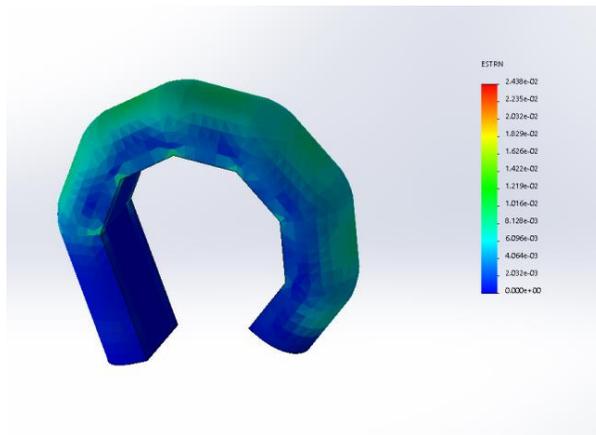


*Figura 21. Vista lateral del actuador blando factor de seguridad*



*Figura 22. Vista isométrica del actuador blando factor de seguridad*

En estas graficas se ilustran los valores mínimos y máximos del factor de seguridad para el actuador blando en su límite de flexión con una presión de 25psi en el sistema y paredes de 3.5mm a lo largo del actuador, siendo 1.1 y 2 respectivamente. Lo anterior demuestra que las características físicas seleccionadas para actuador, con base a los estudios previamente mencionados, cumplen con los requerimientos del dispositivo.



*Figura 23. Deformación unitaria (vista isométrica)*

En la gráfica de deformaciones unitarias se puede apreciar la expansión del actuador en su posición máxima en las zonas en las que tiende a fallar con un valor de  $1.310e-02$ , el cual no logra afectar sus movimientos ni lo lleva al fallo. Las zonas en color verde están compuestas únicamente de la silicona y el hilo de costura, mientras que las zonas netamente azules están compuestas por tela de poliéster, silicona e hilo de costura y los extremos por paredes de silicona de 1cm (izquierda) y 6mm (derecha) haciéndolas más resistentes a las deformaciones.

## **Moldes**

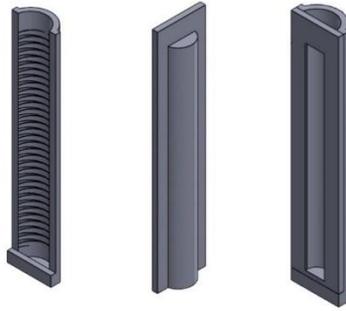
Se optó por diseñar e implementar 3 moldes en impresión 3D en ABS:

Molde 1: Pulgar

Molde 2: Índice – medio – anular

Molde 3: Meñique

Las dimensiones de para los dedos Índice – medio – anular son las mismas debido a que las diferencias entre ellos son despreciables.



*Figura 24. Moldes para fabricación de los actuadores (SolidWorks)*

### **Prototipo inicial 1**

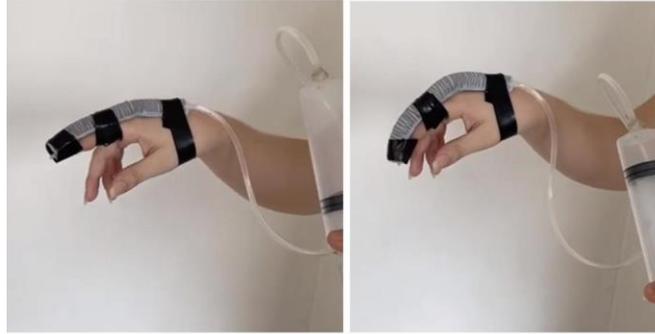
Se realizó el primer prototipo de actuador blando, con el fin de evaluar su funcionalidad y efectividad para los movimientos requeridos en las terapias.



*Figura 25. Prototipo inicial*



*Figura 26. Prueba 1 del prototipo inicial*



*Figura 27. Prueba 2 del prototipo inicial*

## **Prototipo inicial 2**

Una vez construidos los actuadores blandos, se realizaron serie de pruebas conjuntas con el compresor de aire y regulador de presión.



*Figura 28. Prueba prototipo inicial 2 (lateral)*



*Figura 29. Prueba prototipo inicial 2 (inferior)*

## **6.2. DISEÑO DISPOSITIVO FINAL**

El dispositivo final, a diferencia del prototipo inicial, cuenta un guante térmico para sostener los actuadores blandos en la posición necesaria para realizar los

movimientos. Además, cuenta con tres (3) motores vibradores ubicados estratégicamente para distribuir las vibraciones en la mano de manera uniforme y finalmente, una caja de control la cual contiene todos los componentes del sistema electroneumático.

### 6.2.1. Guante

El guante está conformado por un guante que conserva el calor, el cual ayuda en las terapias, cinco (5) actuadores blandos que corresponden a cada dedo, tres (3) motores vibradores y catorce (14) tiras de velcro para sostener los dedos.

Una vez ensamblado todos los componentes que hacen parte del guante, se obtuvieron las siguientes medidas finales:



Figura 30. Dimensiones del guante

Tabla 8. Dimensiones del guante

A	250 mm
B	160 mm
C	410 mm
D	100 mm

### 6.2.2. Caja de control

Esta es una caja de acero galvanizado calibre 20 y que consta de diferentes módulos de los cuales destacan los dos principales, el primero para el compresor de aire y el segundo para el sistema electroneumático. Las dimensiones de la caja de control son las siguientes:

## Caja componentes electroneumáticos

Tabla 9. Dimensiones caja componentes electroneumáticos

A	300 mm
B	300 mm
C	200 mm

## Caja del compresor de aire

Tabla 10. Dimensiones caja del compresor de aire

D	150 mm
E	300 mm
F	200 mm

## 6.3. MATERIALES

### 6.3.1. COMPRESOR DE AIRE

El compresor de aire para autos de la marca Stanprof funciona a 12V 10A, trabaja a 100psi (7bar) con una capacidad de 9l/min, este compresor forma parte del sistema neumático del dispositivo y es el que se encarga de suministrar el aire para que los actuadores blandos cumplan con su función.



