



**UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA**

**Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño
ETSID**

**Doctorado en Diseño, Fabricación y Gestión de Proyectos
Industriales**

**Estudio sistémico de una estructura exoesquelética para la rehabilitación
de la atrofia muscular de la mano en personas con artritis reumatoide**

Tesis Doctoral

Doctorando: Roberto Moya Jiménez

**Directora:
Dra. Teresa Magal Royo**

Ecuador, febrero de 2023

“La mano es el instrumento de instrumentos”

Aristóteles

Agradecimientos

Antes que todo, me permito expresar un profundo y sincero agradecimiento hacia todos aquellos que han contribuido y aportado de distintas maneras al desarrollo de esta tesis doctoral, especialmente a la Dra. Teresa Magal Royo quien, desde su experiencia conocimiento y máxima dedicación, orientó y motivó la investigación haciendo el respectivo acompañamiento. Gracias por confiar en mis investigacionessobre exoesqueletos, pero sobre todo gracias por apoyarme en este tiempo.

Agradecer a mis compañeros y compañeras, en el apoyo logístico y desarrollo tecnológico del prototipo, así como su inestimable ayuda y apoyo durante estos años.

Un agradecimiento por la apertura a las instalaciones y a los pacientes brindada en el Hogar de Ancianos Santa Catalina Labouré, Quito, Ecuador y especialmente a su directora Sor Cecilia Vargas, quien me ha permitido culminar con éxito esta investigación. Agradezco también el trabajo y apoyo recibido de los fisioterapeutas y médicos del Centro que usaron el dispositivo ARTH-aid ExoGlove System para validarlo y que facilitaron información para mejorar el dispositivo final. Finalmente, un agradecimiento a los mayores residentes en el centro que participaron en las pruebas sin cuya inestimable ayuda, comentario y apoyo no podría haberse hecho las pruebas finales con usuarios.

Un agradecimiento especial a la PhD(c) Andrea Goyes.

Y gratitud eterna a mis padres.

Resumen

La mano humana es uno de los instrumentos más importantes para la psicomotricidad de ser humano y cualquier problema crónico como la Artritis Reumatoide (AR) implica la necesidad de una rehabilitación pautada y seriada desde el punto de vista médico que controle y verifique su efectividad en el tiempo. La Artritis Reumatoide es una de las enfermedades crónicas de mayor impacto social en la actualidad que afecta principalmente a personas mayores. Se considera que la AR afecta actividades y la calidad de vida de una persona, sobre todo en la de los adultos mayores, donde las afectaciones son mayormente significativas y requieren de atención. A través de la rehabilitación controlada asistida por ordenador, la tesis presenta, por una parte, una investigación sobre exoesqueletos para la rehabilitación crónica y por otra, la creación y validación de un dispositivo exoesquelético para el mano denominado ARTH-aid System que servirá para mejorar la rehabilitación de la mano artrítica que sufre una atrofia muscular progresiva. El sistema creado representa una ayuda significativa a través de la integración de determinados factores como: ergonomía, funcionalidad y diseño. Se ha diseñado y testado con usuarios finales tomando en cuenta los factores mecánicos y de funcionalidad en la pérdida progresiva de movilidad manual de la mano en personas mayores con AR crónica.

El sistema de rehabilitación incluye como parte fundamental un exoesqueleto en la mano que evalúa la dinámica y el progreso de la rehabilitación de un usuario generando confianza y satisfacción en el paciente durante las sesiones y mejorando la interacción con el fisioterapeuta. La metodología y el diseño de un guante exoesqueleto para la rehabilitación de pacientes crónicos de AR, ha sido desarrollada y evaluada teniendo en cuenta aspectos relacionados con el Design Thinking (DT) y el Diseño Centrado en el Usuario (DCU). Así mismo, en la creación e implementación tecnológica del sistema, se ha tenido en cuenta las tecnologías informáticas y electrónicas orientadas al manejo de sistema de gestión y control de movimientos programados mediante una placa electrónica integrada, finalmente se han utilizados aplicaciones de Diseño Asistido por Ordenador (DAO) y herramientas de Prototipado Rápido (PR) para la generación de las simulaciones informáticas y piezas físicas articuladas implementadas en el guante.

La validación del sistema se realizó en el Hogar de Ancianos Santa Catalina Labouré, de Quito, Ecuador, primero con un grupo de expertos compuesto por los fisioterapeutas que trabajan en el centro y que permitió analizar su factibilidad como sistema integrado en el proceso de rehabilitación actual y posteriormente con un grupo de pacientes controlados terapéuticamente desde el centro, que permitió validar la funcionalidad del dispositivo, verificar su efectividad y evaluar el nivel de satisfacción dentro de la experiencia del usuario.

Palabras clave: Artritis Reumatoide, Mano, Exoesqueleto, Diseño Centrado en el Usuario, Prototipado Rápido.

Abstract

The human hand is one of the most important instruments for the psychomotricity of being human and any chronic problem such as Rheumatoid Arthritis (RA) implies the need for a scheduled and serial rehabilitation from the medical point of view that controls and verifies its effectiveness over time. Rheumatoid arthritis is one of the chronic diseases with the greatest social impact today that mainly affects older people. RA is considered to affect a person's activities and quality of life, especially in older adults, where the affectations are mostly significant and require attention. Through computer-aided controlled rehabilitation, the thesis presents, on the one hand, an investigation on exoskeletons for chronic rehabilitation and on the other, the creation and validation of an exoskeletal device for the hand called ARTH-AID System that will serve to improve the rehabilitation of the arthritic hand that suffers a progressive muscular atrophy.

The system created represents a significant help through the integration of certain factors such as: ergonomics, functionality and design. It has been designed and tested with end users taking into account the mechanical and functional factors in the progressive loss of manual hand mobility in older people with chronic RA.

The rehabilitation system includes as a fundamental part an exoskeleton in the hand that evaluates the dynamics and progress of a user's rehabilitation, generating confidence and satisfaction in the patient during the sessions and improving the interaction with the physiotherapist. The methodology and design of an exoskeleton glove for the rehabilitation of chronic RA patients has been developed and evaluated considering aspects related to Design Thinking (DT) and User-Centered Design (DCU). Likewise, in the creation and technological implementation of the system, computer and electronic technologies oriented to the management of management system and control of programmed movements through an integrated electronic board have been taken into account, finally Computer Aided Design (DAO) applications and Rapid Prototyping (PR) tools have been used for the generation of computer simulations and articulated physical parts implemented in the glove.

The validation of the system was carried out at the Santa Catalina Labouré Nursing Home, in Quito, Ecuador, first with a group of experts composed of the physiotherapists who work in the center and that allowed to analyze its feasibility as an integrated system in the current rehabilitation process and later with a group of potential users or patients controlled therapeutically from the center, that allowed to validate the functionality of the device, verify its effectiveness and evaluate the level of satisfaction within the user experience.

Keywords: Rheumatoid Arthritis, Hand, Exoskeleton, User-Centered Design, Rapid Prototyping.

Resum

En la present tesi doctoral es va a profundir una de les malalties de gran impacte com és el cas de l'Artritis Reumatoide (AR) que afecta greument nivell mundial a persones de diferents edats. En entendre a la mà com una de les majors eines de vida, es consideren tots els impactes que té la AR en la vida d'una persona, especialment en la dels adults majors, on les afectacions són majorment significatives i requereixen d'atenció

Amb la finalitat de millorar la qualitat de vida d'adults majors que pateixen de AR, la investigació culmina en el disseny d'una eina per a la rehabilitació contínua i controlada que va ser concebuda mitjançant el Disseny Centrat en l'Usuari (DCU) i la implementació de tecnologies i eines de Prototipado Ràpid. No sense abans haver realitzat una forta investigació que permetia comprendre clarament l'anatomia i la fisiologia de la mà. Seguit de revisions de pro-positades que es troben en el mercat i de diferents validacions amb diversos prototips, els mateix que són part de la metodologia utilitzada i que van permetre analitzar tant a la proposta de disseny com els requeriments essencials dels usuaris finals.

El correcte enteniment de l'estructura biomecànica de la mà resideix en el coneixement de la seua estructura com un component funcional autònom; la geometria biomètrica de la mà representa un conjunt d'ossos, músculs i articulacions que són els responsables del control motor i sensorial de la mà. En perdre aquestes habilitats i funcions, es perd la capacitat de realitzar una sèrie de diversos moviments de força i agarres, i fins i tot altres activitats quotidianes com vestir-se o menjar.

El desenvolupament d'un sistema de rehabilitació mitjançant un exoesquelet adaptat i dissenyat pensant en l'usuari, permet millorar la interacció objecte- persona, la dinàmica de rehabilitació i generar confiança en el pacient durant el seu interacció amb el fisioterapeuta. Aquest escenari representa una ajuda significativa a través de la integració de determinats factors com: ergonomia, funcionalitat i disseny per a assemble i manufactura, aspectes que van permetre validar l'exoesquelet creat amb un grup d'usuaris reals. En aqueix sentit, les validacions es van fer tant amb el grup de pacients que pertanyen a la Llar d'Ancians "Santa Catalina Labouré", com amb el grup expert de fisioterapeutes que dediquen un temps a la rehabilitació d'aquests pacients.

Paraules clau: Artritis Reumatoide, Mà, Exoesquelet, Disseny Centrat en l'Usuari, Prototipat Ràpid.

Índice de Contenidos

Agradecimientos	V
Resumen.....	VI
Abstract.....	VII
Resum	VIII
Índice de Contenidos.....	IX
Índice de Tablas	XII
Índice de Imágenes.....	XIII
1. Introducción	1
1. Antecedentes	2
1.1. Planteamiento.	3
1.2. Hipótesis.	4
1.3. Objetivos.....	5
1.3.1. Objetivo general	5
1.3.2. Objetivos específicos.....	5
1.4. Referencias	6
2. Anatomía, morfología y función motora de la mano	8
2.1. Introducción	9
2.2. Biomecánica de la mano.....	10
2.2.1. Aspectos anatómicos de la mano.....	10
2.2.2. Análisis Anatómico	14
2.2.3. Músculos de la mano	15
2.2.4. Aspectos sensoriales de la mano.....	16
2.2.4.1. Termorreceptores	17
2.2.4.2. Propioceptores.....	17
2.2.4.3. Nociceptores	18
2.2.5. Aspectos relacionados con el movimiento de la mano	18
2.2.5.1. Rangos de movilidad del complejo articular de la muñeca y la mano	18
2.2.5.2. Rango de movilidad de los dedos	19
2.2.5.3. Oposición	21
2.2.5.4. Flexión y extensión del pulgar.....	22
2.2.5.5. Clasificación de las funciones de agarre de la mano.....	24
2.3. Conclusiones.....	27
2.4. Referencias	28
3. Artritis reumatoide	32
3.1. Introducción.....	33
3.1.1. Sintomatología en la mano artrítica	33
3.1.2. Evolución de la enfermedad	34
3.1.3. Evolución de la enfermedad en las extremidades superiores.....	36
3.1.4. Manifestaciones extraarticulares.....	36
3.1.5. Tratamiento de la enfermedad	38
3.1.6. La rehabilitación	39
3.1.7. La Terapia Física	41
3.1.8. Actividades Terapéuticas Manuales (ATM).....	42
3.1.9. Técnicas alternativas.....	42
3.1.10. Técnicas Operantes o conductuales	42
3.1.11. Terapia cognitivo-conductual	42
3.1.12. Terapias asistidas por ordenador	43
3.1.13. Dispositivos para la rehabilitación de la mano	44
3.2. Conclusiones.....	48
3.3. Referencias	49

4. Antecedentes Tecnológicos	52
4.1. Introducción.....	53
4.2. Endoesqueleto y Exoesqueleto	54
4.2.1. Endoesqueleto.....	54
4.2.2. Exoesqueletos	56
4.2.2.1. Exoesqueletos activos y pasivos	56
4.2.2.2. Los exoesqueletos mecánicos	57
4.3. La Mecatrónica en la construcción de exoesqueletos	59
4.4. Exoesqueletos robóticos	60
4.4.1. Exoesqueletos de miembros superiores	61
4.5. Exoesqueletos de la mano.....	64
4.5.1. Exoesqueleto ExoK'ab©	64
4.5.2. Mano aumentada.....	65
4.5.3. TrackGloveSystemsCyberGrasp©.....	66
4.5.4. SoftRoboticGlove ©	67
4.5.5. ExoGlovePoly©.....	68
4.5.6. RATHERAPEUTICGLOVE©.....	68
4.5.7. HandExoskeleton©.....	69
4.5.8. WearableHandExoskeleton©.....	70
4.5.9. UNITS-HandEskeleton ©.....	71
4.6. Conclusiones.....	73
4.7. Referencias	75
5. ARTH-aid ExoGlove System.....	78
5.1. Introducción.....	79
5.1.1. Necesidades funcionales, terapéuticas y tecnológicas.	79
5.1.2. Normativa y estándares.....	81
5.2. Propuesta metodológica para la creación del ARTH-aid ExoGlove System.....	82
5.2.1. Identificación antropométrica de la mano.	83
5.3. Diseño del exoesqueleto ARTH-aid ExoGlove System	86
5.4. Diseño del guante como exoesqueleto para mano ARTH-aid ExoGlove System	90
5.4.1. Arquitectura electrónica del ARTH-aid ExoGlove System.....	93
5.4.2. Diseño mecánico del ARTH-aid System.....	98
5.4.3. Aplicación del Diseño Centrado en el Usuario (DCU).....	102
5.4.4. Desarrollo definitivo del ARTH-aid ExoGlove System	111
5.5. Conclusiones.....	113
5.6. Referencias	114
6. Evaluación con usuarios	119
6.1. Introducción.....	120
6.2. Hipótesis planteadas sobre las encuestas de satisfacción final del usuario o paciente	121
6.3. El Hogar Santa Catalina Labouré	121
6.4. Definición de usuarios	122
6.5. Sesiones de ejercicios terapéuticos desarrollados con el ARTH-aid System	126
6.6. Desarrollo de las encuestas sobre la satisfacción final de uso del ARTH-aid System.....	130
6.7. Encuestas realizadas a los terapeutas del centro	130
6.7.1. Usabilidad y Facilidad de uso del ARTH-aid Glove en terapeutas	131
6.7.2. Usabilidad y Facilidad de uso del ARTH-aid ExoGlove System en terapeutas	132
6.7.3. Impacto en la rehabilitación.....	134
6.8. Encuestas realizadas a pacientes.....	136
6.8.1. Usabilidad y facilidad de uso del ARTH-aid ExoGlove en pacientes	138
6.8.2. Usabilidad y facilidad de uso del ARTH-aid System en pacientes.....	140
6.8.3. Impacto en la rehabilitación en pacientes	142
6.8.4. Las valoraciones y promedios de las preguntas realizadas en función del sexo o género de pacientes.....	145
6.9. Conclusiones.....	148

7. Conclusiones y Futuras Líneas de Investigación.....	151
7.1. Conclusiones.....	152
7.2. Líneas de Investigación futuras	156
7.3. Artículos publicados de carácter predoctoral realizados.....	158

Índice de Tablas

Tabla 1: Rango de movimiento en dedos y articulaciones de la mano.	13
Tabla 2: Rango de movimiento de la muñeca.	14
Tabla 3: Promedio de los rangos de movilidad del antebrazo y mano.	19
Tabla 4: Relación porcentual (%) de la longitud de las falanges con respecto a la longitud de la mano.	20
Tabla 5: Relación porcentual (°) de la longitud de las falanges con respecto a la longitud de la mano.	20
Tabla 6: Adaptación de criterios de diagnóstico de la clasificación ACR/EULAR 2010.	37
Tabla 7: Diagnóstico diferencial de la artritis reumatoide de la mano.	38
Tabla 8: Acción farmacológica.	39
Tabla 9: Resumen de las características principales de los exoesqueletos de mano	72
Tabla 10: Criterios de uso del guante exoesquelético de la mano.	80
Tabla 11: Valores antropométricos de los dedos de la mano de usuarios.	83
Tabla 12: Costes de materiales para elaboración del ARTH-aid ExoGlove System.	102
Tabla 13: Retroalimentación basada en los requisitos.	103
Tabla 14: Retroalimentación en base a los requerimientos técnicos abordados en la encuesta realizada en el primer prototipo ARTH-aid ExoGlove.	107
Tabla 15: Adaptación de la encuesta tipo HAQ para el control y seguimiento terapéutico del paciente.	125
Tabla 16: Ejemplo de plantilla de ejercicios semanal de rehabilitación.	130
Tabla 17: Usabilidad y Facilidad de uso del ARTH- ExoGlove en terapeutas.	131
Tabla 18: Datos descriptivos sobre la Usabilidad y Facilidad de uso del ARTH- ExoGlove en terapeutas.	132
Tabla 19: Usabilidad y Facilidad de uso del ARTH-AID System.	133
Tabla 20: Datos descriptivos sobre la Usabilidad y Facilidad de uso del ARTH-System en terapeutas.	133
Tabla 21: Impacto en la rehabilitación mediante el uso del ARTH-ExoGlove en terapeutas.	134
Tabla 22: Datos descriptivos sobre Impacto en la rehabilitación en el uso del ARTH- AID ExoGlove en terapeutas.	135
Tabla 23: Recomendación y satisfacción de uso general.	136
Tabla 24: Promedio de edad.	137
Tabla 25: Usabilidad y facilidad de uso del ARTH-aid ExoGlove.	139
Tabla 26: Usabilidad y facilidad de uso del ARTH-aid ExoGlove.	140
Tabla 27: Usabilidad y facilidad de uso del ARTH-aid System.	141
Tabla 28: Usabilidad y Facilidad de uso del ARTH-AID System.	142
Tabla 29: Valoración de la satisfacción del paciente. P8. Considero que el acceso a la aplicación del ARTH-AID System es rápida.	142
Tabla 30: Impacto en la rehabilitación.	143
Tabla 31: Impacto de rehabilitación.	143
Tabla 32: Valoración de la satisfacción del paciente. P 13. Considero que con el uso del ARTH-AID ExoGlove el dolor de mis manos disminuye.	144
Tabla 33: Valoración de la satisfacción del paciente. P 14. Me ha sido fácil usar el ARTH-AID ExoGlove en mis actividades cotidianas.	144
Tabla 34: Valoración de la satisfacción general del paciente del sistema ARTH-AID.	144
Tabla 35: Respuestas en base a: Recomendaría a más personas en la misma situación que yo.	145
Tabla 36: Respuestas en base a: Continuaría con el uso semanalmente.	145

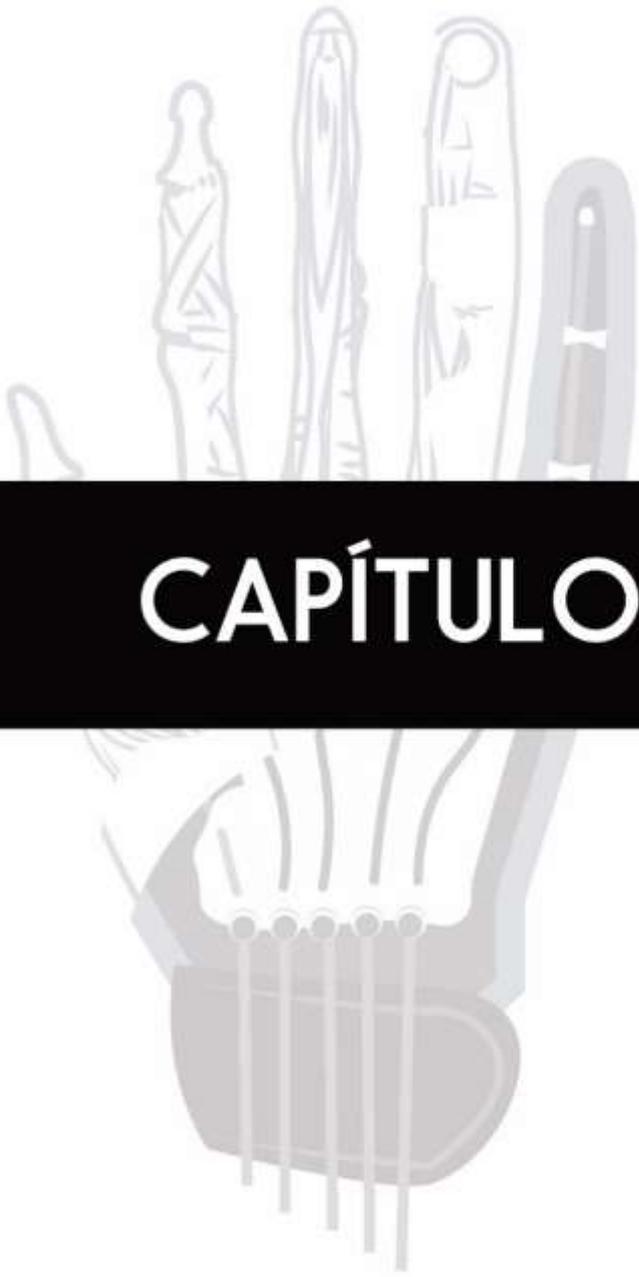
Índice de Imágenes

Imagen 1: Estructura ósea de la mano humana.....	11
Imagen 2: Movimientos del dedo pulgar; (a) abducción, (b) aducción, (c) oposición y (d) reposición...	11
Imagen 3: Falanges y articulaciones del dedo índice.....	12
Imagen 4: Nomenclatura de las articulaciones de la mano humana.....	12
Imagen 5: Músculos abductores, aductores de la mano y conducto sinovial del dedo índice.....	15
Imagen 6: Receptores sensoriales somáticos de la piel.....	17
Imagen 7: Rango de movilidad: muñeca.....	19
Imagen 8: Grados de movilidad de la articulación metacarpofalángica (MCF).	21
Imagen 9: Grados de movilidad de la articulación interfalángicas proximal (IFP)	21
Imagen 10: Grados de movilidad: de la articulación interfalángica distal (IFD).....	21
Imagen 11: Límite de grados de la Abducción-aducción de los dedos de la mano.....	22
Imagen 12: Limite en grados de la abducción transpalmar del pulgar.....	22
Imagen 13: Limite en grados de la articulación metacarpofalángica, (MCF).....	23
Imagen 14: Limite en grados de la articulación interfalángica (IF).	23
Imagen 15: Límite en grados del movimiento de abducción-aducción palmar del pulgar.....	23
Imagen 16: Clasificación de los tipos de agarre (A) Cilíndrico, (B) de punta, (C) de gancho, (D) palmar, (E) esférico, (F) lateral.	25
Imagen 17: Clasificación de Napier.....	25
Imagen 18: Clasificación de Iberall.	26
Imagen 19: Fotografía de los nódulos reumatoideos subcutáneos en el codo izquierdo.....	34
Imagen 20: Armassist 2.0 ©.....	43
Imagen 21: Férulas funcionales para extremidades superiores e inferiores	44
Imagen 22: Dispositivo Strengthener © en posición para terapia de agarre	45
Imagen 23: GripPro © en posición de agarre.....	45
Imagen 24: Modelo de pinza de silicona para dedos.....	46
Imagen 25: Varigrip©.....	46
Imagen 26: Aploplexi Stroke ©.	47
Imagen 27: Comparación de endoesqueleto con exoesqueleto.	54
Imagen 28: Huesos y cartílagos.	56
Imagen 29: Exoesqueleto pasivo y activo.	57
Imagen 30: Exoesqueleto PART4you de Audi.	57
Imagen 31: Exoesqueleto Walking Assist Device fabricado por Honda.	58
Imagen 32: Exoesqueleto desarrollado por Lockheed Martin.....	58
Imagen 33: The Roam Elevate desarrollado por Roam Robotics para esquiar.....	58
Imagen 34: Clasificación de los cuatro tipos de exoesqueletos por aplicaciones en la industria.	59
Imagen 35: Esquema de exoesqueleto robótico convencional.	61
Imagen 36: Descripción del sistema de un exoesqueleto robótico para brazo.	62
Imagen 37: Descripción del sistema de un exoesqueleto robótico de mano enfocado a rehabilitación motriz superior.	63
Imagen 38: FES-Exoskeleton© mientras se realiza movimientos de codo. (A) extensión del codo. (B) flexión del codo.....	63
Imagen 39: Secuencia de fotografías tomadas durante el experimento que ilustran el estado del exoesqueleto al final de las 3 etapas.....	64
Imagen 40: (A) Imágenes de una mano en ExoK'ab © (B) Mecanismo de pulsera ajustable. (C) Movimiento de flexión. (D) Movimiento de extensión.....	64
Imagen 41: Partes de la Mano aumentada©.....	65
Imagen 42: (A) abertura de café, (B) abertura de lata de carne, (C) verter el agua,	65
Imagen 43: Mano Robot Exoesquelética NJIT Track- Glovesystem CyberGrasp©.....	66
Imagen 44: Ejercicios con SoftExoskeleton©.....	67
Imagen 45: SoftRoboticGlove©.....	67
Imagen 46: ExoGlove-Poly©.....	68

Imagen 47: RATherapeuticGlove©.....	69
Imagen 48: Captura digital del movimiento del dispositivo HandExoskeleton©.....	70
Imagen 49: WearableHandExoskeleton©.....	70
Imagen 50: UNITS-HandEskeleton.....	71
Imagen 51: Manos digitalizadas con escaneo 3D en formato de malla.....	84
Imagen 52:Proceso de digitalización.....	85
Imagen 53:Proceso de impresión 3D de un modelo de mano con artritis.....	85
Imagen 54:Estudio preliminar de los movimientos y amplitudes de los dedos de la mano.....	86
Imagen 55: Diseño de falanges a partir de referencias antropométricas de las medidas en usuarios con artritis.....	86
Imagen 56: Diseño de la estructura palmar a partir de referencias antropométricas de las medidas en usuarios con artritis.....	87
Imagen 57: Primer prototipo de la articulación protésica de las falanges del dedo índice.....	87
Imagen 58:Diseño virtual del modelo rígido de la palma de la mano.....	88
Imagen 59:Validación y testeo de prototipo con paciente y terapeuta.....	89
Imagen 60:Análisis del movimiento poliarticular de la mano.....	89
Imagen 61:Proceso de diseño y desarrollo del prototipo.....	90
Imagen 62:Proceso de Diseño enfocado al desarrollo de producto.....	90
Imagen 63:Boceto digital del guante.....	91
Imagen 64:Diagrama de componentes principales de ARTH-ExoGlove.....	92
Imagen 65:Boceto digital del guante entero.....	93
Imagen 66:Cableado, circuito impreso y pantalla de ARTH-aid System.....	94
Imagen 67:Simulación programado en Arduino en la aplicación ThinkerCad©.....	95
Imagen 68: Diagrama electrónico del sistema ARTH-aid ExoGlove System.....	95
Imagen 69:Código en programación en Arduino para un flexo sensor del ARTH-aid.....	96
Imagen 70: Pruebas de verificación de la señal emitida por los flexosensores en el dispositivo ARTH-aid ExoGlove.....	96
Imagen 71:Diseño de placa electrónica para el sistema ARTH-aid Sytem.....	97
Imagen 72:Simulación de mecanizado para PCB (Tarjeta de circuito impreso).....	97
Imagen 73:Placa final del circuito eléctrico para el ARTH-aid System.....	98
Imagen 74: Modelo simplificado del sistema mecánico del movimiento del dedo índice.....	99
Imagen 75:Fórmula para el cálculo del número de GDL.....	99
Imagen 76:Articulaciones del dedo índice para la ubicación de los GDL.....	100
Imagen 77:Módulos externos del ARTH ExoGlove para la falange de un dedo.....	100
Imagen 78: Preparación de todos los módulos para impresión 3D Ultimaker Cura™.....	101
Imagen 79: Montaje de componentes y pruebas del sistema ARTH-aid ExoGlove System.....	101
Imagen 80: Primer prototipo funcional del ARTH-aid ExoGlove System.....	101
Imagen 81: Evaluación de la experiencia del usuario en base a los requerimientos A-D.....	104
Imagen 82: Evaluación de la experiencia del usuario en base a los requerimientos E-H.....	105
Imagen 83: Evaluación de la experiencia del usuario en base a los requerimientos I-L.....	106
Imagen 84: Recolección de datos de los flexosensores en pantalla.....	108
Imagen 85: Reconocimiento y asignación de los puestos input/output.....	108
Imagen 86: Lectura de datos y mapeo de los sensores.....	109
Imagen 87: Visualización de resultados.....	109
Imagen 88: Diseño esquemático del circuito.....	110
Imagen 89:Esquema electrónico.....	110
Imagen 90: A) Ubicación de componentes B) Prueba de display C) y D) Placa implementada.....	110
Imagen 91: Proceso de mecanizado de la placa PCB.....	111
Imagen 92: Nuevo prototipo del ARTH-aid ExoGlove System.....	111
Imagen 93:Sistema completo del nuevo ARTH-aid ExoGlove System.....	112
Imagen 94: Prototipo final de ARTH-aid ExoGlove.....	112
Imagen 95: Vista panorámica de la residencia.....	122
Imagen 96: Entrada del Hogar de Ancianos.....	122
Imagen 97: Sala de pacientes.....	124
Imagen 98: Ejercicios de fuerza.....	127
Imagen 99: Ejercicios (1) de estiramiento.....	128

Imagen 100:Ejercicios (2) de estiramiento.....	128
Imagen 101:Ejercicios complementarios de fuerza.....	129
Imagen 102:Verificación de usabilidad.....	130
Imagen 103: Histograma de edades de los pacientes.	136
Imagen 104: Promedio de las valoraciones de preguntas del cuestionario para el grupo general. ...	138
Imagen 105: Promedios de las valoraciones de ítems del cuestionario diferenciadas en función de sexo del paciente.....	146
Imagen 106: Promedio de las valoraciones en base a la pregunta Recomendaría el uso de Exo-Glove System.....	146
Imagen 107:Promedio de las valoraciones en base a la pregunta continuaría con el uso de Exo-Glove..	147

Introducción



CAPÍTULO

1

1. Antecedentes

Desde la década de los ochenta, la robótica aplicada al campo sanitario ha permitido avances innovadores en diferentes áreas, como cirugías que requieren una precisión extrema, exoesqueletos para rehabilitación y servicios sanitarios para el rastreo de suministros requeridos por el equipo médico. La robótica es una rama de la ingeniería mecánica, electrónica y de las ciencias de la computación, que se ocupa del diseño, construcción y aplicación de sistemas robóticos y robots. Según Joseph L. Jones, la robótica consiste en el diseño de sistemas de control, sensores, fuentes de energía y software de calidad que trabajan en conjunto para la consecución de la tarea del robot.

Los exoesqueletos son dispositivos externos que mejoran las capacidades y se clasifican principalmente en activos y pasivos. Los exoesqueletos activos tienen componentes móviles que se accionan con mecanismos mecánicos o eléctricos y generalmente reducen la carga física del paciente/usuario. Los exoesqueletos pasivos emplean la energía generada por el usuario. Estos dispositivos se emplean principalmente en el campo médico para recuperar la pérdida de movilidad causada por una parálisis total o parcial de uno o varios miembros. Los exoesqueletos en medicina sustituyen partes del cuerpo humano que no existen o han perdido la función motora, con la finalidad de aportar protección, fuerza o movilidad articular.

En la mayoría de los casos, las prótesis robóticas y los exoesqueletos son sistemas compuestos por un dispositivo estructural y mecánico que sustituye al miembro o parte del cuerpo, una serie de sensores que transmiten información sobre la presión, la temperatura, el movimiento, etc., de las partes a las que están conectados y una aplicación de control y seguimiento informatizado que permite controlar tanto los sensores como el dispositivo en general.

La artritis reumatoide es una enfermedad ampliamente reconocida por su alta incidencia en las articulaciones, como las de la mano, que provoca altos niveles de discapacidad y disminuye la buena calidad de vida de quienes la padecen, así como la de sus familiares. Según el informe de la Organización Mundial de la Salud, OMS N.º 816 sobre las enfermedades reumáticas, esta enfermedad es la de mayor impacto a nivel global, sobre todo en los adultos mayores, con cifras de afectación en Latinoamérica que superan los 20 millones de personas.

Los exoesqueletos robóticos constituyen una herramienta para la intervención en las sesiones de fisioterapia, y estos demuestran tener resultados significativos, incluso en pacientes con enfermedades neurológicas y con patologías crónicas como la artritis. Las terapias físicas especializadas para tratar la artritis son realizadas, en la mayoría de los casos, de forma manual por un fisioterapeuta, quien propone distintos movimientos según como lo pronostique el experto en función de la discapacidad del paciente. Dichos procedimientos resultan difíciles debido a la falta de autonomía de los pacientes para realizar los movimientos y la necesidad de la ayuda por parte del fisioterapeuta. Con este panorama, se ha considerado los siguientes puntos que han orientado la motivación de la presente tesis:

- Analizar y valorar el proceso de control sanitario realizado por el fisioterapeuta para implementar los procesos en el sistema desarrollado. La labor de los fisioterapeutas es imprescindible ya que guía al paciente y se preocupa por evitar que pierda el movimiento en la medida de lo posible basándose en ejercicios físicos adecuados para cada caso.
- Valorar la adaptación de los sistemas exoesqueletos para la mano en la rehabilitación y asistencia de personas con deterioro motor progresivo crónico.
- Concebir un sistema integral de rehabilitación fisioterapéutica que incluya un exoesqueleto en forma de guante de fabricación sencilla y de uso fácil que sirva de apoyo para la realización

de ejercicios físicos de los pacientes crónicos con Artritis Reumatoide.

1.1. Planteamiento.

El objetivo principal de la tesis es analizar, diseñar y evaluar un sistema de rehabilitación que incluya un exoesqueleto para la mano que cubra las necesidades del público objetivo a quien va dirigido. Por ello se analizaron los modelos, las herramientas y aplicaciones más relevantes relacionadas con los tratamientos fisioterapéuticos aplicados en la rehabilitación y mejora de artritis en la mano que permitieron determinar una serie de premisas iniciales:

- Se evidenciaron, analizaron y catalogaron los avances científicos y tecnológicos desarrollados en exoesqueletos para la mano teniendo en cuenta, las características tecnológicas que lo definen y los beneficios que han aportado a los usuarios.
- Se valoró el uso de las técnicas Prototipado Rápido, (PR) para generar parte de las piezas que componen en exoesqueleto que permite la obtención de modelos anatómicos precisos y adaptados a implementar en el guante del sistema final.
- A través de la información facilitada por los fisioterapeutas que como especialistas disponen de información valiosa para delimitar las posibilidades de desarrollo del sistema integral en base al diagnóstico, las terapias físicas existentes.
- Entender las limitaciones tecnológicas y funcionales de la rehabilitación de la Artritis Reumatoide en la mano, ya que no todos los dispositivos o exoesqueletos de la mano, se ajustan a las particularidades de cada paciente debido a las deformaciones óseas que se desarrollan y que obligan a plantear la necesidad de personalizar y adaptar exoesqueletos personalizados.
- Valorar el diseño e implementación de sensores en exoesqueletos robóticos de la mano que utilizan patrones electrónicos e informáticos que facilitan información relacionada con el control de los movimientos, presión, evaluación de los grados de movimiento y permiten el control, almacenamiento y gestión de datos del trabajo de rehabilitación sobre un paciente o usuario.

1.2. Hipótesis.

La hipótesis central de la tesis es evaluar la efectividad en la implementación un sistema de rehabilitación fisioterapéutica de la mano para pacientes con artritis reumatoide crónica mediante el uso de sensores y de tecnologías informáticas de Diseño Asistido por Ordenador, (DAO) y Prototipado Rápido (PR). En el desarrollo conceptual y tecnológico de este tipo de exoesqueleto se ha realizado una reflexión multidisciplinar, tomando en cuenta tres puntos de vista importantes:

- Los aspectos técnicos directamente relacionados con los mecanismos informáticos generales y los sensores para el control análogo/digital de los datos. En este apartado se incluye el sistema electrónico y la potencia a implementar en el sistema
- Los aspectos formales y funcionales relacionados con el desarrollo del exoesqueleto del guante enfocado desde la perspectiva de la experimentación y recolección de datos en la validación y retroalimentación del prototipo.
- Los aspectos relacionados con las técnicas sanitarias y control fisioterapéutico convencional que sirva de base teórica para la implementación y seguimiento de los resultados obtenidos mediante los sensores aplicados al sistema desarrollado.

De este planteamiento general, surgen las siguientes preguntas iniciales:

- ¿Los exoesqueletos para la mano son sistemas fáciles y económicos de implementar para su uso general como dispositivo fisioterapéutico en el control y seguimiento de enfermedades como la Artritis Reumatoide, AR?
- ¿Cuáles son los factores determinantes a la hora de desarrollar e implementar un exoesqueleto para la mano que sea asequible y fácilmente adaptable en base a los tratamientos realizados por los fisioterapeutas a cada paciente con AR que lo necesite?
- ¿Cuáles son los parámetros funcionales que determinan el uso de un guante como exoesqueleto por parte de fisioterapeutas en los procesos y sesiones de rehabilitación en pacientes crónicos de AR?
- ¿Se considera que las técnicas de Diseño Asistido por Ordenador (DAO) y Prototipado (PR) son eficaces y operativas para el desarrollo e implementación de exoesqueletos personalizados para manos con AR?

1.3 Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Evaluar el diseño, desarrollo e implementación de un sistema de rehabilitación fisioterapéutica de la mano en pacientes con artritis reumatoide crónica mediante la creación de un prototipo de exoesqueleto o guante cuyos movimientos son controlados mediante sensores.

1.3.2. Objetivos específicos

- Diseñar un mecanismo que permita crear un movimiento fluido y controlado de los dedos de una mano artrítica para su rehabilitación mediante un guante exoesquelético.
- Implementar un sistema de sensores y una arquitectura electrónica en un exoesqueleto o guante capaz de controlar el movimiento de los dedos y el tiempo de respuesta.
- Analizar exoesqueletos existentes de mano y su respuesta a necesidades de pacientes dentro de la rehabilitación tradicional.
- Conocer e implementar las mediciones antropométricas de la mano convencional para entender la funcionalidad de los movimientos convencionales y de qué manera se ve afectado ante un problema crónico como se produce en la mano artrítica.
- Definir un prototipo experimental a través de criterios funcionales, estéticos y ergonómicos de un sistema adaptado para la rehabilitación funcional y motora de la mano artrítica.

Por todo lo expuesto, es evidente que existe un incremento exponencial de nuevas investigaciones relacionadas con el desarrollo experimental y comercial de exoesqueletos para el ámbito sanitario. En el caso de exoesqueleto para la mano en forma de guante. Actualmente, existen muy pocas implementaciones orientadas al campo de la fisioterapia de recuperación de manos artríticas que justifica el desarrollo de la presente tesis.

La tesis ha sido desarrollada desde el trabajo multidisciplinar, para mejorar la calidad y eficacia de los tratamientos de fisioterapia en estos pacientes es importante considerar mecanismos análogos, sistema electrónico y aspectos formales y atributos del producto de diseño para condensarlo con factores médicos que aporten para lograr un producto final óptimo enfocado en la rehabilitación de la atrofia muscular relacionada con la pérdida de movilidad en la mano como efecto de la Artritis Reumatoide en pacientes adultos.

Desde su estudio hasta la evaluación se ha colaborado con usuarios finales y usuarios expertos, los mismo que serán actores fundamentales para el correcto avance del exoesqueleto.

Se ha realizado un análisis de modelos, herramientas y aplicaciones relevantes en el ámbito de los exoesqueletos para la ayuda motora de extremidades superiores y/o inferiores.

1.4 Referencias

Jones J.L, Seiger B.A., Flynn A.M. (1998). *Mobile Robots: Inspiration to Implementation*, Second Edition A K Peters/CRC Press, Routledge, England, UK ISBN: 978-1568810973

Mantilla, J. I. A., y Santa, J. M. (2016). Tecnología de asistencia: Exoesqueletos robóticos en rehabilitación. *Movimiento Científico*, Vol. 10 (2), 83-90.

Miranda, R. M. M., Moscoso, C. J. J., Montesdeoca, J. L. (2019). Comunicación parcial neurosensorial-visual a un ordenador mediante lectura de pupila. Vol. 4 (6), 3-25. <https://doi.org/10.23857/pc.v4i6.994>

Organización Mundial de la Salud. (1992). *Enfermedades reumáticas: informe de un grupo científico de la OMS / Organización Mundial de la Salud*; traducido por la Organización Panamericana de la Salud. Ginebra: Benzal. ISBN: 9243208160

WHO Scientific Group on Rheumatic Diseases & World Health Organization. (1992). *Enfermedades reumáticas: informe de un grupo científico de la OMS [se reunió en Ginebra del 26 al 30 de junio de 1989]*. Organización Mundial de la Salud. ISBN: 9243208160 En: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/39682> (Consulta realizada el 27/09/2022)

Zubizarreta Molinuevo, J. (2021). *Exoesqueletos I: Definición y Clasificación. Notas Técnicas de Prevención*. Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (INSST) nº 1162 En: <https://www.insst.es/documents/94886/566858/NTP+1162+Exoesqueletos+I+Definici%C3%B3n+y+clasificaci%C3%B3n+-+A%C3%B1o+2021.pdf/6f074ccc-6e03-bb05-dd59-efb5fa4e1fc8?t=1658924532645> (Consulta realizada el 27/09/2022)

Álvarez Bayona, T. (2021) *Exoesqueletos II: Criterios para la selección e integración en la empresa. Notas Técnicas de Prevención*. Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (INSST) nº 1163 En: <https://www.insst.es/documents/94886/566858/NTP+1163+Exoesqueletos+II+Criterios+para+la+selecci%C3%B3n+e+integraci%C3%B3n+en+la+empresa+-+A%C3%B1o+2021.pdf/cae53381-0965-c171-aff7-6355574dd989?t=1658924524157> (Consulta realizada el 27/09/2022)

Anatomía, morfología y función motora de la mano



CAPÍTULO

2

2.1. Introducción

En este capítulo se describen los aspectos que se relacionan con la anatomía y fisiología de la mano que servirán para definir por una parte el establecimiento de parámetros generales de análisis estructural de la misma y por otra la selección de movimientos y las restricciones afectadas por la artritis, como veremos en el capítulo 3 dedicado a comprender y analizar la enfermedad, así como sus síntomas relacionados con la mano.

La información analizada en este capítulo servirá para que pueda llevarse a cabo el desarrollo morfológico y estructural de un exoesqueleto para la mano tanto a nivel virtual mediante técnicas Diseño Asistido por Ordenador, (DAO) y físico por medio de la creación de un prototipo usando tecnologías de Prototipado Rápido, (RP) para la generación del exoesqueleto en forma de guante. Así mismo, los datos serán utilizados para verificar la efectividad del exoesqueleto en la fase de uso por parte de usuarios, así como el avance o mejoras en los tratamientos de rehabilitación crónica de la artritis en la mano.

Por lo tanto, antes de diseñar un exoesqueleto adaptado a la mano se requiere de una clara comprensión sobre la anatomía y fisiología de la mano. La estructura creada como exoesqueleto para mano se usa en rehabilitación para compensar la falta de movilidad y/o fuerza de aprehensión limitada. Esta estructura necesita controlar y limitar el movimiento de la mano para la recuperación de la movilidad progresiva, intentando que la estructura creada en forma de guante exoesquelético se adapte anatómicamente a la mano del usuario. Los exoesqueletos creados específicamente para la mano se diseñan en base a las dimensiones antropométricas de cada individuo en función del avance o fase en que se encuentra la enfermedad ya que pueden existir atrofiaciones en la forma o estructura de los huesos, pérdida de movimiento de las articulaciones o cambios en la estructura de los tendones. De hecho, deben permitir el movimiento armónico y natural de la mano, a la vez que debe ayudar a la recuperación de las acciones propias de la mano como la prensión, el agarre, la sujeción, entre otros.

El fundamento teórico parte de la realización de un estudio sistemático que permita desarrollo y generación de un dispositivo de rehabilitación para pacientes en etapa inicial de artritis reumatoide basado en conceptos de rehabilitación tradicional.

Se analizaron los sistemas combinados de control motor de músculos y ligamentos de la mano mediante el estudio de receptores sensoriales presentes en la mano como son los mecanorreceptores, todas estas estimulaciones as recibe el sistema sensorial somático para así ejercer los movimientos articulares de acuerdo con las necesidades del individuo.

Se describirán los tipos de agarre de la mano existentes para el control y la verificación de su funcionamiento normal en base al planteamiento de autores como Napier en la definición de una taxonomía general.

Como conclusión del capítulo se enumerarán los aspectos que permitirán disponer de valores cuantificables y controlables que serán implementados en la creación del guante, así como la definición y calibración de los parámetros que validen el sistema integral en su conjunto.

2.2. Biomecánica de la mano

Según Schwarz y Taylor sobre la anatomía y movimientos de la mano humana, la mano constituye un ejemplo de coordinación perfecta entre los movimientos y funciones que realiza y la conexión neurológica que la convierte en un receptor funcional y sensible, estableciendo que en cualquier mecanismo, animado o inanimado las capacidades funcionales se relacionan tanto con las características estructurales como con la naturaleza del sistema de control disponible para la gestión de funciones por separado o en múltiples combinaciones (Schwarz y Taylor, 1955).

La evolución de la mano humana se ha relacionado con el desarrollo físico y motriz para la realización de tareas complejas y minuciosas que ha implicado la adaptación de su anatomía, incluyendo el sistema muscular y de ligamentos (Jaworski y Karpiński, 2017).

La complejidad comunicativa sensorial que existe entre la mano y el cerebro, el ser humano es capaz de controlar fuerzas, movimientos y orientación, incluyendo la percepción sensorial, el volumen, la textura y la temperatura de los objetos que cogemos con la mano.

Desde el descubrimiento de los fósiles de huesos de mano (Cadena, 2015) en el Olduvai Gorge en Tanzania a inicios de los 60's, las teorías sobre la evolución fisiológica y motriz de la mano humana se ha visto envuelto en polémica, (Marzke y Marzke, 2000), principalmente debido a que se desconoce la evolución de la mano humana actual desde sus ancestros como primate hasta convertirse en *homo habilis* con capacidad no sólo para disponer de un fino control psicomotriz manual para desarrollar tareas para la supervivencia como la construcción de herramientas y utensilios sino también para la realización de artesanías y obras de arte dentro la creatividad propiamente humana. Según la Dra. Mary Marzke del Departamento de Antropología de la Universidad de Arizona, la singularidad de la mano humana viene dada por las funciones que ejerce y sobre todo en las habilidades psicomotrices como agarrar objetos con firmeza y precisión.

Para ello se ha considerado conveniente analizar el conjunto de músculos y articulaciones de la mano que proporcionan variados patrones de movimiento para determinar la complejidad y la destreza del movimiento.

Más concretamente se analizarán las variaciones de la flexión-extensión en los dedos, los niveles posturales del pulgar y las variaciones en el eje radio lunar de la mano (Schwarz y Taylor, 1995).