Figura 31. Compresor de aire

### 6.3.2. SILICONA + CATALIZADOR

Esta es una silicona líquida de Dureza Shore A30 se mezcla con un catalizador (la cantidad debe ser el 3% de los gramos de silicona que se va a utilizar), este catalizador ayuda a secar más rápido la silicona (entre 6 a 8 horas) y debido a la dureza que posee, su textura final es blanda y elástica. La silicona + catalizador se emplearon para la fabricación de los actuadores blandos junto con otros componentes como el hilo de algodón y la tela de poliéster. Estos son accionados por el compresor de aire.



Figura 32. Silicona S830 + catalizador 3%

Tabla 11. Propiedades mecánicas de S830, S835 y S840. [55]

**Notes:** The data are based on the operation under room temperature of 25 °C.

Typical general characteristics	Inspection Method	Value		
		S830	S835	S840
Product data (Catalyzed A+B)				
<b>Hardness</b>	Shore A	30±2	35±2	40±2
<b>Mix Ratio</b>	A:B	100:3	100:3	100:3
<b>Color</b>	/	White	White	White
<b>Pot life</b>	25 °C (77F)	20-30mins	30-50mins	30-50mins
<b>Curing time</b>	25 °C (77F)	3- 5hrs	3- 5hrs	3- 5hrs
<b>Viscosity</b>	mPa.s	21000±3000	18000±3000	19000±3000
<b>Tear-Strength</b>	kN/m	≥28	≥25	≥23
<b>Tensile -Strength</b>	MPa	≥4.8	≥4.2	≥4.0
<b>Elongation</b>	%	≥450	≥400	≥300
<b>Shrinkage</b>	%	≤0.2	≤0.2	≤0.2

### 6.3.3. MOLDES EN IMPRESIÓN 3D

Se fabricaron en impresión 3D en el material ABS, están compuestos de dos piezas. Los moldes se emplearon para verter la mezcla de silicona + catalizador, tienen una forma semicircular y alargada que permite emplear una menor presión a diferencia de otras secciones transversales y longitudes menores.

### 6.3.4. VÁLVULAS SOLENOIDES

Válvulas solenoides de tipo HQV1 con entrada y salida de ¼ de pulgada, sus dimensiones son: 40x30x60mm. Cinco (5) de estas válvulas funcionan a 12V 4.8W y las otras cinco (5) funcionan a 24V 4.8W, fabricadas en metal y plástico, ideales para agua y aire. Trabajan con un rango de flujo de 3 – 25L/min, con un rango de presión de 0 – 120PSI (0 – 0.8MPa) y una rango de temperatura de 0 – 100°C. Conforman el sistema neumático, se conectaron dos a cada actuador, una válvula para suministrar aire del compresor y la otra para la salida del aire.



Figura 33. Válvulas solenoides.

### 6.3.5. FUENTE CONMUTADA

Para la alimentación del sistema se incorporó una fuente conmutada modelo S-360-12 de 12V 30A 360W, su voltaje de entrada es de 100 VAC ~ 240 VAC y la frecuencia de entrada de 50 Hz / 60Hz. Diseñada para un amplio número de dispositivos, entre los cuales se encuentran los dispositivos eléctricos y electrónicos.

A esta fuente se conecta directamente las válvulas solenoides que trabajan a 12V y el compresor de aire para autos.



*Figura 34. Fuente conmutada.*

### **6.3.6. MÓDULO LM2596 REDUCTOR DE VOLTAJE**

El módulo LM2596 permite la regulación de voltaje a partir de una fuente de alimentación que proporcione un voltaje mayor, su voltaje de entrada DC es de 4.5V ~ 40V y es capaz de tener como voltaje de salida 1.5V ~ 35V, dando una corriente máxima de salida de 3A. Este módulo se encarga de alimentar el Arduino MEGA, el sensor digital de temperatura DS18B20, motores vibradores, shield display LCD 2x16 azul con keypad, diodos led y módulos relé 4 canales.



*Figura 35. Módulo lm2596 reductor de voltaje.*

### **6.3.7. MODULO XL6009 ELEVADOR DE VOLTAJE**

El módulo XL6009 permite la regulación de un voltaje a partir de una fuente de alimentación que proporcione un voltaje menor. Su voltaje de entrada DC es de 3V ~ 32V y tiene un voltaje de salida de 5V ~ 35V con una corriente de salida máxima de 3<sup>a</sup>. A este módulo se conecta cinco válvulas solenoides de 24V.



*Figura 36. Módulo xl6009 elevador de voltaje*

### **6.3.8. SHIELD DISPLAY LCD 2X16 AZUL CON KEYPAD**

Este display LCD alfanumérico de 2 líneas x 16 caracteres viene integrado con 6 pulsadores y un buzzer. Sus dimensiones son 4.74mm x 2.94mm y se emplea para mostrar un menú de opciones para configurar algunos parámetros de la terapia de acuerdo a las necesidades del usuario.



*Figura 37. Shield display lcd 2x16 azul con keypad.*

## **6.4. RECOLECCIÓN DE DATOS**

Para la obtención de datos sobre la fase de implementación del dispositivo, se realizó una encuesta por medio de la herramienta Google Forms con el propósito de medir la satisfacción del usuario y su practicidad.

### **6.4.1. MUESTRA POBLACIONAL**

La prueba fue realizada a 15 usuarios, en donde sus edades oscilan entre los 22 a los 58 años de edad, con un promedio de 38 años. De los 15 usuarios, siete (7) eran

mujeres (46,7%), siete (7) eran hombres (46,7%) y uno (1) se identificó como otro (6,7%).