2.2.1. Aspectos anatómicos de la mano

La mano humana está compuesta por 27 huesos, los cuáles se dividen en tres grupos: (1) el carpo, (2) los metacarpianos y (3) las falanges, todos conectados a la muñeca a través de la palma.

El correcto entendimiento de la estructura de la mano reside en el conocimiento de la estructura como un componente funcional autónomo dentro de un organismo vivo, la geometría biométrica de la mano representa un conjunto colaborativo de huesos y músculos. La biometría conductual es altamente dependiente de la anatomía de los huesos y músculos, por esta razón es fundamental comprobar la individualidad de la biometría de cada individuo en cuestión (Kumar y Kumar, 2009)

Siguiendo con la descripción anatómica de la mano un aspecto importante tomado en consideración, es la anatomía concreta de los dedos y su relación con el conjunto de la mano en sí. Cada dedo se constituye por tres falanges: (1) Distal, (2) Intermedia y (3) proximal, a excepción del dedo pulgar que solo tiene dos (Distal y Proximal). El dedo pulgar está fijo por debajo de los otros dedos destacando su flexibilidad que permite la abducción y la rotación gracias a la gran movilidad de su metacarpo.

Esto permite variar la orientación en que se desarrolla el movimiento de flexión-extensión del dedo pulgar, y con esta propiedad es posible realizar la oposición de los dedos (Delmas y Rouviere, 2005).

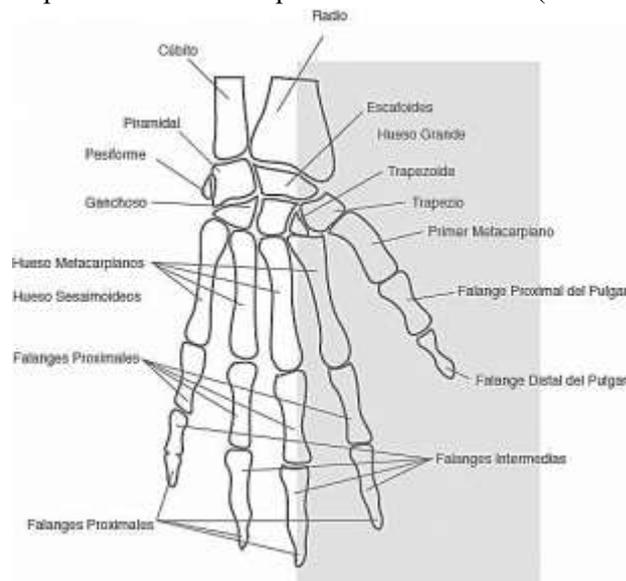


Imagen 1: Estructura ósea de la mano humana.
Fuente: Adaptado de (Schwarz y Taylor, 1955:2)

Así mismo, el dedo pulgar conforma el sistema de pinza en combinación con el resto de los dedos de la mano y más concretamente con el dedo índice. El dedo pulgar puede realizar los siguientes movimientos:

- La abducción-extensión, separando el dedo pulgar del eje de la mano. Este movimiento abre la mano y tiene un rango de amplitud entre 35 a 40 grados, (Ver imagen 2 a).
- La aducción-extensión, Es un movimiento que permite abrir la mano y separa el dedo pulgar del eje de la mano. Tiene un rango de amplitud de entre 35 a 40 grados (Ver imagen 2 a).
- La aducción. Es un movimiento que aproxima el dedo pulgar al eje de la mano. Su amplitud está en un rango de 35 a 40 grados. (Ver imagen 2 b).
- La oposición. Es un movimiento combinado de la flexión del dedo pulgar y hace posible la oposición frente al dedo meñique, presentando una amplitud de entre 45 a 60 grados.
- La reposición. Es un movimiento que devuelve el dedo pulgar a la posición de partida o descanso (Ver imagen 2 c).

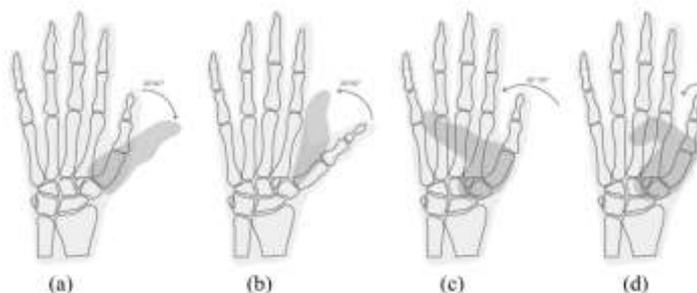


Imagen 2: Movimientos del dedo pulgar; (a) abducción, (b) aducción, (c) oposición y (d) reposición.
Fuente: Adaptado de (Delmas y Rouviere, 2005)

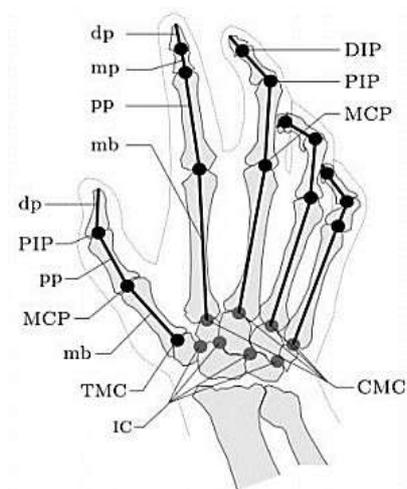
La gran cantidad de articulaciones músculos, así como el tamaño de las áreas cerebrales de la corteza responsables para el control motor y sensorial de la mano, proporciona la capacidad de realizar una serie de varios movimientos complicados necesarios para las actividades cotidianas, en 1919, Schlesinger determinó seis tipos de movimientos representando los movimientos que las articulaciones que conforman la capacidad funcional de la mano pueden realizar: agarre cilíndrico, agarre palmar, pellizco de oposición, gancho (Jaworski y Karpiński, 2017). En el artículo sobre el análisis mecatrónico de un dedo antropomorfo del Grupo de investigación de Neurotecnología, Control y Robótica (NEUROCOR) del departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad Politécnica de Cartagena, se describen las características cinemáticas y estructurales de los dedos y más concretamente se centra en tres articulaciones de los movimientos primarios de flexión-extensión (García Cordova et al., 2001).

- Articulación metacarpofalángica o MCP que une la falange metacarpiana y la proximal de un dedo o pulgar.
- Articulación interfalángica proximal o PIP que se localiza entre las falanges media y proximal del dedo.
- Articulación interfalángica distal o DIP que se ubica entre las falanges media y distal del dedo.



Imagen 3: Falanges y articulaciones del dedo índice.

Fuente: Adaptado (García, et.al. 2001).



Nomenclatura	Descripción
dp	Distal phalanx
mp	Middle phalanx
pp	Proximal phalanx
mb	Metacarpal bone
DIP	Distal interphalangeal joint
PIP	Proximal interphalangeal joint
MCP	Metacarpophalangeal joint,
CMC	Carpometacarpal joint
TMC	Trapeziometacarpal joint
IC	Intercarpal joint

Imagen 4: Nomenclatura de las articulaciones de la mano humana.

Fuente: Adaptado de (Prattichizzo, Meli y Malvezzi, 2015).

La gran cantidad de articulaciones y músculos de la mano, así como el tamaño de las áreas de la corteza cerebral que son los responsables del control motor y sensorial que proporciona la capacidad de realizar una serie de movimientos complicados, necesarios en las actividades diarias (Schwarz y Taylor, 1955).

A continuación, se presentan dos tablas que creadas por los investigadores Jaworski y Karpiński donde se describen los parámetros relacionados con el movimiento de la mano que delimitan el rango de alcance de los movimientos de los dedos, las articulaciones y la muñeca. (Ver tabla 1 y 2).

Esta clasificación permite a los médicos evaluar los niveles mínimos de control de los movimientos de la mano en el paciente artrítico crónico y también programar las funciones motoras que debe implementarse en un sistema informatizado de control de un exoesqueleto de la mano y su interacción con la muñeca (Ver tabla 1 y 2).

Tabla 1: Rango de movimiento en dedos y articulaciones de la mano.

Dedo	Flexión	Extensión	Abducción/ Aducción
Pulgar			
Trapezio metacarpiano	50-90°	15°	45-60°
Metacarpofalángica (MCM)	75-80°	0°	0°
Interfalángica (IP)	75-80°	5-10°	0°
Índice			
Metacarpiano	5°	0°	0°
MCP	90°	30-40°	60°
Interfalángica proximal	110°	0°	0°
Interfalángica distal	80-90°	5°	0°
Medio			
CMC	5°	0°	0°
MCP	90°	30-40°	45°
PIP	110°	0°	0°
DIP	80-90°	5°	0°
Anular			
CMC	10°	0°	0°
MCP	90°	30-40°	45°
PIP	120°	0°	0°
DIP	80-90°	5°	0°
Meñique			
CMC	15°	0°	0°
MCP	90°	30-40°	50°
PIP	135°	0°	0°
DIP	90°	5°	0°

Fuente: Adaptado de (Jaworski y Karpiński, 2017).

Tabla 2: Rango de movimiento de la muñeca.

Muñeca	Valor
Flexión	65-70°
Extensión	70-80°
Flexión radial (desviación)	15-25°
Flexión cubital (desviación)	40-45°

Fuente: Adaptado de (Jaworski yKarpíński, 2017).

2.2.2. Análisis Anatómico

Como se ha indicado en el apartado de introducción, la evolución fisiológica y psicomotriz de la mano humana viene determinado por el desarrollo de las funciones de manipulación de los objetos por parte del ser humano en su supervivencia a lo largo del tiempo. La necesidad de agarrar, manipular y transformar objetos con las manos determina en muchos casos la capacidad psicomotriz y la pérdida funcional de capacidades debido a enfermedades como la artritis.

El número de músculos excede el número de grados de libertad proporcionado por las articulaciones por lo que algunos de ellos no afectan al movimiento de las articulaciones, así no limita su capacidad teórica total de movimiento con lo cual permite aportar a nivel morfológico, estructural y funcional (Loaiza, 2011).

De hecho, algunos músculos se encuentran controlados por una articulación como el flexor largo y no tienen relación con los movimientos en los dedos a los que se encuentran inervados, por el contrario, pueden participar en una variedad de acciones cinemáticas propias (Jeremy., y Sharkey, 2017), el músculo flexor común profundo o FCP puede tener dos acciones separadas con subdivisiones funcionales.

El signo de Paul Bunnell describe la sinergia del Sistema Nervioso Central, o CNS, como método de simplificación del movimiento, si el control se ejerce sobre un músculo individual o un grupo mixto, el CNS explica que el control se extiende sobre cada grupo como una unidad en lugar de en todos los constituyentes del grupo (Bunnell et al., 1948).

El CNS actúa sobre el sistema de músculos activos, que controlan las tareas principales de la biomecánica de la mano. La aparición de enfermedad del CNS, en un caso de una enfermedad inflamatoria crónica tratada con agentes inmunosupresores, puede estar relacionada con varios diagnósticos. Esto enfatiza la necesidad de un procedimiento de diagnóstico temprano y preciso (Taylor, Eranki y Kerin, 2007). El tratamiento inmunosupresor de enfermedades reumáticas puede estar asociado con varias infecciones que se producen por falta de defensas del cuerpo o del cerebro (Warnatz et al., 2003).

Por tanto, los problemas neurológicos relacionados con la artritis crónica se centran en el Sistema Nervioso Central presente en afectaciones a los vasos, tejidos reumatoides con inflamación, o causadas por infiltración de células causantes de la inflamación. También puede afectar a nivel osteoarticular con alteraciones focalizadas que pueden producir compresión medular; y muscular, causando inmovilidad progresiva y dolor en las articulaciones (Bathon et al, 1989).

2.2.3. Músculos de la mano

Los músculos de la mano humana están compuestos por grupos extrínsecos de músculos que rodean a los huesos presentes en la parte dorsal de la mano, o en la parte de la palma de la mano (agarre). Se dividen en extensores y flexores. Los extensores se utilizan para realizar los movimientos de extensión de los dedos, los flexores posibilitan la flexión de los dedos y los abductores que son utilizados para la separación de rotaciones externas que posibilitan una mayor amplitud de movimiento. (Delmas y Rouviere, 2005: 89).

Los músculos se pueden clasificar según su origen (Freivalds, 2011: 168):

- Músculos intrínsecos (originados en la mano): se asocian con los movimientos delicados y finos de los dedos. Este grupo se subdivide en: (1) tenar (flexión del pulgar y abducción/aducción), (2) hipotenar (flexión del dedo meñique y aducción), y (3) media palmar (flexión de las uniones MPC y abducción/aducción). La inflamación de estos músculos es causante de los dolores de los dedos, (Freivalds, 2011: 170).
- Músculos extrínsecos (originados en el antebrazo): son más grandes y están relacionados a la fuerza de la mano. Este grupo se subclasifican en funcionales y estructurales. Los músculos funcionales son los flexores de dedos y la mano, y los músculos estructurales son los extensores que sirven para extender y enderezar, de manera que amplía efectivamente el ángulo (An et al., 1979).

La muñeca presenta tres músculos extensores que son: 1) el primer radial externo, segundo radial externo y el cubital posterior, 2) segundo radial externo es el extensor primario de la muñeca y liga con el centro de la palma, permitiendo que los flexores actúen a través de sus arcos de movilidad. Otra de la parte importante del movimiento de los dedos son los conductos sinoviales que envuelven a los dedos para proporcionar una baja fricción durante el movimiento de los tendones (Lajud y Pérez, 2006). En la imagen a continuación la zona sombreada corresponde a una representación de la piel.

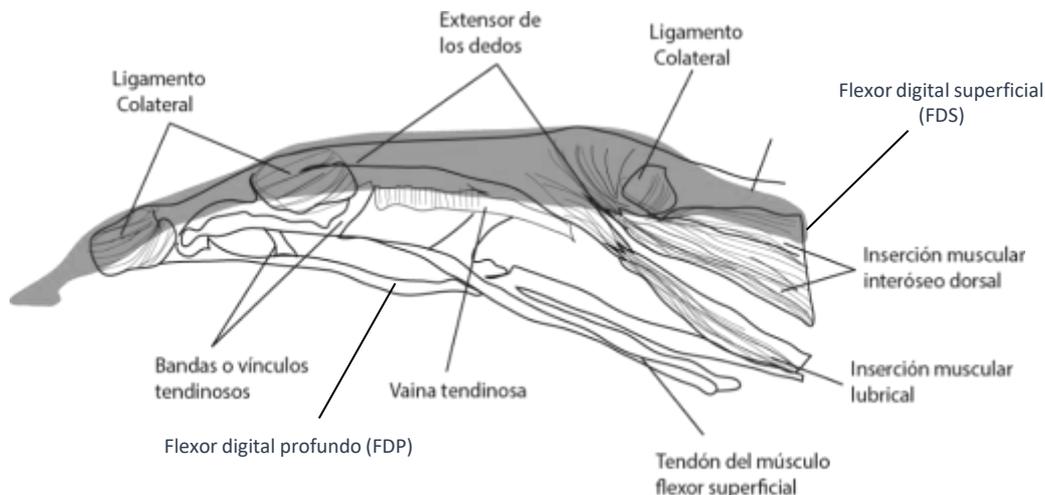


Imagen 5: Músculos abductores, aductores de la mano y conducto sinovial del dedo índice.

Fuente: Adaptado de (Connolly, 1998).

2.2.4. Aspectos sensoriales de la mano

El sistema táctil de la mano es un conjunto de estímulos que se generan a través de la percepción de la presión en el contacto de los dedos sobre los objetos por ejemplo y que necesita de un control motor adecuado dependiendo de la tarea a realizar y puede o no requerir una atención consciente o subconsciente por parte de individuo. La sensibilidad táctil de la mano se relaciona con la pérdida o aminoramiento de la sensación del dolor ante un peligro o la necesidad de aprehensión que puede afectar a la integridad y seguridad de la persona. De hecho, la sensibilidad cutánea es importante no sólo para la mano sino para todo el cuerpo (Quintal et al., 2013).

La mayor parte de los receptores sensoriales existentes en la mano se denominan mecanorreceptores, y son capaces de detectar y calibrar estimar las sensaciones táctiles recibidas por el sistema sensorial somático. Estos mecanorreceptores son capaces de interpretar señales de posición en el tejido corporal (Johansson y Vallbo, 1983). En la mano, los mecanorreceptores se localizan en las articulaciones para así poder responder a los cambios del ángulo, dirección y velocidad que se producen con los movimientos de la articulación en función de las necesidades del individuo por ejemplo cuando necesita agarrar un objeto con las manos.

Receptores sensoriales somáticos de la piel en la mano puede dividirse en:

- Los folículos pilosos. Los folículos pilosos disponen de terminaciones nerviosas que responden rápidamente al tacto y detectan el movimiento de los objetos que se colocan sobre ellos y la dermis e incluso son capaces de percibir el contacto inicial del objeto antes de ser tocado por la piel.
- Los discos de Merkel (tacto fino adaptación lenta). Son células que actúan como receptores sensitivos ante la presión y se especializan en la epidermis y constituyen el 25% de las unidades táctiles de la mano. Abundan también en la palma de la mano y la planta de los pies.
- Corpúsculos de Meissner (deslizamiento y adaptación rápida) son receptores superficiales con campos sensitivos de alta discriminación. Se localizan en las papilas dérmicas de la piel; y son mecanorreceptores responden rápidamente al tacto. Constituyen el 43% de las unidades táctiles de la mano y presentan mayor sensibilidad en las zonas de la palma y la planta de los pies.
- Corpúsculos de Pacini (tacto, presión, vibración y adaptación rápida): Son mecanorreceptores de adaptación rápida, que responde al tacto y a las vibraciones. Se distribuye a lo largo del cuerpo y abunda en la dermis profunda, en el tejido subcutáneo, los ligamentos y otras cápsulas articulares.
- Receptores emplumados de Ruffini (estiramiento y adaptación lenta) son de información sensorial menos discriminada (tacto “grueso”). Los nociceptores transmiten la sensación dolorosa en respuesta a un daño o lesión. Los propioceptores son husos musculares (no huesos), es decir fibras musculares modificadas. Son mecanorreceptores de adaptación lenta que se localizan en la parte más profunda de la dermis. Constituyen el 19% de las unidades táctiles de la mano y se encargan de responder al estiramiento de la piel. Son los responsables de la sensibilidad al tacto y a la- presión en los dedos.

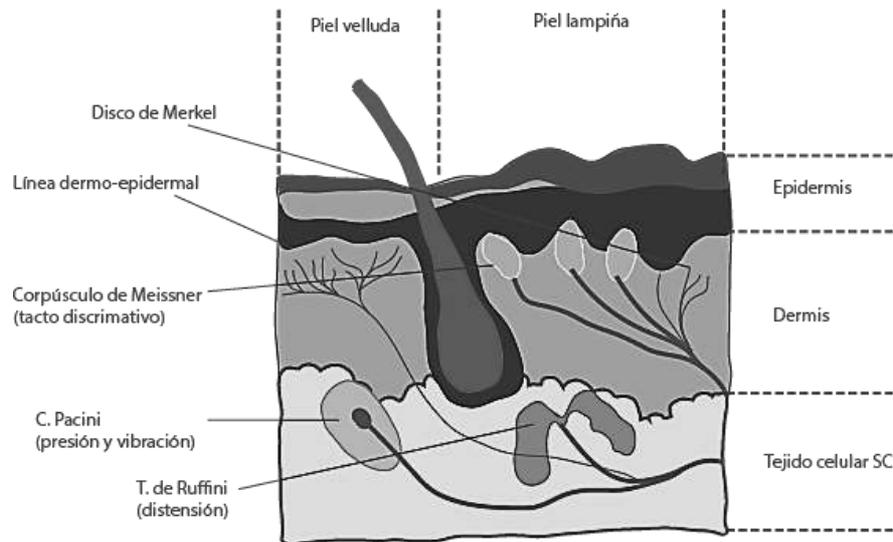


Imagen 6: Receptores sensoriales somáticos de la piel.

Fuente: Adaptado de (Johansson y Vallbo, 1983).

2.2.4.1. Termorreceptores

Todas las células del cuerpo son sensibles a la temperatura, en especial el cerebro, que por su complejidad requiere una temperatura más estable respecto a otras partes del cuerpo; por tanto, es vital que la temperatura se mantenga alrededor de los 37°C y no supere los 40.5°C (Bear et, 1998).

Todos los órganos internos y externos del cuerpo humano son sensibles a la temperatura. Hay neuronas sensibles a la temperatura en el hipotálamo y en la médula espinal que se encargan de regular la temperatura corporal en general (Macefield, 1998; Johansson y Westling, 1987).

De hecho, existen terminaciones nerviosas que detectan diferentes umbrales de temperatura, pero no todas son termorreceptores ya que se las puede diferenciar por el rango de temperatura que detectan. Podemos diferenciarlas entre las detectoras de calor (30°C - 45°C) y de frío (10°C - 35°C).

Los receptores al frío son terminaciones de fibras mielínicas de pequeño tamaño tipo A delta, que se estimulan cuando la temperatura de la piel está por debajo de los 35°C; y los receptores al calor son fibras amielínicas del tipo C que se estimulan cuando la temperatura de la piel supera los 40 o 45°C.

2.2.4.2. Propioceptores

Los propioceptores proporcionan información sobre nuestro medio interno, mas no del medio externo. Estos permiten recibir señales sobre la posición relativa de los miembros del cuerpo, incluso permiten detectar el movimiento de las extremidades y la velocidad con la que actúan. Esta sensibilidad es clave para orientar los movimientos y para el conocimiento de las posiciones de las extremidades (Johansson y Westling, 1987). Existen este tipo de detectores en los músculos, las articulaciones y los ligamentos.

Los músculos propioceptores están presentes los huesos musculares, estos sirven para medir/detectar los cambios en la longitud y la tasa de estiramiento de los músculos, mientras que los órganos tendinosos de Golgi se encargan de calibrar la fuerza generada por un músculo, basándose en la tensión ejercida por el tendón (Silbernagl y Despopoulos, 2009).

2.2.4.3. Nociceptores

Son los receptores especializados en detectar la sensación o umbral del dolor. Esta sensación es muy útil para la supervivencia del ser humano ya que actúa como mecanismo de alarma o advertencia ante situaciones peligrosas o anormales que pueden causar daños (Johansson y Westling, 1987).

Se distribuyen por todo el cuerpo como por ejemplo la piel, los huesos, los músculos, los órganos internos, el corazón, los vasos sanguíneos, etc.... pero no se ubican en el cerebro. Esta particularidad es la que permite a los neurocirujanos llevar a cabo intervenciones quirúrgicas solamente aplicando anestesia local y mantienen consciente a las personas durante su intervención.

Estos receptores son capaces de detectar estímulos de diferentes tipos:

- Químicos. Son capaces de detectar valores de PH bajo o elevado, o sustancias neuroactivas, etc.
- Mecánicos: Son capaces de detectar la presión excesiva, en especial de objetos punzantes.
- Térmicos: Son capaces de detectar rangos extremos de calor y/o frío.

2.2.5. Aspectos relacionados con el movimiento de la mano

En este apartado se a describir los movimientos más importantes a tener en cuenta cuando realizamos una acción de movimiento o aprehensión con nuestras manos y más concretamente los movimientos combinados entre la muñeca, la mano y los dedos- Estas mediciones son importantes para determinar el umbral o límites de movimiento de una mano sana y de una mano con problemas crónicos de movilidad como la que se produce cuando se tiene artritis reumatoide. Conocer las limitaciones servirá para configurar los parámetros de movimiento que ofrecerá el exoesqueleto de la mano que va a diseñarse.

Para ello se describirán y analizaran una serie de rangos los ángulos de flexión-extensión que las articulaciones pueden realizar a partir de los movimientos comunes entre la muñeca, la mano y los dedos.

2.2.5.1. Rangos de movilidad del complejo articular de la muñeca y la mano

En cada articulación de la mano para se realizan mediciones para establecer el ángulo de flexión-extensión que las articulaciones pueden realizar a partir de los movimientos comunes entre la mano y los dedos.

La muñeca desarrolla un movimiento general de pronación-supinación, es decir un movimiento de rotación interior o anterior, tomando como eje a la posición neutral con el antebrazo, también realiza otros movimientos como la flexión-extensión y la desviación radial-cubital (Velásquez Sánchez et al., 2007).

Los movimientos de la muñeca logran dar estabilidad a las articulaciones de la mano, combinando fuerza y precisión. Estos movimientos controlados son posibles mediante la sinergia entre todas las articulaciones de la mano, es decir entre radio cubital distal, radiocarpiana, medio carpianas, intercarpianas y carpometacarpianas (Palastanga, Field, y Soames, 2007).

La curvatura común de la muñeca y la extremidad superior del brazo condiciones normales tiene una desviación aproximada de 80°, tomando como referencia su posición neutra o recta del brazo. El arco normal de extensión de la muñeca y el brazo se sitúa en los 70° mientras que la desviación o amplitud de movimiento cubital tiene un arco aproximado de 30° y una desviación radial es cercana a los 20°. La desviación cubital tiene mayor arco de movimiento gracias a que el cubito no permite una extensión en una dirección distal y no se enlaza directamente con el carpo, el cual es más limitado (Delprat, Ehrler, y Meyer, 2005).

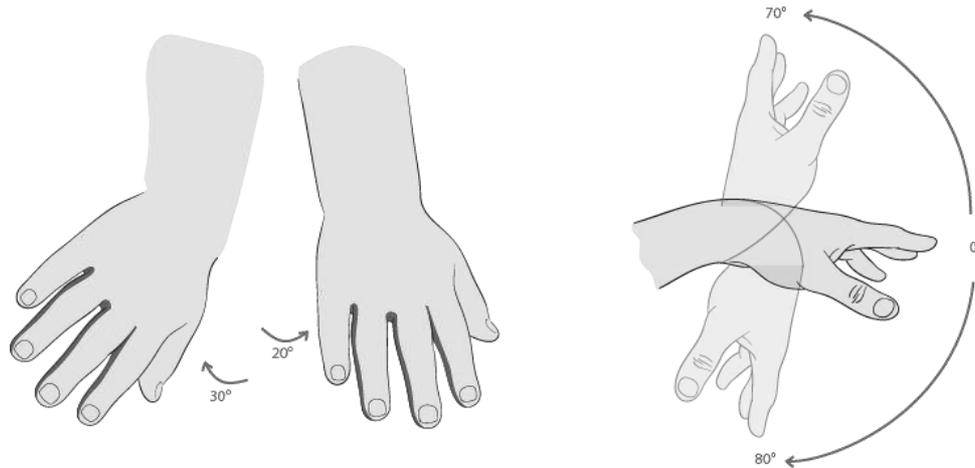


Imagen 7: Rango de movilidad: muñeca.
Fuente: Adaptado de (Connolly, 1998).

Tabla 3: Promedio de los rangos de movilidad del antebrazo y mano.

Articulación	RMD (Rango de movilidad)	
Codo	Flexión	1 a 145°
	Extensión	0°
Muñeca	Flexión	0 a 75°
	Extensión	0 a 70°
	Radial	0 a 20°
	Cubital	0 a 35°

Fuente: Adaptado de (Schwarz y Taylor, 1955).

2.5.5.2. Rango de movilidad de los dedos

El rango de movilidad de cada dedo se mide respecto a la palma de la mano en posición recta en función de la flexión máxima en grados. Esto permite observar si existe una hiperextensión dentro del rango total de movimiento de los dedos para determinar una posible afectación en la movilidad.

Existe una relación entre la longitud que existe entre los dedos con respecto al porcentaje de la longitud total de la mano.

Tabla 4: Relación porcentual (%) de la longitud de las falanges con respecto a la longitud de la mano.

Falange	Media	Distal	Proximal
Índice	14,1	8,6	21,8
Medio	15,8	9,8	24,5
Anular	15,3	9,7	22,2
Meñique	10,8	8,6	17,2
Pulgar	-	12,1	17,1

Fuente: Adaptado de (Schwarz y Taylor, 1955).

Tabla 5: Relación porcentual (°) de la longitud de las falanges con respecto a la longitud de la mano.

Articulación interfalángica distal (dif)	extensión	0°
	flexión	0 a 80°
Articulación interfalángica proximal (pif)	extensión	0°
	flexión	0 a 10°
Articulaciones metacarpofalángicas (mcf)	hiperextensión	0 a 45°
	flexión	0 a 90°

Fuente: Adaptado de (Schwarz y Taylor, 1955).

El movimiento de las articulaciones interfalángica de tipo proximal (PIF), distal (DIF) y metacarpofalángicas (MCF) del dedo pulgar está determinado de la misma forma que los demás dedos, empleando el criterio anterior para cada una de las articulaciones.

Los movimientos de las articulaciones de los cinco dedos vienen determinados por los siguientes movimientos:

- Flexión-extensión de los dedos a la altura de las articulaciones Interfalángica (PIF).
- Abducción-aducción de los dedos a la altura de las articulaciones metacarpofalángicas (MCF).
- Abducción palmar: Aducción-abducción del pulgar a nivel de la articulación metacarpofalángica (MCF).
- Flexión-extensión de los dedos a la altura de las articulaciones metacarpofalángicas (MCF).
- Abducción transpalmar y abducción radial: consisten en la flexión- extensión del pulgar a la altura de la articulación metacarpofalángicas (MCF) y de la articulación interfalángica (IF), respectivamente.

2.5.5.3. Oposición

Durante la flexión de los dedos, éstos se están en un movimiento continuo hasta tocar la palma distal, como se muestra en las imágenes a continuación. En la extensión normal de los dedos, todos se mueven y se extienden hasta la posición recta o pueden llegar a elevarse. Por tanto, los arcos de movilidad: articulación metacarpofalángica (MCF) disponen de un límite de ángulo superior entre 30 a 45 grados. (Ver imagen 8)

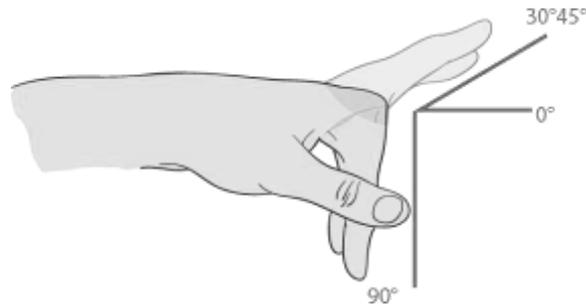


Imagen 8: Grados de movilidad de la articulación metacarpofalángica (MCF).

Fuente: Adaptado de (Connolly, 1998).

En el caso de los arcos de movilidad de la articulación interfalángicas proximal (IFP) (flexión-extensión) se sitúa en los valores límite entre 0 a 100 grados. (ver imagen 9)

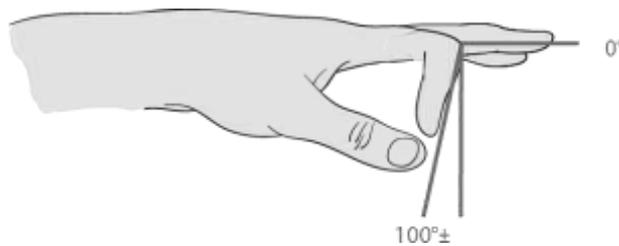


Imagen 9: Grados de movilidad de la articulación interfalángicas proximal (IFP)

Fuente: Adaptado de (Connolly, 1998).

Los límites de movimiento de los arcos de movilidad: articulación interfalángica distal (IFD) (flexión-extensión), se sitúa en los valores límite entre 10 a 90 grados. (ver imagen 10)



Imagen 10: Grados de movilidad: de la articulación interfalángica distal (IFD)

Fuente: Adaptado de (Connolly, 1998).

Respecto a los límites establecidos en los grados de libertad en el movimiento de abducción-aducción

(es decir el movimiento de los dedos de la mano separándose y luego se juntándose para tocarse entre sí) se sitúa entre los valores de 0 a 20 grados. (Ver imagen 11)

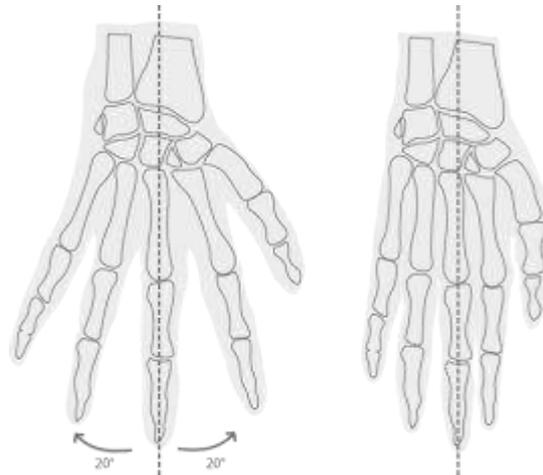


Imagen 11: Límite de grados de la Abducción-aducción de los dedos de la mano.
Fuente: Adaptado de (Connolly, 1998).

2.2.5.4. Flexión y extensión del pulgar

La flexión-extensión del pulgar se identifica de manera sencilla cuando se intenta tocar la base del dedo meñique. Este movimiento permite establecer un rango de flexión activa de las articulaciones metacarpofalángica e interfalángicas del pulgar entre 0 a 50 grados. (ver imagen 12)

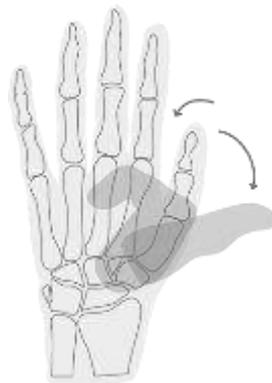


Imagen 12: Limite en grados de la abducción transpalmar del pulgar.
Fuente: Adaptado de (Connolly, 1998).

La flexión-extensión de la articulación metacarpofalángicas (MCF) del pulgar tiene un rango amplio de movimiento que alcanza hasta los 50°, mientras que su articulación interfalángica se sitúa entre los 20° y 90° con respecto a la línea axial del pulgar. Cuando el pulgar está en abducción total, el dedo índice y pulgar forman un ángulo de unos 70°. Para regresar la posición del pulgar hasta la palma, la acción es una aducción completa y con ella este dedo es capaz de realizar un movimiento de oposición llegando a tocar el dedo meñique. (ver imagen 13, 14 y 15)



Imagen 13: Limite en grados de la articulación metacarpofalángica, (MCF).
Fuente: Adaptado de (Connolly, 1998).



Imagen 14: Limite en grados de la articulación interfalángica (IF).
Fuente: Adaptado de (Connolly, 1998).

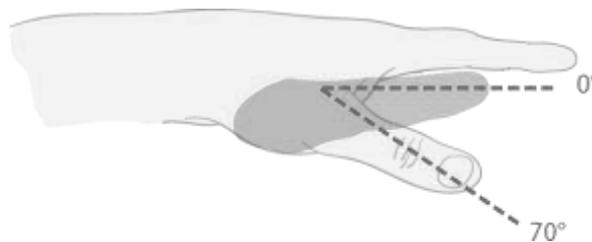


Imagen 15: Límite en grados del movimiento de abducción-aducción palmar del pulgar.
Fuente: Adaptado de (Connolly, 1998).

Aunque de forma conjunta, los dedos presentan un rango promedio de movimiento, cuando se los analiza de manera separada se presentan distintos rangos para cada dedo. Por ejemplo, la articulación MCF del dedo índice presenta un rango de movilidad hacia otros dedos de unos 70° y la articulación MCF del dedo meñique un rango de 95°. El rango de movilidad de la abducción-aducción del dedo índice es cercano a los 60°, el dedo medio se acerca a los 45° y el dedo meñique no supera los 50°.

Dentro de los movimientos de los dedos de la mano, existen limitaciones de movimiento específicas

según unos dedos específicos frente a otros que hay que considerar. Por ejemplo, la articulación MCF del dedo índice presenta un rango de movilidad hacia otros dedos de unos 70° y la articulación MCF del dedo meñique un rango de 95°. Así mismo es importante destacar el rango de movilidad de la abducción-aducción del dedo índice es cercano a los 60°, el dedo medio se acerca a los 45° y el dedo meñique no supera los 50°.

2.2.5.5. Clasificación de las funciones de agarre de la mano

El estudio de los agarres de la mano es fundamental para determinar la capacidad de recuperación de la mano tanto en cirugías como en la elaboración de prótesis y exoesqueletos robóticos de la mano ya que permite programar y controlar tanto los movimientos de la mano como su progreso como sería en este caso con el diseño de un dispositivo para la rehabilitación de la mano artrítica.

Como hemos visto anteriormente, es necesario conocer los límites y rangos de extensión de los músculos y articulaciones de la mano, pero también centrarnos en aquellos procesos combinados con es el caso del agarre de objetos por parte de la mano. En este proceso intervienen numerosos factores y movimientos coordinados por el cerebro relacionados con el movimiento de los músculos y articulaciones, la detección por parte de los receptores de las sensaciones térmicas y de presión y el establecimiento del grado y fuerza de aprensión de un objeto determinado.

La clasificación de los agarres de la mano propuesta inicialmente por Schlesinger en 1919 ha sido modificada por diferentes autores como Napier (1956), Schwarz y Taylor (1955), (Cutkosky, 1989; Cutkosky y Howe, 1990) se centra en el control de la mano a la hora de coger objetos denominados: cilíndrico, palmar, puntual, lateral, esférico y de gancho.

De hecho, Cutkosky indicaba que los agarres de precisión eran los más importantes ya que dotaban al ser humano de destreza y sensibilidad a la hora de manipular objetos o crear. Así mismo, los agarres de aprensión fuertes son los que permiten controlar a los objetos desde la seguridad y la estabilidad a la hora de utilizar instrumentos de precisión para crear, fabricar y manipular instrumentos. Los diferentes tipos de agarre, en función del tipo o volumen del objeto, permite diferenciar el número de dedos implicados en la sujeción y su disposición.

Para la presente tesis se ha utilizado este tipo de clasificación de los agarres para definir los puntos de control en la rehabilitación de pacientes con Artritis Reumatoide, AR que se han programado por el sistema creado. En concreto la tesis se ha centrado en dos que son los agarres de precisión y fuerza y el agarre en oposición. Estos dos tipos de agarre son importantes para la evaluación del estado de rehabilitación de pacientes con trastornos artríticos en la mano de carácter crónico y permite a los terapeutas conocer y valorar el éxito de una terapia de rehabilitación controlada ya sea de manera tradicional como mediante un sistema asistido por ordenador.

Agarres de precisión y fuerza

El agarre de precisión está dado por el pulgar en abducción y rotado en la articulación metacarpofalángica y carpometacarpiana. Los dedos se flexionan y están en abducción sobre la articulación metacarpofalángica, mientras que la muñeca se encuentra firme y el objeto está sujeto con los dedos, (especialmente con el dedo índice) y el pulgar. Este tipo de agarre se usa para sujetar objetos pequeños.

Un agarre de fuerza con la mano es cuando el pulgar se encuentra en el plano de la palma y las

articulaciones metacarpofalángica y carpometacarpiana se encuentran en abducción, es decir, cuando los dedos están flexionados en oposición a la palma, con un ángulo de flexión dependiente de las dimensiones del objeto y la muñeca está colocada en una desviación cubital, neutra entre la flexión y extensión (Napier, 1956).

Un agarre de fuerza con la mano es cuando las articulaciones metacarpofalángica y carpometacarpiana del pulgar y el índice se encuentran en abducción, es decir, cuando el dedo está flexionado en oposición a la palma, con un ángulo de flexión dependiente de las dimensiones del objeto. (Napier, 1956).

Considerando los movimientos de flexión-extensión de la mano en la imagen se muestran las actividades de posición y agarre que en general se realizan durante el proceso de rehabilitación tradicionales para la recuperación de la movilidad de la mano.

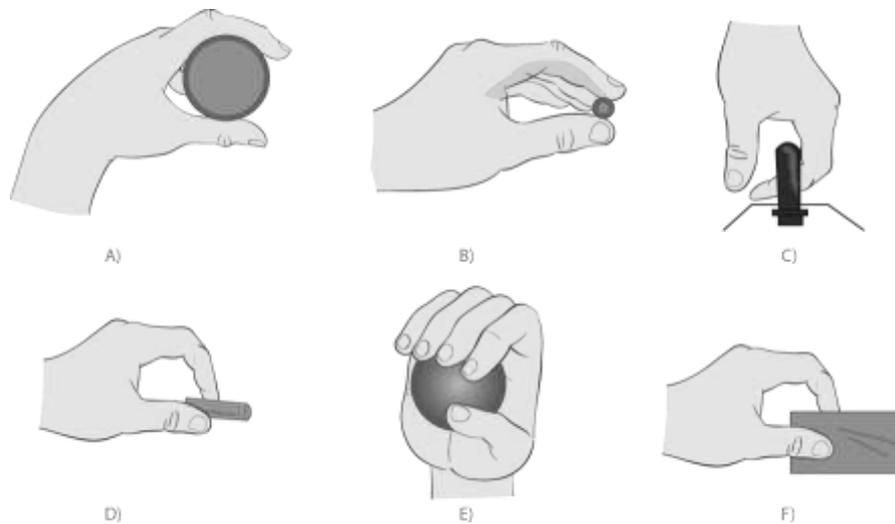


Imagen 16: Clasificación de los tipos de agarre (A) Cilíndrico, (B) de punta, (C) de gancho, (D) palmar, (E) esférico, (F) lateral.

Fuente: Adaptado de (Napier, 1956).

La posición del pulgar define el tipo de agarre de precisión o de fuerza. Cuando mayor es la abducción o posición de cerrado del pulgar, existen menos grados de precisión y se tiende a realizar un agarre más fuerte. (Ver imagen 17)

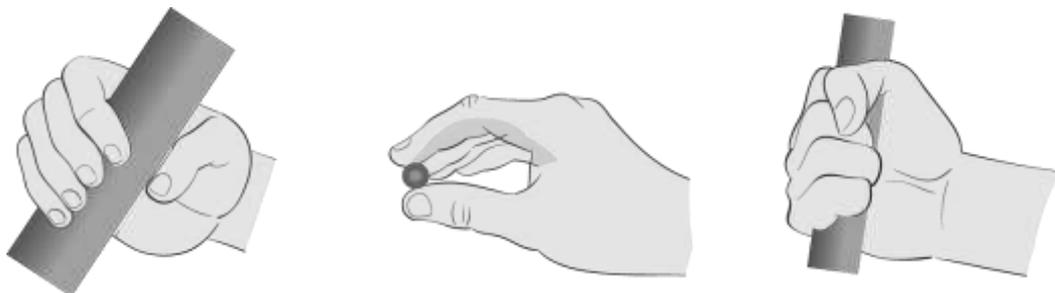


Imagen 17: Clasificación de Napier.
Fuente: Adaptado de (Napier, 1956).

Agarre en oposición

La oposición es un movimiento en el cual la superficie de la yema del dedo pulgarse coloca en ángulo recto o está cara a cara con las demás yemas de los dedos restantes. MacKenzie usa el término oposición para describir las tres direcciones básicas a través de las cuales, la mano ejerce diferentes tipos de fuerzas (MacKenzie y Iberall, 1994).

- Oposición lateral: Se establece entre los dedos índice y pulgar a través de una dirección que generalmente es transversal a la palma. Por ejemplo, al sujetar una llave.
- Oposición puntual: Se establece cuando las yemas de los dedos a lo largo de una dirección que generalmente es paralela a la palma de la mano. Por ejemplo, al abrir un frasco.
- Oposición palmar: Se establece por el contacto entre las superficies de los dedos y la palma, a lo largo de una dirección que generalmente es perpendicular a la palma de la mano. Por ejemplo, al agarrar el mango de un martillo.

La imagen 18 muestra los tres tipos de agarre en oposición: puntual, palmar y lateral. Las flechas muestran la dirección y acción de las fuerzas que son ejercidas por los dedos y por la palma de la mano.

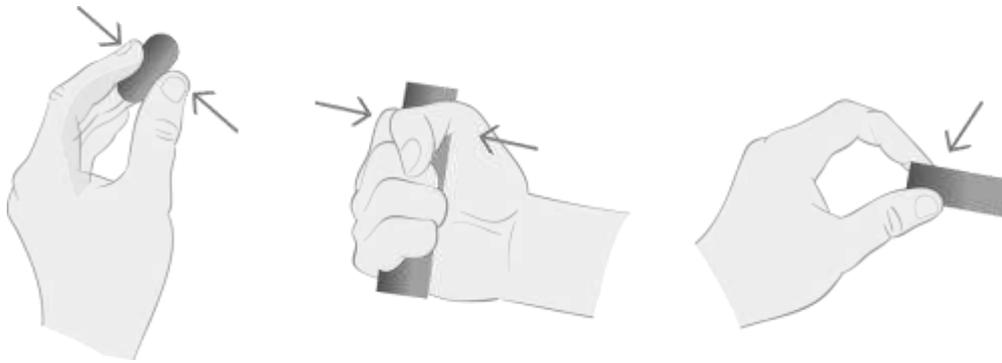


Imagen 18: Clasificación de Iberall.
Fuente: Adaptado de (Iberall, 1987).

2.3. Conclusiones

En este capítulo se ha realizado una descripción anatómica de la mano y se han definido las condiciones y limitaciones de sus articulaciones en condiciones normales. Esta información es importante para el diseño de un exoesqueleto de la mano y para establecer pautas metodológicas para la programación de movimientos en la rehabilitación de la mano en enfermos con artritis crónica. El objetivo de la rehabilitación en estos casos es mitigar la pérdida funcional de movimiento y aprehensión, restaurando las funciones motoras lo mejor posible y dentro de los límites permitidos por el estado de la enfermedad. Es importante tener en cuenta que en muchos casos la rehabilitación solo puede ser de mantenimiento o tratamiento, y no de recuperación completa.

El correcto entendimiento de la anatomía de la mano y de los aspectos biométricos y mecánicos involucrados es fundamental en el diseño del sistema de rehabilitación. Por lo tanto, al diseñar el guante exoesquelético se tendrán en cuenta medidas y ajustes en los rangos de movimiento, y se llevará a cabo un prototipado rápido de los elementos articulados de la estructura del producto. Además, en la evaluación del sistema en pacientes reales se tendrá en cuenta la clasificación de los tipos de agarre de objetos con la mano, que es una herramienta comúnmente utilizada por los terapeutas para evaluar el avance de la enfermedad.