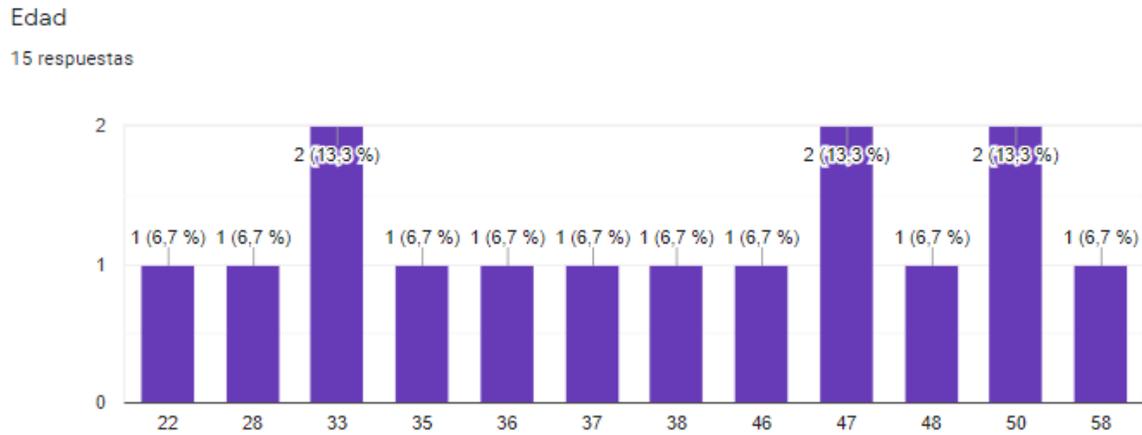


Figura 38. Edades de los encuestados.

En la figura anterior se muestra la edad de las quince (15) personas que utilizaron el dispositivo y realizaron las sesiones completas. Se clasificaron por edad de manera ascendente empezando desde 22 hasta 58 años.

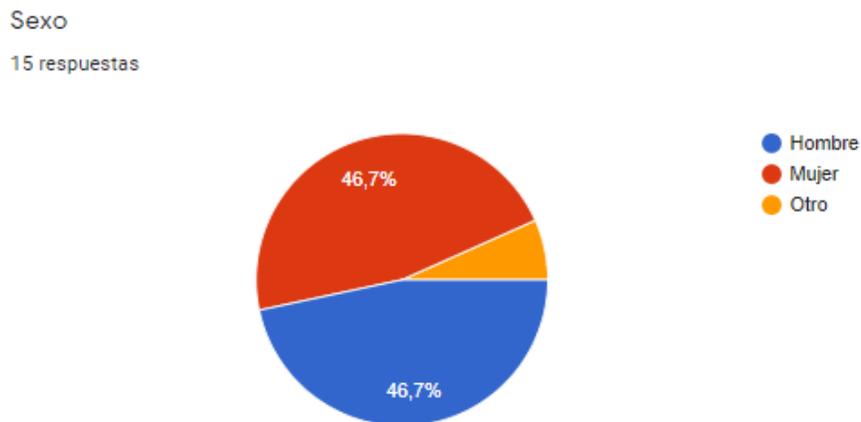


Figura 39. Género de los encuestados.

La figura [39] enseña el porcentaje del sexo al cual pertenecen las quince (15) personas encuestadas para realizar pruebas, aunque la enfermedad es más común en mujeres, se tomaron muestras iguales para estandarizar los resultados.

## **6.5. ANÁLISIS DE RESULTADOS**

A partir de la simulación realizada de los actuadores blandos y de la información extraída de los artículos, se obtuvieron 3 actuadores de diferentes dimensiones con una sección transversal semicircular, un grosor de paredes de 3,5mm y los materiales (silicona S830 Shore A30, hilo de costura y tela de poliéster) que se deben implementar para lograr el comportamiento deseado. Al suministrarles aire comprimido con una presión de 20psi logran seguir la trayectoria de los dedos de la mano de una persona, simulando su apertura y cierre. Una vez incorporados al guante, permiten realizar 4 ejercicios de fisioterapia (apertura y cierre de mano, pinza, pinza (pulgar – índice – medio), apertura y cierre mano intercalado).

El guante está diseñado para ser utilizado a bajas temperaturas, por lo que es capaz de conservar el calor y dar la sensación de que emite calor. Esto relaja los músculos de la mano, ayuda a disminuir la rigidez lo cual resulta altamente beneficioso durante la terapia reduciendo el dolor que puede padecer el usuario durante la realización de los ejercicios.

Al guante también se incorporaron 3 motores vibradores que le brindan la posibilidad al paciente de realizar una terapia vibratoria al final de cada ejercicio o rutina, permitiendo que finalice su terapia en un estado de mayor relajación y disminuyendo cualquier tipo de dolencia en las articulaciones.

Brindando una terapia muy completa dentro de un tiempo de 15 a 25 minutos, debido a que propone tres (3) tipos de terapias, en donde simultáneamente puede hacer ejercicios de fisioterapia y termoterapia, con la opción de culminar en terapia vibratoria.

### **6.5.1. ANÁLISIS DE LAS PRUEBAS REALIZADAS POR EL PROTOTIPO**

Durante la fase de pruebas del prototipo inicial se establecieron los puntos de sujeción del actuador blando a cada dedo, de manera que no interfiera con el movimiento natural de la mano y evitar molestias durante la terapia, siendo estos la falange distal, la falange media, la falange proximal y en los metacarpos.

Para las pruebas movimiento, se empleó una manguera y una jeringa para suministrarle aire y presión al actuador blando, dando como resultado un movimiento incompleto de flexión por falta de presión. A pesar de no lograr la presión requerida para lograr todo el movimiento del actuador, los materiales empleados estos mostraron un comportamiento favorable y no presentaron ningún tipo de falla.

#### **6.5.2. ANÁLISIS DE LAS PRUEBAS REALIZADAS POR EL DISPOSITIVO FINAL**

Dado que el dispositivo final cuenta con un compresor, el cual está regulado para suministrar 20psi, los actuadores incorporados al guante logran realizar los movimientos requeridos para las terapias. Además, con la implementación de las válvulas solenoides se puede controlar los movimientos por cada actuador de manera independiente proporcionando la posibilidad de realizar 3 variaciones de ejercicios adicionales. Gracias a los materiales del guante pueden conservar el calor y otorgar la sensación de mayor calor.

Por otro lado, la interfaz con la que cuenta para la interacción con el usuario permite una selección de rutinas y/o ejercicios de manera fácil y rápida, dándole la oportunidad al usuario utilizar de forma autónoma el dispositivo terapéutico y así poder realizar sus terapias desde la comodidad de su hogar.

De acuerdo a las encuestas realizadas a los 15 usuarios con relación al dispositivo terapéutico, se obtuvieron los siguientes resultados:

¿Qué opina del dispositivo terapéutico?

15 respuestas



Figura 40. Afirmación No. 1 de la encuesta.

El 53,3% de los usuarios encuestados encuentran el dispositivo muy interesante y el 33,3% lo halló interesante por las funciones que cumple y la tecnología implementada en el dispositivo describiéndolo como algo novedoso que no consume mucho tiempo, además de no exigir toda su atención una vez empezada la terapia lo que ofrece la posibilidad de realizar una actividad diferente que no implique desplazamiento o movimientos bruscos.

El dispositivo es fácil y rápido de poner.

14 respuestas

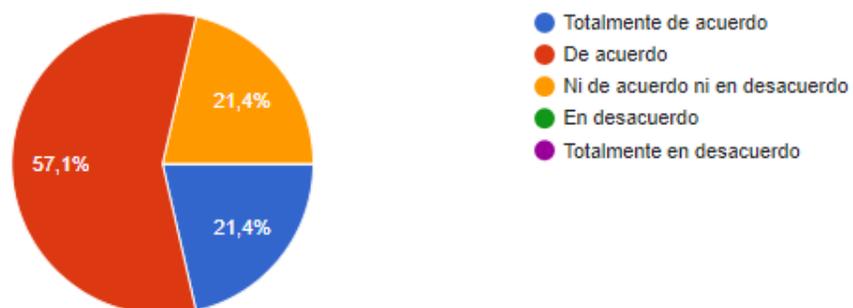


Figura 41. Afirmación No. 2 de la encuesta.

El 21,4% de los usuarios estuvieron muy de acuerdo con esta afirmación, el 57,1% estuvo de acuerdo y el 21,4% no estuvo ni de acuerdo ni en desacuerdo. Estas respuestas variaron por el tamaño de las manos de cada usuario, teniendo las manos más pequeñas el primer y segundo grupo (azul y rojo) lo que les facilitó colocarse el guante para la realización de las pruebas, mientras que los demás grupos de usuarios (amarillo, verde y morado) tendían a tener manos más gruesas y grandes dificultando este proceso.

Me sentí cómodo/a usando el dispositivo durante la terapia.

15 respuestas

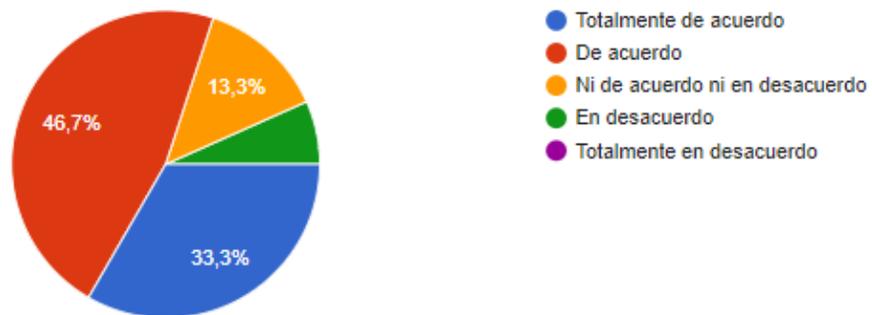


Figura 42. Afirmación No. 3 de la encuesta.

De esta afirmación, el 80% de los usuarios (totalmente de acuerdo y de acuerdo) encuentran cómodo el dispositivo durante el uso, desde su peso, el tamaño del guante, la longitud de las mangueras hasta la calidad del guante brindando una experiencia agradable.

Me pareció fácil y rápida la elección de rutinas y ejercicios.

15 respuestas

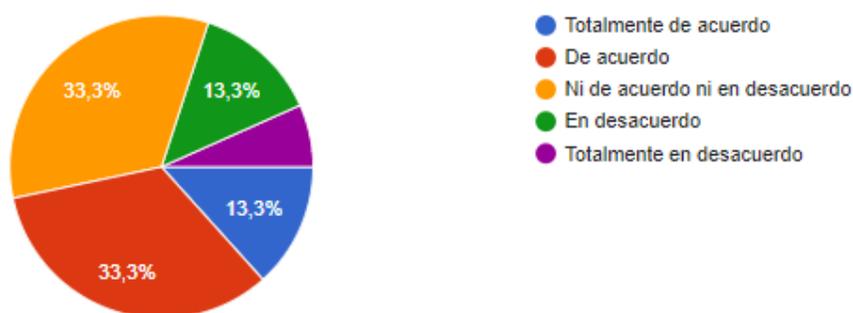


Figura 43. Afirmación No. 4 de la encuesta.

Los resultados obtenidos de esta afirmación indican que para la mayoría de los usuarios (amarillo, verde y morado) les pareció que la selección de las rutinas y ejercicios requerían un esfuerzo considerable ya que debían recurrir al manual de usuario para identificar en qué consisten las terapias o ejercicios que contiene el dispositivo.

Me sentí relajado/a y seguro/a en todo momento utilizando el dispositivo.

15 respuestas

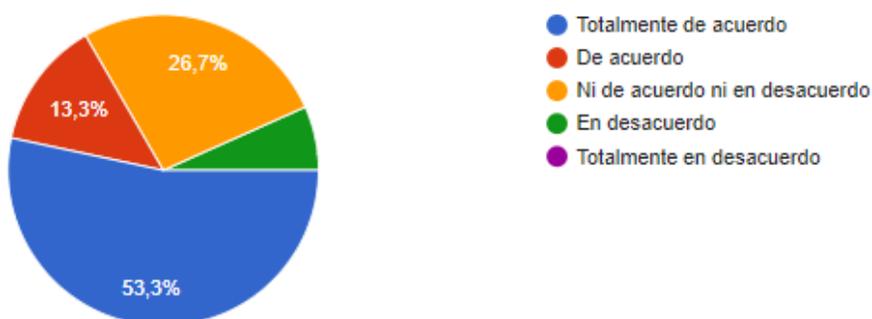


Figura 44. Afirmación No. 5 de la encuesta.

A pesar de ser un dispositivo innovador con una modalidad diferente para la realización de las terapias, el 66,6% se sintió seguro y relajado durante esta debido al funcionamiento apropiado generando confianza a los usuarios.

Considero que fue fácil retirar el dispositivo una vez finalizada mi terapia.