2.4. Referencias

- An, K. N., Chao, E. Y., Cooney III, W. P., y Linscheid, R. L. (1979). Normative model of human hand for biomechanical analysis. *Journal of biomechanics*, Vol 12(10), 775-788. [https://doi.org/10.1016/0021-9290\(79\)90163-5](https://doi.org/10.1016/0021-9290(79)90163-5)
- Bathon JM, Moreland LW, DiBartolomeo AG. (1989)- Inflammatory central nervous system involvement in rheumatoid arthritis. *Semin Arthritis Rheumatology*. Vol. 18 (4):258-66.
- Bear M.F., Connors B.W. y Paradiso M.A. (1998). *Neurociencia Explorando el cerebro*. Manson Publishing ISBN: 9788483150122.
- Bunnell, S., Doherty, E. W., y Curtis, R. M. (1948). Ischemic contracture, local, in the hand. *Plastic and Reconstructive Surgery*, Vol. 3(4), 424-433. En: https://journals.lww.com/plasreconsurg/citation/1948/07000/ischemic_contracture,local,_in_the_hand.4.aspx (Consultado el 5/10/2020).
- Cadena Monroy L.Á. (2015). De los primeros homínidos al Homo sapiens. *Revista Colombiana de Bioética*. Vol. 8 (2). <https://doi.org/10.18270/rcb.v8i2.793>
- Connolly, K. J. (Ed.). (1998). *The psychobiology of the hand*. Cambridge University Press. UK
- Cutkosky M.R. (1989) On grasp choice, grasp models, and the design of hands for manufacturing tasks. *IEEE Transactions on robotics and automation*, Vol. 5 (3), 269-279. <https://doi.org/10.1109/70.34763>
- Cutkosky M.R., Howe R.D. (1990) Human Grasp Choice and Robotic Grasp Analysis. In: Venkataraman S.T., Iberall T. Eds. *Dextrous Robot Hands*. Springer, New York, NY. https://doi.org/10.1007/978-1-4613-8974-3_1
- Delmas, A., y Rouviere, H. (2005). *Anatomía Humana descriptiva, topográfica y funcional*. Elsevier-Masson, 11º ed. ISBN: 8445813137
- Delprat, J., Ehrler, S., y Meyer, C. (2005). *Muñeca y mano: examen articular*. EMC. Kinesiterapia-Medicina física. Elsevier, Paris: Vol. 26 (2) 1-1. [https://doi.org/10.1016/S1293-2965\(05\)43513-6](https://doi.org/10.1016/S1293-2965(05)43513-6)
- Freivalds, A. (2011). *Biomechanics of the upper limbs: mechanics, modelling and musculoskeletal injuries*. CRC press, Routledge ISBN 9781138073234
- García Córdova, F., Martínez Álvarez, J. J., Saltarén Pazmiño, R. J., Guerrero González, A., y López Coronado, J. (2001). Diseño mecatrónico de un dedo antropomórfico. Parte I: mecánica. En: *Jornadas de Automática (22ª: 2001: Barcelona)*. XXII Jornadas de Automática Barcelona, 12-14 de septiembre de 2001. Barcelona: Comité Español de Automática. 2001. ISBN 84-699-4593-9 En: <http://hdl.handle.net/10317/1048> (Consultado el 20/05/2019).
- Iberall T. (1987) Grasp planning from human prehension. *IJCAI'87: Proceedings of the 10th international joint conference on Artificial intelligence - Vol (2) 1153-1156*. En <https://dl.acm.org/doi/abs/10.5555/1625995.1626110> (Consultado el 20/05/2019).
- Jarmey, C., y Sharkey, J. (2017). *Atlas conciso de los músculos*. Editorial Paidotribo S.L. Badalona, España ISBN: 9788499106045
- Jaworski, Ł., y Karpiński, R. (2017). Biomechanics of the human hand. *Journal of Technology and Exploitation in Mechanical Engineering*, Vol.3(1), 28-33. <https://doi.org/10.35784/jteme.536>
- Johansson, R. S., y Vallbo, Å. B. (1983). Tactile sensory coding in the glabrous skin of the human

- hand. Trends in neurosciences, Vol 6, 27-32. [https://doi.org/10.1016/0166-2236\(83\)90011-5](https://doi.org/10.1016/0166-2236(83)90011-5)
- Johansson R.S y.; Westling G. (1987). Signals in tactile afferents from the fingers eliciting adaptive motor responses during precision grip, Vol 66(1), 141– 154. <https://doi.org/10.1007/bf00236210>
- Kelly R., Víctor Santibáñez V. (2003). Control de movimiento de Robots Manipuladores. Monografía sobre Control Automático e Informática Industrial, Pearson Educación. Madrid, ISBN: 84-205-3831-0
- Kumar A., Mundra T.S., Kumar A. (2009) Anatomy of Hand. En: Li S.Z., Jain A.(eds) Encyclopedia of Biometrics. Springer, Boston. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-73003-5>
- Loaiza, J. L., y Arzola, N. (2011). Evolución y tendencias en el desarrollo de prótesis de mano. DYNA, 78(169), 191–200 En: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/19354> (Consultado el 20/05/2019).
- Macefield, V. (1998). The signalling of touch, finger movements and manipulation forces by mechanoreceptors in human skin. Neural Aspects in Tactile Sensation, 89–130. [https://doi.org/10.1016/s0166-4115\(98\)80065-4](https://doi.org/10.1016/s0166-4115(98)80065-4)
- MacKenzie, C. L., y Iberall, T. (1994). The grasping hand. Advances in psychology, Vol. 104. North-Holland/Elsevier Science Publishers. ISBN: 978-0444817464 En: <https://www.sciencedirect.com/bookseries/advances-in-psychology/vol/104/suppl/C> (Consultado el 20/05/2020).
- Marzke, M.W y Marzke R.F. (2000). Evolution of the human hand: approaches to acquiring, analysing and interpreting the anatomical evidence. The Journal of Anatomy Vol. 197 (1), 121-140. <https://doi.org/10.1046/j.1469-7580.2000.19710121.x>
- Napier, J. R. (1956). The prehensile movements of the human hand. The Journal of bone and joint surgery. British volume, Vol 38(4), 902-913. <https://doi.org/10.1302/0301-620X.38B4.902>
- Palastanga, N., Field, D., y Soames, R. (2007). Anatomía y movimiento humano. Mexico DF: Paidotribo. ISBN 84-801-9500-2
- Prattichizzo D., Meli L y Malvezzi M. (2015). Digital Handwriting with a Finger or a Stylus: A Biomechanical Comparison- IEEE Transaction Haptics Vol. 8(4), 356-70. <https://doi.org/10.1109/TOH.2015.2434812>
- Quintal, I.; Noël, L.; Gable, C.; Delaquaize, F.; Bret-Pasian, S.; Rossier, P.; Annoni, J.-M.; Maupas, E.; Spicher, C.-J. (2013). Método de rehabilitación sensitiva del dolor. EMC Kinesiterapia Medicina Física, Vol 34(2), 1–17. [https://doi.org/10.1016/S1293-2965\(13\)64675-7](https://doi.org/10.1016/S1293-2965(13)64675-7)
- Schwarz, R., y Taylor, C. (1955). The anatomy and mechanics of the human hand. Artificial Limbs. Vol 2, (2) 22 –35. En: http://www.oandplibrary.org/al/pdf/1955_02_022.pdf (Consultado el 20/10/2020).
- Silbernagl, S., y Despopoulos. (2009). Color Atlas of Physiology. 6th Ed. Thieme Publishing Group, New York, USA. ISBN: 978-3135450063
- Taylor, T. H., Eranki, K. P., y Kerin, K. D. (2007). Intrinsic muscle spasm of the hand; Bunnell's sign. The Journal of rheumatology, Vol 34(6), 1332-1335. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/17552059> (Consultado el 20/10/2020).

Warnatz, K., Peter, H. H., Schumacher, M., Wiese, L., Prasse, A., Petschner, F. et al. (2003). Infectious CNS disease as a differential diagnosis in systemic rheumatic diseases: three case reports and a review of the literature. *Annals of the rheumatic diseases*, Vol 62 (1), 50-57
<http://dx.doi.org/10.1136/ard.62.1.50>

Artritis reumatoide



CAPÍTULO

3

3.1. Introducción

La Artritis Reumatoide (AR) es una enfermedad inflamatoria, de carácter crónico, que afecta a diferentes estructuras articulares y tendinosas del cuerpo humano. Esta enfermedad ataca la funcionalidad de diversos órganos como la piel, los riñones, la médula ósea y a sistemas como el pulmonar, el cardiovascular, el ocular y sobre todo el cutáneo. Por tanto, afecta tanto a grandes y pequeñas articulaciones como a las periféricas de la mano como las metacarpofalángicas con manifestaciones sistemáticas como la rigidez muscular. También se incluyen aspectos más generales como fatiga, pérdida de peso corporal y muscular (Deane y Holers, 2019), (Ramírez, Aguilar, y Méndez, 2012).

Los pacientes que sufren de artrosis padecen dolores toda su vida y se evidencia un deterioro funcional progresivo incluso con tratamiento farmacológico (Beltrán, 2005). La afectación musculoesquelética implica un dolor en las articulaciones como los pies, las rodillas, las manos incluyendo un proceso inflamatorio. Así mismo, en sus estadios más avanzados, se produce una rigidez articular que necesita de la activación muscular diaria para que no se degrade con el tiempo. (Holguera et al., 2017). Estos signos de dolor e inflamación se inician en los músculos, cartílagos y articulaciones debido a la degradación de los linfocitos localizados en el tejido sinovial (Ramírez, Aguilar, y Méndez, 2012).

Esta enfermedad aparece a cualquier edad, pero es más frecuente en personas entre los 40 y 60 años, y con una proporción por sexos de 3:1, predominando la mujer. Esta diferencia de proporción por sexos se nota más y de manera progresiva después de los 70 años, con una relación 4:1 (García y García, 2011). La AR está asociada con una mayor mortalidad, particularmente en mujeres mayores y puede reducir la esperanza de vida de 3 a 18 años (Rubbert y Finckh, 2009). A nivel genético, existen evidencias de que hay una predisposición genética a padecer la enfermedad que unido a los antígenos citrulinados que se generan en las articulaciones producen la inflamación de la membrana sinovial - que es la capa de tejido conjuntivo que recubre una articulación - se organiza como tejido invasivo que puede degradar el cartílago y el hueso. (Holguera et al., 2017).

En el caso de la mano, los procesos de la pérdida sinovial producen derrames sinoviales en los cartílagos de las articulaciones y en las interfases cartilaginosas de los dedos que generan rigidez en las fases más avanzadas de la enfermedad (Bawadekar et al., 2016), (Moura et al., 2010).

3.1.1. Sintomatología en la mano artrítica

La artritis presente en la mano afecta a todas las articulaciones meta-falángicas proximales de los dedos y el potencial de agarre que tienen en condiciones normales. Mientras avanza la enfermedad, aparecen subluxaciones o desplazamiento de huesos de la mano, desviaciones cubitales de los dedos, y atrofia de los músculos intrínsecos de la mano e incluso pueden existir roturas tendinosas. También es posible que se produzcan deformidades de los dedos en forma de ojales o *boutonnière*, luxaciones dorsales en las articulaciones, deformidades en forma de cuello de cisne en el pulgar, flexiones en las articulaciones interfalángicas distales e hiperextensión de las articulaciones proximales, deformidad característica del dedo meñique, adoptando una forma de Z (Lozano, 2001).



Imagen 19: Fotografía de los nódulos reumatoideos subcutáneos en el codo izquierdo.

Fuente: (Turrión et al., 2017).

3.1.2. Evolución de la enfermedad

La enfermedad desde sus primeros estados genera un proceso de sinovitis poliarticular simétrica y erosiva, que afecta a las articulaciones del cuerpo en general de manera progresiva destruyendo el sistema articular y generando lesiones a nivel óseo estructural (Holguera et al., 2017). El caso de degradación más evidente de la enfermedad se produce en los pies y las manos (Barrett et al., 2000).

La enfermedad se inicia con el aumento de volumen articular causado por el derrame sinovial, también puede existir sinovitis en vainas tendinosas y bursas que son recubrimientos tubulares de los tendones que disminuyen la presión y fricción en sus tejidos. Esta inflamación es la causante de la limitación funcionales que se producen en los pacientes crónicos y está acompañada por debilidad y atrofia muscular que se hace evidente en pocas semanas desde el inicio de la enfermedad.

La afectación musculoesquelética puede iniciarse como artritis mono articular habitualmente es de una articulación grande como codos y rodillas y se van sumando otras articulaciones mientras avanzan los años, desarrollando formas oligoarticulares, es decir una afectación agresiva de las articulaciones, y formas poliarticulares.

Existen patrones que marcan la evolución de la enfermedad en sus fases iniciales (Holguera et al., 2017):

- Patrón lento e insidioso (50-70% de rigidez matutina): aquí la enfermedad se desarrolla en semanas meses con inflamación articular aditiva.
- Patrón intermedio (15-20% de rigidez matutina).
- Patrón agudo (8-15% de rigidez matutina).

Según el curso evolutivo de la enfermedad se describen tres patrones:

- Patrón de curso progresivo (65-70% de rigidez matutina): el más frecuente con afectación aditiva de articulaciones.
- Patrón de curso intermitente (15-20% de rigidez matutina): con periodos de remisión parcial o total, pero en cada periodo de inflamación aumenta el número de articulaciones inflamadas.
- Patrón de curso remitente (10% de rigidez matutina): con periodos de remisión de la enfermedad prolongados.

Una gran parte de los pacientes llega a presentar o desarrollar limitaciones funcionales siguiendo los patrones marcados y, de este porcentaje, la mitad pierde su capacidad de trabajo dentro de los primeros diez años de evolución de la enfermedad, ocasionando graves consecuencias económicas y sociales, que afectan también la vida de sus familiares.

La evolución agresiva de la enfermedad desemboca en un sinnúmero de investigaciones dentro de los profesionales de la salud, llegando a reconocer la necesidad de que el tratamiento de rehabilitación se realice en una etapa precoz para el correcto desarrollo de la rehabilitación y el progreso de esta.

El inicio de la enfermedad empieza con la pérdida funcional de las extremidades lo que desencadena en la polimialgia reumática el dolor y la rigidez y con brotes localizados en las extremidades de inflamación conocido como artritis matricular o inflamatoria que se va extendiendo con el tiempo.

Para la evaluación en la evolución de la enfermedad, Battle propone una segmentación de la velocidad en la instauración de los síntomas de la artritis y el número de articulaciones que se ven afectadas. (Battle et al.,2019), velocidad en la instalación de los síntomas encontramos tres niveles:

- Nivel lento o insidioso: Alrededor del 70% de los pacientes afectados por la enfermedad, comienzan por esta velocidad, donde las articulaciones se inflaman lentamente y se tornan dolorosas con una evolución de más de dos meses en los primeros estadios de la enfermedad. La presencia de rigidez matutina suele presentarse precozmente.
- Nivel intermedio: El comienzo de la enfermedad se produce en el 15-20% de los pacientes en menos de dos meses.
- Nivel agudo: El 15% de los pacientes padecen los síntomas de la enfermedad de manera rápida y lleva asociado la fatiga y pérdida de peso repentina.

La clasificación según el número de articulaciones afectadas se centra en los siguientes niveles.

- Nivel monoarticular. Afecta a una sola articulación inflamada que se convierte en algo persistente.
- Nivel extraarticular: Es la menos frecuente, y genera el síndrome del túnel carpiano y los nódulos reumatoides en las articulaciones como los dedos de las manos o los pies.
- Nivel poliarticular: compromete Se considera este nivel cuando la enfermedad afecta a más de cuatro articulaciones.

3.1.3. Evolución de la enfermedad en las extremidades superiores

En base a los síntomas generales indicado anteriormente, podemos establecer un criterio específico de evolución de la enfermedad en las extremidades superiores y más concretamente en la mano. Por ello, será necesario definir las tareas de recuperación de la movilidad que posteriormente se van a implementar como rutinas en el sistema de rehabilitación que se va a proponer. Por ello se va a realizar una descripción de los siguientes elementos que componen la mano como son los dedos, las articulaciones de los carpos y los tendones porque son estructuras fundamentales para la movilidad de la mano. Para ello, se describen los problemas fisiológicos y de movilidad que sufre la mano y sus componentes cuando se ven afectados por la Artrosis.

Como ya se indicó anteriormente, los dedos con artrosis presentan en general una atrofia muscular interósea que se ve debilitada por la membrana sinovial y que produce una desviación cubital de los dedos y por tanto una deformidad bastante acusada con el paso del tiempo. Los problemas surgen en cuatro elementos fundamentales que van movilidad a la mano y que son las articulaciones, los carpos, los tendones y los flexores de los tendones.

Las articulaciones interfalángicas proximales de los dedos en las etapas más avanzadas de la enfermedad pueden producir tres tipos de deformidades: (1) inestabilidad de las IFP, (2) Desarrollo de dedos con ojal boutonnière y (3) deformidad en cuello de cisne en el dedo pulgar (Holguera et al., 2017).

Los carpos que conforman la estructura de las extremidades superiores y se unen mediante ligamentos, presentan una afectación de la articulación radiocubital inferior conlleva una limitación en la pronosupinación y puede llegar a la destrucción del ligamento triangular del carpo con desplazamiento del cúbito, después de haber producido una limitación de la flexión-extensión del carpo.

Los tendones son el elemento más afectado por la enfermedad ya que son los que tienen vaina sinovial. La molestia aparece desde que llega una pequeña inflamación de la vaina a la presencia de dedo en resorte hasta la rotura tendinosa (Holguera et al., 2017).

La tenosinovitis de los flexores puede dar lugar a un compromiso del nervio mediano, siendo en ocasiones el primer síntoma de la enfermedad (síndrome del túnel del carpo) (Holguera et al., 2017).

3.1.4. Manifestaciones extraarticulares

Casi la tercera parte de los pacientes con AR presentan manifestaciones extraarticulares como problemas cutáneos, nódulos subcutáneos, epiescleritis o afectación pulmonar o vasculitis, depresión, entre otras (Holguera et al., 2017).

- Síntomas Cutáneos

Las manifestaciones extraarticulares con más reincidencia son los nódulos reumatoides subcutáneos. Dichos nódulos se presentan en un 7% de los casos en pacientes con AR (durante la primera etapa) y hasta un 30% de pacientes lo desarrollan en una etapa tardía de la enfermedad. Se encuentran comúnmente en los dedos (ver imagen 1) y en zonas de presión o roce.

Dentro del cuadro de la enfermedad las afecciones se diversifican afectando casi en su totalidad a la anatomía del paciente, cabe recalcar que debido a dirección que toma la investigación el enfoque de la información presentada se dirige hacia la mano.

Dentro del tratamiento de la AR se han desarrollado criterios de clasificación del AR para poder detectarla y clasificarla en una fase temprana lo cual desembocará en un mejor tratamiento ya que como sabemos, es una enfermedad crónica sin cura. La clasificación más utilizada es del American College of Rheumatology (ACR) creado por Aletaha y su equipo (Aletaha et al., 2010).

Conjunto de variables y puntuación de cada una de ellas para el cómputo global. Un paciente será clasificado de AR si la suma total es igual a seis valores: ACP: anticuerpos antipéptidos citrulinados; FR: factor reumatoide; PCR: proteína C reactiva; VS: velocidad de sedimentación global

Tabla 6: Adaptación de criterios de diagnóstico de la clasificación ACR/EULAR 2010.

Criterios diagnósticos de clasificación ACR/EULAR 2010	
Afección articular	
Una articulación grande afecta	0
2-10 articulaciones grandes afectadas	1
1-3 articulaciones pequeñas afectadas	2
4-10 articulaciones pequeñas afectadas	3
Más de 10 articulaciones pequeñas afectadas	5
Serología	
FR y ACCP negativos	0
FR y/o ACCP positivos bajos (>3 veces la normalidad)	2
FR y/o ACCP positivos bajos (<3 veces la normalidad)	3
Reactante de fase aguda	
VSG y PCR normales	0
VSG y PCR elevadas	1
Duración	
Menos de 6 semanas	0
Seis semanas o mas	1

Fuente: Adaptado de (EULAR/ACR, 2010).

En la Tabla 6 se encuentran varios elementos diagnósticos, diferenciales de la enfermedad, que se pueden obtener de la historia clínica, el examen físico y los exámenes complementarios, los cuales pueden ser de orden químico-biológico.

Tabla 7: Diagnóstico diferencial de la artritis reumatoide de la mano.

Diagnóstico diferencial de la artritis reumatoide
Atropías por cristales (gota, pseudogota o artropatía crónica por pirofosfatos)
Polimialgia reumática
Osteoartritis
RS3PE (remitting seronegative symmetrical sinovitis whit pitting edema)
Artritis relacionada con enfermedades de tejido conectivo o vasculitis sistémica
Artritis relacionada con neoplasias
Osteoartritis hipertrófica
Sarcoidosis
Artritis infecciosa (hepatitis B y C, VHI y otros)
VIH: virus de la inmunodeficiencia humana

Fuente: Adaptado de (EULAR/ACR, 2010).

La evolución de una mano con artritis es muy rápida y significativa en pacientes con artrosis en general ya que existe una degeneración de las articulaciones de las manos que se ve afectada por los siguientes factores: (Palmer et al., 2019):

- Rigidez articular de la mano en general.
- Limitaciones en el rango de movimiento activo y pasivo de los dedos de la mano.
- Déficit de agarre y fuerza de pellizco entre dedos.
- Limitaciones en la destreza manual a la hora de sostener y/o agarra objetos o realizar tareas con las manos.

Dentro de las fases preliminares de la artritis reumatoide en la mano en el diagnóstico radiográfico se observa inicialmente como osteopenia en banda, pinzamiento del espacio articular y erosiones marginales en el 15-30% de los pacientes en el primeraño de la enfermedad (Holguera et al., 2017).

La información presentada y analizada se utiliza para que el terapeuta realice un diagnóstico sobre la evolución de la movilidad de la mano con respecto a la afectación de la enfermedad en la mano.

3.1.5. Tratamiento de la enfermedad

La terapia farmacológica constituye en la mayoría de los casos, la base del tratamiento de la AR. Sus objetivos son aliviar los síntomas de dolor e inflamación de las articulaciones, prevenir las lesiones articulares y evitar la pérdida de función articular.

Los principales fármacos que se utilizan son los analgésicos como los antiinflamatorios no esteroideos (AINE), los corticoides, los fármacos antirreumáticos modificadores de la enfermedad (FAME) tradicionales y biológicos (Conartritis, 2014).

Tabla 8: Acción farmacológica.

Acción Rápida	Vía oral	Paracetamol Opioides AINEs
	Vía intraarticular	Glucocorticoides
Acción Lenta	Vía oral	Condroitin Sulfato Sulfato de glucosamina
	Vía intraarticular	Ácido Hialurónico

Fuente: Adaptado de (Conartritis, 2014)

De manera complementaria, es necesario combinar el tratamiento farmacológico con tratamientos de control y revisión del estado funcional de las articulaciones mediante la rehabilitación terapéutica como la fisioterapia. Por ello, las terapias complementarias van desde adaptar hábitos de movilidad en la cotidianidad, mejorar la flexibilidad con ejercicios motrices para así optimizar la flexibilidad de las articulaciones y aprender a convivir con el dolor artrítico (Conartritis, 2014).

3.1.6. La rehabilitación

La rehabilitación de las extremidades afectadas por la enfermedad pueda ayudar a mantener y contener la enfermedad cuando se convierte en crónica ya que es irreversible.

Los tratamientos complementarios consisten principalmente en desarrollar rutinas de movimientos dirigidos por fisioterapeutas, disponer de apoyo psicológicos y tener una alimentación saludable que permita retrasar en su conjunto los estadios más críticos de la enfermedad.

Rehabilitación según la Organización Mundial de la Salud (OMS):

La aplicación coordinada de un conjunto de medidas médicas, sociales, educativas y profesionales para preparar o readaptar al individuo con objeto de que alcance la mayor proporción posible de capacidad funcional (OMS, 1969:6).

Según el enfoque de las decisiones médicas que se toman, se define Rehabilitación médica como:

La parte de la asistencia médica que trata de desarrollar las capacidades funcionales y psicológicas del individuo y, si es preciso, sus mecanismos de compensación, a fin de permitirle llevar una existencia autónoma y activa (OMS, 1969:6).

Es por ello que la rehabilitación muscular como la fisioterapia se convierte en una ayuda fundamental para ayudar al paciente de manera regular mediante la definición de rutinas programadas por especialistas en función de las necesidades del paciente y su estado. Es precisamente en la definición de rutinas donde los exoesqueletos programados pueden ayudar al paciente programando ejercicios personalizados y controlando los resultados mediante un sistema integrado.

El tratamiento de rehabilitación debe iniciarse en la fase precoz de la enfermedad en conjunto con el farmacológico, a efecto de esto es fundamental el tratamiento de la enfermedad en los dos primeros años. Para pacientes con artritis y artrosis que tengan diferentes grados de atrofia muscular asociada, la rehabilitación se encuentra en un continuo cambio y a la espera de nuevos avances tecnológicos.

Uno de los principales objetivos del tratamiento terapéutico es maximizar la función de la mano y destacar la realización de ejercicios que conlleven a mejoras específicas en las articulaciones afectadas

creando una nueva relación de movimiento y fortalecimiento de los grupos musculares más relevantes para la función manual (Vlieland, 2003). Otros propósitos de tratamiento en la rehabilitación también son:

- Obtener la remisión o el control de la enfermedad en la mano.
- Disminuir el dolor articular y el deterioro progresivo de los movimientos de la mano.
- Mantener la función motriz de la mano y más concretamente en mejorar la fuerza muscular, los procesos de agarre, etc. que permitan la autonomía del paciente en la realización de actividades diarias y en el trabajo
- Mejorar la calidad de vida a través de hábitos saludables.

La rehabilitación permite la reducción del dolor, el fortalecimiento de la musculatura y la reducción de la inflamación para minimizar la deformidad articular, proporcionando así una guía para los pacientes en relación con el acondicionamiento físico (Hall y Brody, 2006).

Los pacientes que padecen enfermedades de artritis se enfrentan a una enfermedad que acarrea mucho dolor e incomodidad, siendo sin duda alguna estos síntomas los principales causantes de problemas que van más allá del panorama del paciente. El envejecimiento tiene un gran impacto sobre aspectos como el estilo de vida, la disminución de la capacidad física y sensorial, la capacidad de ingresos, la socialización, la independencia y el estado general de salud, lo cual hace que el envejecimiento poblacional represente una elevada carga para los servicios sanitarios y asistenciales (Gutiérrez et al., 2013; Orozco et al., 2007).

Con el fin de mermar estos efectos en el paciente se ha generado una importancia crucial sobre los procesos de rehabilitación creando así un método de reinserción del paciente a la vida cotidiana que maneja y a afrontar padecimientos de dolor y psicológicos que involucra estas enfermedades Según la OMS Fisioterapia se define como:

“Arte y ciencia del tratamiento físico por medio de la gimnasia reeducativa, el calor, el frío, la luz, el masaje y la electricidad. Entre los objetivos del tratamiento figuran el alivio del dolor, el aumento de la circulación, la prevención y la corrección de incapacidades y la recuperación máxima de la fuerza, la movilidad y la coordinación. Esta rama también comprende la ejecución de pruebas eléctricas y manuales para determinar la importancia de la alteración de los impulsos nerviosos y de la energía muscular. Se incluyen pruebas para precisar las aptitudes funcionales y la amplitud del movimiento articular, todo con el fin de facilitar al médico el establecimiento del diagnóstico y de registrar los progresos efectuados con el paciente” (OMS, 1969:6).

La fisioterapia por lo tanto se encarga de (Combe, 2007):

- Explorar las alteraciones y limitaciones que se pueden presentar en los pacientes.
- Aliviar alteraciones y limitaciones funcionales elaborando, ejecutando y modificando intervenciones terapéuticas que busquen mejorar las actividades del paciente afectado.
- Prevenir lesiones, alteraciones, limitaciones funcionales y discapacidades, mediante la prevención y detección de daños a la salud.
- Promover y mantener la salud e integridad física de los pacientes de todas las edades.

3.1.7. La Terapia Física

El ejercicio terapéutico que ofrece la fisioterapia a pacientes y clientes es uno de los servicios más utilizados para prevenir o para mejorar el rendimiento de aquellos pacientes con alteraciones o limitaciones funcionales diagnosticadas (Hall y Brody, 2006).

Los ejercicios tienen la misión de:

- Mejorar el estado físico y de salud de los diagnosticados, incrementando su sensación de bienestar.
- Prevenir complicaciones en el estado físico de las personas sanas.
- Reducir al mínimo el uso de medios sanitarios.
- Evitar la aparición de futuras alteraciones o evitar mayores pérdidas de la funcionalidad de las partes afectadas.

Los métodos de intervención del ejercicio terapéutico comprenden actividades o técnicas para la mejora de varios criterios como: movilidad, fuerza, control neuromuscular y resistencia muscular. Cada ejercicio es un aporte para la pronta recuperación de la coordinación y equilibrio de las destrezas funcionales, incluyéndolos patrones naturales del movimiento.

No se debe olvidar la importancia de la educación del paciente y su inserción en un plan sistemático de asistencia. Los progresos funcionales a largo plazo y la prevención de futuras lesiones se producirán sólo si el paciente conoce y entiende cuáles son los objetivos del plan de ejercicio. En base a ello, querrá incorporar los consejos e instrucciones del terapeuta su vida diaria y así mejorará su calidad de vida (Vlieland, 2003).

El tratamiento más utilizado en terapia enfocado a la atrofia muscular es el que mantiene amplitudes articulares, fuerza muscular, destreza manual y el uso de buenas posturas para evitar cansancio y posibles deformaciones.

El método para aplicar en el tratamiento de la artritis y artrosis es directamente dependiente de la causa y la gravedad de las articulaciones comprometidas, y sin dejar de lado el grado en que esta dolencia afecta las actividades diarias.

En ese sentido, resulta clave tomar en cuenta la edad del paciente y su ocupación. Otro factor importante es la guía e intervención del médico en la elaboración del plan de tratamiento, ya que este debe estar orientado a reducir el dolor y evitar el malestar de alguna discapacidad posterior (Vlieland, 2003).

Se recomiendan los ejercicios que buscan fortalecer el tono muscular, junto con ejercicios de amplio rango de movimiento que ayuden a mejorar la flexibilidad. Se suele incluir otros ejercicios considerados de bajo impacto los cuales ayudan a mantener las articulaciones saludables, aliviando la sensación de rigidez.

Entre las terapias más utilizadas en el tratamiento de la artritis de la mano encontramos:

- Las terapias manuales o Actividades Terapéuticas Manuales (ATM).
- Las terapias alternativas.

3.1.8. Actividades Terapéuticas Manuales (ATM)

Las actividades de carácter manual tienen fines terapéuticos específicos y funcionales. Son planificadas por los médicos junto al asesoramiento de los terapeutas, quienes establecen un programa de ejercicios de estiramiento y fortalecimiento de la mano a medida que se pueda alcanzar medidas de resultados deseados como (Palmer et al., 2019):

- Dolor reducido o eliminado.
- Disminución de la hinchazón.
- ROM mejorada (medidas goniométricas).
- Fuerza mejorada (dinamómetro).
- Mejor coordinación y destreza.

En este análisis se toma en cuenta algunos criterios como:

- Proporcionar acción en los movimientos requeridos, buscando que la actividad aporte a la recuperación de la movilidad y fortalezca el conjunto de músculos.
- Repetir los movimientos deseado por un número de veces controlable por series o rutinas.
- Permitir la medición del arco de movimiento.

3.1.9. Técnicas alternativas

En un cuadro clínico de la artritis reumatoide y la artrosis, el dolor crónico es uno de los factores más relevantes a tratar y generalmente incluye medicamentos, fisioterapia, ejercicio, educación y posible cirugía. El tratamiento suele ser muy agresivo y proporcionado de manera oportuna puede retardar la destrucción de la articulación.

La visión holística aconseja tratar a esta clase de enfermedades como un campo interdisciplinario con un enfoque más amplio que abarque desde el tratamiento del dolor, psicológico, conductual y cognitivo. Respecto a las terapias existentes para el tratamiento están las técnicas alternativas como las operantes, las cognitivo-conductual y las terapias asistidas por ordenador.

3.1.10. Técnicas Operantes o conductuales

Estas técnicas se basan en los principios del condicionamiento instrumental u operante. El factor conductual del dolor se refiere principalmente a los problemas relacionados con el dolor, cambios posturales, expresiones faciales y conductas de desbloqueo. En general, las técnicas operantes se dirigen a la reducción o eliminación de las conductas relacionadas con el dolor, a la restauración de las actividades diarias y a la instauración del ejercicio físico (Bados y García, 2011)

3.1.11. Terapia cognitivo-conductual

Dentro de las terapias psicológicas para el dolor crónico, las técnicas cognitivo- conductuales son las más empleadas y han demostrado ser efectivas (Eccleston, Williams y Morley, 2009; Lunde, Nordhus y Pallesen, 2009). Dentro de esta terapia se toma en cuenta factores médico-psicológicos que permiten abarcar conductas crónicas disminuyendo la incapacidad motriz.

3.1.12. Terapias asistidas por ordenador

Las terapias asistidas por ordenador son procesos que se ayudan de los ordenadores para procesar los datos que pueden almacenarse localmente y enviarse periódicamente a los proveedores de salud para su análisis y actualizaciones periódicas del tratamiento (Perry et al., 2009). Se describe como un sistema que permite al especialista, en este caso, al fisioterapeuta, diseñar y/o aplicar un tratamiento adecuado en base al análisis recibido. Existen terapias físicas asistidas por ordenador para la recuperación física y motora en pacientes con trastornos crónicos, pero hay muy poco investigado en el desarrollo de un sistema de rehabilitación para la mano que ayude al fisioterapeuta al tratamiento en pacientes con afecciones como la artritis. Dentro de las terapias físicas asistidas por ordenador encontramos como novedad el uso de exoesqueletos que proporcionan a pacientes crónicos con pérdidas de movilidad progresiva o pacientes con un gran daño muscular, realizar movimientos controlados que no podrían realizarse sin ayuda.

En esencia un exoesqueleto robótico dispone de una estructura capaz de sostener guiar y programar los movimientos que por lo genera realiza un ser humano como ocurre cuando movemos los brazos o andamos.

El uso de la rehabilitación asistida por robots ha demostrado una mejora relativamente rápida en términos de fuerza y actividades funcionales, brindando un resultado más significativo versus la rehabilitación convencional (Lara y Martínez,2018).

Un ejemplo interesante es el uso de exoesqueletos como parte de las terapias asistidas por ordenador de extremidades superiores como el ArmAssist 2.0©, desarrollado por TECNALIA, para la rehabilitación de miembros superiores en personas con discapacidad neuromuscular. Este dispositivo permite el entrenamiento asistido y activo del brazo y la mano a través de videojuegos.

Mediante un sistema integrado a una aplicación informática se trabajan parámetros de fuerza, movimiento y autonomía en movimientos del antebrazo, muñeca y mano de pacientes. Funciona con un dispositivo de base móvil conectado al usuario mediante una prótesis, lo cual permite al paciente interactuar con los juegos desarrollados específicamente para la terapia física que mejora y fortalece los músculos y articulaciones de la mano y la muñeca¹.



Imagen 20: Armassist 2.0 ©
Fuente: TECNALIA, 2016.

¹TECNALIA.(2016). ArmAssit 2.0.(España). Disponible en: <https://www.tecnaliaventures.com/portfolio-item/robot-asistivo-para-la-rehabilitacion/>. Consultado 04/07/2022

3.1.13. Dispositivos para la rehabilitación de la mano

Desde hace décadas existen ayudas para la rehabilitación motora para enfermedades de todo tipo. En el caso de la mano que se ve afectada por las dolencias artríticas encontramos numerosos dispositivos que en algún caso se han convertido en los sistemas precursores de los exoesqueletos como los guantes robotizados. En el siguiente apartado se hace una descripción general de dispositivos generales y específicos que pueden ser utilizados en alguna fase de la rehabilitación de la mano. Entre los dispositivos más conocidos encontramos; las férulas, las pelotas de goma, las bandas o gomas y los dispositivos externos.

Las Férulas

Las férulas son dispositivos empleados en la medicina terapéutica, que pueden estar fabricados en materiales como el cartón, la madera o los termoplásticos por inyección de diversas densidades que permiten su uso para la estabilización de los huesos y articulaciones dañadas; corrigiendo las posibles deformaciones (Bressel y Salcedo, 2017). Las férulas se dividen en tres tipos:

- **Las férulas funcionales o de actividad:** Están diseñadas para mejorar la función y permiten realizar algunas actividades de la vida diaria minimizando el uso de las articulaciones y sin correr el riesgo de empeorar.
- **Pasivo (de reposo o inmovilización):** no son articuladas ya que su única misión es inmovilizar los miembros mientras impiden que se generen mayores deformaciones. Estas no permiten realizar ninguna actividad por lo cual es recomendable que se utilicen durante la noche o cuando no se va a realizar ninguna actividad.
- **Férulas estáticas:** son articuladas y facilitan la dinámicos de los músculos debilitados, también coadyuvan al movimiento articular en una determinada posición.



Imagen 21: Férulas funcionales para extremidades superiores e inferiores

Fuente: reactiv.com, 2022

Pelotas de goma

Las pelotas de goma blandas de diferentes densidades fortalecen los músculos de agarre de la mano y son muy importantes en la rehabilitación de la mano artrítica. Permiten realizar de manera sencilla movimientos de abducción, es decir cerrar y abrir la mano; permite ejercitar la presión, la fuerza y la coordinación en los dedos en el proceso de agarre, y facilita el flujo sanguíneo a la mano, muñeca y

el codo. El uso de la pelota de goma combina todos estos ejercicios para el fortalecimiento de la fuerza y la coordinación en un solo dispositivo.²



Imagen 22: Dispositivo Strengthener © en posición para terapia de agarre
Fuente: Gojoy Swim Store, 2013.

GripPro©

Este dispositivo en forma de anillo es un entrenador de fuerza y resistencia para los dedos, la mano y el antebrazo. Es portátil y fácil de usar, con tres niveles de dificultad acorde al peso del anillo. A comparación de otros ejercitadores portátiles tiene mejor sensación de agarre en la mano y resulta más cómodo.²



Imagen 23: GripPro © en posición de agarre
Fuente: SportsyOutdoors, 2014.

Hand X Band©

Este dispositivo se compone por una serie de bandas elásticas de silicona para entrenar los dedos de manera individual y coordinada. Las bandas son de alta elasticidad, larga duración y fácil de usar.

² Gojoy SwimStore (2013). Strengthener©. En: <https://es.aliexpress.com/item/33064023791.html>. Consultado el 04/07/2022

Los ejercicios se orientan hacia el estiramiento de los músculos de los dedos, la palma y la muñeca, pero también fortalecer los dedos de forma individual. El Hand X Band³ está diseñado con el objetivo de prevenir lesiones como túnel carpiano y codo de tenista en las extremidades superiores como la mano y el brazo para corregir el desequilibrio del agarre de los músculos.



Imagen 24: Modelo de pinza de silicona para dedos
Fuente: Fitness Factory, 2015.

Varigrip[©]

Se compone de una estructura rígida formada por varios tubos que pueden pulsarse de manera individual en forma de resortes con diferentes grados de resistencia. Los resortes permiten trabajar y fortalecer los tendones de la mano y tiene la posibilidad de graduar el ritmo con el que se desea trabajar. Es un dispositivo de ejercicios que se recomienda para fortalecer la mano y mejorar la flexibilidad en cada dedo. Especialmente la utilizan quienes practican guitarra, sin embargo, su uso también se extiende a la rehabilitación de la mano ya que puede ajustarse la resistencia de los resortes mediante tornillos que modifican la posición inicial.⁴



Imagen 25: Varigrip[©].
Fuente: Thinkgeek, 2012.

Aploplexi Stroke[©]

³ SportsyOutdoors (2014).GripPro[©]. En: <https://es.aliexpress.com/i/4000193195683.html>. Consultado el 04/07/2022.

⁴ FitnessFactory (2015) Hand X Band[©]. En:<https://es.aliexpress.com/item/4000086986370.html>. Consultado el 04/07/2022.

Es un dispositivo semirrígido que se acopla sobre la mano en forma de guante y apéndices rígidos o soportes en cada dedo de la mano y la muñeca. Se utiliza en la rehabilitación de la muñeca y como instrumento ortopédico en dedos para recuperar la fuerza y movimiento.⁵ Los ejercicios realizados con este dispositivo permiten el fortalecimiento de tendones de la mano.



Imagen 26: Aploplexi Stroke ©.

Fuente: InterHome⁶, 2012

⁵ Thinkgeek (2012) VariGrip. Hand Exerciser. En: <http://www.thinkgeek.com/product/efe9>. Consultado el 04/07/2022.

⁶ InterHome (2012) Aploplexi Stroke. En :https://es.aliexpress.com/store/product/Hand-PHYSIOTHERAPY-REHABILITATION-Training-Equipment-Dynamic-Wrist-and-finger-Orthosis-for-HEMIPLEGIA-Patients-Tendon-repair/1924754_32489627638.html. Consultado el 04/07/2022

3.2. Conclusiones

La artritis es una enfermedad crónica que afecta a aproximadamente el 30% de la población mundial y que limita severamente las habilidades motoras finas de las extremidades superiores, como la mano, comprometiendo la calidad de vida de los pacientes. El principal problema de la artritis en las extremidades superiores es la pérdida de función de las articulaciones, lo que causa dolor, inflamación y rigidez en las articulaciones y reduce la movilidad.

Los tratamientos tradicionales para la artritis incluyen terapias físicas y medicamentos que atacan las sustancias que causan deformaciones y dolor en las articulaciones, reduciendo los síntomas y, en algunos casos, deteniendo el avance del daño articular. Estos tratamientos también pueden mejorar la movilidad articular y la independencia del paciente y aumentar su autoestima y su capacidad para relacionarse con su entorno. Sin embargo, estos tratamientos suelen ser largos y requieren supervisión médica constante.

Con el avance de la tecnología, existen sistemas de rehabilitación asistidos por ordenador que permiten controlar y verificar el estado del paciente y programar rutinas de rehabilitación. Los exoesqueletos también pueden ser un complemento útil para la rehabilitación crónica y grave en casos de atrofia muscular en manos artríticas.

En este capítulo se han tratado aspectos relacionados con las pruebas diagnósticas que permitirán programar rutinas de rehabilitación mediante sistemas de rehabilitación asistidos por ordenador basados en exoesqueletos. Para ello, es esencial adaptar los aspectos relacionados con el control fisioterapéutico de la rehabilitación de la mano artrítica y crear una aplicación de gestión de la información del usuario que ayude al especialista a tomar decisiones sobre las rutinas programadas en el dispositivo de ayuda para la rehabilitación.

3.3. Referencias

Aletaha, D., Neogi, T., Silman, A. J., Funovits, J., Felson, D. T., Bingham III, C. O., ... y Hawker, G. (2010). Rheumatoid arthritis classification criteria: an American College of Rheumatology/European League Against Rheumatism collaborative initiative. *Arthritis y rheumatism*, Vol. 62(9), 2569-2581 <https://doi.org/10.1136/ard.2010.138461>

Arango, V., y Ruiz, I. (2006). Diagnóstico de los adultos mayores de Colombia. Documento de investigación de la Fundación Saldarriaga Concha. Bogotá, 1-19. http://www.sdp.gov.co/sites/default/files/diag_adul_mayor.pdf (Consultado 05/05/2022)

Fedesarrollo y Fundación Saldarriaga Concha. (2015). Misión Colombia Envejece: cifras, retos y recomendaciones. Editorial Fundación Saldarriaga Concha. Bogotá, D.C. Colombia. En: https://www.saldarriagaconcha.org/wp-content/uploads/2019/01/pm_proceso_envejecimiento.pdf (Consultado 12/01/2022)

Bados, A., y García-Grau, E. (2011). Técnicas operantes. Departamento de Personalidad, Evaluación y Tratamiento Psicológicos. Facultad de Psicología, Universidad de Barcelona. En <http://hdl.handle.net/2445/18402> (Consultado 04/07/2022)

Barrett, E., Scott, D., Wiles, N., y Symmons, D. (2000). The impact of rheumatoid arthritis on employment status in the early years of disease. En E. Barrett, D. Scott, N. Wiles, y D. Symmons, The impact of rheumatoid arthritis on employment status in the early years of disease: a UK community-based study. *Rheumatology* 1403-1409. En: <https://doi.org/10.1093/rheumatology/39.12.1403> (Consultado 10/05/2022).

Battle, E., Minguez Vega, M., Bernabeu Gnzálvez, y Panadero Tendero, G. (2019). Artritis Reumatoide. d'Alacant: Unidad de Reumatología. Hospital Clínico de Sant Joan d'Alacant. En: <https://fdocuments.es/document/artritis-reumatoide-tulo-1-artritis-reumatoide-13-artritis-reumatoide-e-battle.html> (Consultado 12/05/2022)

Bawadekar, M., Gendron-Fitzpatrick, A., Rebernick, R., Shim, D., Warner, T., Nicholas, A., et al. (2016). Tumor necrosis factor alpha, citrullination, and peptidylarginine deiminase 4 in lung and joint inflammation. *Arthritis Research y Therapy* Vol. 18 En: <https://doi.org/10.1186/s13075-016-1068-0>

Bressel, M. A., y Salcedo, I. V. (2017) Efectos del uso de ortesis de mano sobre la independencia funcional en pacientes con Artritis Reumatoide: revisión sistemática. <https://revistatog.com/num27/pdfs/revision1.pdf> (Consultado 09/05/2020)

Combe B. (2007). Early rheumatoid arthritis: strategies for prevention and management. Best practice y research. *Clinical rheumatology*, Vol 21(1), 27–42. <https://doi.org/10.1016/j.berh.2006.08.011>

Combe, B., Lukas, C. y Morel, J. (2015). Artritis reumatoide del adulto: epidemiología, clínica y diagnóstico. *EMC - Aparato Locomotor*, Vol.48(4), 1–17. [https://doi.org/10.1016/S1286-935X\(15\)74992-0](https://doi.org/10.1016/S1286-935X(15)74992-0)

Conartritis. (2014). Todo sobre la artritis. En: <http://www.conartritis.org/todo-sobre-artritis/que-es-la-ar/tratamiento/> (Consultado 05/05/2019)

Cordoba, A, García-Unzueta, MT, Riancho-Zarrabeitia, L, Corrales, A, Martínez-Taboada, V, y Riancho, JA. (2021). Hipercalcemia en pacientes con artritis reumatoide: un estudio retrospectivo. *Revista de Osteoporosis y Metabolismo Mineral*, 13(1), 5-9 <https://dx.doi.org/10.4321/s1889-836x2021000100002>

Deane, K. D., y Holers, M. V. (2019). The Natural History of Rheumatoid Arthritis. USA: Elsevier Inc. ISBN (Consultado 09/07/2019)

Eccleston, C., de C Williams, A. C., y Morley, S. (2009). Psychological therapies for the management of chronic pain (excluding headache) in adults. *Cochrane database of systematic reviews*, Vol (2).

<https://doi.org/10.1002/14651858.CD007407.pub4>

García Arias M.J. y García Vadillo J.A. (2011). Tratamiento de la artritis reumatoide del anciano. Vol. (12) 4, 103-107. Seminarios de la Fundación Española de Reumatología <https://doi.org/10.1016/j.semreu.2011.07.001>

Gutiérrez, W. A., Samudio Brigard, M. L., Fernández-Ávila, D. G., Díaz, M. C., y Gutiérrez Dávila, J. M. (2013). Artritis reumatoide en el anciano. Revisión narrativa. Revista Colombiana de Reumatología, Vol 20(2), 91–101. [https://doi.org/10.1016/s0121-8123\(13\)70003-3](https://doi.org/10.1016/s0121-8123(13)70003-3)

Hall, C. M., y Brody, L. T. (2006). Ejercicio terapéutico. Editorial Paidotribo.

Holguera, M. R., Turrión Nieves, A., Pérez Gómez, A., y Álvarez de Mon-Sot, M. (2017). Artritis reumatoide. Medicine Vol, 12 (28) 1615-1625 <https://doi.org/10.1016/j.med.2017.02.010>

Lozano, J. A. (2001). Artritis reumatoide (I). Etiopatogenia, sintomatología, diagnóstico y pronóstico. Offarm. Vol 20 (8). 94-101 <https://www.elsevier.es/es-revista-offarm-4-pdf-13018360> (Consultado 20/05/2022)

Lunde, L. H., Nordhus, I. H., y Pallesen, S. (2009). The effectiveness of cognitive and behavioural treatment of chronic pain in the elderly: a quantitative review. Journal of clinical psychology in medical settings, Vol.16(3), 254-262. <https://doi.org/10.1007/s10880-009-9162-y>

Moura, R., Cascao, R., Perpetuo, I., Canhao, H., Vieira-Sousa, E., Mourao, A., y otros. (2010). Cytokine pattern in very early rheumatoid arthritis favours B-cell activation and survival. Rheumatology. Journal of Translational Medicine Vol. 8 (1) <https://doi.org/10.1186/1479-5876-8-S1-P33>

Palmer, E., Matlick, D., Council, R. O., y Richman, S. (2019). Rheumatoid Arthritis: Wrist and Hand. Clinical Review <https://www.ebscohost.com/assets-sample-content/RRC-Rheumatoid-Arthritis-Wrist-Hand-Clinical-Review.pdf>(Consultado 05/06/2019)

Perry J.C., Zabaleta H., Belloso A., Keller T. (2009) ARMassist: A low-cost device for telerehabilitation of post-stroke arm deficits. In: Dössel O., Schlegel W.C. (eds) World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering, September 7 - 12, 2009, Munich, Germany. IFMBE Proceedings, Springer, Berlin, Heidelberg. vol 25(9). https://doi.org/10.1007/978-3-642-03889-1_18

Jerry J.C., Zabaleta H., Belloso A. Rodríguez-de-Pablo, F, Cavallaro I. y T. Keller T., (2012). ARMassist: Development of a functional prototype for at-home telerehabilitation of post-stroke arm impairment, 2012 4th IEEE RAS y EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob), pp. 1561-1566, <https://doi.org/10.1109/BioRob.2012.6290858>

Orozco DJ, Bedoya JD, Bedoya EG, Cárdenas, JD, Ramírez LA. (2007) Artritis en el anciano. Revista Colombiana de Reumatología, Vol. 14 (1) 66-84. En: <http://www.scielo.org.co/pdf/rcr/v14n1/v14n1a07.pdf> (Consultado 20/05/2020)

Ramírez, D. A., Aguilar, N. Z., y Méndez Rodríguez, A. (2012). Artritis reumatoide. Revista médica de Costa Rica y Centroamérica, Vol 69 (602), 299-307. <https://www.binasss.sa.cr/revistas/rmcc/602/art24.pdf> (Consultado 12/06/2020)

Rubbert-Roth, A., y Finckh, A. (2009). Treatment options in patients with rheumatoid arthritis failing initial TNF inhibitor therapy: a critical review. Arthritis research y therapy, Vol.11(1), 1-12. <https://doi.org/10.1186/ar2666>

Vlieland, T. P. V. (2003). Rehabilitation of people with rheumatoid arthritis. Best Practice y Research Clinical Rheumatology, Vol. 17(5), 847-861. [https://doi.org/10.1016/s1521-6942\(03\)00043-3](https://doi.org/10.1016/s1521-6942(03)00043-3)

World Health Organization. (1969). Comité de Expertos de la OMS en Rehabilitación Médica. En <https://apps.who.int/iris/handle/10665/38490> (Consultado 10/05/2).

Antecedentes Tecnológicos



CAPÍTULO

4

4.1. Introducción

El esqueleto en el ser humano es una estructura que se compone de numerosos subsistemas con diversas funciones motrices y/o protectoras. Estos subsistemas se componen de huesos, cartílagos y articulaciones que conforman una sinergia para una funcionalidad establecida y que se rige por el sistema neuronal de impulsos del Sistema Nervioso Central SNC. El hecho de que el esqueleto humano se considere un endoesqueleto no implica que no podamos reconstruir una parte de los subsistemas que se deterioran y convertirlos en cualquiera de los dos tipos de exoesqueletos que existen.

El esqueleto humano se comporta como un endoesqueleto ya que se encuentra envuelto de músculos, tendones y piel. Protege órganos y facilita la movilidad del cuerpo a través de las extremidades. Precisamente, cuando se produce una pérdida o deterioro de algún hueso o subsistema óseo por ejemplo en las extremidades inferiores o superiores se recurre tradicionalmente a las prótesis externas (brazos, manos, piernas, ortopédicas) e incluso internas, (rotulas artificiales en la cadera, tornillos de sujeción entre huesos, etc.).

De hecho, actualmente diseñar y crear tecnológicamente piezas que sustituyan una parte o partes de nuestro endoesqueleto original (un hueso, un cartílago o una articulación) mediante el uso de las prótesis o un subsistema (prótesis complejas). También podemos crear piezas o subsistemas situados fuera de nuestro cuerpo como exoesqueletos que permitan la protección, sujeción o mejora de las funciones motoras.

En cualquiera de los dos casos, podemos incluir dentro del mecanismo o estructura que sustituye al hueso o la subsistema óseo, complementos tecnológicos que mejores sustancialmente las propiedades y funcionalidad que tenían originalmente relacionados con el uso de materiales como el titanio, plásticos, etc., el uso de articulaciones mecánicas mediante el uso servomotores, el uso de sensores para el control, de la sensibilidad y detección de movimiento, etc., el uso de conexiones eléctricas para el funcionamiento de los componentes internos, el uso de servoreceptores para controlar de manera precisa as posiciones, entre otros, que permitan monitorizar el sistema en su conjunto y mejorar la calidad de vida de la persona que lo utilice.

A nivel tecnológico, la mecatrónica se orienta en crear sistemas o mecanismos de conexión neuronal o de impulsos para crear un sistema robusto y funcional (Miralles y Giuliano, 2008).

Dejando de lado las prótesis tradicionales y convencionales, las técnicas relacionadas con el diseño y creación de los exoesqueletos, parten de las teorías, metodologías y técnicas generados en el ámbito de la biónica y la mecatrónica. La ingeniería mecatrónica, o simplemente mecatrónica, es una rama multidisciplinaria de la ingeniería, se dedica al diseño unificado de sistemas mecánicos y eléctricos, con el uso combinado de la robótica y de la ingeniería electrónica y ciencia de la computación. A nivel de conceptualización del diseño de los exoesqueletos, la biónica es la ciencia dedicada a implementar mecanismos o principios que existen en el mundo animal y/o de las plantas en la generación de mecanismos y procesos industriales.

La mayoría de los animales vertebrados poseen un sistema esquelético que funciona como soporte y sujeción de órganos y musculatura. Así mismo, en el ser humano, el esqueleto es una estructura que mantiene la forma, soporta o protege los órganos de uncuerpo. Los esqueletos se clasifican atendiendo

a su composición y/o a su posición. Según su composición los esqueletos se clasifican en fluidos y sólidos. Un esqueleto fluido o hidrostático es aquel organismo que utiliza el líquido contenido dentro de alguna cavidad de su cuerpo como soporte y para la transmisión de fuerzas musculares. Mientras que los esqueletos sólidos, se sub- clasifican en: flexibles, rígidos. Los que son parecidos a la goma y pueden deformarse son llamados flexibles; los que no resisten cambios de forma como en los huesos o en las conchas que son rígidos (Zaballos y Moreno, 2011).

Según su localización, un esqueleto se clasifica como endoesqueleto si es interno, o como exoesqueleto cuando se sitúa fuera de los órganos a los que protege y es considerado como una cubierta exterior.

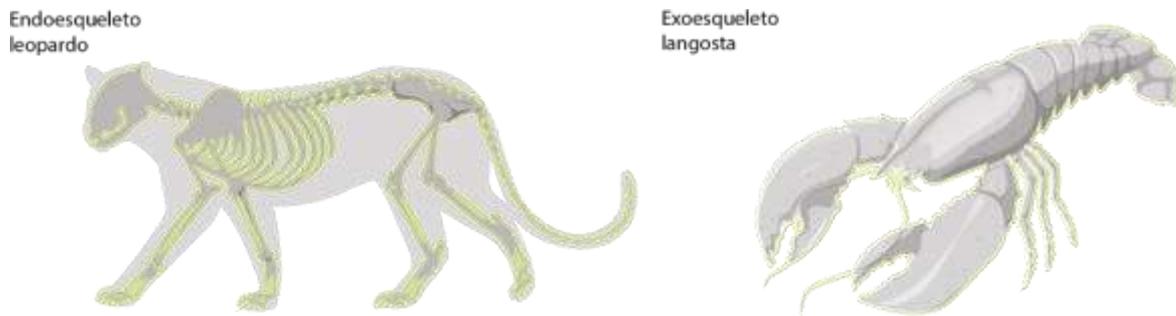


Imagen 27: Comparación de endoesqueleto con exoesqueleto.

Fuente: (Elaboración propia, 2021).

La relación del exoesqueleto con el humano, la naturaleza constituye una fuente inagotable de inspiración para el desarrollo de nuevas tecnologías que incluyen al diseño de exoesqueletos adaptados a partes del cuerpo humano con el fin de compensar alguna deficiencia capaz de ocasionar discapacidad.

Cabe mencionar que los exoesqueletos robóticos asumen el comportamiento de la naturaleza y de los seres vivos para conseguir una adaptación funcional natural que ayude al ser vivo sobre el cual se utilice o aplique. El diseño de estos mecanismos se concibe con la ayuda de distintas disciplinas como la medicina, la electrónica y la mecánica (Chávez et al., 2011).

4.2. Endoesqueleto y Exoesqueleto

Como hemos indicado anteriormente en la introducción del capítulo, entre los seres vivos y según su localización, encontramos de tipos generales de estructuras denominadas endoesqueleto y exoesqueletos.

4.2.1. Endoesqueleto

En los seres vivos, los endoesqueletos se encuentran situados en la parte interior del cuerpo y en los seres vertebrados están frecuentemente complementados con una capa dérmica o piel que lo recubre. El endoesqueleto permite al cuerpo moverse, además de tener la función de dar forma al animal, permite la fijación de músculos, tendones y protege el sistema nervioso. En los vertebrados superiores, también protege la mayoría de los órganos vitales. Existen cinco tipos de endoesqueletos: espículas, secreciones, osículos, huesos y cartílagos (Zaballos y Moreno, 2011).

- **Espículas.** Son cuerpos esqueléticos calcáreos que forman parte de la estructura que sostiene el sistema de tejidos en animales como esponjas y corales.
- **Secreciones.** Se describen como sustancias que pueden ser enviadas al exterior del cuerpo, en el caso de ser exocrina, o endocrina cuando permanece en el interior del organismo.
- **Osículos.** Es un tipo de endoesqueleto presente en los equinodermos, que se refiere a un filo o categoría taxonómica animal perteneciente a marinos invertebrados con una piel espinosa como característica externa. Los osículos son las estructuras compuestas de carbonato de calcio que componen los endoesqueletos del filo mencionado.
- **Los Huesos.** Son estructuras rígidas, con escasa elasticidad compuestos de tejido fibroso impregnado de sales minerales como el calcio y el fósforo, que dan soporte y permiten el movimiento. Los vertebrados tienen un endoesqueleto articulado formado por huesos, en su mayoría macizos y con la musculatura externa a ellos. Su forma varía en función de la estructura que lo conforma. Protegen de las lesiones de órganos como el cerebro, el corazón y a otros órganos sensibles. Los huesos pueden clasificarse por su forma en:
 - Largos: Son huesos que tienen una estructura tubular, donde predomina su longitud, están compuestas por cartílago articular que permite la articulación con otros huesos para conformar el sistema óseo, mayormente están presentes en miembros superiores e inferiores.
 - Planos: Son huesos que tienen un espesor reducido, su principal función es la protección, se destaca al cráneo, escápulas y esternón en este grupo.
 - Cortos: Son huesos que tienen un espesor, largo y ancho semejantes y presenta una estructura con forma de cubo este tipo incluyen las vértebras, carpos y tarsos.
 - Irregulares: Estructuras con forma irregular que se componen de un tejido óseo presente de manera compacta, son importantes para un desarrollo correcto de articulaciones móviles y no móviles.
 - Sesamoideos: Son huesos que tienen una dimensión pequeña de forma redondeada que presenta un tendón incrustado, este se encuentra bajo compresión y tensión, se encuentran en las rodillas, manos y pies.

Los cartílagos.

Son un suplementario del hueso, está formado por una proteína sólida y dúctil. En el cartílago, las células están dispersas en una matriz secretada que es elástica, pero muy dura y sólida (Palastanga, Field y Soames, 2007). Las articulaciones son una parte importante dentro de los movimientos del esqueleto. Se clasifican en:

- Pivote.
- Bisagra.
- Silla de montar.
- Esférica.
- Elipsoidal.
- Deslizante.

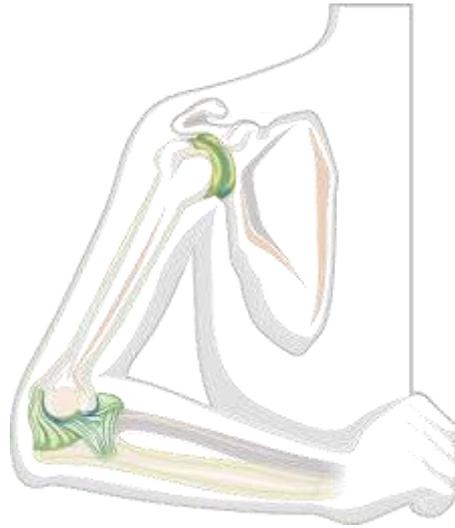


Imagen 28: Huesos y cartílagos.

Fuente: (Elaboración propia, 2020).

Un exoesqueleto es una estructura normalmente dura y producida por secreción de células tegumentarias, que generalmente está destinada a ser portada sobre un cuerpo o ser vivo a modo de protección frente al entorno (Serea et al., 2013).

En cualquier caso, el exoesqueleto se compone de una serie de elementos que le permiten tener propiedades concretas, se lo considera como un conjunto de elementos que generan una estructura rígida, semirrígida o movable. Por ejemplo, los exoesqueletos rígidos como el caparazón de una tortuga en realidad están formados por estructuras más pequeñas que se unen entre sí para formar una estructura rígida.

4.2.2. Exoesqueletos

Los tipos de exoesqueletos se plantean para explicar su función. También respecto a los exoesqueletos mecánicos que existen en base a su función, ya sea de protección, de movimiento o de ayuda en la rehabilitación. Estas clasificaciones permitirán entender la orientación de los prototipos que se indicarán después para el enfoque de la presente tesis.

4.2.2.1. Exoesqueletos activos y pasivos

Los exoesqueletos se pueden clasificar en pasivos o activos, es decir, sirven como protectores o actuadores del movimiento. Los activos por lo general requieren de mecanismos complementarios para articular los movimientos que en el mundo real de los seres vivos se resuelve con un sistema neuronal que los activa en caso de necesidad ante situaciones de peligro, mientras que los exoesqueletos pasivos no muestran un accionar controlado de manera activa, e incrementar significativamente las capacidades físicas respecto a la protección.

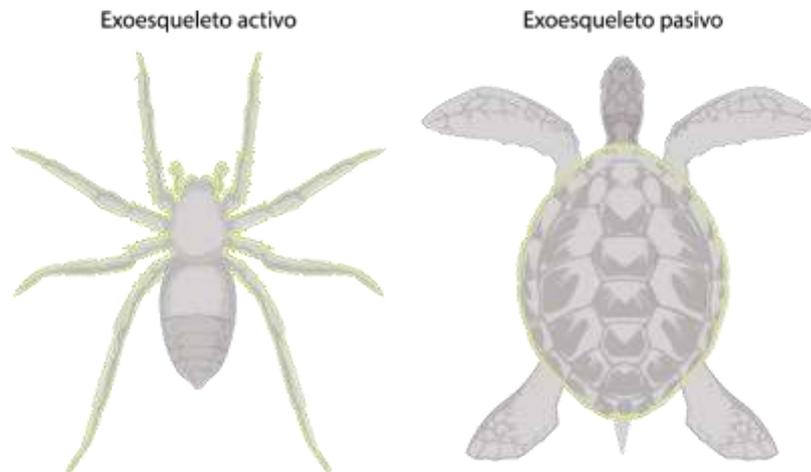


Imagen 29: Exoesqueleto pasivo y activo.
Fuente: (Elaboración propia, 2021).

4.2.2.2. Los exoesqueletos mecánicos

Los exoesqueletos mecánicos conocidos como exotrajés de potencia, son sistemas estructurales diseñados para facilitar la realización de actividades como elevar pesos o mejorar la movilidad de manera eficaz, su funcionamiento es a través sistemas hidráulicos, biomarcadores y motores.

Los exoesqueletos aplicados a la industria se centran sectores como construcción y fabricación/producción, principalmente para contribuir ergonómicamente al realizar tareas que requieran esfuerzo físico para soportar cargas.



Imagen 30: Exoesqueleto PART4you de Audi.
Fuente: (Tecmovia, 2015).

Los exoesqueletos aplicados a la sanidad se centran en el mercado tradicional de prótesis de todo tipo y que se incluyen un nuevo campo específico para la rehabilitación mediante exoesqueletos programados que recrean el mismo movimiento del cuerpo humano de manera que los pacientes obtengan una rehabilitación mucho más útil y así mejorar las capacidades de movimiento, de igual manera se emplean en la reconstrucción de extremidades articuladas para mejorar la calidad de vida de personas posterior a un accidente o enfermedad crónica.



Imagen 31: Exoesqueleto Walking Assist Device fabricado por Honda.
Fuente: (Pastor, 2013).

Los exoesqueletos militares se utilizan a modo de protección del soldado o para realizar tareas peligrosas como la detección de minas antipersonas. Se constituyen como proyectos de potencias mundiales para protección de los soldados, para reducir la fatiga al movilizarse o levantar obstáculos que requieran esfuerzo físico.



Imagen 32: Exoesqueleto desarrollado por Lockheed Martin.
Fuente: (Lockheed Martin, 2019).

Los exoesqueletos comerciales se centran en resolver necesidades específicas y funcionales del ser humano como en el senderismo, escalada o prevención de lesiones



Imagen 33: The Roam Elevate desarrollado por Roam Robotics para esquiar.
Fuente: (Roam Robotics, 2019).



Imagen 34: Clasificación de los cuatro tipos de exoesqueletos por aplicaciones en la industria.

Fuente: (Elaboración propia, 2020).

Dentro del análisis de exoesqueletos existentes en el mercado y en el desarrollo académico científico la mecatrónica ha intervenido en la implementación de características tecnológicas en dispositivos de rehabilitación presentadas en esta investigación, de esta manera se indica la relevancia del trabajo colaborativo y la importancia del factor multidisciplinario en el desarrollo de proyectos.

4.3. La Mecatrónica en la construcción de exoesqueletos

Dentro de ambiente de diseño de productos o procesos, es común distinguir métodoso técnicas para resolver problemas específicos en ingeniería, especialmente cuando se trata de sistemas en donde incide más una disciplina que otra. Sin embargo, la evolución de las máquinas y las técnicas asociadas a su diseño muestran que existen dificultades para lograr integrar técnicas y métodos que han funcionado bien de forma aislada, pero que, en diseños especiales, principalmente en aquellos en donde se combinan efectos de diferente naturaleza, aplicar las técnicas de diseño convencional no siempre son la mejor alternativa para solucionar los problemas de diseño (Vargas, 2000).

La palabra Mecatrónica proviene de la división de dos palabras “*meca*” de mecánica y “*trónica*” de electrónica, aunque posee un rango de interpretación mayor a este significado ya que abarca áreas como lo son el control y la computación (Kyura y Oho, 1996).

Los exoesqueletos orientados para la rehabilitación basados en tecnología mecatrónica son dispositivos que pueden adaptarse a distintas partes del cuerpo, que buscan mejorar la recuperación de un paciente después de haber sufrido algún tipo de pérdida de movilidad debido a una enfermedad o accidente.

Estos dispositivos son fundamentales para el proceso de ya que pueden servir como apoyo al proceso marcado como pauta por el fisioterapeuta durante el proceso de recuperación del paciente (Guzmán et al., 2013).

Desde hace 20 años, esta tecnología ha demostrado ser una herramienta que actúa en pro del bienestar y del mantenimiento del movimiento de una extremidad. Estas razones son suficientes para elegir estos dispositivos e incluirlos en las sesiones impartidas por el fisioterapeuta (Guzmán et al., 2013).

4.4. Exoesqueletos robóticos

Como ya comentamos en la introducción los exoesqueletos robóticos están orientados principalmente en a ayudar a proteger el cuerpo y a sostener el esqueleto, buscando mejorar la movilidad en las personas que presenten dificultades. Así mismo, estas estructuras robóticas pueden utilizarse en el ámbito de la rehabilitación, por medio del desarrollo de estructuras semirrígidas y dinámicas que permitan mejorar la movilidad del cuerpo humano de forma parcial (por ejemplo, en piernas, brazos o manos) (Flores et al., 2011).

En la actualidad la mayoría de los exoesqueletos para la rehabilitación en el ámbito de la sanidad que se encuentran en el mercado son destinados para:

- Ayuda y protección de la espalda.
- Ayuda y protección de los hombros.
- Ayuda y movilidad de las piernas.
- Ayuda y movilidad de las manos.

Un exoesqueleto robótico se compone de una estructura de esqueleto artificial externo de un órgano o sistema del cuerpo humano que lo sustituye y que dispone de piezas robóticas que lo automatizan para ser controlado por el ser humano mediante un sistema computacional semiautónomo. La autonomía de exoesqueleto robótico dependerá del control de los movimientos que se programen (Serea et al., 2013).

Estos exoesqueletos pueden ser pasivos o activos, es decir que contengan o no actuadores para el movimiento y por lo tanto necesiten o no un sistema de control asociado al accionamiento de dichos actuadores mediante un ordenador que los programe. La gran mayoría de este tipo de exoesqueletos, se gestionan a través de sistemas informáticos inteligentes que procesan y ejecutan decisiones mecánicas y funcionales a través de los actuadores con el fin de realizar una tarea previamente definida (Chávez et al., 2011). Es importante mencionar que los actuadores son dispositivos que se emplean para transformar la energía mecánica, hidráulica o neumática en movimiento.

Como tendencial actual se encuentran los exoesqueletos robótico portátil que surgió en la década de 1960 y que no se generalizaron hasta la actualidad debido a que el equipamiento informático y de piezas era muy voluminoso. Los sistemas portátiles, ayudan a los usuarios humanos para realizar múltiples tareas, como recoger objetos pesados y transportarlos, reducir la carga en tareas físicamente exigentes y aplicar tratamiento de rehabilitación a pacientes (Rupal et al., 2017). Los exoesqueletos portátiles se pueden usar para ayudar a realizar las tareas cotidianas, como caminar, realizar transferencias de sentado a pararse (y viceversa) y moverse en general.

La imagen muestra un esquema un sistema convencional de un exoesqueleto robótico, el cual se divide en tres módulos principales: Control, energía/alimentación y actuadores. En la primera se controlan y codifican las señales sensoriales y de control a través de una unidad que gestiona las entradas y salidas del sistema, en el módulo de energía se encuentra la fuente de alimentación que posibilita el accionar de los motores, finalmente en el módulo actuador los motores se encargan de transformar la energía en movimientos y accionan las señales que serán enviadas a la unidad de memoria del sistema.

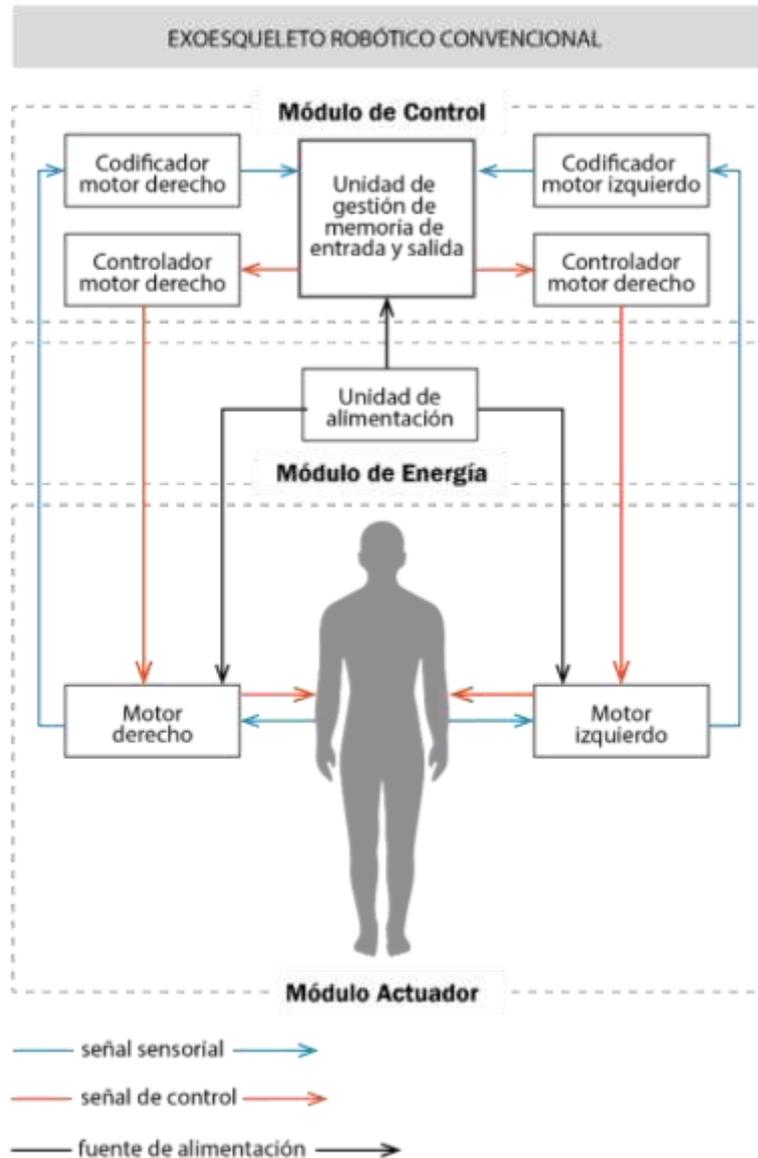


Imagen 35: Esquema de exoesqueleto robótico convencional.

Fuente: Adaptado de Mia Sin Yap et.al., 2019.

4.4.1. Exoesqueletos de miembros superiores

Los sistemas de exoesqueletos permiten brindar asistencia en movimientos en actividades de la vida cotidiana, de esta manera los dispositivos dirigidos a los miembros superiores tienen como objetivo soportar el peso de esta parte del cuerpo y las cargas aplicadas. Todos los exoesqueletos de miembros superiores varían en su estructura y componentes como se mostrará en los ejemplos a continuación.

Los exoesqueletos en aspectos generales fabricados para humanos son diferentes según el tipo de actividad destinada a cumplir. Los exoesqueletos pueden estar hechos de diferentes materiales y el área de protección y aplicación varía de acuerdo con la parte del cuerpo a ubicarse, como por ejemplo en los hombros. Algunos exoesqueletos tienen elementos de sujeción ajustables para que sean

personalizables al usuario.

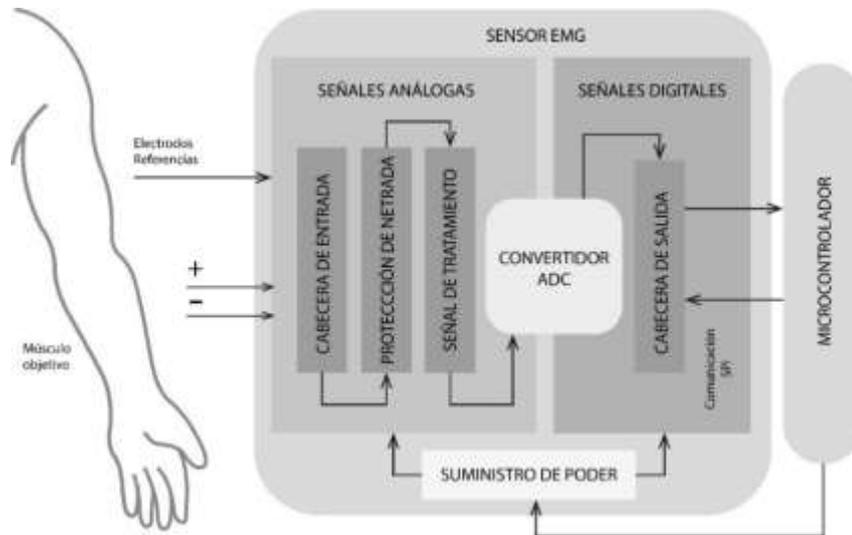


Imagen 36: Descripción del sistema de un exoesqueleto robótico para brazo.
Fuente: Adaptado de Cissal, et.al., 2018.

- Exoesqueletos para la mano.

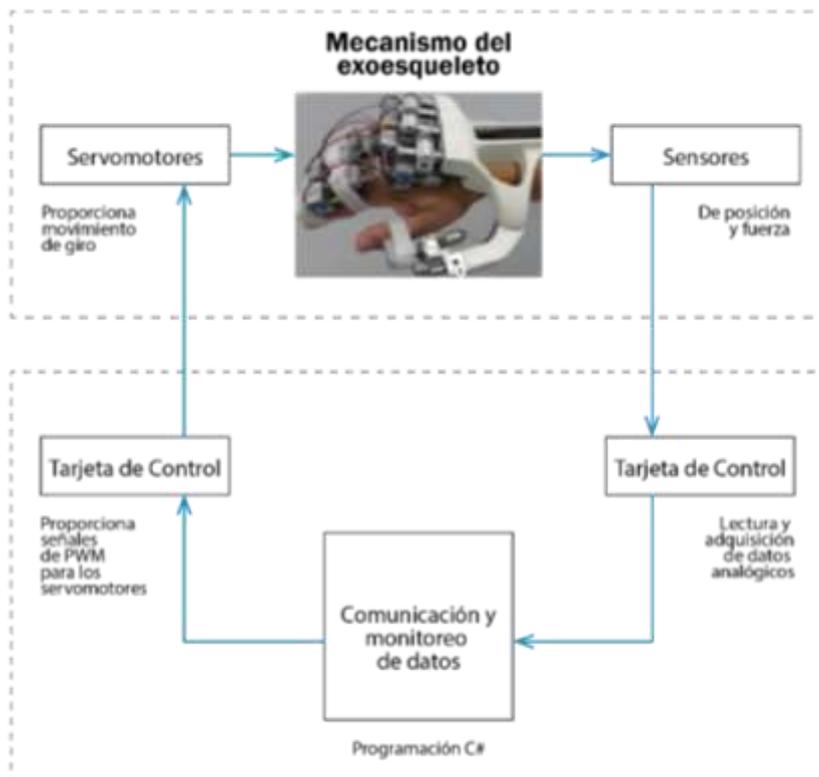


Imagen 37: Descripción del sistema de un exoesqueleto robótico de mano enfocado a rehabilitación motriz superior.

Fuente: Adaptado de Sandoval-González, et al., 2015.

- Exoesqueleto robótico para el brazo.

FES-Exoeskeleton© desarrollado por Irimia y su equipo, es un exoesqueleto para la sustitución de la movilidad y la rehabilitación de miembros superiores de personas con discapacidad neuromotoras producidos por accidentes cerebrovasculares, lesiones de médula espinal, entre otros.

Combina una estructura creada en base a un exoesqueleto compuesto de una interfaz de gestión de la información emitida por los sensores de un sistema robótico de estimulación eléctrica funcional o FES, que realiza las funciones motoras del codo y una interfaz de computadora cerebral no invasiva o BCI que puede distinguir si el usuario está imaginando el movimiento del brazo derecho o izquierdo. En la imagen se puede observar como el dispositivo robótico FES-Exoeskeleton© se extiende desde el codo hacia el hombro en dos posiciones A y B y se adapta al brazo del sujeto, permitiendo los movimientos principales de extensión-flexión del antebrazo.

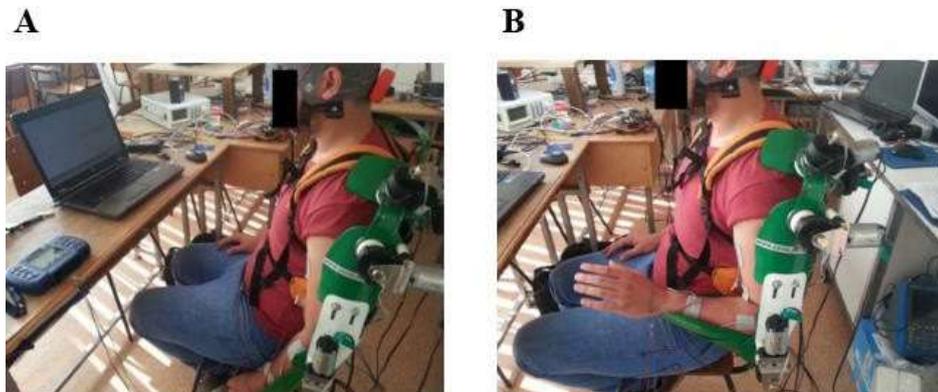


Imagen 38: FES-Exoskeleton© mientras se realiza movimientos de codo. (A) extensión del codo. (B) flexión del codo.

Fuente: (Irimia et al., 2016).

- Exoesqueleto del codo

El exoesqueleto de codo desarrollado por el equipo BRI ATR, del departamento de Brain Robot Interface Computational Neuroscience Labs permite al usuario realizar movimientos con el codo para mover el brazo y coger/elevar objetos sin mayor esfuerzo de las articulaciones (Peternel et al., 2016).

La ventaja de este exoesqueleto robótico es que, si la tarea se altera y el patrón de ayuda existente se convierte en insuficiente, el exoesqueleto se adapta gradualmente a la nueva ejecución de la tarea de manera que el aumento de la actividad muscular causada por la nueva tarea deseada se puede reducir.

En la imagen 39, se muestra diferentes secuencias de adaptación inteligente de movimiento del exoesqueleto cuando se movió el objeto a la posición de referencia más baja a una posición superior.



Imagen 39: Secuencia de fotografías tomadas durante el experimento que ilustran el estado del exoesqueleto al final de las 3 etapas.

Fuente: (Peternel et al., 2016).

4.5. Exoesqueletos de la mano

4.5.1. Exoesqueleto ExoK'ab©

Este proyecto desarrollado por el Instituto Tecnológico de Orizabase centra en el diseño, desarrollo y pruebas clínicas de un exoesqueleto robótico centrado en la rehabilitación motora de la mano para pacientes con discapacidades motoras neuromusculares. Después de sufrir una lesión con fractura de huesos, la rehabilitación activa que permite mejorar la fuerza de agarre de la mano en pacientes que lo utilizan (Sandoval et al., 2016).

El diseño mecánico del exoesqueleto de la mano ExoK'ab© está dirigido específicamente hacia la rehabilitación activa y pasiva de los dedos de la mano ya que proporciona la capacidad de medir la fuerza aplicada al usuario en cada falange. Al estar completamente sensorizado mide cada movimiento de rotación y traslación controlando la posición en el proceso de rehabilitación. El sistema electrónico implementado en el sistema fue diseñado para controlar 10 motores de CC y para medir 10 fuerzas, 10 posiciones angulares y cuatro sensores de posición lineal. Para su testeo con usuarios finales se realizaron rutinas rehabilitación activa y pasiva y se compararon con los métodos de rehabilitación tradicionales para evaluar la efectividad de esta solución novedosa.

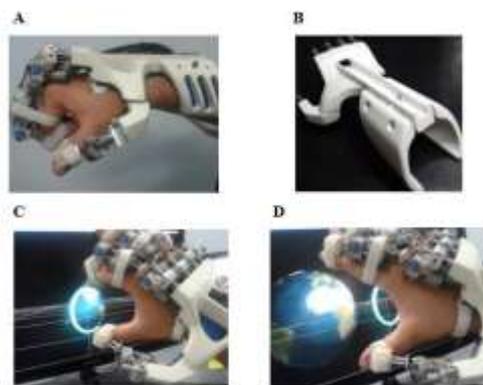


Imagen 40: (A) Imágenes de una mano en ExoK'ab © (B) Mecanismo de pulsera ajustable. (C) Movimiento de flexión. (D) Movimiento de extensión.

Fuente: (Sandoval et al., 2016).

4.5.2. Mano aumentada

Este proyecto se centra un exoesqueleto de la mano mediante exoglove llamado Soft-SixthFinger que permite la compensación de las habilidades y movimientos de los dedos de la mano y la recuperación funcional en el proceso de agarre de objetos.

En la imagen 41 se indican los componentes de la mano aumentada. El prototipo cuenta con un sexto dedo, robótico que sirve para facilitar el agarre y mejora las acciones sin mayor esfuerzo, y a esta estructura le acompañan cuatro módulos utilizados para el movimiento de flexión-extensión. El dispositivo se puede llevar en el antebrazo a través de una banda elástica, esto compensa la falta de movimiento y normal funcionamiento de la mano. El paciente puede controlar la flexión/extensión del dedo robótico a través de una interfaz basada en electromiografía (EMG) integrada en una gorra denominada eCap. (Hussain et al., 2016). En la imagen puede verse el funcionamiento del sistema de mano aumentada en diferentes tareas cotidianas.

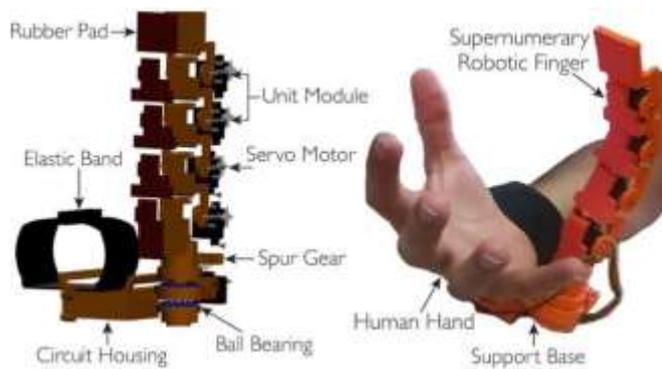


Imagen 41: Partes de la Mano aumentada©.
Fuente: (Hussain et al., 2016).

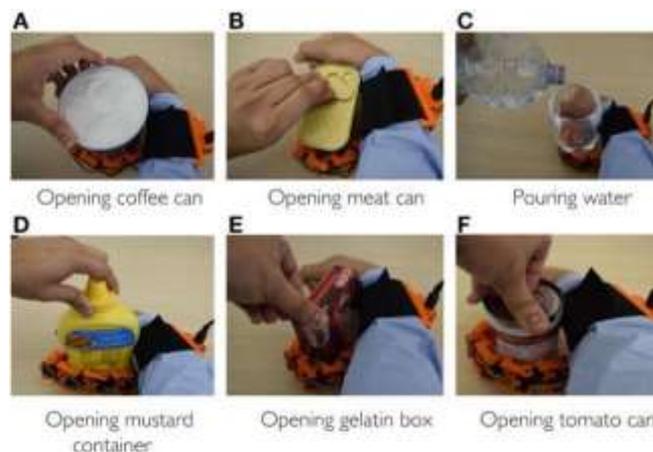


Imagen 42: (A) abertura de café, (B) abertura de lata de carne, (C) verter el agua, (D) abrir el envase de mostaza, (E) caja de gelatina de apertura, y (F) la apertura de lata de tomate.
Fuente: (Hussain et al., 2016).

Estudio sistémico de una estructura exoesquelética para la rehabilitación de la atrofia muscular de la mano en personas con artritis reumatoide

4.5.3. TrackGloveSystemsCyberGrasp©

El CyberGrasp© es un sistema de transmisión de fuerza para dedos y mano vinculado a una PC y basado en la realidad aumentada para realizar ejercicios que simulen el agarre de objetos. El proyecto ha sido desarrollado por la empresa CyberGlove Systems LLC y es un exoesqueleto que se adapta al guante y que agrega resistencia a cada dedo. Con el sistema de transmisión de fuerza los usuarios son capaces de sentir el tamaño y la forma de los objetos 3D generados por el ordenador, así como las fuerzas de agarre son producidas por una red de tendones dirigidos a las yemas de los dedos a través del exoesqueleto.

El dispositivo ejerce fuerzas de agarre perpendiculares a las yemas de los dedos a través de movimientos completos y fuerzas ajustables para cada usuario. Así mismo, permite su ajuste a la variedad de manos, es decir, sin importar el tamaño.

En la imagen 43 se aprecia la simulación del Piano Trainer utilizando el sistema del NJIT-TrackGlove©.

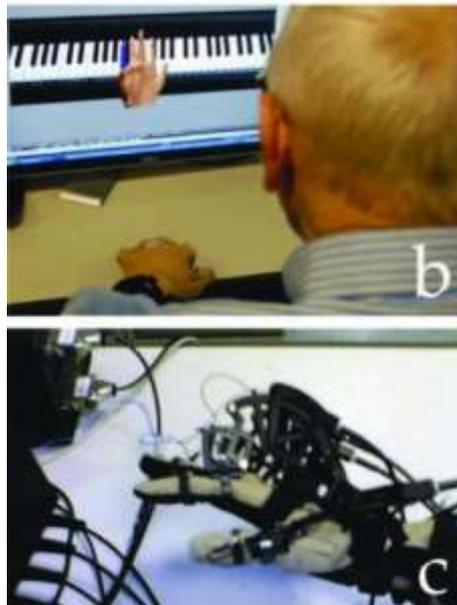


Imagen 43: Mano Robot Exoesquelética NJIT Track- Glovesystem CyberGrasp©.

Fuente: (Adamovich et al., 2009)

El SoftExoskeleton©, desarrollado por los miembros del Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos de Nueva Jersey, donde se utilizan actuadores neumáticos de rigidez variable, tanto para asistencia manual como para rehabilitación. Dichos actuadores permiten distintas flexiones en las diferentes localidades de la mano, admitiendo realizar ejercicios de terapia (Yap et al., 2015).

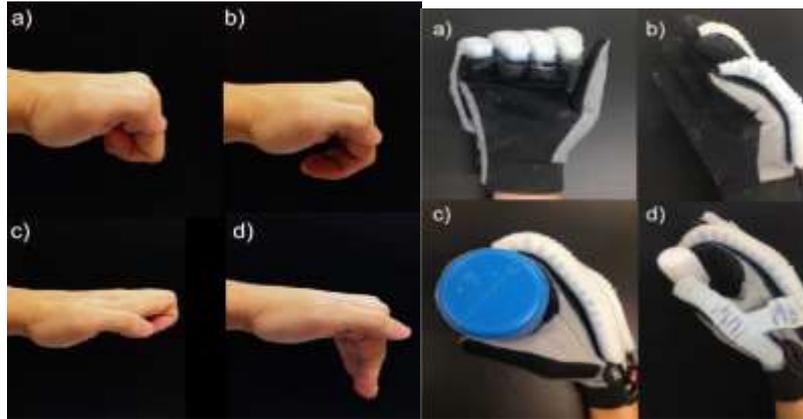


Imagen 44: Ejercicios con SoftExoskeleton©

Fuente: (Yap et al., 2015).

4.5.4. SoftRoboticGlove ©

El proyecto nace de la posibilidad de acoplar un mejor estilo de vida a personas que sufren de algún problema motriz en las manos, desarrollando así un exoesqueleto portátil, ligero y fácil de usar, (ver imagen 45). El trabajo se centró en el análisis experimental para explorar las propiedades mecánicas de los actuadores neumáticos suaves, mediante el estudio de las trayectorias de las yemas de los dedos haciendo uso de elementos finitos (Yi et al. 2016).

Como resultado el SoftRoboticGlove© es un guante que permite simular músculos artificiales blandos con grados de libertad. Realiza movimientos de flexión-extensión permitiendo realizar tareas de manipulación. La diferencia del SoftRoboticGlove© sobre los demás exoesqueletos se centra en que los actuadores neumáticos en el brazo delantero están conectados a un mecanismo de transmisión por cable, encargado de controlar los movimientos de cada articulación. En el futuro se tiene planificado imitar los movimientos del pulgar para lanzar una nueva versión de este prototipo.

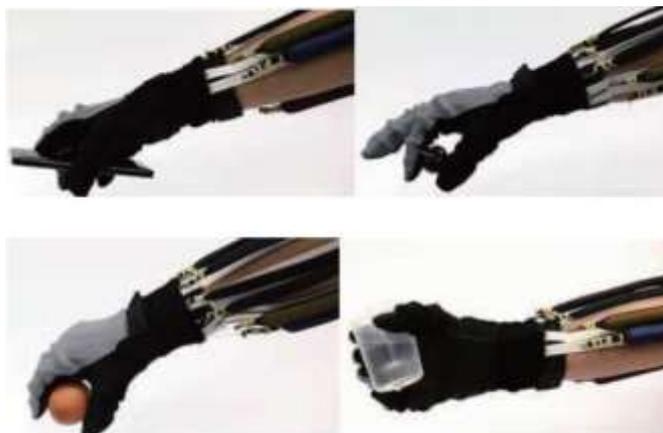


Imagen 45: SoftRoboticGlove©

Fuente: (Yi et al., 2016).

4.5.5. ExoGlovePoly©

ExoGlovePoly© es la versión mejorada del dispositivo de rehabilitación ExoGlove©, el cual consiste en un guante con un mecanismo adaptado para la mano que utiliza un sistema de enrutamiento de tendón blando y un mecanismo de accionamiento bajo. La importancia de este nuevo prototipo radica en la implementación de imanes y el módulo de ajuste longitudinal del tendón, permitiendo de ese modo adaptarse a las distintas dimensiones de la mano.