15 respuestas

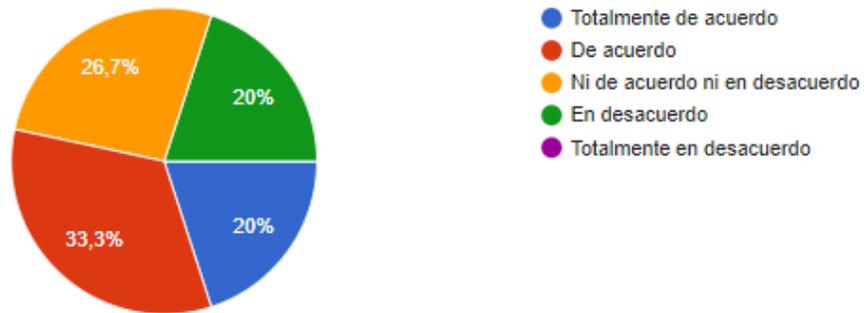


Figura 45. Afirmación No. 6 de la encuesta.

Dentro de esta afirmación, el 60% de los usuarios (rojo y amarillo) no encontraron dificultades al momento de retirar el guante cuando finalizaron la terapia mientras que el 40% (verde y azul) se les complicó. Lo anterior se debe a los tamaños de las manos de cada usuario, presentando dificultades menores o nulas quienes poseían manos más pequeñas.

Volvería a utilizar el dispositivo para realizar mis terapias.

15 respuestas

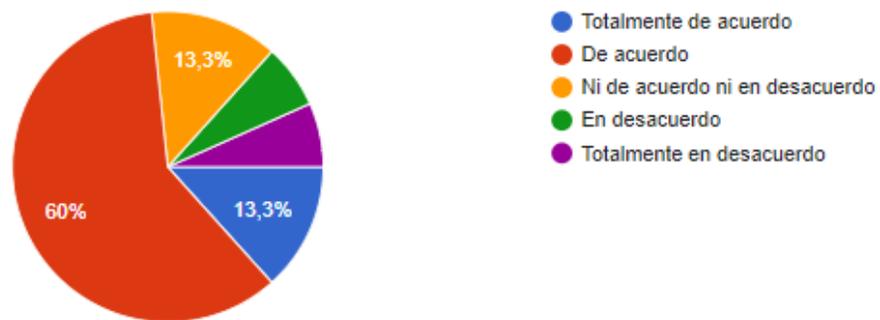


Figura 46. Afirmación No. 7 de la encuesta.

Recomendaría el uso del dispositivo a familiares y/o amigos.

15 respuestas

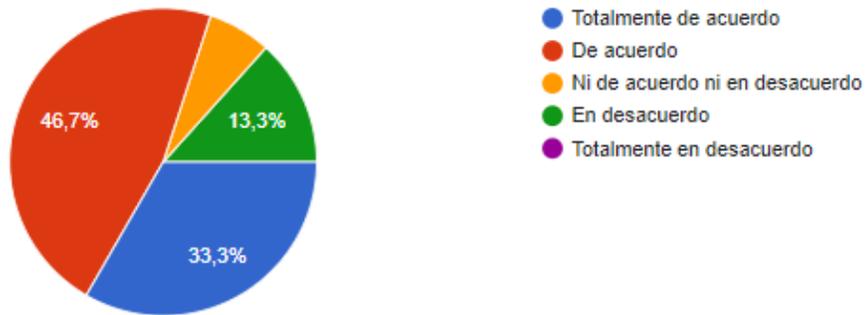


Figura 47. Afirmación No. 8 de la encuesta.

Estas dos últimas afirmaciones (No. 7 y No. 8) ilustran una aceptación positiva de los usuarios al dispositivo terapéutico, describiéndolo funcional además de innovador.

## 6.6. MANUAL DE USUARIO

Dentro del manual de usuario del dispositivo terapéutico, se muestra las instrucciones a seguir para la utilización de este y la correcta selección de los ejercicios y rutinas que tiene disponibles, junto con recomendaciones de uso. Además, contiene una explicación descriptiva de cada ejercicio y terapia que puede seleccionar el usuario para facilitar su experiencia.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Con base a los resultados obtenidos en las pruebas de este proyecto, se puede llegar a la robótica blanda como un factor clave dentro del futuro de la industria debido a su flexibilidad y movimientos complejos que los actuadores pueden llegar a realizar en lugar de los rígidos motores que se han venido usando en las últimas décadas. Además, no solo permite la posibilidad de fabricar actuadores blandos para las manos, sino que también en un futuro se pueden llegar a trabajar con dispositivos terapéuticos para diferentes partes del cuerpo como rodilla y cadera.

Cabe destacar que, con la implementación adecuada, en lugar de fabricar dispositivos terapéuticos, se puede dar paso a nuevas prótesis sencillas que funcionen a base de robótica blanda para realizar movimientos de extensión y flexión en un principio.

Del mismo modo, el dispositivo final obtenido puede mejorar significativamente implementando mejores componentes con las características requeridas, pero de un menor tamaño como las válvulas solenoides, el compresor de aire y la fuente de alimentación permitiendo que el dispositivo sea más portátil y cómodo para el usuario.

Por otro lado, a pesar de estar diseñado para el uso del hogar, podría implementarse fácilmente en centros de rehabilitación y hospitales para brindar terapia no solo a los pacientes que sufran de artrosis en las manos sino también a los pacientes que hayan sufrido de algún trauma en las manos y requieran terapia.