La incrustación de los imanes admite la graduación de la correa palmar y el módulo de ajuste evita la limitación del rango de movimiento del dedo. Cabe mencionar que el dispositivo utiliza únicamente un actuador para generar el movimiento de flexión y extensión, por ende, consigue la reducción del peso, haciéndolo ligero y transportable. Es así como el El ExoGlove-Poly©, (ver imagen 46) además de ser un exoesqueleto de robótica blanda en forma de guante, es personalizable a los requerimientos de cada paciente respecto al ajuste y dimensiones de la mano (Lee et al., 2016).

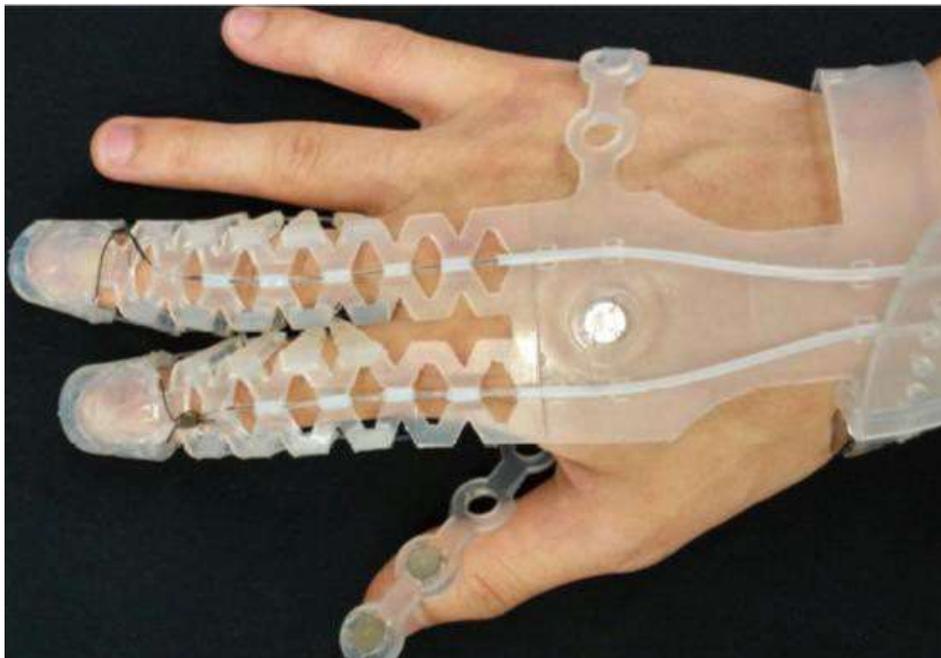


Imagen 46: ExoGlove-Poly©.
Fuente: (Lee et al,2016)

4.5.6. RATHERAPEUTICGLOVE©

RATHERAPEUTICGLOVE© consiste en el desarrollo de un dispositivo para la rehabilitación de la mano en pacientes con Artritis Reumatoide y para la prevención de las deformidades artríticas de los dedos, en etapas tempranas de la enfermedad. Es un guante robótico equipado con dos actuadores neumáticos inflables en su interior, encargados de la compresión lateral de los dedos y sus articulaciones. El inflado del guante en su conjunto se sitúa en un rango de 0 a 2 bares en intervalos de 0.5 bares y permite disponer de datos en cada nivel de presión para determinar movimiento (ver imagen 47).

Los resultados de adaptabilidad del guante obtenidos en seis sujetos sanos demostraron que la distribución del agarre y presión a lo largo de los dedos es uniforme y capaz de adaptarse al movimiento que permita su uso para la rehabilitación (Chua et al. 2017).

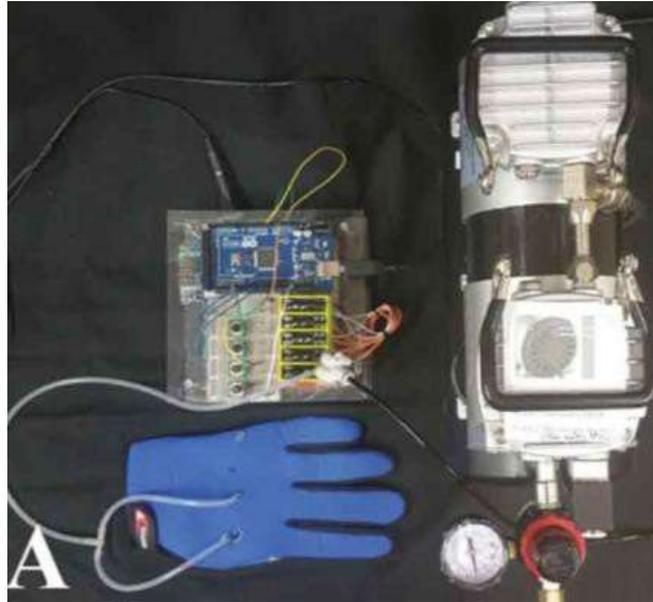


Imagen 47: RAtherapeuticGlove©.
Fuente: (Chua et al, 2017).

4.5.7. HandExoskeleton©

HandExoskeleton© es un exoesqueleto del mano basado en un modelo biomédico, creado para permitir un mayor rango de movilidad, de manera que todos los dedos puedan realizar movimientos de aducción, abducción, extensión y flexión, mientras se minimiza el peso y tamaño del exoesqueleto para mayor comodidad del usuario. (Hansen et al., 2018).

En su desarrollo y diseño formal se utilizaron tecnologías de realidad virtual para establecer modelos musculoesqueléticos específicos, que analizaran la cinemática de las articulaciones, con el fin de validar la eficacia en el diseño de un guante personalizado, (ver imagen 48). Para ello se utilizó un programa de simulación de la cadena cinemática a los modelos exoesqueléticos y de ese modo evaluar el control de los movimientos de la mano mediante el guante. (Hansen et al., 2018).

El sistema exoesquelético virtual podría ser un factor clave en la validación ergonómica para la creación de prototipos físicos analizando la efectividad del dispositivo antes de crearlo físicamente.

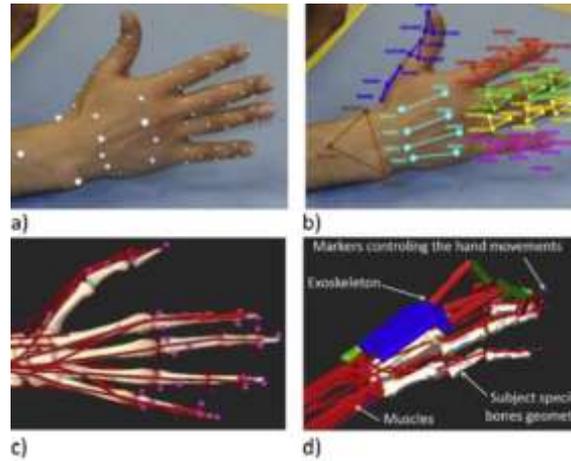


Imagen 48: Captura digital del movimiento del dispositivo HandExoskeleton©.
Fuente:(Hansen et al., 2018).

4.5.8. WearableHandExoskeleton©

WearableHandExoskeleton© Es un dispositivo en forma de estructura creada con cintas diseñado con el fin de ayudar a las personas a realizar sus tareas en el diario vivir para la rehabilitación sensoriomotora. Su principal característica consiste en la portabilidad y autónoma del sistema ya que puede llevarse en un bolsillo o mochila, (ver imagen 49).

El sistema consta de tres partes principales; 1) el dispositivo que incluye el sistema de recepción de datos que es lugar donde se registran las trayectorias de las articulaciones con el uso del sistema de captura de secciones y que puede llevarse en el pecho, en un chaleco o mochila, 2) los cables que unen el dispositivo de toma de datos y la mano mediante unos cables accionados linealmente por servomotores y 3) el guante que incluye los tendones exoesqueléticos, que están conectados por cables accionados linealmente por servomotores, (Randazzo et al., 2018).



Imagen 49: WearableHandExoskeleton©
Fuente: (Randazzo et al., 2018).

4.5.9. UNITS-HandEskeleton ©

UNITS-HandEskeleton© es un sistema de exoesqueleto para la mano portable, creado por el Instituto Nacional de Ciencia y Tecnología de ULSA, que se emplea para obtener movimientos generales de los dedos por flexión/extensión (ver Imagen 50).

El sistema de conexión de las articulaciones de los dedos en el guante utiliza resortes para los movimientos de flexión- extensión de estos. El mecanismo del resorte genera la fuerza necesaria para guiar a los dedos a la postura deseada. Mediante el uso de elementos finitos se analizan los movimientos (Jo et al. 2019).

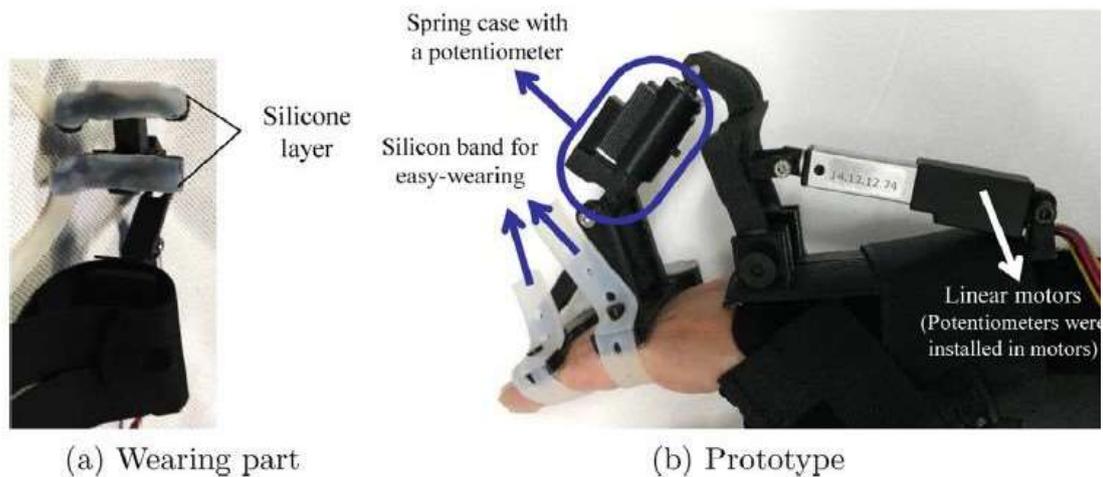


Imagen 50: UNITS-HandEskeleton.
Fuente: (Jo et al. 2019).

Como hemos descrito, existen en el mercado una variedad de dispositivos electrónicos y robóticos diseñados para asistir la terapia de rehabilitación de la mano, estos especialmente han ganado interés por su relación con pacientes con accidentes cerebrovasculares.

Se revisaron 36 exoesqueletos que presentan prototipos o investigaciones de exoesqueletos de mano y/o que se aplicaron para la rehabilitación de pacientes con artritis. La tabla resume a los dispositivos de los últimos cinco años que han resultado relevantes para la mejora del movimiento de los dedos de los pacientes.

En la tabla se indican especialmente los dispositivos que proporcionan al paciente la capacidad de realizar el movimiento de pinza o sujeción con los dedos, siendo ésta una de las principales funciones de la mano.

Tabla 9: Resumen de las características principales de los exoesqueletos de mano

Año de fabricación del producto	Actuador	GDL (Grados de Libertad de la mano)	Movimiento en dedos	Rango movimiento (grados de movimiento)	Peso (gramos)
2015	Híbrido neumático	3°	Flexión	150°	desconocido
	Hidráulico	15°	Flexión- Extensión	250°	<500 gr
	Cable polea	15°	Flexión- Extensión	-	711 gr
	Neumático	99°	Flexión- Extensión	112°	194 gr
	Neumático	3°	Flexión	149°	-
	Neumático	15°	Flexión	141.2°	200 gr
	Neumático	12°	Flexión	191.2°	180 gr
	Neumático	3°	Flexión- Extensión	143°.5	25 gr
	Neumático	3°	Flexión	165°	-
	Neumático	-	Flexión	99.7°	200 gr
2016	Actuador lineal	1°	Flexión	-	-
	Neumático	15°	Flexión- Extensión	-	-
	Neumático	15°	Flexión	105.9°	-
	Neumático	3°	Flexión- Extensión	93°	-
	Neumático	12°	Flexión- Extensión	-	<100 gr
	Neumático	3°	Flexión	-	-
	Neumático	3°	Flexión	40°	-
	Neumático	4°	Flexión	-	-
2017	Cable polea	2°	Flexión	-	-
	Cablepolea	15°	Flexión	141.2°	300 gr
	Neumático	14°	Flexión-Extensión	96°	85.03 gr
	Neumático	44°	Flexión- Extensión	90°	-
	Neumático	15°	Flexión-Extensión	-	-
	Cablepolea	2°	Flexión- Extensión	120°	90 gr
	Neumático	-	Flexión-Extensión	110°	285 gr
2018	Neumático	3°	Flexión-Extensión	171°	-
	Neumático	-	Flexión- Extensión	-	<150 gr
	Neumático	6°	Flexión-Extensión	-	-
2019	Neumático	-	Flexión- Extensión	-	75 gr
	Neumático	4°	Flexión- Extensión	106°	156 gr

Fuente: Adaptado de (Moya et al., 2020).

4.6. Conclusiones

La finalidad de los exoesqueletos actuales en general radica en la asistencia de ayudar activamente al usuario mientras realizan tareas diarias. En el caso de los exoesqueletos adaptados a las extremidades superiores en el ser humano y más concretamente en los que se focalizan en la rehabilitación de la mano tienen un nivel alto de complejidad por la adaptación a los movimientos de los huesos, articulaciones y a sus grados de libertad.

Se determina la complejidad en el diseño de un exoesqueleto con el criterio de aceptabilidad y adaptabilidad del paciente, incluyendo la facilidad de uso, debido a que los exoesqueletos de la mano todavía no son comunes en centros médicos o de terapia, y en la mayoría de los casos requieren de asistencia para su implementación.

Finalmente, se determina que existe una tendencia significativa en el desarrollo formal y de diseño tecnológico de los guantes como exoesqueletos en el proceso de rehabilitación de la mano. Inicialmente en el diseño se utilizaron materiales rígidos para crear el mecanismo de las articulaciones, los diseños de guantes más recientes sugieren el uso de materiales flexibles y maleables. Otra tendencia apreciable es el uso de menos actuadores a fin de disminuir el volumen y el peso total del dispositivo. En base a lo que se ha analizado, el desarrollo para el diseño formal y funcional del exoesqueleto se centrará en:

- Utilizar los exoguantes para realizar trabajos específicos con las manos que necesitan un esfuerzo especial y complementario.
- Rehabilitar la mano del paciente sin causar tensiones o incrementar el peso.
- Los materiales usados para crear las articulaciones mediante técnicas de prototipado rápido PR se centran en termoplásticos que provienen de materiales orgánicos, como el filamento que proviene del Ácido Poliláctico.
- Los materiales seleccionados para crear el exoguante deben contribuir en el nivel ergonómico, funcional y estético a una mejor integración entre el guante y usuarios finales. Por tanto, se debe usar materiales plásticos y tejidos ligeros, elásticos y transpirables en la construcción del exoguante para que no pese ni genere fricciones.
- A nivel técnico se considera que en el futuro será conveniente implementar un sistema, que por medio del uso de actuadores por control remoto que enviarán señales inalámbricas evitando de esta manera el cableado, creando un guante realmente autónomo.
- Otra implementación futura será el uso de sensores complementarios a los actuadores que medirán otros parámetros sanitarios relacionados con el paciente como su presión arterial y temperatura que es un factor determinante durante la rehabilitación, debido que a mayor generación de temperatura se presenta alivio y relajación muscular.

A partir del análisis comparativo de productos, se identificaron características específicas que permitieron determinar un método adecuado para realizar un análisis de las tipologías existentes de

productos en diferentes ámbitos. Estas características se utilizaron para estudiar los exoesqueletos a considerar para realizar una comparación efectiva entre diferentes productos en términos de usos, calidad, precio, funcionalidades, diseño y satisfacción del cliente.

Este análisis permitió evaluar la competencia y determinar los aspectos clave para la selección del producto más adecuado para una situación específica. Además, el análisis comparativo de productos proporcionó información sobre la mejora continua de los productos, la aplicación de estrategias de marketing, la administración de recursos y la implementación de nuevas tecnologías para mejorar la futura propuesta.

4.7. Referencias

Adamovich, S. V., Fluet, G. G., Mathai, A., Qiu, Q., Lewis, J., y Merians, A. S. (2009). Design of a complex virtual reality simulation to train finger motion for persons with hemiparesis: a proof-of-concept study. *Journal of neuroengineering and rehabilitation*, Vol 6(1), 1-10. <https://doi.org/10.1186/1743-0003-6-28>

Chávez Cardona, M. A., Rodríguez Spitia, F., y Baradica López, A. (2010). Exoesqueletos para potenciar las capacidades. *Revista Ingeniería Biomédica* Vol. 4(7) pp. 63-73. ISSN 1909-9762

Chua, M. C. H., Lim, J. H., y Yeow, R. C. H. (2017). Design and Characterization of a Soft Robotic Therapeutic Glove for Rheumatoid Arthritis. *Assistive Technology*, 1–9. <https://doi.org/10.1080/10400435.2017.1346000>

Cisnal, A., Lobo, V., Moreno, V. y Fraile, J.C. (2018). Robhand, un exoesqueleto de mano para la rehabilitación neuromotora aplicando terapias activas y pasivas. *Actas de las XXXIX Jornadas de Automática*, Badajoz, 5-7 de Septiembre de 2018, 34-41. <https://doi.org/10.17979/spudc.9788497497565.0034>

Edgerton, V. R. (2003). Patente nº 6,666,831. Washington, DC. En: <https://patents.google.com/patent/US6666831B1> (Consultado 16/05/2019).

Flores Portilla, E., Piña Quintero, R., Avilés Sánchez, O., Niño Suárez, P., y Molina Vilchis, M. (2011). Diseño del mecanismo actuador de un dedo robot. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, Medellín, Colombia Vol. 58, 153-162. ISSN: 0120-6230.

Guzmán Valdivi, C., Blanco Ortega, A., y Oliver Salazar, M. (2013). Entendiendo la Mecatrónica en la Rehabilitación. X Congreso Internacional Innovación y desarrollo tecnológico CIINDET 2013, Cuernavaca Morelos, México.

Hansen, C., Gosselin, F., Ben Mansour, K., Devos, P., y Marin, F. (2018). Design validation of a hand exoskeleton using musculoskeletal modeling. *Applied Ergonomics*, Vol.68, 283–288. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2017.11.015>

Hussain, I., Salvietti, G., Spagnoletti, G., y Prattichizzo, D. (2016). The Soft-SixthFinger: A Wearable EMG Controlled Robotic Extra-Finger for Grasp Compensation in Chronic Stroke Patients. *IEEE Robotics and Automation Letters* Vol. (1)2, 1000-1006 <https://doi.org/10.1109/LRA.2016.2530793>

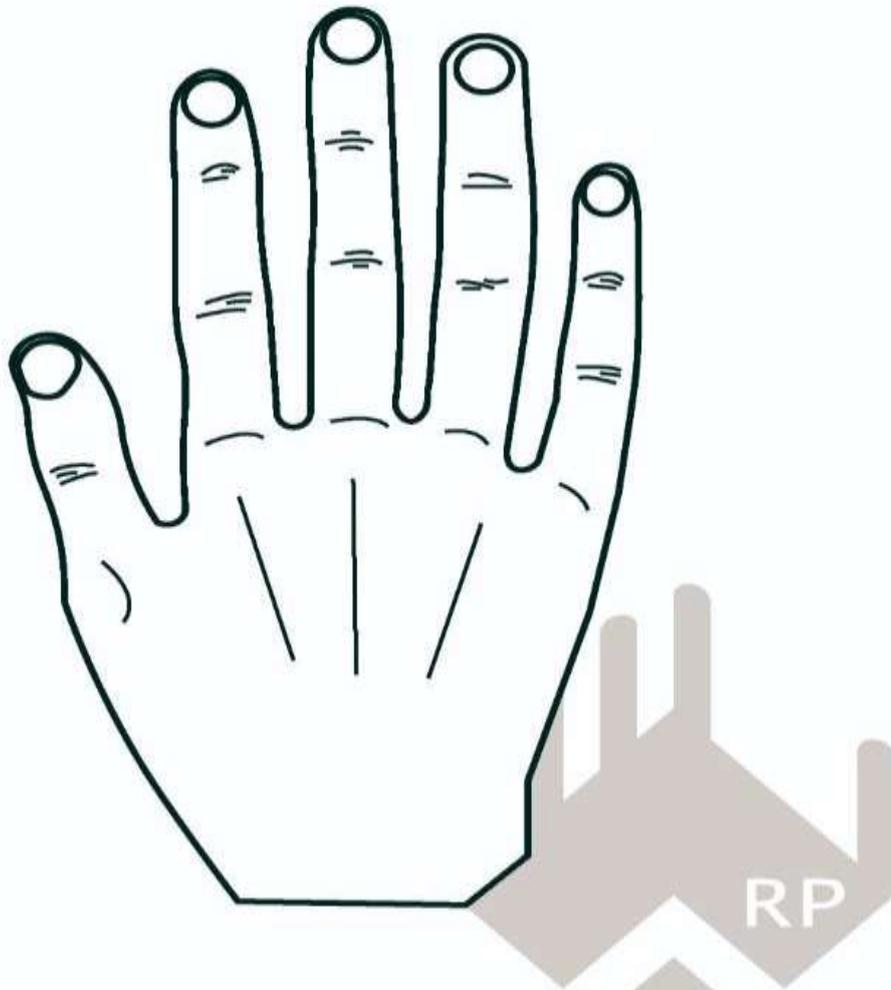
Irimia, D. C., Poboroniuc, M. S., Serea, F., Baciú, A., y Olaru, R. (2016). Controlling a FES-EXOSKELETON rehabilitation system by means of brain-computer interface. In *2016 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE)* 352-355. <https://doi.org/10.1109/ICEPE.2016.7781361>

Jo, I., Park, Y., Lee, J., y Bae, J. (2019). A portable and spring-guided hand exoskeleton for exercising flexion/extension of the fingers. *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 135, 176–191. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2019.02.004>

Kyura N. y H. Oho H., (1996) *Mechatronics-an industrial perspective* in *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 1 (1) 10-15, <https://doi.org/10.1109/3516.491405>.

- Lee, H., Kang, B. B., In, H., y Cho, K.J. (2016). Design Improvement of a Polymer-Based Tendon-Driven Wearable Robotic Hand (Exo-Glove Poly). *WearableRobotics: Challenges and Trends*, 95–99. https://doi.org/10.1007/978-3-319-46532-6_16
- Miralles, M., y Giuliano, G. (2008). Biónica: eficacia versus eficiencia en la tecnología natural y artificial. *Scientiae Studia*, Vol. 6(3), 359-369. <https://doi.org/10.1590/S1678-31662008000300005>.
- Palastanga, N., Field, D., y Soames, R. (2007). *Anatomía y movimiento humano. Estructura y funcionamiento*. Editorial Paidotribo.
- Peternel, L., Noda, T., Petrič, T., Ude, A., Morimoto, J., y Babič, J. (2016). Adaptive control of exoskeleton robots for periodic assistive behaviours based on EMG feedback minimization. *PLoS ONE* Vol 11(2) e0148942. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0148942>
- Randazzo, L., Iturrate, I., Perdakis, S., y Millan, J. R. (2018). Mano: A WearableHand Exoskeleton for Activities of Daily Living and Neurorehabilitation. *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol 3(1), 500– 507. <https://doi.org/10.1109/lra.2017.2771329>
- Rupal, B. S., Rafique, S., Singla, A., Singla, E., Isaksson, M. y Virk, G. S. (2017). Lower-limb exoskeletons: Research trends and regulatory guidelines in medical and non-medical applications. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, Vol. 14(6), <https://doi.org/10.1177/1729881417743554>
- Sandoval-Gonzalez, O., Jacinto-Villegas, J., Herrera-Aguilar, I., Portillo-Rodriguez, O., Tripicchio, P., Hernandez-Ramos, M. y Avizzano, C. (2016). Design and development of a hand exoskeleton robot for active and passive rehabilitation. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, Vol.13(2), 66. <https://doi.org/10.5772/62404>
- Serea, F., Poboroniuc, M., Irimia, D., Hartopanu, S., y Olaru, R. (2013). Preliminary results on a hybrid FES-exoskeleton system aiming to rehabilitate upper limb in disabled people. *International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC) 722-727*, <https://doi.org/10.1109/ICSTCC.2013.6689046>
- Vargas, E. (2000). *Metodología Aplicada al Desarrollo de Máquinas Mecatrónicas*. Querétaro, México: Congreso Latinoamericano de Instrumentación y Control de Procesos. Universidad Autónoma de Querétaro. En: <https://www.mecatronica.net/emilio/ArtCongInt/07-2000.PDF> (Consultado 05/06/2019).
- Vidal, C. A., Pérez, D. M., Calzada, C. C., y Castañeda, P. (2012). Anomalías congénitas más comunes. *Revista Mexicana de Ortopedia Pediátrica*. Vol 14 (1) 5-11 <https://www.medigraphic.com/pdfs/opediatria/op-2012/op121b.pdf> (Consultado 05/06/2019).
- Yap, H. K., Jeong Hoon Lim, Nasrallah, F., Goh, J. C. H., y Yeow, R. C. H. (2015). A soft exoskeleton for hand assistive and rehabilitation application using pneumatic actuators with variable stiffness. *2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. <https://doi.org/10.1109/icra.2015.7139889>
- Yi, J., Shen, Z., Song, C., y Wang, Z. (2016). A soft robotic glove for hand motion assistance. *2016 IEEE International Conference on Real-Time Computing and Robotics (RCAR)*. <https://doi.org/10.1109/rcar.2016.7784010>
- Zaballos, J. P., y Moreno, A. G. (2009). *Modelos adaptativos en Zoología (Manual de prácticas)*. 5. Esqueletos: hidrostatos, exoesqueletos y endoesqueletos. REDUCA (Biología). Serie Zoología. Vol. 2 (2) 54-69, ISSN: 1989-3620

ARTH-aid ExoGlove System



CAPÍTULO 5

ARTH_aid
Exo Glove

5.1. Introducción

Este capítulo se centra en describir un nuevo sistema de rehabilitación de la atrofia muscular de la mano mediante el uso de un exoesqueleto adaptado llamado ARTH-aid ExoGlove System que apoye el trabajo del fisioterapeuta con pacientes con artritis crónica. Se han aplicado metodologías basadas en técnicas de conceptualización y desarrollo de nuevos productos y se han utilizado técnicas de Diseño Asistido por Ordenador (DAO) y Prototipado Rápido (RP) para crear y evaluar prototipos funcionales de articulaciones para el exoesqueleto. Estas técnicas han permitido definir un proceso sistemático para la creación y evaluación de futuros exoesqueletos de la mano adaptados para la rehabilitación de la Artritis Reumatoide (AR). A partir de las conclusiones obtenidas de los modelos existentes, se han verificado los aspectos de mejora y optimización que deben tenerse en cuenta en el diseño de nuevos dispositivos de exoesqueletos para la mano para tratamientos de rehabilitación.

El diseño y desarrollo del exoesqueleto para la mano ha permitido definir un método basado en las nuevas tecnologías desde el proceso de digitalización de la mano, la creación virtual de la estructura y el desarrollo del prototipo final mediante el uso del Prototipado Rápido de las articulaciones que formalizan un exoesqueleto en forma de guante, ARTH-aid ExoGlove System.

Durante el proceso de experimentación de elementos electrónicos, con el programa FabAcademy™ se desarrolló una propuesta aplicada al sistema de rehabilitación. Se definieron niveles de interacción en donde la participación del experto en rehabilitación o el acompañante fue indispensable para obtener resultados apropiados para el uso del guante.

Para el sistema electrónico se utilizaron aplicaciones del sistema Arduino, componentes de electrónica básica y que formaron parte del programa FabAcademy™, que permitió comunicar el desarrollo de software, hardware y hacer pruebas de control del sistema desarrollado. Con el sistema montado se realizaron diferentes análisis y test de verificación técnica. También se realizaron pruebas de satisfacción del usuario en dos perfiles; el perfil experto orientado a los fisioterapeutas y el perfil usuario final con pacientes con artritis crónica.

En el capítulo se detalla el flujo de trabajo de la fase de desarrollo, donde las metodologías de diseño aplicado permitieron identificar las fortalezas y debilidades del sistema final. Durante el proceso de creación se desarrollaron varios prototipos partiendo de modelos DAO preliminares del dispositivo mediante el programa SolidWorks realizando variaciones en el diseño y la construcción del exoesqueleto final en forma de guante. De hecho, se realizaron diversas alternativas de las articulaciones rígida que conforman la estructura del exoesqueleto junto con el guante. ARTH-aid ExoGlove System dispone de una serie de actuadores para el control de la flexión-extensión de los dedos, generado por el sistema de mecanismos dispuestos en un subsistema de actuadores, un subsistema de captación de datos, un subsistema eléctrico y un subsistema informático con una interfaz.

5.1.1. Necesidades funcionales, terapéuticas y tecnológicas.

En la revisión de los exoesqueletos realizada en el capítulo anterior, se hallaron productos innovadores en el campo de medicina, sin embargo, la mayoría de las alternativas para rehabilitación no se diferencian entre sí, siendo el componente de diseño industrial, a nivel funcional y estético, un aporte para presentar un factor diferenciador en los productos. Siguiendo las metodologías de Diseño de producto se ha desarrollado una solución de exoesqueleto a partir de las especificaciones, requisitos y

necesidades que se han planteado en los capítulos anteriores.

Funcionales:

- La estructura del exoesqueleto que se implemente en el guante debe ser ligero y debe imitar los mismos movimientos que los dedos de la mano humana.
- La activación del sistema de control de los movimientos de los dedos debe realizarse por parte del usuario.

Ergonómicos:

- El guante debe realizarse con materiales textiles ligeros y transportables.
- Las articulaciones protésicas que envuelven a los dedos del paciente deben ser ligeros y adaptados a la forma de los dedos artríticos.

De manera específica se ha considerado importante definir los criterios o requerimientos de uso del guante exoesquelético del mano orientado a la rehabilitación mediante la definición de parámetros agrupados por factores de uso, de terapia y de función.

Tabla 10: Criterios de uso del guante exoesquelético de la mano.

Requerimientos		Descripción
Criterios generales	A) Manejabilidad	Es transportable y de fácil manejo y uso por el usuario.
	B) Versatilidad	Debe usarse en diferentes manos de los usuarios, debe presentar la capacidad de adaptarse con rapidez y facilidad a distintas funciones.
	C) Peso mínimo	La estructura respeta un límite de peso indicado.
	C.1) Mantenimiento	Que las piezas articuladas sean fáciles de encontrar y mantener.
	D) Modulable	Las piezas articuladas sean intercambiables para su montaje, mantenimiento y limpieza independientes y pueden separarse.
	E) Montaje	Procedimiento adecuado de colocación y retirada.
	X) Robustez	Uso de materiales y tecnologías fiables que faciliten la robustez final del guante y del sistema en su conjunto.
Funcionamiento del guante de la terapia	F) Control de fuerza	Debe activar resistencia tanto en flexión como extensión de los dedos.
	G) Flexibilidad	Debe dotar el número necesario de grados de libertad en los dedos.
	H) Capacidad de agarre	Es necesario que brinde la posibilidad para realizar distintos tipos de agarre.

I) Zonas neutras	Zonas neutras en la palma de la mano y en las yemas de los dedos para mantener la sensibilidad al tocar los objetos. Dado que se avizora ciertas habilidades de agarre, debe dejar la palma del usuario y las yemas de los dedos lo más libres posible.
J) Activación implicada	Activación de la oposición a la flexión-extensión es regulada por los servos.
K) Tiempo de respuesta	Los movimientos son captados inmediatamente por el sistema electrónico conformado por sensores.
L) Sensibilidad de los flexosensores	Los flexosensores utilizados deben tener una recisión de presión o tiempo.
M) Materiales	La fabricación personalizada de articulaciones protésicas para la estructura exoesquelética de la mano mediante el uso de Prototipado Rápido, PR y los materiales que utilizan.

Fuente: (Elaboración propia, 2022).

5.1.2. Normativa y estándares

Para el desarrollo del ARTH-aid ExoGlove System en su conjunto se ha tenido en cuenta la verificación y comprobación de una serie de requisitos normativos de carácter internacional en cuanto a los dispositivos electrónicos para alcanzar un nivel confiable de seguridad de todos los elementos electrónicos que van a ser usados por los pacientes.

Los estándares que el equipo debe cumplir están definidos por requisitos constructivos y de funcionamiento mínimos, establecidos en el estándar primario: IEC 60601-1, para poder ser comercializados, los equipos electro médicos deben demostrar la conformidad con los requisitos de las normas. Esta serie de normas colaterales se aplican tanto a la seguridad eléctrica como mecánica y térmica, mediante procesos de evaluación de los productos, orientada a gestionar el riesgo por el uso de algoritmos de programación.

El estándar IEC 60601-1-2 es la norma colateral que especifica los requisitos y los ensayos relativos a las interferencias electromagnéticas para los equipos electro médicos y deben seguir los alineamientos de los ensayos de Compatibilidad Electromagnética (EMC) para dispositivos electro médicos.

Al seguir esta normativa se pretende alcanzar la certificación emitida por Underwriters Laboratories Inc. (UL), siendo la mayor certificación de seguridad eléctrica en Norteamérica, que es adoptada de forma voluntaria en varias regiones a nivel global por su prestigio y debido a que confirma que un producto cumple con garantía los estándares de seguridad y calidad.

Paralelamente y desde el punto de vista del diseño, se ha tenido en cuenta también los requisitos y recomendaciones para actividades del Diseño Centrado en el Ser Humano mediante la ISO 9241-210:2019 que aborda la ergonomía de la interacción entre sistema- humano, y considera el ciclo de vida de los sistemas interactivos basados en procesos de diseño y con componentes de hardware y software que buscan mejorar la interacción humana. La información está destinada mayormente a la

planificación y gestión de proyectos que diseñan y desarrollan sistemas interactivos. Los factores humanos detallados sobre ergonomía, usabilidad y cuestiones de accesibilidad se tratan más plenamente en una serie de normas como la ISO 9241 e ISO 6385 que establecen los principios generales de la ergonomía. El ARTH-aid ExoGlove System se compone de varios subsistemas que se detallan a continuación:

- Subsistema de control.
- Subsistema de conectores.
- Subsistema de módulos.
- Subsistema del guante.

Subsistema de control. El sistema electrónico de control de las señales se compone de elementos textiles y elementos electrónicos que unen la parte mecánica de los actuadores y el software de control de movimientos emitidos desde el ARTH-aid ExoGlove System, lo que brinda como resultado la operatividad efectiva del exoesqueleto con sus respectivos movimientos y una mejora significativa al disminuir el tiempo de fabricación y el tamaño del control electrónico.

Subsistema de conectores. Corresponde a la comunicación mediante cables de los servomotores situados en el ARTH-aid ExoGlove System, y más concretamente en las articulaciones protésicas que accionan los movimientos lineales de cada dedo. De cada articulación protésica de manera independiente se compone de cables que unen el dispositivo de toma de datos y la mano mediante, estos se accionan linealmente por servomotores y el guante que incluye los tendones exoesqueléticos, que están conectados por cables accionadas linealmente por servomotores.

Subsistema de módulos protésicos. Este subsistema integra las articulaciones protésicas a través de los cuales pasan los hilos tensores. Existe un módulo central situado en la parte dorsal de la mano, que permite generar la tensión requerida al flexionar los dedos.

Subsistema del guante textil envolvente. El ARTH-aid ExoGlove System dispone de una base textil en forma de guante que protege los sistemas de conexión, los hilos tensores y las articulaciones protésicas que conforman el exoesqueleto interno.

5.2. Propuesta metodológica para la creación del ARTH-aid ExoGlove System

En el desarrollo de los prototipos iniciales del ARTH-aid ExoGlove System se realizaron diferentes planteamientos para establecer la propuesta metodológica en el uso de DAO y RP para la creación del exoesqueleto interno compuesto de articulaciones protésicas rígidas que se integraron en el prototipo final. En concreto, se realizaron varios modelos articulados para el dedo índice y la palma de la mano que permitieron estudiar los movimientos de abducción-flexión de los dedos de la mano en el proceso de agarre de objetos.

La metodología describe cada uno de los aspectos tratados en el proceso de creación, permitiendo crear una serie de prototipos previos que sirvieron para validar la funcionalidad y uso de los elementos que componen el ARTH-aid ExoGlove System.

5.2.1. Identificación antropométrica de la mano.

Esta fase se considera fundamental para realizar una valoración de las medidas antropométricas de una mano sana frente a la mano artrítica en una fase avanzada o de carácter crónico. Las variaciones volumétricas de la media de una mano sana convencional y de una mano artrítica que sufre deformaciones han sido fundamentales para la correcta creación y adaptación de las articulaciones protésicas del exoesqueleto y para su montaje final en el prototipo del ARTH-aid ExoGlove System. Dado que los dedos son el foco principal de estudio para realizar la valoración del movimiento y funcionamiento en las manos de pacientes con artritis, se precisó un análisis de las articulaciones de los dedos de la mano tomando como punto de partida un modelo físico real de una mano sana que ayudó a modificar y rectificar las variaciones dimensionales producidas en una mano artrítica y que fueron fundamentales para el establecimiento dimensional de las articulaciones protésicas adaptadas en el ARTH-aid ExoGlove System.

Para la obtención de un modelo de la mano artrítica referencial se escaneó tridimensionalmente varias manos de personas sanas y de pacientes con un escáner modelo Kinect de la compañía Xbox. Se establecieron las especificaciones concretas de los dedos de la mano y partiendo del modelo de la mano entera se desglosaron los datos y mediciones obtenidas en la digitalización 3D de las falanges de las manos para la obtención de una base de datos que sea posteriormente utilizada en la estandarización del modelo. Se digitalizaron las manos de una población de cinco personas sanas que oscilaban entre los 18 y 65 años y posteriormente se tomaron de nuevo medidas a cinco personas con artritis reumatoide de la residencia donde se realizó el estudio.

La metodología en la toma de datos antropométricos se centró en registrar las siguientes medidas específicas:

- Las medidas de falanges distales.
- Las medidas de falanges medias.
- Las medidas falanges proximales, metacarpianas y carpianas.

En la siguiente tabla se describe la medición realizada, que se inicia con el orden para la identificación de las falanges. Este estudio antropométrico tiene la finalidad de aportar posteriormente como caso de estudio para la proyección de los datos en las validaciones.

Tabla 11: Valores antropométricos de los dedos de la mano de usuarios.

		Falange	Media (mm)	percentil 5 (mm)	percentil 65 (mm)	percentil 95 (mm)
1	Pulgar	1	30.33	28.3	31.9	33.7
		2	25.3	17.65	25.45	29.35
2	Índice	1	32.6	28.4	33.2	35.6
		2	22.3	20.3	23.9	25.7
		3	21	19.25	22.25	23.75

3	Medio	1	36.33	29.65	37.45	41.35
		2	24.6	23.3	26.9	28.7
		3	23	20.2	22.6	23.8
4	Anular	1	30.6	28.7	37.1	41.3
		2	25	22.35	26.55	28.65
		3	23.3	23.05	23.65	23.95
5	Meñique	1	21.66	14.8	24.4	29.2
		2	22	19.2	21.6	22.8
		3	19	18.2	20.6	21.8

Fuente: (Elaboración propia, 2020).

En el proceso de creación de los diferentes prototipos finales desarrollados con técnicas y programas de Diseño Asistido por Ordenador, DAO, a nivel general de cada mano escaneada, se obtuvo una nube de puntos que se convirtieron en una superficie mallada y que fue tratada posteriormente con los programas 3DMax© y SolidWorks© para obtener un modelo 3D que pudiera reconstruirse físicamente mediante técnicas de Prototipado Rápido, RP con el programa Ultimaker Cura™ (ver imagen 51).

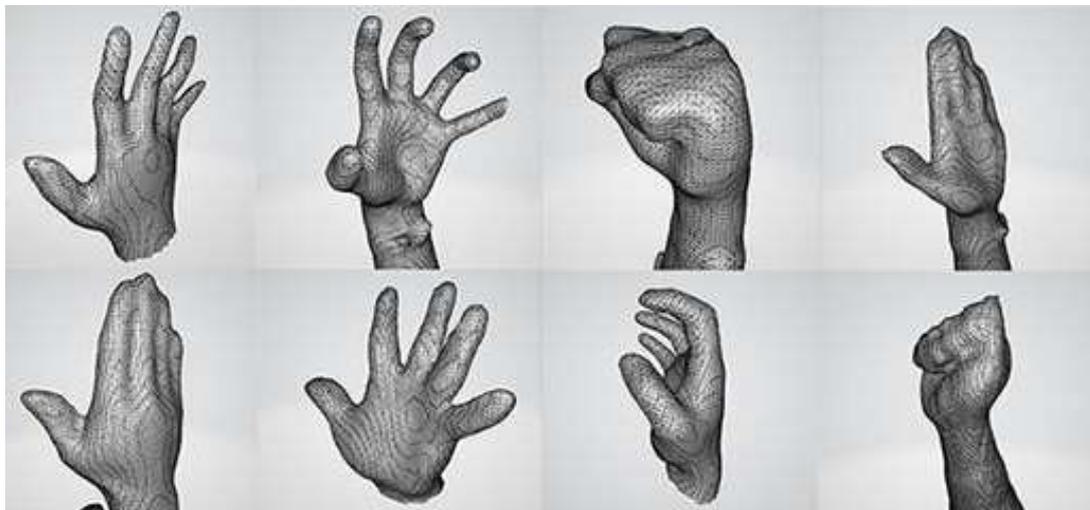


Imagen 51: Manos digitalizadas con escaneo 3D en formato de malla.

Fuente: (Elaboración propia, 2020).

Para el proceso de impresión 3D de la mano se utilizó la impresora Ender 5 de la empresa Creality y el programa Ultimaker Cura™ que trabaja con filamentos de PLA, que dispone de una aplicación Open Source que permite el tratamiento de la geometría con tecnología Fused Deposition Modeling (FDM). Esta tecnología permite la obtención de piezas con propiedades de resistencia y precisión de la mano final obtenida.



Imagen 52:Proceso de digitalización.
Fuente: (Elaboración propia, 2020).



Imagen 53:Proceso de impresión 3D de un modelo de mano con artritis.
Fuente: (Moya y Magal-Royo, 2019).

5.3. Diseño del exoesqueleto ARTH-aid ExoGlove System

Tomando como referencia los valores del percentil 65 de la tabla 11 elaborada en base a la selección de medidas físicas sobre usuarios con problemas de artritis, se generó virtualmente una mano tridimensional que sirvió para establecer la forma y disposición de las piezas que componen el ARTH-aid ExoGlove System. Las piezas más importantes trabajadas fueron la férula, o elemento de que envolvía la zona palmar de la mano, y las articulaciones protésicas que sirvieron de soporte para la colocación de los servomotores, actuadores y los hilos tensores.



Imagen 54: Estudio preliminar de los movimientos y amplitudes de los dedos de la mano

Fuente: (Moya y Magal-Royo, 2020).

Dichas articulaciones fueron creadas virtualmente en 3D, tomando como referencia las dimensiones de las falanges, para así tener un mejor acoplamiento del exoesqueleto en el usuario.



Imagen 55: Diseño de falanges a partir de referencias antropométricas de las medidas en usuarios con artritis

Fuente: (Moya y Magal-Royo, 2019)

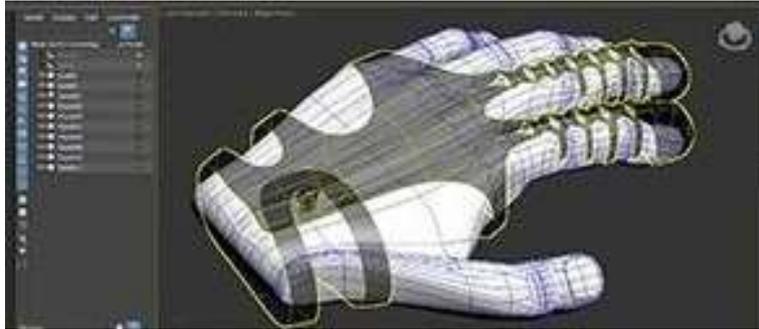


Imagen 56: Diseño de la estructura palmar a partir de referencias antropométricas de las medidas en usuarios con artritis

Fuente: (Moya y Magal-Royo, 2019).



Imagen 57: Primer prototipo de la articulación protésica de las falanges del dedo índice.

Fuente: (Moya y Magal-Royo, 2020).

El primer prototipo 3D generado mediante técnicas de Prototipado Rápido (PR), consistió en la formalización de la articulación protésica de las falanges del dedo índice para evaluar la capacidad de movimiento articulado de las tres piezas o falanges. Se escogió el dedo índice porque su posición e importancia a la hora del proceso de agarre de objetos junto con el dedo pulgar (ver imagen 57).

La creación de esta primera estructura articulada de un dedo índice permitió analizar su funcionalidad en pacientes, así como el establecimiento de una metodología basada en la toma de datos que definiera un modelo adaptable para la construcción de un exoesqueleto que pudiera ser utilizado por varios usuarios de manera cómoda y articulable dentro del ARTH-aid ExoGlove System.

Como segunda fase en el desarrollo del ARTH-aid ExoGlove System se realizó un prototipo de la pieza que envuelve la palma de la mano y sirve para el paso del cableado que tensa las estructuras posibilitando el movimiento articulado de los dedos pulgar, índice y medio. Se tomaron en cuenta los movimientos, tensiones y flexiones de los dedos que se realizan durante los ejercicios convencionales empleados en las terapias de rehabilitación de la mano artrítica. En base a ello se planteó un prototipo virtual de la zona palmar de la mano de carácter preliminar para analizar y comprender los movimientos articulares que afectarían a las articulaciones de los dedos y que permitieran definir los grados de libertad.

La información obtenida fue fundamental para definir los grados de libertad idóneos que posibilitaran

los movimientos articulares de los dedos mediante la adaptación de las falanges protésicas diseñadas sobre las cuales se encuentran sujetos los sensores.

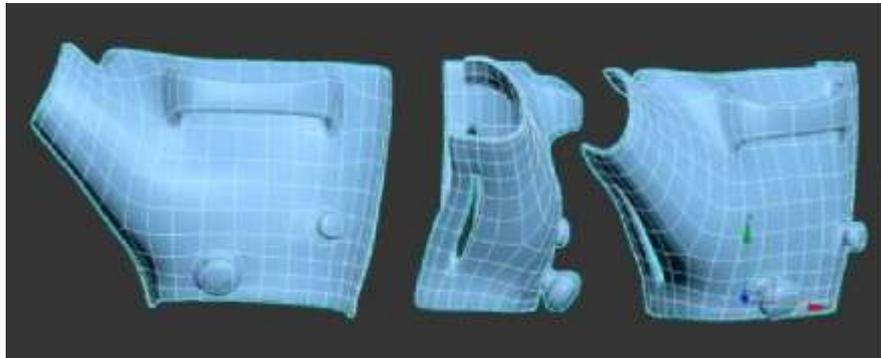


Imagen 58: Diseño virtual del modelo rígido de la palma de la mano.