Finalmente, se debe tener en cuenta que cada paciente tendrá una diferente capacidad de apertura y cierre de las manos de acuerdo al estado de la enfermedad, por lo anterior, siempre se recomienda consultar a un fisioterapeuta antes de proceder a realizar terapias con el dispositivo.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] FOUNDATION, O. (n.d.). La artrosis ha crecido más de un 70% en veinte años y sigue en aumento - OAFI Foundation. [online] OAFI Foundation. Available at: <https://oafifoundation.com/la-artrosis-ha-crecido-mas-de-un-70-en-veinte-anos-y-sigue-en-aumento/> [Accessed 13 Sep. 2019].
- [2] <https://www.who.int/es>. (n.d.). La artrosis se convertirá en la cuarta causa de discapacidad en el mundo en 2020, según la OMS. [online] Available at: [https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/39682/9243208160\\_spa.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/39682/9243208160_spa.pdf?sequence=1&isAllowed=y) [Accessed 9 Sep. 2019].
- [3] Martínez Figueroa, R., Martínez Figueroa, C., Calvo Rodríguez, R. and Figueroa Poblete, D. (2015). Osteoartritis (artrosis) de rodilla. [online] Elsevier.es. Available at: <https://www.elsevier.es/es-revista-revista-chilena-ortopedia-traumatologia-230-pdf-S0716454815000236> [Accessed 9 Sep. 2019].
- [4] Fundare Colombia. (n.d.). [fundarecolombia.org](http://fundarecolombia.org). [online] Available at: <http://fundarecolombia.org/web/images/stories/articulos/ArtrosisComoVivirConElDolor.pdf> [Accessed 10 Sep. 2019].
- [5] Otero Ramón, P., Peña Ramírez, J., Espinosa Garzón, N., Morales Moreno, C., Aguilar Vivas, G., Cruz Libreros, Á., Velázquez manes, A. and Rivero Betancourt, C. (2017). SITUACIÓN DE LA ARTRITIS REUMATOIDE EN COLOMBIA. [online] [Cuentadealtocosto.org](http://Cuentadealtocosto.org). Available at: <https://cuentadealtocosto.org/site/images/Publicaciones/boletines/2017/SITUACION%20DE%20LA%20ARTRITIS%20REUMATOIDE%20EN%20COLOMBIA%202016.pdf.pdf> [Accessed 10 Sep. 2019].
- [6] Solís Cartas, U., Calvopiña Bejarano, S., Martínez Ladrada, J., Paguay Moreno, A. and Saquipay Duchitanga, G. (2018). Percepción de calidad de vida en pacientes con osteoartritis. Características sociodemográficas y clínicas. Estudio de 5 años. [online] Elsevier.es. Available at: <https://www.elsevier.es/es-revista-revista-colombiana-reumatologia-374-pdf-S0121812318300586> [Accessed 10 Sep. 2019].
- [7] Márquez Arabia, J. and Márquez Arabia, W. (2014). Artrosis y actividad física. [online] [scielo.sld.cu](http://scielo.sld.cu). Available at:

[http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0864-215X2014000100008](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-215X2014000100008)  
[Accessed 10 Sep. 2019]. Colombianosune.com. (2011). Experto en Artrosis llega a Colombia | La enfermedad afecta al 50% de la población en el mundo. [online] Available at: <http://www.colombianosune.com/noticia/experto-en-artrosis-llega-a-colombia> [Accessed 10 Sep. 2019].

[8] Artrosis de mano. (2017). Retrieved 15 August 2019, from [https://inforeuma.com/wp-content/uploads/2017/04/54\\_Artrosis-de-Mano\\_ENFERMEDADES-A4-v05.pdf](https://inforeuma.com/wp-content/uploads/2017/04/54_Artrosis-de-Mano_ENFERMEDADES-A4-v05.pdf)

[9] Castillo Puerta, C., Correa, E., Correa Sanchez, D., Díaz Hoyos, D., Duque Salazar, C., Florez, M., Gallego, D., Rodriguez García, D., F. Gil, A., Gómez, F., Gómez Toro, A. and Hernández Coral, P. (2019). ARTROSIS Y DISCAPACIDAD. [Word] Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira.

[10] thelancet.net. (2015). Global, regional, and national incidence, prevalence, and years lived with disability for 301 acute and chronic diseases and injuries in 188 countries, 1990–2013: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study. [online] Available at: [https://www.thelancet.com/journals/lancet/article/PIIS0140-6736\(15\)60692-4/fulltext#back-bib8](https://www.thelancet.com/journals/lancet/article/PIIS0140-6736(15)60692-4/fulltext#back-bib8) [Accessed 11 Sep. 2019].

[11] Macellari, V., Maccioni, G., Lanzetta, M. and Morelli, S. (2008). A home-care system for the telemonitoring and telerehabilitation of the hand incorporating interactive biofeedback. [online] <https://www.researchgate.net>. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/23317602\\_A\\_home-care\\_system\\_for\\_the\\_telemonitoring\\_and\\_telerehabilitation\\_of\\_the\\_hand\\_incorporating\\_interactive\\_biofeedback](https://www.researchgate.net/publication/23317602_A_home-care_system_for_the_telemonitoring_and_telerehabilitation_of_the_hand_incorporating_interactive_biofeedback) [Accessed 1 Sep. 2019].

[12] Cempini, M., Vitello, N., Giovacchini, F., María de Rossi, S., Lenzi, T., Chiri, A. and Carrozza, M. (2012). Wearable exoskeleton device for hand rehabilitation. [online] [Patents.google.com](https://patents.google.com). Available at: <https://patents.google.com/patent/US20150223959> [Accessed 1 Sep. 2019].

[13] P. Hendricks, J. (2010). Therapeutic arthritis glove with expandable gold rings. [online] [Patentimages.storage.googleapis.com](https://patentimages.storage.googleapis.com). Available at: <https://patentimages.storage.googleapis.com/0c/4a/14/0bd830a8afd4e6/US8313471.pdf> [Accessed 1 Sep. 2019].