Fuente: (Moya y Magal-Royo, 2020).

Esta propuesta fue finalmente rechazada porque se omitió el hecho de que para realizar una correcta terapia de rehabilitación de mano es esencial dejar la zona palmar libre de cualquier elemento.

Por otro lado, el análisis de la ubicación y posicionamiento de los hilos sensores tanto en los modelos físicos como virtuales fueron muy útiles para el entendimiento de la resistencia a la flexión-extensión que se genera en los movimientos de agarre de los dedos pulgar, índice y medio.

Se desarrolló un segundo prototipo del ARTH-aid ExoGlove System, teniendo en cuenta varios criterios funcionales específicos relacionados con el peso del exoesqueleto final que afectaba al material de las primeras falanges articuladas del primer prototipo creado con filamento plástico PLA. La creación de un nuevo modelo de exoesqueleto de peso reducido más liviano permitió mejorar la sensación de movimiento natural de los dedos con las falanges protésicas creadas.

Manteniendo la metodología para el análisis y creación del exoesqueleto mediante las técnicas de DAO y de PR y una vez montado una nueva versión del ARTH-aid ExoGlove System, se empezaron a realizar las primeras pruebas de concepto y funcionalidad mediante un test en pacientes con artritis y bajo la supervisión de un terapeuta. Estas primeras pruebas de concepto se realizaron con pacientes con un estado incipiente de la enfermedad y que presentaban cierta pérdida de movimiento de las articulaciones de la mano.

La validación y funcionalidad del segundo prototipo del ARTH-aid ExoGlove System se orientó sobre todo a evaluar la eficacia de los movimientos de las articulaciones protésicas de los dedos del exoesqueleto siguiendo las tareas y los movimientos exigidos para la rehabilitación convencional de la mano artrítica. Mediante el prototipo inicial creado, el paciente fue evaluado durante cinco meses realizando los ejercicios terapéuticos marcados por el médico en su proceso de rehabilitación (ver imagen 59).



Imagen 59: Validación y testeo de prototipo con paciente y terapeuta.
Fuente: (Elaboración propia, 2021).

Así mismo, el uso del segundo prototipo ARTH-aid ExoGlove System por parte del paciente permitió definir mejoras en la estructura formal de las articulaciones protésicas del exoesqueleto como el arco articular de los dedos, reduciendo la sensación de rigidez en el movimiento de las articulaciones creadas y mejorando el estiramiento muscular de la mano (Moya y Magal-Royo, 2020).

Se realizó un estudio de los movimientos de referencia como la flexión-abducción de los dedos y de la palma de la mano mediante el análisis de los ángulos de restricción y amplitud en la mano real con el programa AutoCAD©.

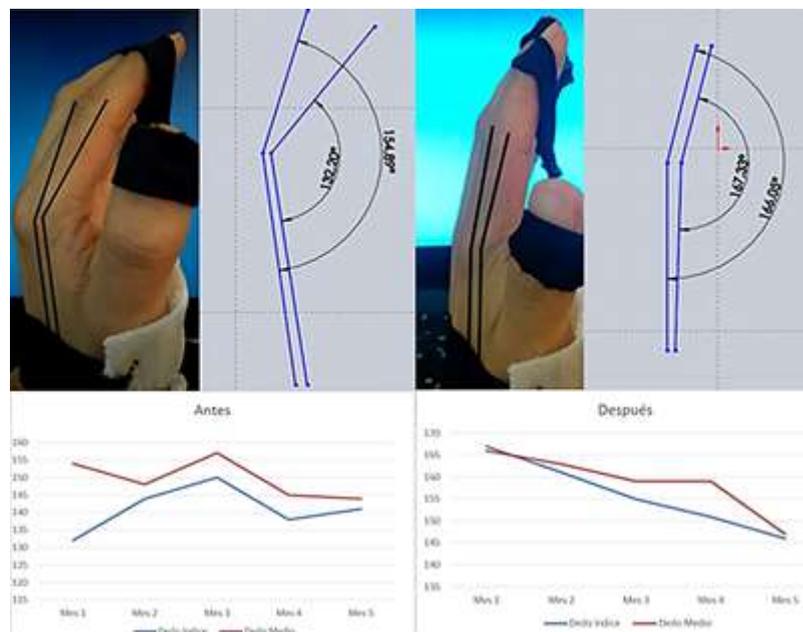


Imagen 60: Análisis del movimiento poliarticular de la mano.
Fuente: (Moya y Magal-Royo, 2020).

La imagen 60 muestra los gráficos de la evolución del movimiento poliarticular y de la flexibilidad

de las articulaciones, en base a los datos referenciales obtenidos de fotografías que mostraban el antes y después del uso del dispositivo. Con ello se midieron los rangos de movimiento, y se registraron los ángulos de apertura de la mano.

El análisis de los movimientos poliarticulares pasivos-activos, de flexión-extensión y abducción tratados sirvieron para determinar los aspectos formales de los componentes que se ajustaron a los dedos.

El dispositivo en cuestión ejecuta operaciones de tipo activo, ya sea ayudando, posibilitando o reforzando la motricidad de la mano, así como oponiendo una acción pasiva de resistencia a la misma para ejercitar los músculos extensores y flexores. Este ejercicio tiene el beneficio de aliviar la inflamación de los tejidos musculares y articulares, tal y como lo recomendó el fisioterapeuta.

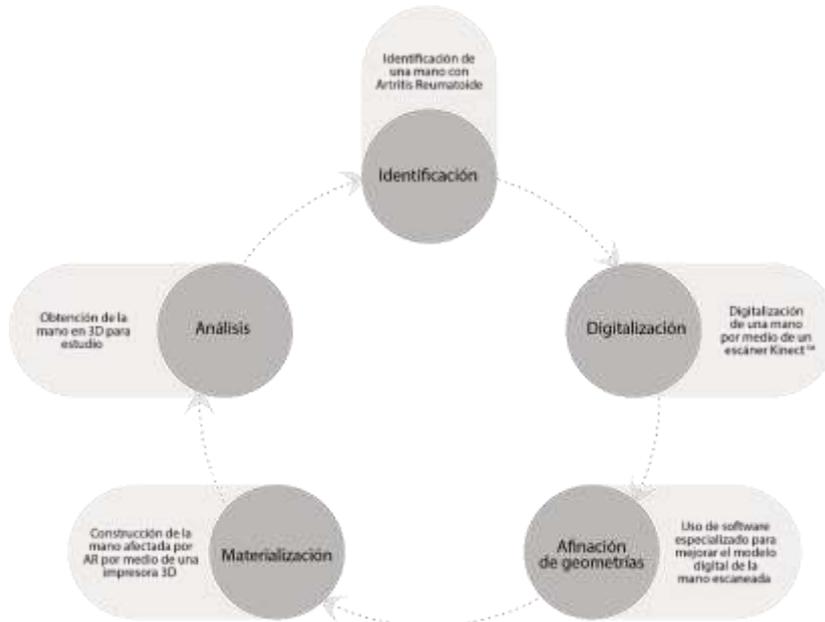


Imagen 61: Proceso de diseño y desarrollo del prototipo.
Fuente: (Elaboración propia, 2020).



Imagen 62: Proceso de Diseño enfocado al desarrollo de producto.
Fuente: (Elaboración propia, 2020).

5.4. Diseño del guante como exoesqueleto para mano ARTH-aid ExoGlove System

Una vez creada la metodología de creación de las piezas articuladas para los dedos del exoesqueleto ARTH-aid ExoGlove System mediante técnicas DAO y PR testados con usuarios, se analizó su integración junto al resto de componentes que debe tener un exoesqueleto de mano convencional y que vimos en el capítulo anterior incluyendo los siguientes elementos:

- Los sensores.
- Los módulos interfalángicos.
- Los cables.
- Los servomotores.
- El sistema informático de comunicación y programación de los movimientos de los servomotores.
- Los actuadores.
- El sistema de gestión de datos.
- Envoltorio o guante textil.

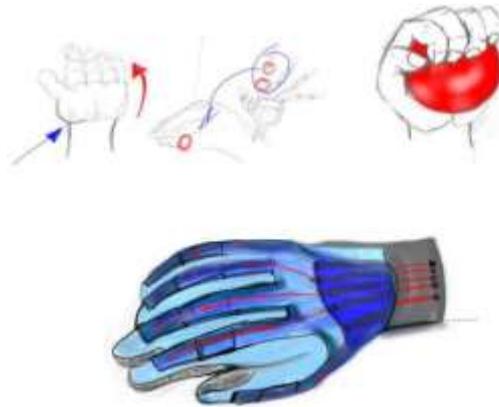


Imagen 63: Boceto digital del guante.
Fuente: (Elaboración propia, 2020).

Los sensores

Los sensores empleados en la construcción del exoesqueleto están creados con material elástico textil que ayuda a generar oposición en los movimientos. Tomando en cuenta la efectividad de los hilos sensores por la facilidad de movimiento que brinda al paciente, además de la facilidad de diseño mediante los módulos que se ajusten a la mayoría de las manos; se determinó el siguiente modelo que se caracteriza por tener un control combinado de movimientos que son inducidos por la estimulación eléctrica a través de actuadores y correctamente conducidos por el guante que están en contacto directo con la mano del usuario final.

Las articulaciones protésicas interfalángicas

Las articulaciones creadas físicamente mediante PR se utilizan para crear el exoesqueleto de la mano que guiará los dedos del paciente en la realización de los movimientos terapéuticos programados.

El cableado

Los cables de 0.3 milímetros de grosor y material de cobre recubierto con aislante se utilizan para comunicar datos de flexión. Se ha utilizado el cableado del tipo conexión en paralelo para evitar inconvenientes de conexión, los cables llegan desde el sistema de control pasando por la palma de las manos donde se distribuyen en cada dedo y se conectan con los flexosensores.

Los servomotores

Los servomotores tipo micro HXT900 implementados en el ARTH-aid ExoGlove System se sitúan en la muñeca y sirven para oponer una resistencia (acción pasiva) a la acción de la motricidad de la mano para ejercitar los músculos extensores y flexores.

El sistema informático de comunicación y programación de los movimientos

Este sistema es necesario para que los servomotores funciones de manera coordinada. Fue desarrollado en lenguaje de programación para Arduino basado en el mismo lenguaje de programación, de esta manera se establece la comunicación y control de los servomotores dentro del sistema.

Los actuadores

Son elementos que tienen la capacidad de transformar energía eléctrica en la activación de un proceso de movimiento con la finalidad de generar un efecto sobre el proceso automatizado definido con la programación.

El sistema de gestión de datos

Mediante la tabulación de datos manualmente se expresó la selección de información con respecto a los rangos de flexión en el movimiento de los dedos.

Guante

El envoltorio o guante externo que envuelve al exoesqueleto y a los cables este hecho de material textil elástico de neopreno que tiene propiedades de elasticidad y resistencia, ligero y transpirable. El objetivo del guante como elemento que recoge todos los dispositivos creados es la de adaptarse de manera universal a cualquier mano sana pero también a las peculiaridades de la mano con problemas de artrosis.

La validación funcional del guante como elementos globales debería tener en cuenta las siguientes premisas relacionadas con la forma de actuar o de usar como, por ejemplo:

- Si el guante tiene mucha holgura, entonces cada sensor no se mueve en conjunto con la articulación del dedo al que está asociado
- Si el guante es muy pequeño o ajustado a la mano, entonces el sensor tendrá mayor presión aplicada en la parte inferior durante la flexión de cada articulación.

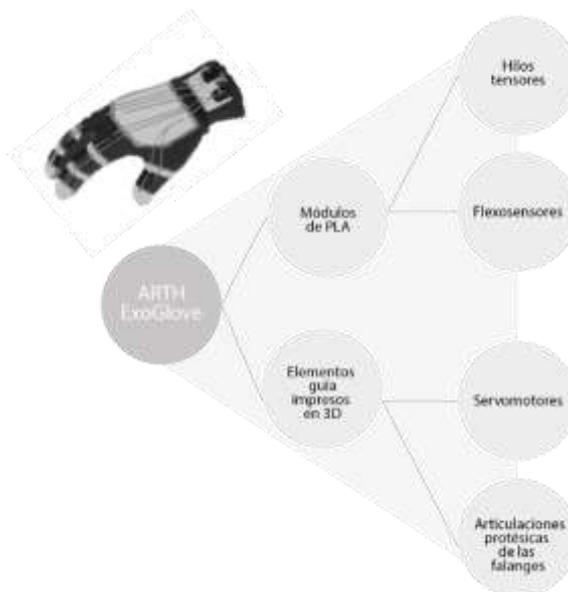


Imagen 64: Diagrama de componentes principales de ARTH-ExoGlove.

Fuente: (Elaboración propia, 2021).

Su fabricación mediante herramientas de prototipado rápido optimizan el diseño y brindan la posibilidad a los usuarios de autofabricar y personalizar su propio dispositivo.



Imagen 65: Boceto digital del guante entero.

Fuente: (Elaboración propia, 2022).

5.4.1. Arquitectura electrónica del ARTH-aid ExoGlove System

Los componentes que configuran el sistema eléctrico del sistema ARTH-aid ExoGlove System son; 1) una placa de control principal PCB diseñada específicamente para recibir información de los flexosensores, 2) un ordenador 3) una aplicación informática programada desde la aplicación de Arduino© para el control de los servomotores para manejar la tensión de los hilos, 5) una placa de microcontrolador (modelo Arduino UNO) 6) Un módulo tipo display LCD 16 x 2 QY luz verde conectado a la aplicación de Arduino© que permite observar los la variación en los rangos de flexión, 7) los cables de cobre que se conectan a los servomotores situados en el guante, y paralelos a estos se sitúan los hilos tensores. En base a la normativa vigente como vimos en el capítulo 4, el sistema eléctrico necesita seguir una serie de protocolos de seguridad mecánica y térmica para evitar interferencias electromagnéticas.

El tablero de control principal sirve para controlar los servomotores mediante una conexión por cables que se explicarán más tarde. El tablero de control presenta como características funcionales más importantes el procesamiento y la configuración de entradas. El tablero de control utiliza una pantalla LCM-S.1602DTR/M con una interfaz configurada para imprimir los mensajes o señales emitidas.

La placa de sensor periférico utiliza un microprocesador de 8 bits modelo Atmel Atmega328p que se utiliza para leer los canales de entrada analógica, serializar los datos y enviarlos a la placa de control principal que controla las acciones.



Imagen 66: Cableado, circuito impreso y pantalla de ARTH-aid System

Fuente: (Elaboración propia, 2022)

Se incluyeron varios canales analógicos para permitir la inclusión de futuros sensores y satisfacer las necesidades de la aplicación, lo que permitió incrustar en el exoesqueleto los instrumentos de medición sin necesidad de aumentar el tamaño total del dispositivo.

En cuanto a los flexosensores o también denominado FSR, cuyas características son el aumento de resistencia al ser flexionado, se conectaron en las entradas principales de la placa para registrar los datos del proceso de rehabilitación de los pacientes como sus movimientos articulares y el ángulo de apertura en flexión-extensión de sus dedos (ver imagen 66).

Los servomotores modelo SG90 situados en el interior de los dedos del guante incluyendo la parte superior de la palma de la mano, son indispensables para controlar torque/movimiento que ejercen por los dedos. La fuerza ejercida durante el movimiento de los dedos puede alcanzar hasta $1,5 \text{ Kg/cm}^2$, los servomotores permiten generar un movimiento síncrono en los cinco dedos de la mano mediante el control por cables en el panel. La función de estos es generar una fuerza de acción en los movimientos ejercidos por cada una de las articulaciones de la mano lo que ayuda al paciente en los ejercicios controlados que debe realizar con las manos para mejorar mediante el ejercicio las habilidades motrices mermadas por la enfermedad, evitando el anquilosamiento del músculo al ejercitarlo y hacerlo más fuerte. El estímulo de movimiento de los músculos de la mano a través de un exoesqueleto para la mano que genera los movimientos precisos y regulados permite mejorar y controlar la recuperación de la movilidad parcial o total de la mano según el nivel de la patología detectada a nivel médico.

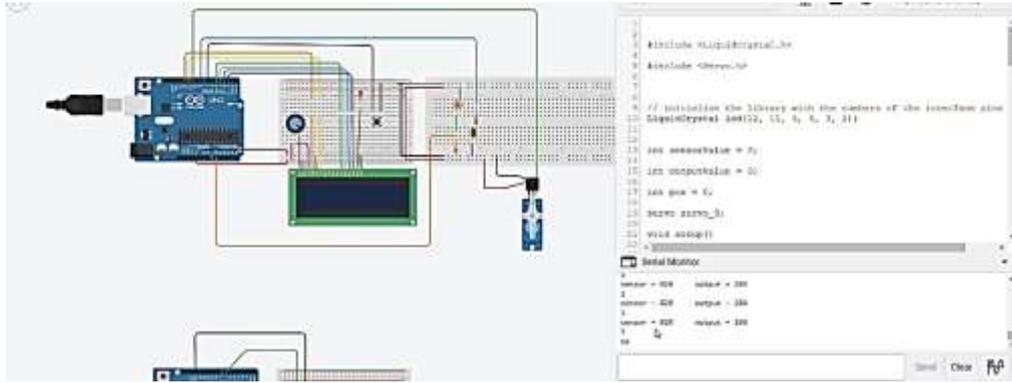


Imagen 67: Simulación programado en Arduino en la aplicación ThinkerCad©
 Fuente: FabLab Zoi. Quito, Ecuador, 2022

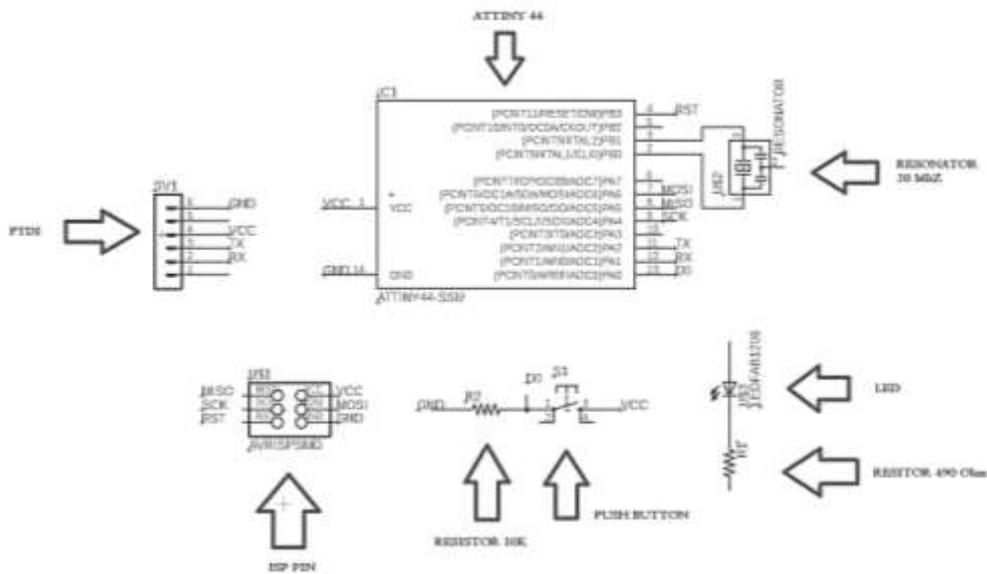


Imagen 68: Diagrama electrónico del sistema ARTH-aid ExoGlove System.
 Fuente: (Elaboración propia, 2022)

Para el establecimiento de la conexión se utilizó la aplicación Arduino v.1.8.12, realizando la programación tanto de la recopilación de los datos obtenidos para el control y seguimiento de los valores conseguidos por los sensores instalados en el guante. El código es sencillo, se empleó la librería interna de Arduino sobre Servos para utilizar sus funciones, que fueron calibradas previamente según la posición que adopte el servomotor en el prototipo.

Primero se declararon las entradas que son las señales analógicas, para registrar y guardar las señales de los dedos. En la configuración y declaró uno de los servomotores en los pines correspondientes y en bucle o *loop* se controló el sensor.

Para que el dispositivo reaccione junto con el movimiento de los dedos, se guardó la señal analógica leída por el pin de entrada en el valor de sensor, que en este caso fue A0. Esta instrucción se tuvo que repetir dentro del código para cada dedo.

```

// initialize the library with the numbers of the interface pins
LiquidCrystal lcd(12, 11, 5, 4, 3, 2);

int sensorValue = 0;
int outputValue = 0;
int pos = 0;
Servo servo_9;

void setup()
{
  pinMode(A0, INPUT);
  pinMode(8, OUTPUT);
  //Serial.begin(9600);

  // set up the LCD's number of columns and rows:
  lcd.begin(16, 2);
  // Print a message to the LCD.
  lcd.print("S1:");

  //configure pin2 as an input and enable the internal pull-up resistor
  pinMode(7, INPUT_PULLUP);

  servo_9.attach(10);
}

void loop()
{
  // read the analog in value:
  sensorValue = analogRead(A0);
  // map it to the range of the analog out:
  outputValue = map(sensorValue, 0, 1023, 0, 255);
}

```

Imagen 69: Código en programación en Arduino para un flexo sensor del ARTH-aid System.

Fuente: Arduino©, 2022

El uso de esta aplicación de programación en Arduino permitió verificar la señal de los flexosensores de manera que no se necesitó el uso de un filtro digital para la captación de la señal del microcontrolador, debido a que la entrada de datos no produce ningún tipo de ruido en la señal del sensor.

En la verificación del proceso se utilizó una placa Arduino1 con un LED que una vez conectado el cable permitía verificar la conexión (ver imagen 70). Esta reacción se refleja rápidamente en el foco led que se enciende al captar la señal.

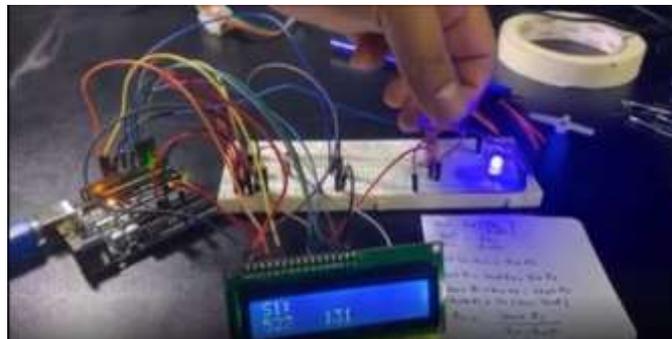


Imagen 70: Pruebas de verificación de la señal emitida por los flexosensores en el dispositivo ARTH-aid ExoGlove.

Fuente: (Elaboración propia, 2022).

En función de las pruebas realizadas se generó un circuito de placa electrónica, especialmente diseñado para el ARTH-aid ExoGlove System, en la comunicación entre componentes que permita imprimir un mensaje con un código de programación establecido, (Ver imagen 71). Esta placa se añadió/acopló/implementó al dispositivo del control para la emisión de señales.

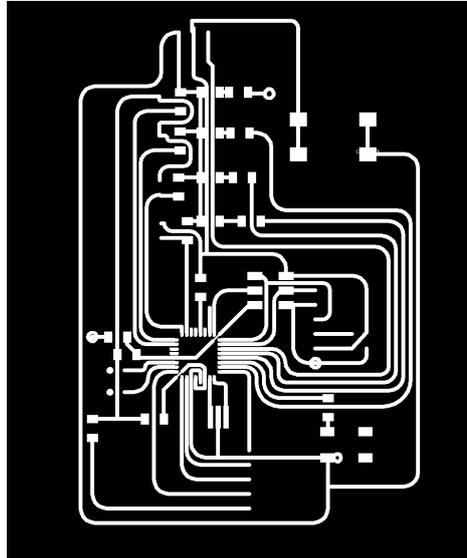


Imagen 71: Diseño de placa electrónica para el sistema ARTH-aid Sytem.
(Elaboración propia, 2022).

La placa se creó primero de manera virtual mediante la aplicación Eagle© que permitió la simulación y verificación del sistema eléctrico que después fue generado físicamente mediante un sistema de mecanizado en placa CNC, (ver imagen 72).

La generación de los archivos de corte y visualización de las trayectorias de corte en formato G-CODE se realizó con la aplicación Fabmodules©.



Imagen 72: Simulación de mecanizado para PCB (Tarjeta de circuito impreso).
Fuente: FabLab Zoi. Quito, Ecuador, 2022.

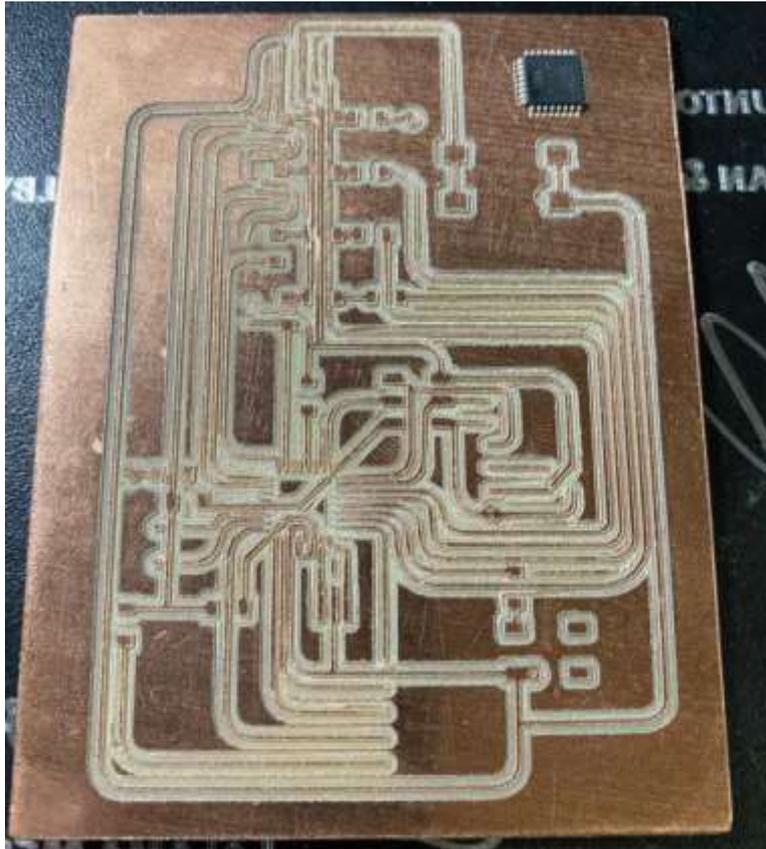


Imagen 73:Placa final del circuito eléctrico para el ARTH-aid System.
Fuente: (Elaboración propia, 2022).

5.4.2. Diseño mecánico del ARTH-aid System

El diseño mecánico se centra en los dispositivos implementados en el ARTH-aid ExoGlove System. Para ello se tuvo en cuenta aspectos relacionados con los cálculos referenciales para el movimiento de las falanges y las articulaciones protésicas creados con PR que conforman el exoesqueleto de la mano.

El principal objetivo del diseño mecánico del ARTH-aid ExoGlove System fue lograr un movimiento autónomo en cada falange de cada dedo de la mano, dado que esto permite al paciente adaptar el exoesqueleto a las características de su propia mano. Por ello los mecanismos implementados en el guante fueron diseñados específicamente para forzar al paciente a generar y controlar los movimientos específicos programados para su rehabilitación. Como ya se indicó en la introducción de este capítulo, el ARTH-aid ExoGlove System ha sido desarrollado como un dispositivo activo dirigido a los procesos de rehabilitación de la mano artrítica mediante seguimiento con diversos grados de control de la individualización de los dedos.

La estructura de soporte de los dedos o articulaciones protésicas se diseñaron en base a tres piezas principales (proximal, medial y distal) unidos por cables que se adaptan a la flexión-extensión de las articulaciones metacarpofalángicas (MCP) e interfalángicas (IP). Un extremo del cable está unido al

servomotor y el otro extremo está unido a la falange distal del módulo de cada dedo del exoesqueleto. Cuando el servomotor tensa el cable, las juntas MCP e IP se extienden y el deslizador se mueve al extremo proximal del metacarpiano.

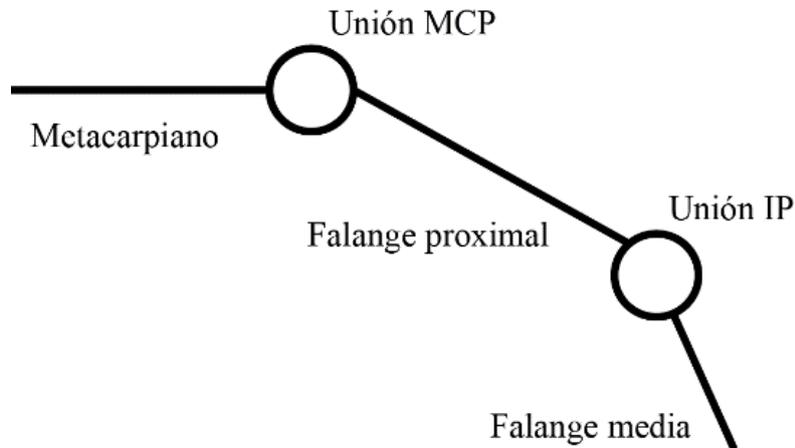


Imagen 74: Modelo simplificado del sistema mecánico del movimiento del dedo índice.
Fuente: Adaptado de (Lu et al., 2016).

Cada dedo está dividido en tres piezas excepto el pulgar que cuenta con dos, y cada pieza se compone por dos GDL, grados de libertad, que brindan soporte para los cuatro dedos (índice al meñique), mientras que el pulgar cuenta con un grado de libertad. En el caso concreto del pulgar la pieza también incorpora un grado de libertad pasivo adicional para posicionar la amplitud del ángulo de abducción/aducción del dedo pulgar, así como el giro pasivo en el soporte del pulgar para crear un ajuste ergonómico. El número de GDL se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

$$F = 3n - 2P_L - P_H$$

donde: $n = 3$, $P_L = 3$, $P_H = 0$
entonces $F = 3$

Imagen 75: Fórmula para el cálculo del número de GDL.
Fuente: Adaptado de (Lu et al., 2016).

En el desarrollo e implementación del sistema de la mano, cada dedo necesita tres GDL menos el dedo pulgar que solamente tiene dos articulaciones. Las piezas están conectadas entre sí por estos tres grados de libertad. Dos de ellos coadyuvan/ayudan al proceso de extensión-flexión de la articulación IP y MCP.

Cuando el dedo se extiende, la articulación MCP, metacarpofalángica del exoesqueleto de la mano, es la articulación de mayor tamaño, se encuentra entre los huesos de los dedos y los huesos de la mano. En el dedo índice, los GDL activos son la flexión / extensión de la articulación MCP e IP, la abducción / aducción del dedo índice está presente, pero es completamente pasiva. En el dedo pulgar la flexión / extensión MCP e IP y la oposición de la articulación metacarpiana.

ARTH-aid ExoGlove System se estableció mediante el diseño modular de las piezas de un dedo con cuatro puntos de anclaje, lo que representa los GDL, grados de libertad, antes mencionados, tomando en cuenta que hay tres articulaciones meta falángicas denominadas DIP (falange distal), PIP (falange

proximal), MCP (falange metacarpiano), este último consta de dos GDL, divididos en MCP1 y MCP2, encargados de la motricidad y el movimiento de flexión- extensión de las falanges, así como la abducción-extensión de la mismas. A continuación, se presenta un gráfico de la biomecánica explicada de acuerdo a las articulaciones de los dedos y su rango de movimiento de los dedos respectivamente.

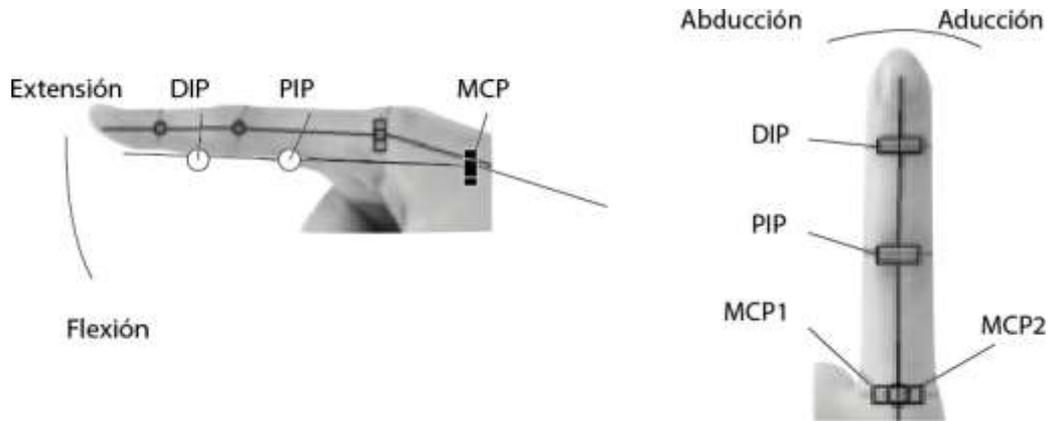


Imagen 76: Articulaciones del dedo índice para la ubicación de los GDL

Fuente: (Elaboración propia, 2022).

Las piezas diseñadas favorecen el movimiento de los dedos y dan soporte a la estructura al mismo tiempo que se encargan de conectar las poleas, actuadores y sistemas, por lo que requieren de un material capaz de soportar tensiones. (Ver imagen 77).

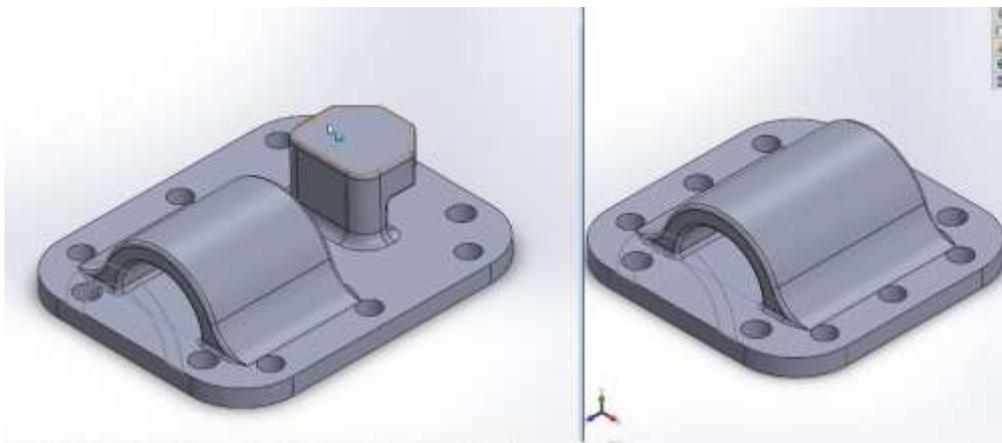


Imagen 77: Módulos externos del ARTH ExoGlove para la falange de un dedo.

Fuente: (Elaboración propia, 2022).

Las piezas que componen los elementos articulados para cada dedo del ARTH-aid ExoGlove System se construyeron en material termoplástico conocido como ácido poliláctico o PLA. Se generaron las piezas virtualmente mediante el programa SolidWorks™ que permitió analizar no solo las dimensiones, sino que también se realizaron cálculos y simulaciones de ensamblajes y materiales para verificar su idoneidad.

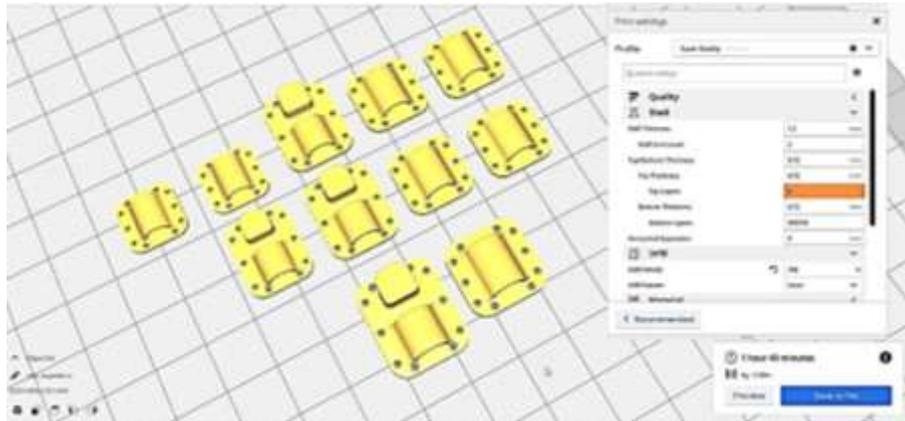


Imagen 78: Preparación de todos los módulos para impresión 3D Ultimaker Cura™.
Fuente: (Elaboración propia, 2022).



Imagen 79: Montaje de componentes y pruebas del sistema ARTH-aid ExoGlove System.
Fuente: (Elaboración propia, 2022).



Imagen 80: Primer prototipo funcional del ARTH-aid ExoGlove System
Fuente: (Elaboración propia, 2022).

Finalmente, al integrar los sistemas y módulos se consiguió el prototipo final (ver imagen 80) y se hizo un estudio preliminar del coste del primer prototipo del ARTH-aid ExoGlove System donde se requirieron varios componentes como se detalla en la Tabla 12. Como parte fundamental del sistema, el guante en el cual se distribuyen los microcomponentes como son los módulos impresos con filamento PLA, además de servomotores, sensor de fuerza y microcontroladores para llegar a un producto funcional.

Tabla 12: Costes de materiales para elaboración del ARTH-aid ExoGlove System.

Material/componente	# Unidades	Precio unitario (dólares)	Precio total (dólares)
Filamento PLA 200gr.	1	6	6
Servomotores	2	5	10
Par de guantes	1	7	7
Sensorflex	5	10	50
Sensor de fuerza	1	12	12
ATMGA328 UA	1	3	3
Electronic suply SMD	1	10	10
ATtiny3216	1	1	1
ATtiny412	1	1	1
Otros consumibles (leds, estaño, cables...)	1	5	5
Total			105 \$

Fuente:(Elaboración propia, 2022).

5.4.3. Aplicación del Diseño Centrado en el Usuario (DCU)

El diseño de productos debe satisfacer tres necesidades: (1) Funcionalidad, (2) Usabilidad y (3) Accesibilidad, siendo estos los requerimientos primordiales que busca el consumidor en un producto. Así pues, Donald Norman, a través de su teoría de diseño emocional (2002) se enfoca en satisfacer estas necesidades permitiendo a los usuarios ser partícipes en el proceso de diseño, garantizando en este caso, la funcionalidad y la aceptación del exoesqueleto por parte del paciente.

Para esta tesis, se seleccionó esta metodología a través de la cual se puede conocer los sentimientos, necesidades y preferencias del usuario antes, durante y/o después del diseño del producto. En cuanto al proceso, el DCU involucra al usuario en todas las fases de desarrollo del producto o prototipo. Así, a grandes rasgos se puede considerar que hay tres grandes fases: (1) la investigación y análisis de los usuarios, (2) el diseño y (3) la evaluación, los cuales nunca han de verse como fases sucesivas o inflexibles (Norman, 2002; Domingo, y Pera, 2010).

En general, el diseño está pensado para evitar molestias a los pacientes durante el uso del exoguante y para integrar todos los componentes sin mayor complicación, lo que también beneficia a la fabricación e instalación del sistema y contribuye al uso regular del guante, lo que en consecuencia tendrá un impacto positivo en la rehabilitación de las personas mayores.

La funcionalidad del ARTH-aid System está orientado tanto para el paciente que lo va a usar a través del exoguante como para el equipo sanitario y principalmente los fisioterapeutas que requieran integrarlo dentro de las sesiones de rehabilitación que realizan diariamente con pacientes. para que

ambos puedan entenderlo y no demande una cantidad de tiempo considerable para configurarlo y ponérselo.

Los expertos que testearon los prototipos fueron cuatro personas, (dos hombres y dos mujeres), dentro del área de rehabilitación en el centro geriátrico analizado, que tratan habitualmente personas con artrosis crónica y con edades comprendidas entre 38 a 40 años y con al menos 10 años de experiencia profesional.

La encuesta inicial incluía los siguientes aspectos indicados en la tabla 13, en el que se realizaron una serie de preguntas relacionadas con los requerimientos de control de los prototipos creados y que sirvieron para depurar y obtener un prototipo fiable.

Tabla 13: Retroalimentación basada en los requisitos.

	Requerimientos	Descripción
Usabilidad	A. Versatilidad	Debe ser usado en diferentes manos de usuarios
	B. Peso mínimo	La estructura cumple con un límite de peso indicado
	C. Mantenimiento	Los módulos que requieren atención son independientes y se pueden separar entre sí
	D. Fácil control de interfaz	Procedimiento adecuado de montaje y desmontaje.
Terapia	E. Control de fuerza	Debe activar la resistencia tanto en la flexión como en la extensión de los dedos.
	F. Flexibilidad	Debe proporcionar el número necesario de GDL al menos de tres tipos.
	G. Capacidad de agarre	Es necesario brindar la posibilidad de realizar diferentes los tipos de agarre más comunes
	H. Apertura de palma	Dado que algunas habilidades de agarre ya están presentes, la palma de la mano y las yemas de los dedos del usuario deben dejarse lo más libres posible.
	I. Activación simplificada	La activación de la oposición flexión-extensión es regulada.
	J. Tiempo de respuesta	Los movimientos son inmediatamente capturados por el sistema electrónico.
	K. Materialización	La manufactura permite la personalización del dispositivo usando herramientas de prototipado rápido.
	L. Robustes	Tecnología de impresión 3D y materiales textiles.

Fuente: (Moya-Jiménez et al, 2023)

El grupo de expertos fisioterapeutas de la residencia mostró gran interés en utilizar el prototipo inicial desde el principio y gracias a ello se realizaron entrevistas personalizadas para valorar las mejoras a desarrollar en el segundo prototipo. El terapeuta encargado mencionó que la tensión que generaban los alambres era la correcta y que la metodología diseñada para el proceso de rehabilitación era fácil de

seguir y de acompañar con el exoesqueleto.

Un experto en rehabilitación externo al centro geriátrico en cuestión el Dr. Oscar Rea una vez analizado e interactuando con el primer prototipo recomendó que el dispositivo no debe ayudar a realizar el movimiento por el paciente, sino que debe generar oposición leve en los movimientos de flexión para que se fortalezca el tono muscular y permita una incrementar los rangos de movimiento en las articulaciones, con este criterio y recomendación, se propuso hilos tensores para provocar un tensión opuesta al movimiento de agarre en la mano.

Una vez realizadas las primeras adaptaciones en los sucesivos prototipos, la recolección de datos por medio de las encuestas preliminares con los pacientes permitió identificar los requerimientos deseados para el sistema y sobre todo para el exoguante. En esta encuesta preliminar sobre la experiencia de usuario se seleccionó a un grupo de control previo de cinco pacientes para analizar la funcionalidad del sistema centrado en la funcionalidad del guante. De esta manera se pudieron realizar cambios tanto en la programación como la adaptación de las articulaciones para generar el prototipo final y poder realizar la encuesta final a mayor número de pacientes en una encuesta final.

Durante una semana el grupo de cinco pacientes seleccionados recibieron dos sesiones con un conjunto de ejercicios de rehabilitación mediante el uso del exoguante. Posteriormente a la sesión de rehabilitación semanal se realizó la encuesta. Una vez procesados los resultados se obtuvieron los resultados de satisfacción general en el uso del exoguante valorados porcentualmente.

En general, los pacientes seleccionados calificaron el guante de manera positiva y mencionaron que una de sus mayores expectativas es usarlo por más tiempo. El nivel de satisfacción de los pacientes en general presenta una valoración de 50%, así como en la mayoría de los porcentajes obtenidos en el resto de los requerimientos indicados en la encuesta preliminar. En la imagen 81 se muestra que el porcentaje relacionado con la versatilidad y el fácil control de la interfaz no les importa realmente a los pacientes. Los valores más altos se centraron en el mantenimiento del producto y el peso ligero del exoguante con un 57%, lo cual se consideró como unos aspectos positivos del prototipo creado.

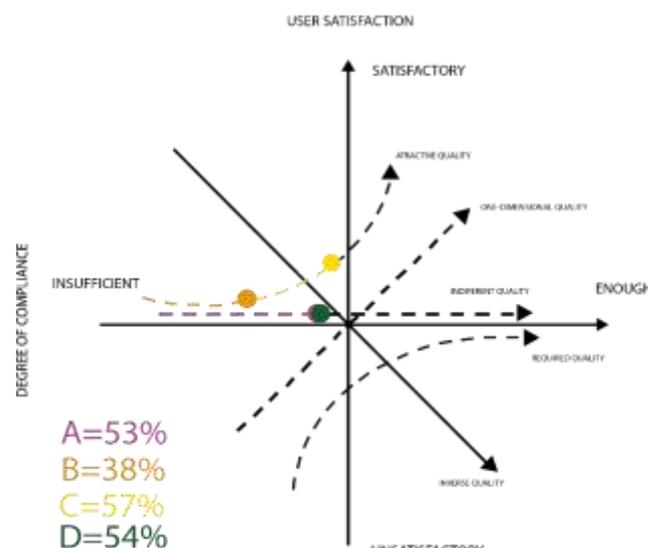


Imagen 81: Evaluación de la experiencia del usuario en base a los requerimientos A-D

Fuente: (Moya-Jiménez et al, 2023)

La versatilidad en relación con el uso del dispositivo en diferentes manos de pacientes con un valor de del 53% no presentó una relevancia significativa para ser tomada en cuenta debido a que en la comprobación los materiales textiles del cuerpo del guante facilitaron el acoplamiento a varios tamaños de manos. El peso mínimo percibido de la estructura del exoguante tuvo un índice de satisfacción del 38% teniendo en cuenta que en este prototipo los elementos electrónicos se presentaron por separado para realizar la respectiva medición de los sensores y verificar su funcionamiento. En referencia al mantenimiento percibido del dispositivo se obtuvo una valoración del 57%, siendo uno de los requerimientos más relevantes para tener en cuenta en el desarrollo y construcción del futuro prototipo. Esto implicó el rediseño y la simplificación de las articulaciones protésicas del exoguante y la necesidad de crear piezas articuladas modulares. Así mismo se realizaron mejoras en el sistema de control de los sensores aplicados sobre las articulaciones que mejorarían la presentación de los datos en la pantalla a través de un dispositivo electrónico externo.

En la imagen 82 se muestra que los aspectos más valorados por los pacientes como la flexibilidad y el control de la fuerza del aguante. Este último aspecto fue el más valorado con un 74% porque los pacientes se sintieron libres de pedir subir o bajar la tensión, según su estado físico o emocional. En referencia a la capacidad de agarre que fue valorado con un 72% se consideró como un aspecto importante y necesario para ser implementado en el prototipo del exoguante final.