- [14] Vargas, F., Medina, M., Hermosa, J. and Medina, R. (2014). Tratamiento del paciente con artrosis. [online] [www.researchgate.net](http://www.researchgate.net). Available at: [https://www.researchgate.net/profile/Francisco\\_Vargas\\_Negrin/publication/259955046\\_Tratamiento\\_del\\_paciente\\_con\\_artrosis/links/5591b72d08ae15962d8e30d7/Tratamiento-del-paciente-con-artrosis.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Francisco_Vargas_Negrin/publication/259955046_Tratamiento_del_paciente_con_artrosis/links/5591b72d08ae15962d8e30d7/Tratamiento-del-paciente-con-artrosis.pdf) [Accessed 2 Sep. 2019].
- [15] De la Torre Barreiro, J. (2016). Device for treating arthritis and osteoarthritis in extremities and chronic inflammations and for reducing muscular pain and tension. PCT/ES2016/070040. Available at: <https://patents.google.com/patent/WO2017032910A1/en>
- [16] Jianfeng, L. and Zhaojing, Z. (2016). Wearable hand exoskeleton device. CN201610447505 20160621. Available at: <https://www.tib.eu/en/search/id/epa%3ACN106112963/Wearable-hand-exoskeleton-device/#documentinfo>
- [17] Galán Cutipa, F. (2017). Galán, F. (2017). Diseño, implementación y control de un exoesqueleto para rehabilitación de extremidades superiores (Tesis de Máster en Ingeniería Mecánico-Eléctrica con Mención en Automática y Optimización). Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería. Piura, Perú. DISEÑO, IMPLEMENTACIÓN Y CONTROL DE UN EXOESQUELETO PARA REHABILITACIÓN DE EXTREMIDADES SUPERIORES. [online] [Pirhua.udep.edu.pe](http://pirhua.udep.edu.pe). Available at: [https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/3058/MAS\\_IME\\_AUT\\_025.pdf?sequence=3&isAllowed=y](https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/3058/MAS_IME_AUT_025.pdf?sequence=3&isAllowed=y) [Accessed 2 Sep. 2019].
- [18] Kang, T., Lee, J., Park, D., & Cynn, H. (2018). Effects of a finger exercise program on hand function in automobile workers with hand osteoarthritis: A randomized controlled trial. Retrieved 2 September 2019, from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2468122918303979>
- [19] Diez, J., Blanco, A., Catalán, J., Badesa, F., Lledó, L., & García, N. (2018). Hand exoskeleton for rehabilitation therapies with integrated optical force sensor. Retrieved 4 September 2019, from <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/1687814017753881>

- [20] Bianchi, M., Cempini, M., Conti, R., Meli, E., Ridolfi, A., Vitiello, N., & Allotta, B. (2018). Design of a Series Elastic Transmission for hand exoskeletons. Retrieved 2 September 2019, from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095741581830031X>
- [21] Abadía Cubillo, K., & Mesén Aguilar, P. (2008). EFICACIA DE LA MAGNETOTERAPIA EN PACIENTES CON OSTEOARTROSIS. Retrieved 23 September 2019, from <https://www.medigraphic.com/pdfs/revmedcoscen/rmc-2008/rmc081d.pdf>
- [22] Tapia Z, L., Ayala M, G., Meneses, M., Banda R, R. and Suazo G, C. (n.d.). MANUAL DE ÓRTESIS. [online] hospitaldeltrabajador.cl. Available at: <https://www.hospitaldeltrabajador.cl/ht/Comunidad/documentos/Documents/MANUAL%20ORTESIS.pdf> [Accessed 28 Sep. 2019].
- [23] Pastor Vega, J. CALOR Y TEMPERATURA. [online] Sld.cu. Available at: [http://www.sld.cu/galerias/pdf/sitios/rehabilitacion-fis/termoterapia\\_1.pdf](http://www.sld.cu/galerias/pdf/sitios/rehabilitacion-fis/termoterapia_1.pdf) [Accessed 28 Sep. 2019].
- [24] Mera Aranis, C. Técnicas de Protección Articular y Ahorro de energía. [online] academia.edu. Available at: [https://www.academia.edu/36389189/Tecnicas\\_de\\_Proteccion\\_Articular\\_y\\_Ahorro\\_de\\_energ%C3%ADa](https://www.academia.edu/36389189/Tecnicas_de_Proteccion_Articular_y_Ahorro_de_energ%C3%ADa) [Accessed 29 Sep. 2019].
- [25] Agurre Zabaleta, J. LA PSICOMOTRICIDAD FINA, PASO PREVIO AL PROCESO DE ESCRITURA. [online] scribd.com. Available at: <https://es.scribd.com/document/352755545/Agurre-Zabaleta-J-La-Psicomotricidad-Fina-Paso-Previo-Al-Proceso-de-La-Escritura> [Accessed 22 Sep. 2019].
- [26] Pozo Navarro, P. Tratado de psiquiatría. pp. Capítulo 40 Páginas 717-722.
- [27] Artrosis de manos, ejercicios y fisioterapia para aliviar el dolor – Fisioterapia a tu alcance. (2018). Retrieved 22 September 2019, from <https://www.fisioterapiatualcance.com/fisioterapia-a-tu-alcance/artrosis-de-manos-ejercicios-y-fisioterapia-para-aliviar-el-dolor/>
- [28] Vernon, H. (2013). Manipulation/Manual Therapy in the Treatment of Osteoarthritis. Retrieved 23 September 2019, from

<https://www.omicsonline.org/open-access/manipulation-manual-therapy-in-the-treatment-of-osteoarthritis-2167-7921.1000e107.php?aid=12806>

[29] Simpletasks.org. (*Rheumatic diseases and rheumatologists*. [online] Available at: <http://simpletasks.org/wp-content/uploads/2013/10/Whitepaper-Rheumatic-Diseases-in-America.pdf> [Accessed 30 Sep. 2019].

[30] Arthritis.org. *Understanding Arthritis | Arthritis Diagnosis & Management*. [online] Available at: <https://www.arthritis.org/about-arthritis/understanding-arthritis/> [Accessed 18 Sep. 2019].

[31] Wainstein, G. *Patogénesis de la artrosis*. [online] elsevier.es. Available at: <https://www.elsevier.es/es-revista-revista-medica-clinica-las-condes-202-articulo-patogenesis-artrosis-S0716864014700987> [Accessed 30 Sep. 2019].

[32] Lavallo Montalvo, D. *Osteoartritis*. [online] Facmed.unam.mx. Available at: [http://www.facmed.unam.mx/sms/temas/2010/06\\_jun\\_2k10.pdf](http://www.facmed.unam.mx/sms/temas/2010/06_jun_2k10.pdf) [Accessed 29 Sep. 2019].

[33] Inforeuma.com. (2019). *Artrosis de ManoS*. [online] Available at: [https://inforeuma.com/wp-content/uploads/2017/04/54\\_Artrosis-de-Mano\\_ENFERMEDADES-A4-v05.pdf](https://inforeuma.com/wp-content/uploads/2017/04/54_Artrosis-de-Mano_ENFERMEDADES-A4-v05.pdf) [Accessed 30 Sep. 2019].

[34] Wzar.unizar.es. *Articulaciones*. [online] Available at: [http://wzar.unizar.es/acad/cinesio/Documentos/Tema09\\_ARTICULACIONES\\_Web.pdf](http://wzar.unizar.es/acad/cinesio/Documentos/Tema09_ARTICULACIONES_Web.pdf) [Accessed 9 Oct. 2019].