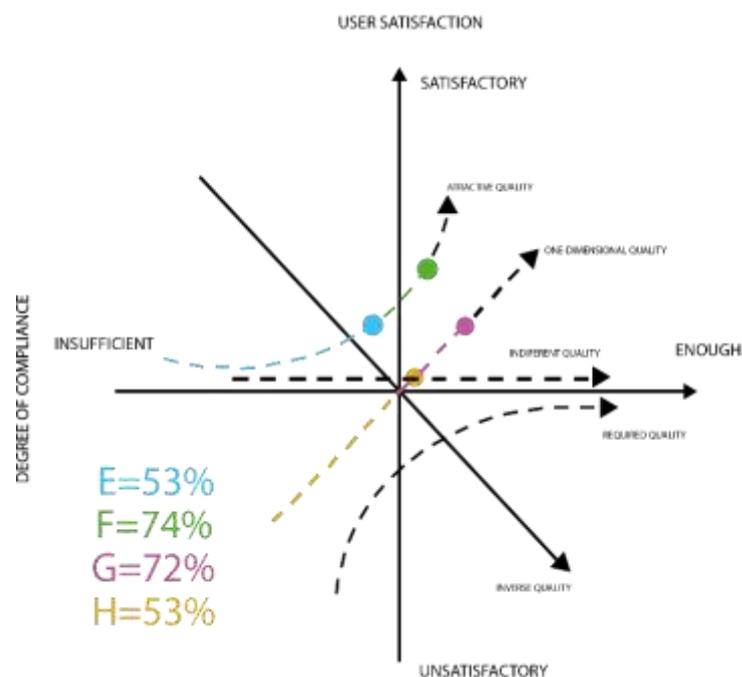


Imagen 82: Evaluación de la experiencia del usuario en base a los requerimientos E-H.

Fuente: (Moya-Jiménez et al, 2023)

En la imagen 83 se muestra los valores relacionados con la terapia dirigida a la activación simplificada, tiempo de respuesta, materialización y robustez. Aquí se demuestra realmente atractivo del dispositivo para el usuario y el profesional con una valoración del 76% por el hecho de que ese guante sea cómodo en la palma del paciente y permita abrir y cerrar la mano fácilmente, además de potenciar las actividades de aprehensión con los dedos.

En referencia a los requerimientos sobre el tiempo que tardan las medidas en mostrarse en la aplicación las valoraciones fueron de un 53% y en el caso de la percepción de la robustez del sistema se obtuvo un 47% lo que implica que en general, el exoguante cumple los requerimientos básicos para mejorar las terapias de rehabilitación dentro de los procesos de recuperación motora de la mano artrítica.

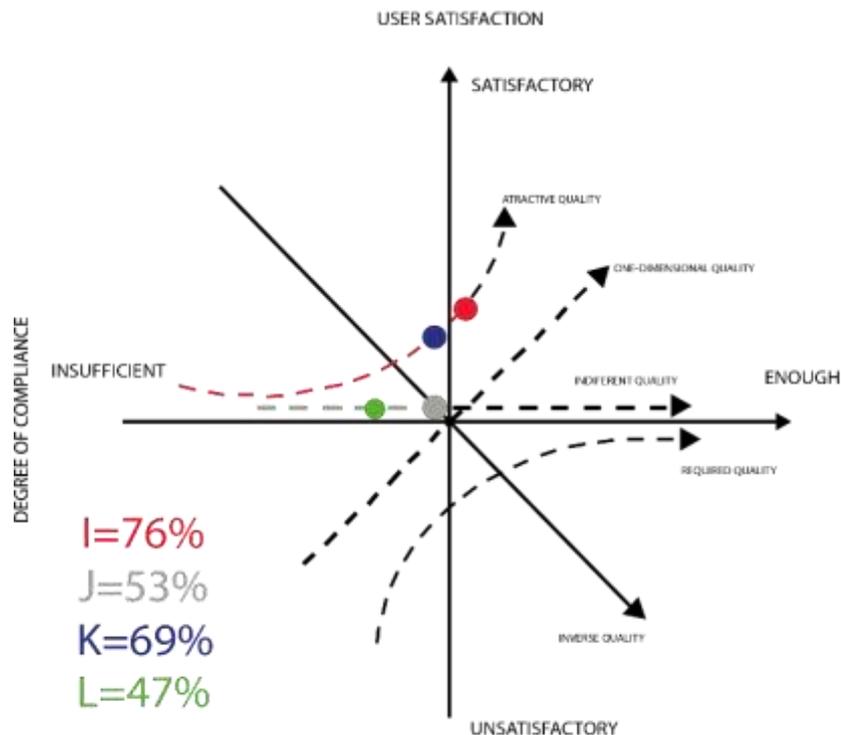


Imagen 83: Evaluación de la experiencia del usuario en base a los requerimientos I-L.
Fuente: (Moya-Jiménez et al, 2023)

En todas las pruebas realizadas, se evidenció la necesidad de realizar mejoras en el arco de movimiento articular de los dedos que favorezcan el estiramiento muscular.

A nivel de avances obtenidos en las primeras pruebas con pacientes y en base a los tratamientos realizados durante una semana a través de ejercicios de control y precisión de los movimientos de los dedos con el guante, el 62% de los pacientes se logró un máximo de 57° de rango de movimiento en la MCF del dedo índice y medio; y un ángulo aproximado de 59° del pulgar. De hecho, en los ejercicios de rehabilitación realizados con el dedo meñique (que tiene menor rango de movimiento) se logró mejora de la flexión del CCM de 24° en el 40% de los pacientes. Con los datos de movilidad de la semana se concluyó que hubo una mejora del 1,3 % en la flexión-extensión de la MCP de los dedos analizados.

El análisis de las encuestas preliminares realizadas sobre el primer prototipo del ARTH-aid ExoGlove System, permitió realizar una revisión a profundidad del sistema para recabar datos de retroalimentación y establecer criterios sobre elementos que mejoraran las prestaciones orientadas a la rehabilitación de la mano artrítica en el siguiente prototipo. Por ello, se implementaron una serie de mejoras técnicas relacionadas con los elementos electrónicos y los sensores adaptados en el guante para obtener un mejor tiempo de respuesta durante el registro del movimiento.

Tabla 14: Retroalimentación en base a los requerimientos técnicos abordados en la encuesta realizada en el primer prototipo ARTH-aid ExoGlove.

Propiedades del dispositivo	Requerimiento/Retroalimentación	Puntuación media absoluta obtenida (valoración 0, 1, 2, 3, 4, 5)
A) Versatilidad	El exoguante debería adaptarse mejor a la mano. (Parcialmente abordado)	4
B) Peso mínimo	Sienten comodidad usando el exoguante. (Abordado)	5
C) Mantenimiento	Elección correcta de materiales. (Abordado)	5
D) Interfaz de control sencilla	El procedimiento de colocación y de retirada debería ser más rápido y práctico (Pendiente)	3
E) Control de fuerza	El sistema de detección táctil, la perilla es útil. (Abordado)	5
F) Flexibilidad	No se presentan limitaciones para el movimiento poliarticular. (Abordado)	5
G) Capacidad de agarre	La calidad de los movimientos es buena. (Abordado)	5
H) Palma abierta	Permite realizar ejercicios con objetos de refuerzo. (Abordado)	5
I) Activación simplificada	La aplicación se encarga de la medición. (Abordado)	5
J) Tiempo de respuesta	El valor del sensor de presión debería reflejarse más rápido. (Parcialmente abordado)	4
K) Robustez	Combina varias tecnologías de prototipado. (Abordado)	5

Fuente: (Moya-Jiménez et al, 2023)

En la apreciación de las propiedades percibidas por los usuarios tanto de pacientes como de profesionales del sector han permitido valorar y definir cuantitativa y cualitativamente a través de la retroalimentación se detectaron mejoras significativas que pueden relacionarse con la aceptación del dispositivo por parte del usuario en un proceso inicial de validación. Los diferentes requerimientos abordados establecieron un avance significativo en el establecimiento de mejoras que afectaron a la ergonomía y la funcionalidad del siguiente prototipo de guante realizado.

Para ello, se realizaron cambios en la programación del sistema de control del nuevo prototipo de ARTH-aid ExoGlove System mediante la versión de Arduino v1.8.12. De esta manera se procesó la información grabada en su circuito integrado permitiendo controlar y verificar los movimientos programados sobre el guante que previamente había sido configurado por el fisioterapeuta en función de las necesidades del paciente con problemas de artritis.

En el desarrollo de la adaptación de la aplicación final en el código fuente se realizaron las siguientes adaptaciones:

- Mejora de la precisión en el reconocimiento del movimiento por los servomotores aplicados en cada dedo del guante e inicialización de pantalla.
- Optimización del potenciómetro y lectura del sensor asignados para cada dedo, así como en la recepción final de los datos obtenidos para tener un rango más exacto de los datos de flexión.

- Actualización del código en Arduino para controlar los movimientos de los servomotores de las falanges de cada dedo.
- Finalmente, se procedió a implementar el sistema electrónico con la parte mecánica de movimiento de los hilos tensores y el ajuste del software de control de los movimientos de los servomotores adaptados en el nuevo prototipo de exoguante que fue verificado posteriormente por usuarios finales.

Esto da como resultado la total operatividad del exoguante con sus respectivos movimientos y una mejora significativa al disminuir el tiempo de fabricación. A continuación, se describen los parámetros de impresión sobre la máquina modelo Creality Ender 5 versión 1 de los elementos modulares articulares de los dedos que finalmente se crearon.

Para la creación de segundo prototipo de guante se utilizó una lycra textil por sus propiedades de elasticidad y transpirabilidad. Así mismo, utilizó un nuevo dispositivo de control electrónico más pequeño con unas dimensiones de 10 cm de largo, 5 cm de ancho y un alto de 4 cm con un display LCD de 16 x 2mm y compatible con el sistema de Arduino.

Una vez realizado el montaje del segundo guante se realizó la verificación del control de datos a través de la comprobación y la recolección de datos de los flexosensores en pantalla, (imagen 84), el reconocimiento y asignación de los puestos input/output, (imagen 85) y la lectura de los datos y la ejecución del comando de mapeo para que devuelva un entero (sin decimales) (imagen 86).

```
#include <Wire.h> // librería I2C para Display
#include <Servo.h> // Librería para Servo Motores
#include <Adafruit_GFX.h> // librería de graficación en Display
#include <Adafruit_SSD1306.h> // Librería para Display 1306

#define WIDTH 128 // Variable para definir el ancho de la pantalla
#define HIGH 64 // Variable para definir el altura de la pantalla
#define OLED_RESET 4 // Variable requerida por la librería display

Adafruit_SSD1306 oled(WIDTH, HIGH, &Wire, OLED_RESET); //Configuración de parámetros del Display

Servo servoMotor1; //Variable Servomotor-1
Servo servoMotor2; // Variable Servomotor=2

int cont = 1; // Variable para contabilizar los niveles de tensión
unsigned long previousMillis = 0; // Variable requerida para tiempo
const long interval = 350; // Variable que define el intervalo de tiempo de repeticiones
```

Imagen 84: Recolección de datos de los flexosensores en pantalla.

Fuente: (Elaboración propia, 2022).

```
void setup() {
  Wire.begin(); //inicialización de la función I2C para Display
  oled.begin(SSD1306_SWITCHCAPVCC, 0x3C); //Inicialización de Display 1306 en la dirección hexadecimal 0x3C
  pinMode(2, INPUT); // Declaración de Pin digital D2 como entrada (Pulsador para subir nivel)
  pinMode(3, INPUT); // Declaración de Pin digital D3 como entrada (Pulsador para bajar nivel)
  servoMotor1.attach(5); // Declaración de Pin Digital D5 con la función PWM para servomotor1
  servoMotor2.attach(6); // Declaración de Pin Digital D6 con la función PWM para servomotor2
}
```

Imagen 85: Reconocimiento y asignación de los puestos input/output

Fuente: (Elaboración propia, 2022).

```

void loop() {

  unsigned long currentMillis = millis();    // Metodo para intervalo de tiempo de bucle
  int button1 = digitalRead(2);             // Lectura de estado de boton1
  int button2 = digitalRead(3);             // Lectura de estado de boton2

  if (currentMillis - previousMillis >= interval) { //Metodo para intervalo de bucle
    // save the last time you blinked the LED
    previousMillis = currentMillis;

    int littleFinger = analogRead(A7);      // Lectura de sensor 1
    int s1 = map(littleFinger, 865, 700, 0, 100); // Mapeo de sensor 1

    int ringFinger = analogRead(A0);        // Lectura de sensor 2
    int s2 = map(ringFinger, 975, 790, 0, 100); // Mapeo de sensor 2

    int ringMiddle = analogRead(A1);        // Lectura de sensor 3
    int s3 = map(ringMiddle, 871, 715, 0, 100); // Mapeo de sensor 3
  }
}

```

Imagen 86: Lectura de datos y mapeo de los sensores.
Fuente: (Elaboración propia, 2022).

```

////////////////////////////////////Vizualización de Datos en Display////////////////////////////////////
oled.clearDisplay();
oled.setTextColor(WHITE);
oled.setCursor(20, 0);
oled.setTextSize(1);
oled.print("Exoskeleton 2.0");
oled.setCursor(10, 18);
oled.setTextSize(1);
oled.print("S1: ");

if (s1 > 0 && s1 <= 100) {
  oled.print(s1);
}
else {
  if (s1 < 0) {
    oled.print("0");
  }
  else {
    oled.print("100");
  }
}

```

Imagen 87: Visualización de resultados.
Fuente: (Elaboración propia, 2022).

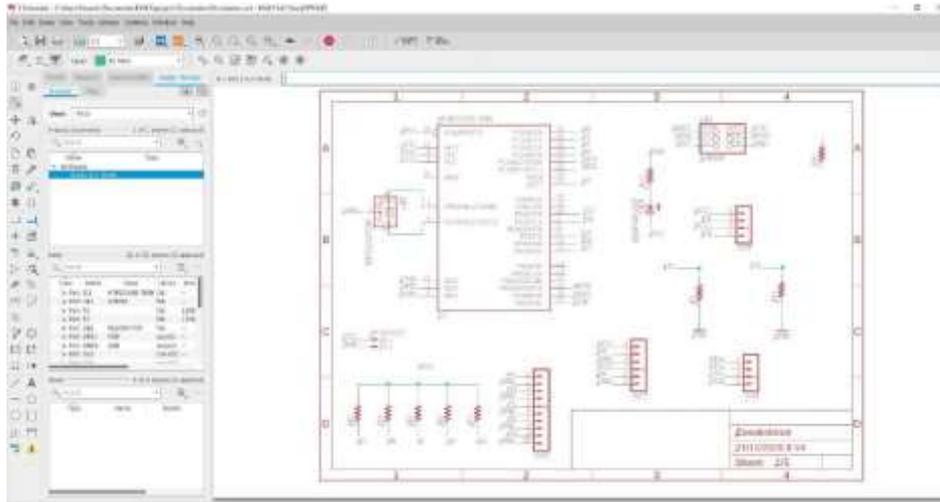


Imagen 88: Diseño esquemático del circuito.
Fuente: (Elaboración propia, 2022).

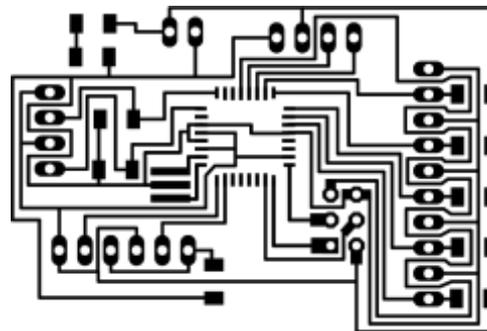


Imagen 89: Esquema electrónico.
Fuente: (Elaboración propia, 2022).

En base al esquema electrónico realizado, se procedió a realizar la soldadura de las conexiones para colocar los componentes de manera ordenada y lógica como se muestra en la imagen 90.

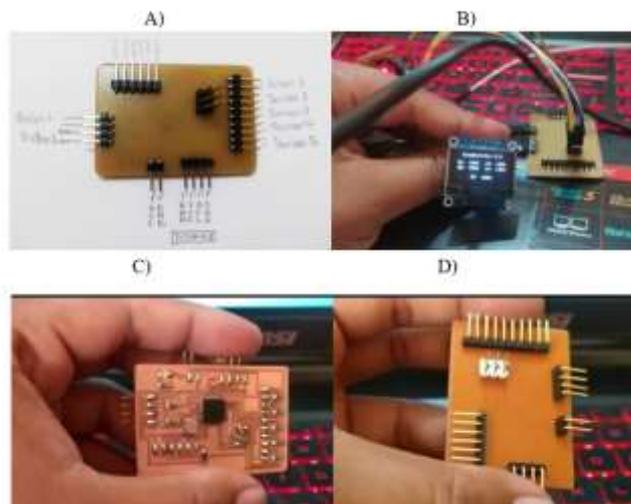


Imagen 90: A) Ubicación de componentes B) Prueba de display C) y D) Placa implementada.
Fuente: (Elaboración propia, 2022).

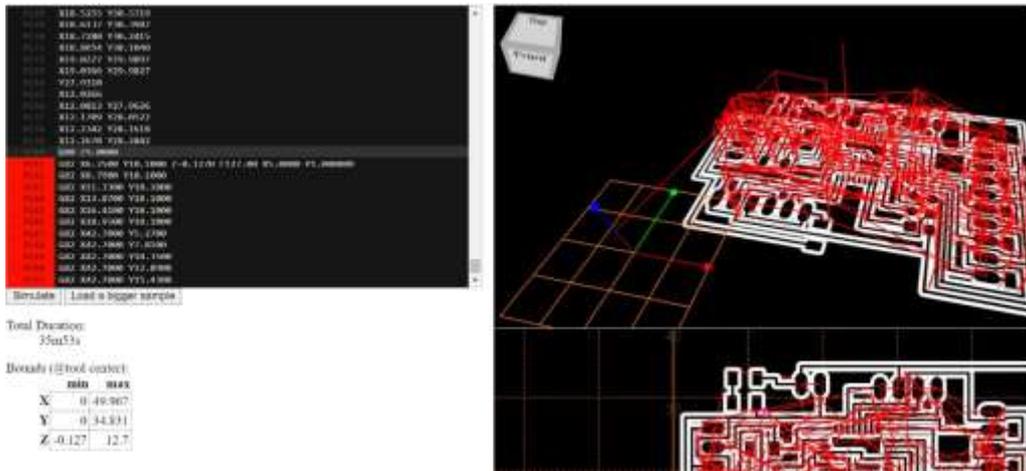


Imagen 91: Proceso de mecanizado de la placa PCB.
Fuente: (Elaboración propia, 2022).

5.4.4. Desarrollo definitivo del ARTH-aid ExoGlove System

Para la creación de desarrollo del guante se cambió el tejido original del guante por un tejido una tela más resistente y flexible, que además ocultara mejor las costuras. Se realizó una reducción significativa de los módulos por los que pasa el hilo tensor es importante para controlar y aumentar los rangos de movimiento, reduciendo cualquier incomodidad que se pueda presentar en el paciente. Se mantuvo el material utilizado para la fijación del hilo en cada dedo del guante ya que se consideró que era el adecuado para los movimientos que debían realizarse (ver imagen 92).



Imagen 92: Nuevo prototipo del ARTH-aid ExoGlove System.
Fuente: (Elaboración propia, 2022).

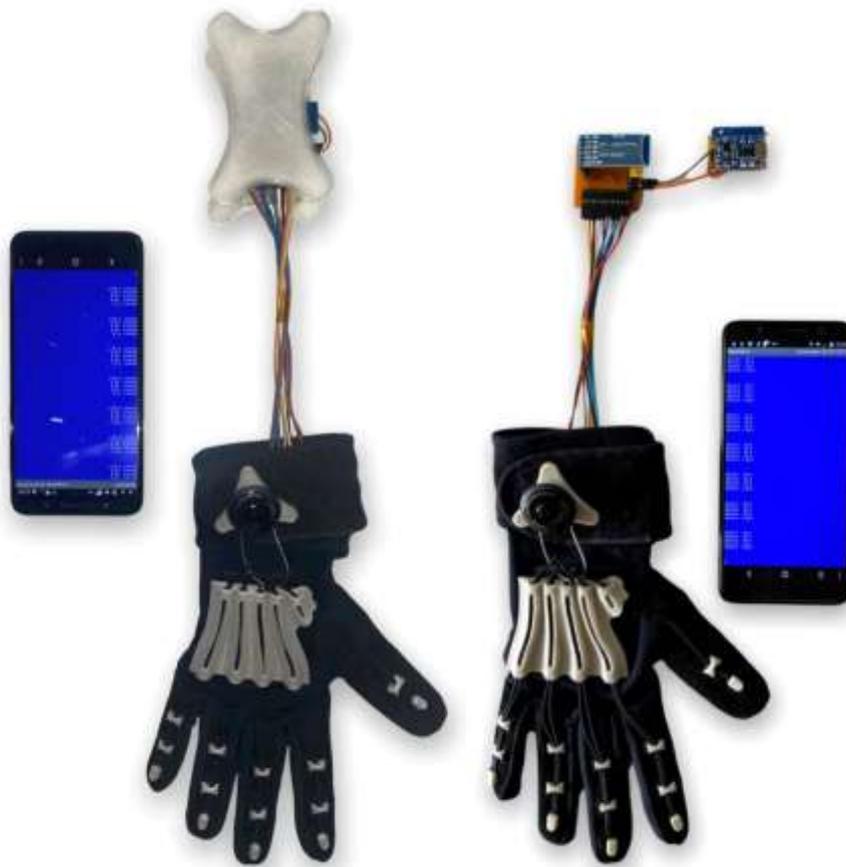


Imagen 93: Sistema completo del nuevo ARTH-aid ExoGlove System
Fuente: (Elaboración propia, 2022).



Imagen 94: Prototipo final de ARTH-aid ExoGlove
Fuente: (Elaboración propia, 2022).

5.5. Conclusiones

El objetivo principal de los sistemas de rehabilitación para la mano es mitigar la pérdida funcional de movimiento y los procesos de aprehensión coordinada en pacientes con enfermedades crónicas que limitan su movilidad. Estos sistemas buscan restaurar las funciones motoras de la mano lo mejor posible dentro de los límites funcionales del paciente, ya que en algunos casos es solo posible lograr una rehabilitación de mantenimiento y no una recuperación completa.

La creación de nuevos exoesqueletos de la mano utiliza metodologías orientadas al Diseño Centrado en el Usuario (DCU) para involucrar a los usuarios en el proceso de diseño y garantizar la funcionalidad, usabilidad y accesibilidad del dispositivo. Además, es esencial conocer y verificar la anatomía de la mano de cada paciente y tener en cuenta los aspectos biométricos para adaptar el exoguante a la mano artrítica.

En el proceso de mejora del prototipo del exoguante se consideraron tres aspectos clave: formales, clínicos y técnicos. Los aspectos formales incluyen el proceso de diseño e integración de ergonomía en el dispositivo. Los aspectos clínicos incluyen el análisis de patologías relacionadas con la mano artrítica y la rehabilitación tradicional para de esta manera proponer variaciones en los ejercicios de rehabilitación. Los aspectos técnicos incluyen la implementación de mecanismos electrónicos y analógicos.

Los sistemas de rehabilitación de la mano para enfermedades crónicas que limitan su movilidad tienen como objetivo mitigar la pérdida de movilidad y coordinación de los dedos y restaurar al máximo las funciones motoras. Estos sistemas se basan en los límites funcionales del paciente debido a la enfermedad, ya que en muchos casos sólo es posible una rehabilitación de mantenimiento en lugar de una recuperación completa.

Para la creación de nuevos exoesqueletos de la mano, se han utilizado metodologías de Diseño Centrado en el Usuario (DCU), que involucran a los usuarios en el proceso de diseño y garantizan la funcionalidad, usabilidad y accesibilidad del exoguante, junto con una eficaz metodología de diseño orientada al usuario y la programación del sistema de rehabilitación. Además, es fundamental conocer y verificar la anatomía de la mano de cada paciente teniendo en cuenta los aspectos biométricos para adaptar el exoguante a la mano artrítica.

En la mejora del prototipo del guante se tuvieron en cuenta tres aspectos fundamentales: 1) los formales para el proceso de diseño e integración de ergonomía en el dispositivo, 2) los sanitarios mediante el análisis de las patologías relacionadas con la mano artrítica y la rehabilitación tradicional, y 3) los técnicos relacionados con los mecanismos electrónicos y analógicos implementados.

Para evaluar el sistema en pacientes reales, se utilizó la clasificación de los tipos de agarre de objetos con la mano, que sirve a los terapeutas para evaluar el avance de la enfermedad. El dispositivo propuesto proporcionará una ayuda para realizar un diagnóstico de las manos de los pacientes y registrará los datos en una base de datos mediante la conexión con un dispositivo electrónico.

Finalmente, en la creación del prototipo del ARTH-aid ExoGlove final han permitido verificar la eficacia en el uso integrado de herramientas DAO como la tecnología de prototipado rápido para generar las articulaciones de apoyo y de esta manera para contribuir en la creación de un guante que sirviera para la rehabilitación de la mano en pacientes que requieran rehabilitación y acompañamiento

en su tratamiento de la Artritis Reumatoide.

El dispositivo en cuestión ayuda a la rehabilitación y seguimiento al ejecutar operaciones de tipo activo y pasivo que fortalecen los músculos extensores y flexores de la mano, aliviando así la inflamación de los tejidos musculares y articulares, tal y como lo recomienda el fisioterapeuta. Además, cuenta con una aplicación de control y seguimiento informatizado que permite monitorear el progreso del paciente y ajustar el tratamiento en consecuencia. En definitiva, este dispositivo ofrece una solución innovadora y efectiva.

Es importante mencionar que el dispositivo fue utilizado únicamente durante las sesiones de rehabilitación. Esto significa que el paciente no lo utilizó fuera del consultorio o en su vida diaria. El dispositivo fue una herramienta utilizada por el fisioterapeuta para ayudar en el proceso de recuperación del paciente y mejorar la funcionalidad de su mano. Es importante seguir las indicaciones del profesional de la salud en cuanto a la duración y frecuencia de uso.

5.6. Referencias

APTA: American Physical Therapy Association. (2019). <https://www.apta.org/>.(Consultado el 25/01/2022).

Batlle Gualda, E., Mínguez Vega, M., Bernabéu Gonzáles, P., Panadero Tendero, G.: (2013) Enfermedades Reumáticas. Ibáñez & Plaza Asociados S.L., Valencia. ISBN: 978-84-88823- 10-6.

Borghetti, M., Sardini, E., Serpelloni, M.: (2013). Sensorized glove for measuring hand finger flexion for rehabilitation purposes. *IEEE Trans. Instrum. Measure.* 62(12), 3308–3314. <https://doi.org/10.1109/tim.2013.2272848>.

Chávez Cardona, M. A., Rodríguez Spitia, & Baradica López, A. (2011). Exoesqueletos para potenciar las capacidades humanas y apoyar la rehabilitación. Colombia: *Revista Ingeniería Biomédica*, Vol 4 (7) pp. 63–73. <https://doi.org/10.24050/19099762.n7.2010.88>

Davarzani, S., Pajouh, M.A.A. (2020). Design and fabrication of sensing system for rehabilitation of finger. 28th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE), pp. 1–5. IEEE.

Davarzani, S., Ahmadi-Pajouh, M., & Ghafarirad, H. (2022). Design of sensing system for experimental modeling of soft actuator applied for finger rehabilitation. *Robotica*, 40(7), 2091-2111. doi:10.1017/S0263574721001533.

De la Tejera, J.A.; Bustamante-Bello, R.; Ramirez-Mendoza, R.A. y Izquierdo-Reyes, J. (2021) Systematic review of exoskeletons towards a general categorization model proposal. *Applied Science* Vol. 11 (1) 76. <https://doi.org/10.3390/app11010076>.

Domingo, M. G., y Pera, E. M. (2010). Diseño centrado en el usuario. Universitat Oberta de Catalunya. En: [https://www.exabyteinformatica.com/uoc/Informatica/Interaccion_persona_ordenador/Interaccion_persona_ordenador_\(Modulo_3\).pdf](https://www.exabyteinformatica.com/uoc/Informatica/Interaccion_persona_ordenador/Interaccion_persona_ordenador_(Modulo_3).pdf). (Consultado el 25/01/2022).

Fries, J., Spitz, P., Kraines, R., y Holman, H. (1980). Measurement of patient outcome in arthritis. *Arthritis Rheumatology*. Vol 23(2) 137-145 <https://doi.org/10.1002/art.1780230202>.

Henderson, J., Condell, J., Connolly, J., Kelly, D., Curran, K. (2011). Review of wearable sensor- based health monitoring glove devices for rheumatoid arthritis. *Sensors* Vol. 21(5), 1576.

Huelves Zarco, Á. M., Aguayo-González, F., Lama-Ruiz, J. R., y Soltero Sánchez, V. M. (2009). Diseño para la usabilidad de productos. *Técnica Industrial*, Vol 279, 47-53. En: <https://www.tecnicaindustrial.es/sumario-ti-279-febrero-de-2009-los-retos-de-l>. (Consultado el 29/01/2020).

ISO - ISO 9241-210:2019 - Ergonomics of human-system interaction. Part 210: Human-centred design for interactive systems. En: <https://www.iso.org/standard/77520.html> (Consultado el 29/01/2020).

Kang, B.B., In, H., Cho, K.: (2012). Force transmission in joint-less tendon driven wearable robotic Hand. In: *Proceedings 12th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS)*, pp. 1853–1858.

Lin, B.S., Lee, I.J., Chiang, P.Y., Huang, S.Y., Peng, C.W.: (2019). A modular data glove system for finger and hand motion capture based on inertial sensors. *Journal Medical and Biology Engineering*. Vol. 39(4), 532–540.

Luciano, M. C., y Herruzo, J. (1992). Some relevant components of adherence behavior. *Journal of Behavior Therapy and Experimental Psychiatry*, Vol 23(2), 117-124. [https://doi.org/10.1016/0005-7916\(92\)90009-8](https://doi.org/10.1016/0005-7916(92)90009-8).

Lu, X., Yang, Z., Chen, Y., y Wang, J. (2016). Structure design of a wearable device for hand rehabilitation. *9th International Symposium on Computational Intelligence and Design (ISCID)* Vol (1) 93-96. IEEE. <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=8555980> (Consultado el 04/09/2022).

Lu L, Zhang J, Xie Y, Gao F, Xu S, Wu X, Ye Z. (2020). Wearable Health Devices in Health Care: Narrative Systematic Review. *JMIR Mhealth Uhealth*. Vol 8(11): e18907. <https://doi.org/10.2196/18907>.

Majithia, V., Geraci, S.A. (2007). Rheumatoid arthritis: diagnosis and management. *The American Journal of Medicine*. Vol.120(11), 936–939.

Moya, R., y Magal-Royo T. (2019). Diseño y prototipado de un dispositivo de rehabilitación para la artritis reumatoide de mano. *Tsantsa. Revista de Investigaciones artísticas*, Vol (7), 233-240. En: <https://publicaciones.ucuenca.edu.ec/ojs/index.php/tsantsa/article/view/2934> (Consultado el 23/01/2020).

Moya-Jiménez, R., Magal-Royo, T., Flores, M., & Caiza, M. (2023). Design and validation of an exoskeleton for hand rehabilitation in adult patients with rheumatoid arthritis. *Proceedings of SAI Intelligent Systems Conference* Ed. Springer, Cham 399-412. https://doi.org/10.1007/978-3-031-16078-3_27.

Moya-Jiménez, R., Magal-Royo, T., Ponce, D., Flores, M., Caiza, M.: (2020). Hand exoskeleton design for the rehabilitation of patients with rheumatoid arthritis. In: *Rodríguez Morales, G., Fonseca C., E.R., Salgado, J.P., Pérez-Gosende, P., Orellana Cordero, M., Berrezueta, S. (eds.) TICEC 2020. CCIS*, Vol. 1307, pp. 12–21. Springer, Cham https://doi.org/10.1007/978-3-030-62833-8_2.

Moya-Jiménez, R., Magal-Royo, T.: (2020). Diseño y prototipado de un dispositivo de rehabilitación para la artritis reumatoide de mano con técnicas de prototipado rápido. *Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologías de Informação E33*, pp.152–163.

Moya-Jiménez, R., y Magal-Royo, T. (2020). Diseño y prototipado de un dispositivo de rehabilitación para la artritis reumatoide de mano con técnicas de prototipado rápido. *Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologías*

de Informação, Vol (33) pp.152-163. En: <http://www.risti.xyz/issues/ristie33.pdf> ISSN: 1646-9895.

Moya-Jiménez, R., Magal-Royo, T., Ponce, D. (2021): Tecnologías digitales innovadoras para el diseño de exoesqueletos para la mano aplicados en la rehabilitación de pacientes con artritis crónica. In: Proceedings INNODOCT/20. International Conference on Innovation, Documentation and Education, pp. 537–543. Editorial Universitat Politècnica de València. <https://doi.org/10.4995/INN2020.2020.11866>

Norman, D. A. (2002). The design of everyday things. Nueva York: Basic Books. En: <http://kowym.com/wp-content/uploads/2018/08/The-Design-of-Everyday-Things-Don-Norman.pdf> (Consultado el 25/01/2020).

Vélez-Guerrero, M.A.; Callejas-Cuervo, M.; Mazzoleni, S. (2021). Integration and Testing of a High Torque Servo-Driven Joint and Its Electronic Controller with Application in a Prototype Upper Limb Exoskeleton. Sensors Vol. 21, 7720. <https://doi.org/10.3390/s21227720>

Viaux, C.G.G.: (2007) Penetración de las Tecnologías de la Información en las Realidades Hospitalarias de los Países Latinoamericanos y del Caribe. In: Müller-Karger, C., Wong, S., La Cruz, A. (eds.) IV Latin American Congress on Biomedical Engineering, Vol. 18. https://doi.org/10.1007/978-3-540-74471-9_263.

Evaluación con usuarios



CAPÍTULO 6

ARTH_aid
Exo Glove

6.1. Introducción

Este capítulo se enfoca en describir los resultados finales obtenidos a través de pruebas realizadas con pacientes del sistema de rehabilitación de atrofia muscular de la mano mediante el exoesqueleto adaptado ARTH-aid ExoGlove System. Se ha aplicado una metodología exploratoria y descriptiva, que incluyó la selección de pacientes, la definición de criterios de evaluación basados en dimensiones que agruparon los resultados de las preguntas formuladas desde el punto de vista del usuario y el tratamiento estadístico de los datos. La encuesta de satisfacción del usuario adaptada para evaluar el prototipo final ha permitido validar tanto los aspectos funcionales como tecnológicos del sistema. Los resultados obtenidos han permitido elaborar conclusiones y plantear investigaciones futuras en la tesis.

El fisioterapeuta a cargo de los pacientes con patologías artríticas en las manos verificadas fue Sr. Luis Felipe Gómez quien facilitó el consentimiento por escrito por su parte y por la dirección de la residencia Santa Catalina Labouré, y facilitó información valiosa sobre los elementos de ajuste textiles a la mano, y estos datos permitieron realizar adaptaciones preliminares en el sistema de sujeción y portabilidad.

En el diseño de las encuestas iniciales se planteó la necesidad de crear dos grupos diferenciados que permitieran abordar la evaluación desde dos puntos de vista. La primera encuesta de carácter exploratorio se centró en el usuario experto con un perfil sanitario como fisioterapeutas, médicos o cuidadores de personas con problemas de artrosis, todos ellos involucrados en las tareas de control y seguimiento de la enfermedad a nivel sanitario. En el caso de las encuestas con el fisioterapeuta del centro y los médicos del centro se realizó una evaluación respecto al sistema desde la funcionalidad, con lo cual este grupo-experto permitió brindar una valoración clínica del ARTH-aid ExoGlove System y la usabilidad. Los resultados de esta primera encuesta preliminar analizada en el capítulo 5 permitió mejorar aspectos funcionales y tecnológicos para obtener el prototipo final del ARTH-aid ExoGlove System.

Paralelamente se diseñó una encuesta médica de seguimiento de paciente siguiendo el modelo cuestionario HAQ (Health Assessment Questionnaire) para el control semanal de los avances obtenidos de las pruebas realizadas a cada paciente con el exoguante que permitiera ver los avances en el uso del ARTH-aid ExoGlove System en pacientes finales. Las encuestas se complementaron con una serie de entrevistas personales que ayudaron a comprender aspectos relacionados con el estado de los pacientes crónicos y su evolución.

Las encuestas finales se realizaron en el año 2021 con un grupo de 30 pacientes del Hogar de Ancianos SantaCatalina Labouré de la ciudad de Quito, Ecuador con el objetivo de validar el exoesqueleto ARTH-aid ExoGlove System dentro la metodología de rehabilitación asistida propuesta, y analizar el impacto de su uso en los pacientes finales. Paralelamente los pacientes estuvieron monitorizados y controlados tanto por los médicos como por los terapeutas que realizaron tareas de retroalimentación en el proceso de adaptación de las sesiones de rehabilitación mediante ARTH-aid ExoGlove System ya que algunos sufrieron COVID-19, otros fueron dados de baja y otros desarrollaron nuevas patologías médicas que modificaron el calendario de las actuaciones planteadas en el inicio.

Se realizaron varias sesiones de entrenamiento previo para verificar el ajuste y comodidad del

exoguante en los pacientes que iban a pasar las pruebas finales mediante una serie de ejercicios terapéuticos relacionados con el movimiento de flexión de los dedos.

Las sesiones de entrenamiento, pruebas y encuestas finales realizadas con pacientes, se realizaron durante cinco semanas consecutivas para evaluar el impacto y avances en la mejora de la movilidad de la mano. Por tanto, las fases desarrolladas fueron las siguientes; fase de selección y recolección de la información de los pacientes seleccionados (1 semana), fase de ejecución y seguimiento de las terapias seleccionados por los terapeutas y recolección de las mediciones obtenidas (3 semanas), fase de realización de la encuesta como control de verificación del impacto en el uso del ARTH-aid ExoGlove System (1 semana) y fase la verificación de datos y tratamiento estadístico (2 semanas).

6.2. Hipótesis planteadas sobre las encuestas de satisfacción final del usuario o paciente

En esta fase de la tesis se ha considerado relevante establecer una serie de hipótesis específicas orientadas a evaluar y validar la satisfacción e impacto en el uso del ARTH-aid ExoGlove System tanto en pacientes como en profesionales del sector que sirviera de complemento adicional a las hipótesis iniciales planteadas en la tesis y más centrada en el impacto de uso de las metodologías aplicadas al DAO y PR en la creación mismo de los prototipos.

Estas nuevas hipótesis focalizadas en el diseño del dispositivo van a permitir evaluar la madurez del prototipo final para ser comercializado e incluso desarrollar una futura solicitud de modelo de utilidad en la Oficina de Patentes y marcas de Ecuador. Por ello se plantearon las siguientes hipótesis:

- Hipótesis 1: ¿El paciente considera que el dispositivo ARTH-aid ExoGlove mejora su calidad de vida?
- Hipótesis 2: ¿El paciente considera que el dispositivo ARTH-aid ExoGlove le ayuda en la mejora de los movimientos de los dedos y las manos?
- Hipótesis 3: ¿El terapeuta considera que el dispositivo ARTH-aid System mejora la calidad de vida del paciente?
- Hipótesis 4: ¿El terapeuta considera que el dispositivo ARTH-aid ExoGlove ayuda al paciente en la mejora de los movimientos de los dedos y las manos?

6.3. El Hogar Santa Catalina Labouré

Las pruebas realizadas con usuarios finales se realizaron en el centro asistencial y de acogida para ancianos del Hogar Santa Catalina Labouré ubicado en Quito, Ecuador. Es una organización dirigida por las hermanas de la caridad de San Vicente de Paúl, que se dedica al cuidado del adulto mayor desde su fundación en 1988. La residencia dispone de 50 pacientes en total y cuenta con 35 colaboradores que se desempeñan en diferentes áreas: Equipo técnico (Trabajadora social, Psicóloga, nutricionista, terapeuta físico y ocupacional) Personal administrativo, enfermería (cuidadores) y área de cocina. Dentro del hogar existe una población de ancianos con edades comprendidas entre los 60 y 110 años. Respecto a las instalaciones, existe un área destinada a la rehabilitación y cuidado médico que incluye un lugar concreto para el tratamiento de pacientes con artritis reumatoide estudio del informe.



Imagen 95: Vista panorámica de la residencia.
Fuente: (Elaboración propia, 2021)



Imagen 96: Entrada del Hogar de Ancianos.
Fuente: (Elaboración propia, 2021).

6.4. Definición de usuarios

La selección de la población participante es un elemento clave para alcanzar los objetivos de valoración de un producto. Para esto, fue necesario conocer las características neuromotoras y las limitaciones motrices de la mano de las personas mayores como pacientes que iban a usar el exoguante y que posteriormente debían contestar a las preguntas de la encuesta.

Para focalizar al grupo de pacientes se obtuvo el permiso de la residencia Santa Catalina Labouré en Quito, Ecuador para tener un acercamiento a los adultos mayores que fueron parte de la investigación. Los terapeutas consideraron que el ARTH-aid ExoGlove podía ser utilizado tanto por

pacientes en estado inicial de la enfermedad como por pacientes con un estado de la enfermedad más avanzado que tuvieran o no dependencia de medicamentos y que sus constantes cognitivas fueran óptimas para contestar adecuadamente a las preguntas.

Por tanto, los participantes fueron seleccionados a partir de la recomendación de los médicos y terapeutas que asisten diariamente a los pacientes. Para esto, se consideró el informe clínico de cada paciente y se realizó un proceso que fue descrito en base a una serie de criterios médicos que fueron: pacientes con amputaciones, pacientes con deformaciones muy pronunciadas en sus articulaciones, pacientes cuya movilidad se encuentre dentro de un rango crítico y pacientes inmovilizados, pacientes con lesiones severas de mano o muñeca y pacientes en estado cognitivo deteriorado.

Desde el punto estadístico y para el tratamiento de datos, se determinó el tamaño de la muestra para una población final, es decir el número de pacientes mínimo para obtener datos estadísticos significativos de las pruebas en base a la siguiente fórmula:

Tamaño de la muestra población finita:

$$n = \frac{z^2 pqN}{\varepsilon^2 (N-1) + z^2 pq}$$

Error muestral:

$$\varepsilon = \left(\frac{z^2 pq}{n} * \frac{N-n}{N-1} \right)^{\frac{1}{2}}$$

n= tamaño de la muestra

N= tamaño de la población= 70

p=q= probabilidades =50%

z= nivel de confianza del 95%

e= 0.05% de margen de error

n = 17.58 ≈ 18 *pacientes*

Se determinó que el número mínimo de pacientes debía ser de 18 para obtener un nivel de confianza del 95%, ampliamente superado ya que la muestra final fue de 30 usuarios procesados.

Una vez seleccionados los pacientes se generó una base de datos y se facilitó un número de identificación del paciente para su monitorización terapéutica y médica durante todas las fases del proyecto. Este número de identificación sirvió para establecer un anonimato controlado de las pruebas y un seguimiento de la evaluación terapéutica paralela a los informes médicos disponibles que son de carácter privado.

La información cada paciente procesada para las encuestas se centró exclusivamente en la edad, género y años padeciendo la enfermedad y la intensidad de los dolores según la historia clínica disponible en el centro. La toma de datos a los pacientes seleccionados durante las sesiones de uso del sistema fue recopilada en un diario de seguimiento para cada sesión.



Imagen 97: Sala de pacientes
Fuente: (Elaboración propia, 2021).

Para el análisis y verificación de la evolución del paciente durante el desarrollo de las cinco semanas que duró el proceso, los terapeutas utilizaron el cuestionario HAQ (Health Assessment Questionnaire) que permite la verificación y control de aspectos funcionales del usuario en términos generales incluyendo sobre todo la movilidad en general y el uso de las manos. El test ofrece una serie de preguntas agrupadas en seis áreas: vestirse y asearse, levantarse, comer, alcanzar y coger objetos con la mano, etc.

Este cuestionario que fue desarrollado en 1978 en la Universidad de Stanford y es una técnica de medición que analiza la capacidad funcional de un paciente con problemas de movilidad de miembros superiores incluyendo la artritis reumatoide. La puntuación final del HAQ es una media de las 6 áreas por lo que su recorrido varía entre 0 (dependiente) y 3 (independiente). Por tanto, la escala aplicada en las preguntas se situó entre los valores 0: Incapaz de hacerlo (dependiente), el valor 1: Con mucha dificultad, el valor 2: Con alguna dificultad y el valor 3: Sin dificultad (independiente), (Fries et al., 1980).

Se generó una encuesta adaptada de 17 preguntas basada en la encuesta original HAQ que permitió evaluar la evolución y seguimiento del paciente a nivel terapéutico de forma paralela a la encuesta de satisfacción realizado sobre el exogante. Estos datos no fueron procesados por el investigador debido a que este sistema se controla desde el centro como parte asistencial y médica del paciente de manera independiente al desarrollo de la encuesta de satisfacción realizada.

Tabla 15: Adaptación de la encuesta tipo HAQ para el control y seguimiento terapéutico del paciente.

		Durante la semana ha sido usted capaz de:				
Vestirse y asearse	1	¿Vestirse solo incluyendo abrocharse los botones y atarse los cordones de los zapatos?				
		Incapaz de hacerlo (dependiente)	Con alguna dificultad	Con mucha dificultad	Sin dificultad (independiente)	
		0	1	2	3	
	2	¿Ducharse y lavar su cabello / cabeza?				
	Incapaz de hacerlo (dependiente)	Con alguna dificultad	Con mucha dificultad,	Sin dificultad (independiente)		
	0	1	2	3		
	3	¿Lavarse y secarse todo el cuerpo?				
	Incapaz de hacerlo (dependiente)	Con alguna dificultad	Con mucha dificultad,	Sin dificultad (independiente)		
	0	1	2	3		
	4	¿Utilizar anillos? Permite determinar si ha se generado leve hinchazón				
	Incapaz de hacerlo (dependiente)	Con alguna dificultad	Con mucha dificultad,	Sin dificultad (independiente)		
	0	1	2	3		
		Durante la semana, ¿ha sido usted capaz de...				
Levantarse	5	¿Levantarse de una silla sin brazos?				
		Incapaz de hacerlo	0	1	2	3 Sin dificultad
	6	¿Acostarse y levantarse de la cama?				
		Incapaz de hacerlo	0	1	2	3 Sin dificultad
		Durante la semana, ¿ha sido usted capaz de...				
Comer	7	¿Cortar un filete de carne?				
		Incapaz de hacerlo	0	1	2	3 Sin dificultad
	8	¿Abrir una caja de cartón o un paquete de comida?				
		Incapaz de hacerlo	0	1	2	3 Sin dificultad
	9	¿Agarrar una taza o servirse la bebida?				
		Incapaz de hacerlo	0	1	2	3 Sin dificultad
		Durante la semana, ¿ha sido usted capaz de...				
Alcanzar objetos	10	¿Alcanzar un objeto pesado de una estantería elevada?				
		Incapaz de hacerlo	0	1	2	3 Sin dificultad
	11	¿Agacharse y recoger ropa del suelo?				
		Incapaz de hacerlo	0	1	2	3 Sin dificultad
	12	¿Abrir tarros?				
		Incapaz de hacerlo	0	1	2	3 Sin dificultad
		Durante la semana, ¿ha sido usted capaz de...				
Presión en el agarre de objetos	13	¿Abrir y cerrar los grifos?				
		Incapaz de hacerlo	0	1	2	3 Sin dificultad
	14	¿Sujetar llaves de cerraduras?				
		Incapaz de hacerlo	0	1	2	3 Sin dificultad
	15	¿Exprimir una toalla?				