[35] Monasterio, A. *CLASIFICACIÓN DE LAS ARTICULACIONES*. [online] Blog de Fisioterapia. Available at: <https://www.blogdefisioterapia.com/clasificacion-de-las-articulaciones/> [Accessed 19 Oct. 2019].

[36] Aie.cl ACTUADORES. [online] Available <http://www.aie.cl/files/file/comites/ca/abc/actuadores.pdf> [Accessed 10 Oct. 2019].

[37] Física Termodinámica. *Principio de Pascal*. [online] Available at: <https://hernanleon1002.wordpress.com/fisica-de-fluidos-y-termodinamica/primer-corte/marco-teorico/principio-de-pascal/> [Accessed 12 Oct. 2019].

[38] 330ohms. (2013). *¿Qué son los actuadores electrónicos?* - 330ohms. [online] Available at: <https://blog.330ohms.com/2013/10/14/que-son-los-actuadores-electronicos/> [Accessed 19 Oct. 2019].

- [39] Lopez, J. *Motores de corriente alterna*. [online] Juntadeandalucia.es. Available at: <http://www.juntadeandalucia.es/averroes/centros-tic/21700290/helvia/aula/archivos/repositorio/0/29/html/Motores%20de%20corriente%20alterna.htm> [Accessed 21 Oct. 2019].
- [40] Acta.es. *Motores Síncronos*. [online] Available at: [https://www.acta.es/medios/articulos/ciencias\\_y\\_tecnologia/029001.pdf](https://www.acta.es/medios/articulos/ciencias_y_tecnologia/029001.pdf) [Accessed 18 Oct. 2019].
- [41] Fisicapractica.com. *Frecuencia y período*. [online] Available at: <https://www.fisicapractica.com/frecuencia-periodo.php> [Accessed 13 Oct. 2019].
- [42] Frank (2017). *Motor paso a paso ¿qué es y cómo funciona?* [online] Available at: <https://www.ingmecafenix.com/electricidad-industrial/motor-paso-a-paso/> [Accessed 16 Oct. 2019].
- [43] Ruiz Cantabrana, Ó. (2016). ARTROSIS DE MANO Y FISIOTERAPIA.. [online] Uvadoc.uva.es. Available at: <https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/20612/TFG-O%20891.pdf;jsessionid=59B6B66934A75399F1634CD9122A4D4B?sequence=1> [Accessed 6 Oct. 2019].
- [44] Rheumatology.org .Diseases and Conditions Osteoarthritis. [online] Available at: <https://www.rheumatology.org/I-Am-A/Patient-Caregiver/Diseases-Conditions/Osteoarthritis> [Accessed 6 Oct. 2019].
- [45] Manual MSD versión para público general. (2018). *Artrosis - Trastornos de los huesos, articulaciones y músculos - Manual MSD versión para público general*. [online] Available at: <https://www.msdmanuals.com/es-co/hogar/trastornos-de-los-huesos,-articulaciones-y-m%C3%BAsculos/enfermedades-articulares/artrosis> [Accessed 28 Oct. 2019].
- [46] Espanol.arthritis.org. (*Uso de calor / frío*). [online] Available at: <http://espanol.arthritis.org/espanol/tratamientos/terapias/terapias-alternativas-complementarias-calor-frio/> [Accessed 23 Oct. 2019].
- [47] Cómo tratar lesiones por deportes con hielo y calor. Retrieved 14 October 2019, from <https://www.healthychildren.org/Spanish/health-issues/injuries->

emergencias/sports-injuries/Paginas/Treating-Sports-Injuries-with-Ice-and-Heat.aspx

[48] Urbano, G. (2018). La electroterapia y sus funciones en la rehabilitación | Deusto Salud. Retrieved 19 October 2019, from <https://www.deustosalud.com/blog/rehabilitacion-quiromasaje/electroterapia-sus-funciones-rehabilitacion>

[49] Electroestimulación neuromuscular: una nueva opción terapéutica en la mejoría de la condición física de los pacientes en hemodiálisis. (2014). Retrieved 11 October 2019, from [http://scielo.isciii.es/pdf/enefro/v17n4/05\\_original4.pdf](http://scielo.isciii.es/pdf/enefro/v17n4/05_original4.pdf)

[50] ECUADOR. 2018. *ESTUDIO DE LA NEUMÁTICA Y SUS APLICACIONES EN DIFERENTES CAMPOS DE LA INDUSTRIA..* [online] disponible en: <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/16881/1/T-UCE-0010-FIL-145.pdf>[Accessed 12 January 2020].

[51] Panagiotis Polygerinos, Kevin Galloway, Zheng Wang. 2016. *Fiber-Reinforced Actuators.* [online] disponible en: <https://softroboticstoolkit.com/book/fiber-reinforced-bending-actuators> [Accessed 14 January 2020].

[52] Harvard biodesign lab. *Soft Robotics.* [online] disponible en: <https://biodesign.seas.harvard.edu/soft-robotics> [Accessed 15 January 2020].

[53] Gómez Suárez <https://core.ac.uk/download/pdf/44311548.pdf>, E., 2015. DISEÑO, MODELADO Y FABRICACIÓN DE ROBOTS BLANDOS. [online] Universidad Carlos III de Madrid. Disponible: <https://core.ac.uk/download/pdf/44311548.pdf> [Accessed 10 January 2020].

[54] Diaz, M., 2018. MODELADO MEDIANTE ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS DE KYMA, UN ROBOT MANIPULADOR BLANDO.. [online] Universidad Politécnica de Madrid. Disponible en: [http://oa.upm.es/51964/1/TFG\\_MONTSERRAT\\_DIAZ-CARRASCO\\_DIAZ.pdf](http://oa.upm.es/51964/1/TFG_MONTSERRAT_DIAZ-CARRASCO_DIAZ.pdf) [Accessed 28 March 2020].

[55] R. Silicone, "Resin Casting Silicone", ottsilicone. [Online]. Available: <https://www.ottsilicone.com/product/resin-casting-silicone/>. [Accessed: 13- Aug- 2020].

## ANEXOS