	Incapaz de hacerlo	0	1	2	3	Sin dificultad
Durante la semana, ¿ha sido usted capaz de...						
	16	¿Hacer tareas de casa como barrer o lavar los platos?				
Otras	Incapaz de hacerlo	0	1	2	3	Sin dificultad
	17	¿Presionar botones del control remoto u otro dispositivo?				
	Incapaz de hacerlo	0	1	2	3	Sin dificultad

Fuente: Adaptado de (Fries et al., 1980).

6.5. Sesiones de ejercicios terapéuticos desarrollados con el ARTH-aid System

A nivel de rehabilitación, las sesiones de tratamiento terapéutico con el paciente requieren un control en la medición, un control postural y de esfuerzos que debe realizarse periódicamente. Por tanto, las sesiones de rehabilitación se realizaron con una frecuencia de dos a tres veces por semana y con una duración aproximada por sesión de entre cinco a diez minutos, dependiendo de la problemática de la mano y del estado del paciente. En la imagen 98 pueden verse algunos de los ejercicios rehabilitadores realizados por los pacientes para recuperar la movilidad de los dedos y que sobre todo permitan disminuir el dolor de las articulaciones. Estos mismos ejercicios se realizaron posteriormente con el ARTH-aid ExoGlove System para seguir con las mismas pautas básicas contrastables.

Estos ejercicios fueron determinados en base a la prescripción facultativa del fisioterapeuta. Según la Asociación Estadounidense de Terapia Física (APTA), los ejercicios terapéuticos se definen como la aplicación sistemática de movimientos físicos, posturas o actividades diseñadas para 1) remediar o prevenir el deterioro, 2) mejorar la función y 3) mejorar la condición física. Siempre se recurrirá a los más sencillos de ejecutar por los usuarios directos.

Principalmente, se recomiendan los ejercicios que favorecen a fortalecer el tono muscular, junto con ejercicios de rango de movimiento que ayuden a mejorar la flexibilidad y los de bajo impacto para mantener las articulaciones saludables y con menos rigidez. De forma análoga, existen diferentes ejercicios para la recuperación del movimiento de la mano y que van a formar parte del estiramiento inicial de cada sesión. Algunos de ellos son los observados en los ejemplos.



Imagen 98: Ejercicios de fuerza.
Fuente: (Elaboración propia, 2021)

La separación de los dedos a pesar de ser un ejercicio de aducción-abducción, en el cual no se genera resistencia mediante los cables tensores, es incluido porque demanda de cierto grado de esfuerzo por parte del paciente.



Imagen 99: Ejercicios (1) de estiramiento.
Fuente: (Elaboración propia, 2021).

La activación del movimiento es autónoma, es decir el usuario puede mover libremente los dedos una vez se coloque el exoesqueleto, sin embargo, el movimiento se proporciona de acuerdo con las indicaciones del fisioterapeuta. Las tareas generales en cada terapia son:

- Estiramiento.
- Prueba de fuerza.

El fin de estos ejercicios es aprovechar la resistencia que generan los cables sensores en las falanges de los dedos y coadyuvan a la recuperación de la movilidad poliarticular progresivamente.



Imagen 100: Ejercicios (2) de estiramiento.
Fuente: (Elaboración propia, 2021).

El ARTH-aid ExoGlove por sí mismo puede generar resistencia de flexión-extensión en ciertos pacientes, y abducción-aducción dependiendo del estado inicial de la mano de la persona. De manera complementaria si se considera que el objetivo es disminuir el dolor y aumentar su fuerza en un período de 16 semanas, existirá un punto en el que se necesite de ayudas como bandas o pelotas para la rehabilitación que eleven la dificultad de los ejercicios. Por tal motivo en la imagen 101 se presentan algunos de los ejercicios que serán de utilidad dentro del desarrollo de esta fase y que contribuirán a un completo fortalecimiento de todas las direcciones.



Imagen 101: Ejercicios complementarios de fuerza.
Fuente: (Elaboración propia, 2021).

Se inició con los ejercicios de oposición debido a que la flexión y extensión del pulgar es más fácil de identificar cuando se intenta tocar la base del dedo meñique. Con este movimiento se observa la flexión activa de las articulaciones metacarpofalángica del pulgar.



Imagen 102: Verificación de usabilidad

Fuente: (Elaboración propia, 2021).

A partir de la segunda semana hasta la semana 5 se realizaron los ejercicios indicados en la Tabla 15, estos fueron elegidos por el fisioterapeuta.

Tabla 16: Ejemplo de plantilla de ejercicios semanal de rehabilitación.

Programa de rehabilitación					
Paciente ID			Semana ---/---/----		
Semana	Puño	Oposición	Estiramiento	Presión	Otros
1	-	-	-	-	-
2	x	x			x
3	x			x	
4			x		
5	x	x			x

Fuente: (Elaboración propia, 2021).

6.6. Desarrollo de las encuestas sobre la satisfacción final de uso del ARTH-aid System

Para la recopilación de la información facilitada por los expertos y pacientes del ARTH-aid System se establecieron dos tipologías de evaluación:

- Entrevistas con expertos de carácter abierto mediante la retroalimentación durante las fases de mejora y validación de los prototipos creados.
- Cuestionarios adaptados con preguntas cerradas y abiertas basadas en la satisfacción del paciente y del grupo de expertos. Los cuestionarios se realizaron de manera individualizada y recoge información relacionada con el uso y funcionalidad final del sistema en general y en el uso de guante ARTH-aid ExoGlove relacionados con la flexión, presión y la comodidad entre otros aspectos (Proulx et al., 2021).

6.7. Encuestas realizadas a los terapeutas del centro

Como se ha indicado en el capítulo 5, previo a las encuestas finales orientado a los usuarios finales del sistema se realizaron entrevistas personales y una encuesta preliminar a los sanitarios (terapeutas y médicos del centro asistencial que sirvió para mejorar el prototipo final creado del ARTH-aid System y del ARTH-aid ExoGlove.

Posteriormente se realizó una nueva encuesta final con los terapeutas de la residencia orientada a valorar la satisfacción del usuario centrados en el uso y funcionalidad final del sistema en general ARTH-aid

System, en el uso de guante ARTH-aid ExoGlove y en el impacto de la rehabilitación desde el punto de vista del profesional que utiliza el sistema en sus pacientes y que serviría para su comercialización futura. Por tanto, las preguntas fueron agrupadas en tres variables para facilitar el análisis de los datos obtenidos:

- Usabilidad y Facilidad de uso del ARTH-aid ExoGlove (preguntas del 1 al 5).
- Usabilidad y Facilidad de uso del ARTH-aid System (preguntas del 6 al 10).
- Impacto en la rehabilitación (preguntas del 11 al 14).
- Recomendación y satisfacción de uso general (preguntas del 15 al 16).

La escala de valoración utilizada ha sido de Muy en desacuerdo (0) y En desacuerdo (1) fueron asociadas en una categoría. El mismo procedimiento se realizó con las valoraciones De acuerdo (4) y Muy de acuerdo (5). Para la categoría Neutro se asignó el valor de 3.

Las encuestas realizadas a los cuatro usuarios expertos fueron tratados estadísticamente en SPSS© para crear las tablas de descriptivas y de frecuencias.

6.7.1. Usabilidad y Facilidad de uso del ARTH-aid Glove en terapeutas

Este bloque de preguntas hace referencia a la Usabilidad y Facilidad detectada por los terapeutas en el uso del exoguante ARTH-aid Glove, durante las sesiones de rehabilitación con sus pacientes.

Es imperativo valorar el punto de vista técnico de los terapeutas en el uso del exoguante con preguntas relacionadas a la facilidad de colocación y uso del guante, con una relación a los hilos tensores y su utilidad. Así mismo, el valor que indiquen sobre la frecuencia en el uso del ExoGlove puede determinar el nivel de eficacia contrastada en base a la contestación de la misma pregunta por parte de los pacientes.

Tabla 17: Usabilidad y Facilidad de uso del ARTH- ExoGlove en terapeutas

1	Que los pacientes utilicen el exoguante con frecuencia me parece efectivo (La puntuación de 3 indica un valor neutro)
	MUY EN DESACUERDO 1 2 3 4 5 MUY DE ACUERDO
2	La calidad de los movimientos con el -AID ExoGlove es buena (La puntuación de 3 indica un valor neutro)
	MUY EN DESACUERDO 1 2 3 4 5 MUY DE ACUERDO
3	La colocación del exoguante me resulta sencillo (La puntuación de 3 indica un valor neutro)
	MUY EN DESACUERDO 1 2 3 4 5 MUY DE ACUERDO
4	Considero que los materiales del ARTH-AID ExoGlove son de buena calidad y duraderos (La puntuación de 3 indica un valor neutro)
	MUY EN DESACUERDO 1 2 3 4 5 MUY DE ACUERDO
5	Los hilos tensores del ARTH-AID ExoGlove me parecen útiles (La puntuación de 3 indica un valor neutro)
	MUY EN DESACUERDO 1 2 3 4 5 MUY DE ACUERDO

Fuente: (Elaboración propia, 2021).

Procesamiento de los datos

Tabla 18: Datos descriptivos sobre la Usabilidad y Facilidad de uso del ARTH- ExoGlove en terapeutas.

	N	Media	Desv Std	Mínimo	Máximo
P1. Que los pacientes utilicen el exoguante con frecuencia me parece efectivo	4	3.50	.58	Neutral	De acuerdo
P2. La calidad de los movimientos con el ARTH-AID ExoGlove es buena	4	4.00	.00	De acuerdo	De acuerdo
P3. La colocación del exoguante me resulta sencillo	4	3.50	1.00	En desacuerdo	De acuerdo
P4. Considero que los materiales del ARTH-AID ExoGlove son de buena calidad y duraderos	4	3.75	.50	Neutral	De acuerdo
P5. Los hilos tensores del ARTH-AID ExoGlove me parecen útiles	4	2.75	.96	En desacuerdo	De acuerdo
N Válido	4				
N perdido	0				

Fuente: (Elaboración propia, 2022).

La opinión de los terapeutas con relación a las preguntas sobre la usabilidad y facilidad en el uso del exoguante durante las sesiones de rehabilitación (preguntas P1, P2, P3, P4 y P5) permitió obtener una serie de valoraciones respecto a las condiciones de adaptación y funcionalidad del guante en el que la pregunta más valorada fue la P2 relacionada la calidad de los movimientos controlados por el guante considerado por los rehabilitadores como un aspecto muy positivo a la hora de ayudar a los pacientes a realizar los movimientos consignados por los expertos durante las sesiones de rehabilitación programada. Otro aspecto considerado por los terapeutas fue la valoración de la pregunta P4 y corresponde a la apreciación de los materiales textiles utilizados en la creación del exoguante que consideran de calidad en base a su acabado superficial y posible durabilidad de uso por numerosos pacientes en el futuro.

6.7.2. Usabilidad y Facilidad de uso del ARTH-aid ExoGlove System en terapeutas

Este bloque de preguntas hace referencia a la usabilidad y a la facilidad de uso del sistema en su globalidad (preguntas P6, P7, P8, P9 y P10) durante las sesiones de rehabilitación con sus pacientes. Se considera importante conocer el punto de vista técnico de los terapeutas en el uso del sistema en base a preguntas orientadas a considerar el dispositivo rehabilitados como práctico, seguro y fácil de usar. La usabilidad está descrita por la eficiencia con la que el usuario puede realizar la tarea con el producto en relación con el entendimiento para entender el sistema e interactuar con el producto.

Tabla 19: Usabilidad y Facilidad de uso del ARTH-AID System.

6	Considero que el acceso a la aplicación del ARTH-AID System es rápida (La puntuación de 3 indica un valor neutro)						
	MUY EN DESACUERDO	1	2	3	4	5	MUY DE ACUERDO
7	Utilizar el ARTH-AID System me parece práctico (La puntuación de 3 indica un valor neutro)						
	MUY EN DESACUERDO	1	2	3	4	5	MUY DE ACUERDO
8	Me siento seguro al usar el ARTH-AID System (La puntuación de 3 indica un valor neutro)						
	MUY EN DESACUERDO	1	2	3	4	5	MUY DE ACUERDO
9	Considero que el ARTH-AID System es sencillo de entender (La puntuación de 3 indica un valor neutro)						
	MUY EN DESACUERDO	1	2	3	4	5	MUY DE ACUERDO
10	La información que encuentro en la aplicación parece estar ordenada (La puntuación de 3 indica un valor neutro)						
	MUY EN DESACUERDO	1	2	3	4	5	MUY DE ACUERDO

Fuente: (Elaboración propia, 2021).

Procesamiento de los datos

Debido al número reducido de participantes en la encuesta se ha considerado los valores de manera referencial y en base a tablas descriptivas de tipo general.

Tabla 20: Datos descriptivos sobre la Usabilidad y Facilidad de uso del ARTH-System en terapeutas.

	N	Media	Desv Std	Mínimo	Máximo
P6. Considero que el acceso a la aplicación del ARTH-AID System es rápida	4	4.00	.00	De acuerdo	De acuerdo
P7. Utilizar el ARTH-AID System me parece práctico	4	3.50	.58	Neutral	De acuerdo
P8. Me siento seguro al usar el ARTH- AID System	4	4.00	.00	De acuerdo	De acuerdo
P9. Considero que el ARTH-AID System es sencillo de entender	4	4.00	.00	De acuerdo	De acuerdo
P10. La información que encuentro en la aplicación parece estar ordenada	4	4.00	.00	De acuerdo	De acuerdo
N Válido	4				
N perdido	0				

Fuente: (Elaboración propia, 2022).

En este bloque de preguntas, los terapeutas establecieron una misma valoración para todas ellas menos la P7 que se orientaba a definir al sistema global no al exogante como práctico. No obstante, la evaluación positiva del resto de los valores con una puntuación de 4 sobre 5 validan el sistema en su totalidad por parte de los profesionales.

6.7.3. Impacto en la rehabilitación

Este bloque de preguntas hace referencia al impacto percibido por los terapeutas en el uso del ARTH-ExoGlove, durante las sesiones de rehabilitación con sus pacientes. Se considera importante valorar el punto del impacto desde el posible efecto a largo plazo positivo en el programa de rehabilitación que tiene en las actividades diarias de los pacientes, esto incluye mejorar la funcionalidad física, mejorar la calidad de vida por medio del uso del producto, reducir una probable discapacidad, prevenir algún tipo de lesión, mejorar su salud mental y emocional.

Tabla 21: Impacto en la rehabilitación mediante el uso del ARTH-ExoGlove en terapeutas

11	Considero que con el uso del ARTH-AID ExoGlove ha disminuido el dolor de las manos de los pacientes <i>(La puntuación de 3 indica un valor neutro)</i>						
	MUY EN DESACUERDO	1	2	3	4	5	MUY DE ACUERDO
12	Para los pacientes ha sido fácil usar el ARTH-AID ExoGlove en las actividades cotidianas <i>(La puntuación de 3 indica un valor neutro)</i>						
	MUY EN DESACUERDO	1	2	3	4	5	MUY DE ACUERDO
13	Siento que el ARTH-AID ExoGlove es un aporte para las actividades de los pacientes <i>(La puntuación de 3 indica un valor neutro)</i>						
	MUY EN DESACUERDO	1	2	3	4	5	MUY DE ACUERDO
14	Ha mejorado el movimiento de flexión-extensión de los dedos de los pacientes <i>(La puntuación de 3 indica un valor neutro)</i>						
	MUY EN DESACUERDO	1	2	3	4	5	MUY DE ACUERDO

Fuente: (Elaboración propia, 2021).

Procesamiento de los datos

Debido al número reducido de participantes en la encuesta se ha considerado los valores de manera referencial y en base a tablas descriptivas de tipo general.

Tabla 22: Datos descriptivos sobre Impacto en la rehabilitación en el uso del ARTH- AID ExoGlove en terapeutas

	N	Media	Desv Std	Mínimo	Máximo
P11. Considero que con el uso del ARTH- AID ExoGlove ha disminuido el dolor de las manos de los pacientes	4	3.50	.58	Neutral	De acuerdo
P12. Para los pacientes ha sido fácil usar el ARTH- AID ExoGlove en las actividades cotidianas	4	3.25	.50	Neutral	De acuerdo
P13. Siento que el ARTH-AID ExoGlove es un aporte para las actividades de los pacientes	4	3.00	1.15	En desacuerdo	De acuerdo
P14. Ha mejorado el movimiento de flexión-extensión de los dedos de los pacientes	4	3.50	.58	Neutral	De acuerdo
N Válido	4				
N perdido	0				

Fuente: (Elaboración propia, 2021).

En este bloque de preguntas sobre el impacto analizado por los terapeutas en sus pacientes que utilizaron el guante las preguntas más valoradas fueron la P11 sobre la disminución del dolor y la P14 sobre la mejora de los movimientos de los dedos de la mano del paciente. La valoración más baja en este bloque se centraba en la valoración de la P13 en el que se percibe dudas o incertidumbre sobre el aporte del guante en las actividades del paciente. En referencia a esta última valoración se considera que las pruebas realizadas durante cinco semanas posiblemente no sean suficiente para valorar la efectividad real del guante en procesos artríticos avanzados o crónicos, pero esta pregunta puede contrastarse con el valor de la P14 en la que se indica que existe una mejora significativa en los movimientos de los dedos. De hecho, estas valoraciones se corroboran con los datos obtenidos antes las mismas preguntas con los pacientes.

Finalmente, se realizaron dos preguntas generales basadas en criterios de satisfacción general del usuario ante el uso del sistema y su recomendación para usarse de manera frecuente que fueron valoradas positivamente y que validan su posible comercialización en el futuro.

Tabla 23: Recomendación y satisfacción de uso general.

15	Recomendaría el uso del ARTH-AID System	<input type="checkbox"/> SÍ
		<input type="checkbox"/> NO
16	Continuaría con el uso del ARTH-AID ExoGlove	<input type="checkbox"/> SÍ
		<input type="checkbox"/> NO

6.8. Encuestas realizadas a pacientes

Las encuestas finales de satisfacción del paciente fueron programadas para ser realizadas al final de las cinco semanas de tratamiento y con una duración media por paciente de 15 minutos. El pase de las encuestas de satisfacción generada por los pacientes se analizó mediante el programa estadístico SPSS para obtener los valores más significativos de respuesta al impacto de uso del sistema en los pacientes.

Un total de 30 participantes (entre 65 y 104 años) participan en el estudio. Los datos del paciente relacionado con edad, sexo, edad y estado de la enfermedad fueron facilitados por el terapeuta a través del historial médico del paciente que permitió la selección final de la muestra genérica seleccionada (30 pacientes), 10 hombres y 20 mujeres. Los usuarios finales participan en todas las fases de evaluación. Los rangos de edad establecidos a priori en la encuesta fueron cuatro: 65-74/75-84/85-94/. 95-104.

Por otra parte, se verificó el agrupamiento inicial de cuatro rangos de edades para agruparse en tres determinados por la significatividad de los datos. Se disponía de un paciente mayor de 100 años y uno menor de 70 años cuyas valoraciones eran iguales o muy próximas a los rangos superior e inferior tratados.

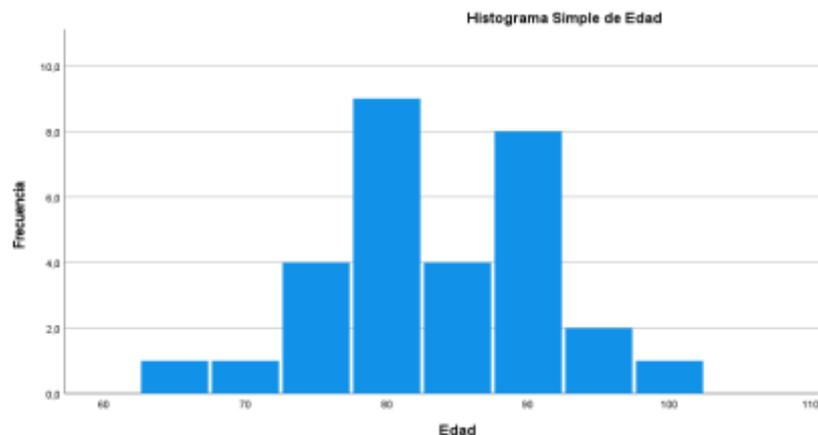


Imagen 103: Histograma de edades de los pacientes.

Fuente: (Elaboración propia, 2022).

Por tanto, se trabajó con los valores obtenidos de los percentiles que facilitaron los tres grupos de edad.

Tabla 24: Promedio de edad

Edad		
Media		83,27
Mediana		82,50
Moda		79,00
Desv. estándar		8,149
Percentiles	25	78,00
	50	82,50
	75	90,25

Fuente: (Elaboración propia, 2022).

La encuesta recopila las valoraciones de los pacientes respecto al ARTH-aid ExoGlove es decir en el guante, el sistema global y el impacto en la mejora de su enfermedad.

La escala de valoración utilizada ha sido de Muy en desacuerdo (0) y En desacuerdo (1) fueron asociadas en una categoría. El mismo procedimiento se realizó con las valoraciones De acuerdo (4) y Muy de acuerdo (5). Para la categoría Neutro se asignó el valor de 3.

Las encuestas realizadas a los pacientes fueron tratados estadísticamente en SPSS© para crear inicialmente para obtener las tablas de descriptivas y de frecuencias básicas de las preguntas realizadas. Para optimizar los resultados la escala inicial de valoración de cinco valores se redujo a tres niveles basados en la idea de acuerdo, neutro y desacuerdo.

En la primera fase se verificó la fiabilidad y significatividad de las preguntas en base al coeficiente de Cronbach y el omega para cada una, la fiabilidad de una pregunta se refiere a la consistencia de los resultados obtenidos al responderla. El coeficiente de Cronbach es una herramienta que se usa para medir la fiabilidad de una pregunta y se calcula mediante la correlación entre las respuestas de los participantes. Cuanto mayor sea el coeficiente de Cronbach, mayor será la fiabilidad de la pregunta. El omega es una medida utilizada para evaluar la significatividad de una pregunta. esta medida se basa en la correlación entre las respuestas de los participantes. Cuanto mayor sea el omega, mayor será la significatividad de la pregunta (Elosua y Zumbo, 2008). El resultado fue que todas las preguntas eran significativas y no había una diferencia entre ellas por lo que todas eran consideradas válidas para ser trabajadas de manera específica o de manera agrupada en forma de dimensiones.

También se realizó una valoración inicial de los resultados promedio obtenidos de todas las preguntas.

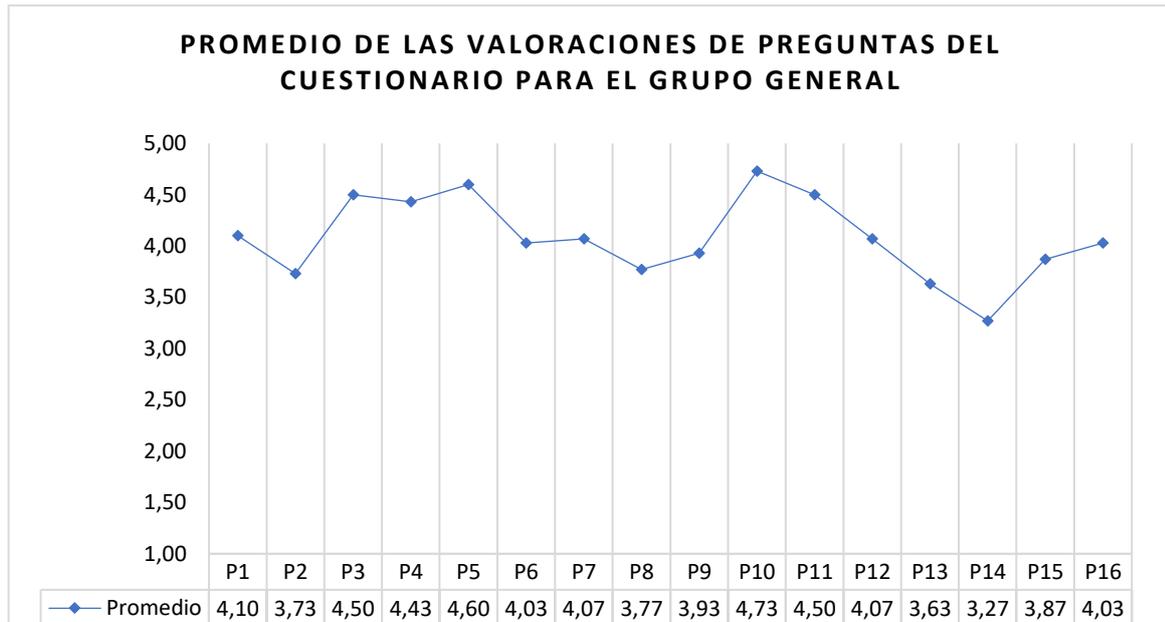


Imagen 104: Promedio de las valoraciones de preguntas del cuestionario para el grupo general.
Fuente: (Elaboración propia, 2022).

En base al gráfico obtenido sobre las valoraciones y promedios de las preguntas realizadas a los pacientes indican que el promedio general está por encima de 4 (de acuerdo Imagen 104).

Los valores más significativos se presentaron en este caso como el más bajo dentro del apartado de impactos en la rehabilitación con la pregunta 14 “*Me ha sido fácil usar el ARTH-AID ExoGlove en mis actividades cotidianas*” debido a la asociación del entendimiento del paciente con la cantidad de elementos presentes en el dispositivo. Y como el más alto en el apartado Usabilidad y Facilidad de uso del ARTH-AID System con la pregunta 10 “*Me siento seguro al usar el ARTH-AID System*” por la sensación de presión brindada por el material textil del guante.

Para una valoración en profundidad las preguntas y el resultado de las respuestas obtenidas por parte de los pacientes se agruparon para facilitar el análisis de los datos obtenidos en base a una serie de dimensiones:

- Usabilidad y Facilidad de uso del ARTH-aid ExoGlove (preguntas del 1 al 7).
- Usabilidad y Facilidad de uso del ARTH-aid System (preguntas del 8 al 12).
- Impactos en la rehabilitación (preguntas del 13 al 16).
- Recomendación y satisfacción de uso general (preguntas del 17 al 18).

6.8.1. Usabilidad y facilidad de uso del ARTH-aid ExoGlove en pacientes

Este bloque de preguntas se centra en la usabilidad y la facilidad de uso del ARTH-aid ExoGlove en pacientes adultos mayores con artritis, esto está en función en gran medida del diseño y construcción del dispositivo. Esto permitirá validar el prototipo final del exoguante creado en referencia a características de comodidad de uso y que sea fácil de ponerse y quitárselo. Esto verificará que el diseño responde a factores ergonómicos, permitiendo que los usuarios se sientan cómodos y seguros. Esto ayuda a mejorar la usabilidad al permitir que los usuarios realicen tareas que de otro modo no serían posibles.

Además, los valores que se indiquen sobre el uso del ARTH-aid ExoGlove determinará la facilidad de ajustar, ya que los pacientes con artritis adultos mayores pueden tener dificultades para adaptarse a los ajustes manuales. Si el exoesqueleto es demasiado complicado para los usuarios, es probable que no se use adecuadamente. Por lo tanto, es importante mencionar que el guante sea fácil de ajustar y configurar de acuerdo con las necesidades individuales del usuario.

Finalmente, el nivel de eficacia contrastado en base a la contestación de las preguntas por partes de los pacientes en función de la usabilidad y facilidad de uso también depende del soporte y entrenamiento proporcionados por los terapeutas. Esto es especialmente importante para que los pacientes con artritis adultos mayores, que pueden tener dificultades para comprender las instrucciones de uso estén apoyados por los terapeutas con el acompañamiento del entrenamiento.

Tabla 25: Usabilidad y facilidad de uso del ARTH-aid ExoGlove

1	Me he sentido cómodo/a usando el ARTH-AID ExoGlove (La puntuación de 3 indica un valor neutro)								
	MUY EN DESACUERDO	1	2	3	4	5	MUY DE ACUERDO		
2	Utilizar el exoguante con frecuencia me parece efectivo (La puntuación de 3 indica un valor neutro)								
	MUY EN DESACUERDO	1	2	3	4	5	MUY DE ACUERDO		
3	La calidad de los movimientos con el ARTH-AID ExoGlove es buena (La puntuación de 3 indica un valor neutro)								
	MUY EN DESACUERDO	1	2	3	4	5	MUY DE ACUERDO		
4	La colocación del exoguante me resulta sencillo (La puntuación de 3 indica un valor neutro)								
	MUY EN DESACUERDO	1	2	3	4	5	MUY DE ACUERDO		
5	Considero que los materiales del ARTH-AID ExoGlove son de buena calidad y duraderos (La puntuación de 3 indica un valor neutro)								
	MUY EN DESACUERDO	1	2	3	4	5	MUY DE ACUERDO		
6	El ARTH-AID ExoGlove se adapta sin problemas a mi mano (La puntuación de 3 indica un valor neutro)								
	MUY EN DESACUERDO	1	2	3	4	5	MUY DE ACUERDO		
7	Los hilos tensores del ARTH-AID ExoGlove me parecen útiles (La puntuación de 3 indica un valor neutro)								
	MUY EN DESACUERDO	1	2	3	4	5	MUY DE ACUERDO		

Fuente: (Elaboración propia, 2021).

Procesamiento de los datos

El ARTH-aid ExoGlove presenta innovación revolucionaria para la rehabilitación de manos para el adulto mayor. Este guante ofrece una amplia gama de beneficios para el usuario, incluyendo la facilidad de uso y usabilidad. Esta tabla presenta los resultados de una investigación sobre el procesamiento de datos para evaluar la usabilidad y facilidad de uso del ARTH-aid ExoGlove para la rehabilitación de manos, contiene datos recopilados de una variedad de evaluaciones realizadas por expertos y usuarios. Esta tabla también proporciona información valiosa sobre cómo el ARTH-aid ExoGlove puede mejorar la calidad de vida de los adultos mayores.

Tabla 26: Usabilidad y facilidad de uso del ARTH-aid ExoGlove.

	P1. Me he sentido cómodo/a usando el ARTH-AID ExoGlove. Usabilidad y Facilidad de uso del ARTH-AID ExoGlove	P2. Utilizar el exoguante con frecuencia me parece efectivo. Usabilidad y Facilidad de uso del ARTH-AID ExoGlove.	P3. La calidad de los movimientos con el ARTH-AID ExoGlove es buena. Usabilidad y Facilidad de uso del ARTH-AID ExoGlove.	P4. La colocación del exoguante me resulta sencillo. Usabilidad y Facilidad de uso del ARTH-AID ExoGlove.	P5. Considero que los materiales del ARTH-AID ExoGlove son de buena calidad y duraderos. Usabilidad y Facilidad de uso del ARTH-AID ExoGlove.	P6. El ARTH-AID ExoGlove se adapta sin problemas a mi mano. Usabilidad y Facilidad de uso del ARTH-AID ExoGlove.	P7. Los hilos sensores del ARTH-AID ExoGlove me parecen útiles. Usabilidad y Facilidad de uso del ARTH-AID ExoGlove.
N. Válido	30	30	30	30	30	30	30
Perdidos	0	0	0	0	0	0	0
Media	4.10	3.73	4.50	4.43	4.60	4.03	4.07
Desv Std	0.88	1.05	0.78	0.90	0.56	0.96	0.69
Mínimo	En desacuerdo	En desacuerdo	En desacuerdo	En desacuerdo	Neutral	En desacuerdo	En desacuerdo
Máximo	Muy de acuerdo	Muy de acuerdo	Muy de acuerdo	Muy de acuerdo	Muy de acuerdo	Muy de acuerdo	Muy de acuerdo

Fuente: (Elaboración propia, 2022).

El ARTH-aid ExoGlove es una herramienta eficaz para mejorar la calidad de vida de los adultos mayores a través de la rehabilitación de manos. Los resultados de la encuesta realizada a terapeutas indican que el guante es fácil de usar y proporciona una buena usabilidad para los usuarios, lo que se refleja en una satisfacción promedio y generalmente alta con el producto. La pregunta más valorada por los terapeutas en la encuesta fue la que se centra en los materiales utilizados en la construcción del guante, lo que sugiere que consideran que estos son un factor importante en la evaluación de la usabilidad y facilidad de uso del ARTH-aid ExoGlove. La pregunta menos valorada por los pacientes fue la efectividad del uso del guante, pero se cree que esto puede deberse a la falta de suficientes sesiones de rehabilitación para evaluar su efectividad en pacientes crónicos. Se ha realizado una valoración cuantitativa de los porcentajes de satisfacción obtenidos por cada pregunta del bloque centro en la facilidad de uso del guante.

6.8.2. Usabilidad y facilidad de uso del ARTH-aid System en pacientes

Este apartado de preguntas está dirigido a la verificación de la interacción del ARTH-aid System en la rehabilitación, es importante que los profesionales terapeutas acompañen la evaluación y verifiquen la seguridad y eficacia del dispositivo. Esto implica realizar pruebas en relación con las preguntas de la tabla 50 para verificar que el producto funciona adecuadamente y que los usuarios no enfrentan ningún riesgo de lesiones o complicaciones de salud. Los profesionales terapeutas también deben evaluar la eficacia del exoesqueleto para el tratamiento de la artritis en adultos mayores y verificar que los usuarios se estén beneficiando de su uso.

Tabla 27: Usabilidad y facilidad de uso del ARTH-aid System

8	Considero que el acceso a la aplicación del ARTH-AID System es rápida (La puntuación de 3 indica un valor neutro)						
	MUY EN DESACUERDO	1	2	3	4	5	MUY DE ACUERDO
9	Utilizar el ARTH-AID System me parece práctico (La puntuación de 3 indica un valor neutro)						
	MUY EN DESACUERDO	1	2	3	4	5	MUY DE ACUERDO
10	Me siento seguro al usar el ARTH-AID System (La puntuación de 3 indica un valor neutro)						
	MUY EN DESACUERDO	1	2	3	4	5	MUY DE ACUERDO
11	Considero que el ARTH-AID System es sencillo de entender (La puntuación de 3 indica un valor neutro)						
	MUY EN DESACUERDO	1	2	3	4	5	MUY DE ACUERDO
12	La información que encuentro en la aplicación parece estar ordenada (La puntuación de 3 indica un valor neutro)						
	MUY EN DESACUERDO	1	2	3	4	5	MUY DE ACUERDO

Fuente: (Elaboración propia, 2021).

Procesamiento de los datos

El procesamiento de datos de la matriz de usabilidad y facilidad de uso del ARTH-aid System en pacientes es una etapa importante en el análisis de la eficacia del dispositivo. Esto implica recopilar y organizar los datos obtenidos a través de encuestas o evaluaciones realizadas a pacientes que han utilizado el ARTH-aid System. Además, es importante tener en cuenta factores como la edad, el género y el tipo de patología de los pacientes para poder hacer comparaciones y generalizaciones más precisas. El procesamiento de datos es una parte fundamental en el análisis de la usabilidad y facilidad de uso del ARTH-aid System, ya que permite obtener una comprensión más profunda de cómo el dispositivo está siendo utilizado y si está cumpliendo con las necesidades de los pacientes.

La pregunta más puntuada y por tanto más valorada para los pacientes en la encuesta fue "*¿Me siento seguro al usar el sistema ARTH-AID?*", lo que indica que ellos consideran la seguridad como un factor importante a la hora de evaluar la facilidad de uso y la usabilidad del guante. Por otro lado, la pregunta menos puntuada y por tanto menos valorada por los pacientes fue "*¿Considero que el acceso a la aplicación del sistema ARTH-AID es rápido?*". Esto sugiere que la rapidez de acceso a la aplicación no es una preocupación principal para los pacientes.

Tabla 28: Usabilidad y Facilidad de uso del ARTH-AID System

	P8. Considero que el acceso a la aplicación del ARTH-AID System es rápida. Usabilidad y Facilidad de uso del ARTH-AID System.	P9. Utilizar el ARTH-AID System me parece práctico. Usabilidad y Facilidad de uso del ARTH-AID System.	P10. Me siento seguro al usar el ARTH-AID System. Usabilidad y Facilidad de uso del ARTH-AID System.	P11. Considero que el ARTH-AID System es sencillo de entender. Usabilidad y Facilidad de uso del ARTH-AID System.	P12. La información que encuentro en la aplicación parece estar ordenada. Usabilidad y Facilidad de uso del ARTH-AID System.
N. Válido	30	30	30	30	30
N. Perdidos	0	0	0	0	0
Media	3.77	3.93	4.73	4.50	4.07
Desv Std	0.77	0.83	0.45	0.63	0.69
Mínimo	En desacuerdo	En desacuerdo	De acuerdo	Neutral	Neutral
Máximo	Muy de acuerdo	Muy de acuerdo	Muy de acuerdo	Muy de acuerdo	Muy de acuerdo

Fuente: (Elaboración propia, 2022).

En el estudio realizado, se ha llevado a cabo un análisis cuantitativo de la satisfacción de los pacientes con respecto a cada pregunta del bloque de valoración de la satisfacción del paciente. Una de las preguntas evaluadas fue: "*¿Considero que el acceso a la aplicación del sistema ARTH-AID es rápido?*". Los resultados muestran el porcentaje de satisfacción obtenido para esta pregunta en particular. Este análisis nos permite tener una visión más detallada y precisa de las opiniones y percepciones de los pacientes sobre el sistema ARTH-AID, lo que nos ayudará a mejorar y optimizar su uso y accesibilidad.

Tabla 29: Valoración de la satisfacción del paciente. P8. Considero que el acceso a la aplicación del ARTH-AID System es rápida.

		Frecuencia	Porcentaje	Porcentaje Válido	Porcentaje Acumulado
Válido	En desacuerdo	1	3.3%	3.3%	3.3%
	Neutral	10	33.3%	33.3%	36.7%
	De acuerdo	14	46.7%	46.7%	83.3%
	Muy de acuerdo	5	16.7%	16.7%	100.0%
Total		30	100.0%		

Fuente: (Elaboración propia, 2022).

6.8.3. Impacto en la rehabilitación en pacientes

Este bloque de preguntas tiene como objetivo evaluar el grado de satisfacción del paciente en relación con el impacto del dispositivo en su rehabilitación, desde la perspectiva de los terapeutas. Se busca establecer una medida de la interacción entre el paciente y el dispositivo y cómo esto afecta el proceso de rehabilitación. Los resultados obtenidos a través de esta evaluación nos permitirán comprender mejor cómo el dispositivo está impactando la rehabilitación del paciente y nos ayudarán a mejorar su uso y eficacia en el futuro.

Tabla 30: Impacto en la rehabilitación.

13	Considero que con el uso del ARTH-AID ExoGlove el dolor de mis manos disminuye (La puntuación de 3 indica un valor neutro)					
	MUY EN DESACUERDO	1	2	3	4	5
						MUY DE ACUERDO
14	Me ha sido fácil usar el ARTH-AID ExoGlove en mis actividades cotidianas (La puntuación de 3 indica un valor neutro)					
	MUY EN DESACUERDO	1	2	3	4	5
						MUY DE ACUERDO
15	Siento que el ARTH-AID ExoGlove es un aporte para mis actividades (La puntuación de 3 indica un valor neutro)					
	MUY EN DESACUERDO	1	2	3	4	5
						MUY DE ACUERDO
16	He mejorado el movimiento de flexión-extensión de mis dedos (La puntuación de 3 indica un valor neutro)					
	MUY EN DESACUERDO	1	2	3	4	5
						MUY DE ACUERDO

Fuente: (Elaboración propia, 2022).

Tabla 31: Impacto de rehabilitación

	P13. Considero que con el uso del ARTH-AID ExoGlove el dolor de mis manos disminuye. Impactos en la rehabilitación	P14. Me ha sido fácil usar el ARTH-AID ExoGlove en mis actividades cotidianas. Impactos en la rehabilitación	P15. Siento que el ARTH-AID ExoGlove es un aporte para mis actividades. Impactos en la rehabilitación	P16. He mejorado el movimiento de flexión- extensión de mis dedos. Impactos en la rehabilitación
N. Válido	30	30	30	30
N. Perdidos	0	0	0	0
Media	3.63	3.27	3.87	4.03
Desv Std	.81	.91	.63	.56
Mínimo	En desacuerdo	En desacuerdo	En desacuerdo	Neutral
Máximo	Muy de acuerdo	Muy de acuerdo	Muy de acuerdo	Muy de acuerdo

Fuente: (Elaboración propia, 2022).

Los resultados de la encuesta muestran que la pregunta más valorada por los pacientes fue "*¿He mejorado el movimiento de flexión-extensión de mis dedos gracias al uso del sistema ARTH-AID ExoGlove?*". Esto indica que la mejora en la movilidad de los dedos es un factor importante para los pacientes y que el sistema ARTH-AID ExoGlove está siendo efectivo en este aspecto. Por otro lado, la pregunta menos valorada por los pacientes fue "*¿Me ha sido fácil usar el sistema ARTH-AID ExoGlove en mis actividades cotidianas?*". Esto sugiere que la facilidad de uso del sistema no es una preocupación principal para los pacientes. Es importante tener en cuenta estos resultados al evaluar el rendimiento y la eficacia del sistema ARTH-AID ExoGlove.

En el estudio realizado, se ha llevado a cabo un análisis cuantitativo detallado de la satisfacción de los pacientes con respecto a cada pregunta del bloque de valoración de la satisfacción del paciente. Una de las preguntas evaluadas fue: "*¿Considero que el uso del sistema ARTH-AID ExoGlove ha disminuido el dolor en mis manos?*". Los resultados muestran el porcentaje de satisfacción obtenido

para esta pregunta en particular. Este análisis nos permite tener una comprensión más precisa de las opiniones y percepciones de los pacientes sobre el impacto del sistema ARTH-AID ExoGlove en la reducción del dolor en las manos, lo que nos ayudará a optimizar su uso y a evaluar su efectividad en esta área.

Tabla 32: Valoración de la satisfacción del paciente. P 13. Considero que con el uso del ARTH-AID ExoGlove el dolor de mis manos disminuye.

		Frecuencia	Porcentaje	Porcentaje Válido	Porcentaje Acumulado
Válido	En desacuerdo	2	6.7%	6.7%	6.7%
	Neutral	11	36.7%	36.7%	43.3%
	De acuerdo	13	43.3%	43.3%	86.7%
	Muy de acuerdo	4	13.3%	13.3%	100.0%
Total		30	100.0%		

Fuente: (Elaboración propia, 2022).

Tabla 33: Valoración de la satisfacción del paciente. P 14. Me ha sido fácil usar el ARTH-AID ExoGlove en mis actividades cotidianas.

		Frecuencia	Porcentaje	Porcentaje Válido	Porcentaje Acumulado
Válido	En desacuerdo	8	26.7%	26.7%	26.7%
	Neutral	7	23.3%	23.3%	50.0%
	De acuerdo	14	46.7%	46.7%	96.7%
	Muy de acuerdo	1	3.3%	3.3%	100.0%
Total		30	100.0%		

Fuente: (Elaboración propia, 2022).

En referencia a las preguntas finales de la encuesta P17 Y P18 basadas en criterios de satisfacción general del paciente ante el uso del dispositivo y su recomendación para usarse de manera frecuente. Esta valoración es importante para la comercialización futura del producto y el índice de satisfacción dl futuro cliente.

Tabla 34: Valoración de la satisfacción general del paciente del sistema ARTH-AID

17	Recomendaría el ARTH-AID System a más personas en la misma situación que yo	<input type="checkbox"/> SÍ <input type="checkbox"/> NO
18	Continuaría con el uso del ARTH-AID ExoGlove semanalmente	<input type="checkbox"/> SÍ <input type="checkbox"/> NO

Fuente: (Elaboración propia, 2022).

Tabla 35: Respuestas en base a: Recomendaría a más personas en la misma situación que yo.

	Frecuencia	Porcentaje	Porcentaje Válido	Porcentaje Acumulado
Válido No	1	3.3%	3.3%	3.3%
Sí	29	96.7%	96.7%	100.0%
Total	30	100.0%		

Fuente: (Elaboración propia, 2022).

Tabla 36: Respuestas en base a: Continuaría con el uso semanalmente.

	Frecuencia	Porcentaje	Porcentaje Válido	Porcentaje Acumulado
Válido No	8	26.7%	26.7%	26.7%
Sí	22	73.3%	73.3%	100.0%
Total	30	100.0%		

Fuente: (Elaboración propia, 2022).

6.8.4. Las valoraciones y promedios de las preguntas realizadas en función del sexo o género de pacientes.

En el estudio realizado, se ha considerado interesante analizar la relación entre la valoración del sistema ARTH-AID y el exoguante, así como su impacto en la rehabilitación, en función del género de los pacientes. Los resultados obtenidos a través de las gráficas indican que el promedio general de satisfacción es muy similar entre hombres y mujeres, y que las curvas de distribución se superponen. Esto sugiere que el género no es un factor determinante en la valoración del sistema y el exoguante ni en su impacto en la rehabilitación. Estos resultados son relevantes ya que nos permiten confirmar que el sistema y el exoguante son efectivos para ambos géneros y que no existen diferencias significativas entre ellos.

Aunque se observa un patrón similar en la valoración del sistema ARTH-AID y el exoguante entre hombres y mujeres, se encontró que el valor más bajo se presentó en la pregunta 14 para ambos géneros. Esto puede deberse a que la colocación del guante requirió la ayuda del terapeuta, lo que puede haber afectado la percepción de los pacientes sobre la facilidad de uso del sistema. Por otro lado, el valor más alto se presentó en la pregunta 10 para los hombres, lo que indica que ellos se sienten cómodos con el sistema. Estos resultados son importantes ya que nos permiten identificar áreas en las que es necesario enfocar más esfuerzos para mejorar la satisfacción y la facilidad de uso del sistema y el exoguante para ambos géneros.

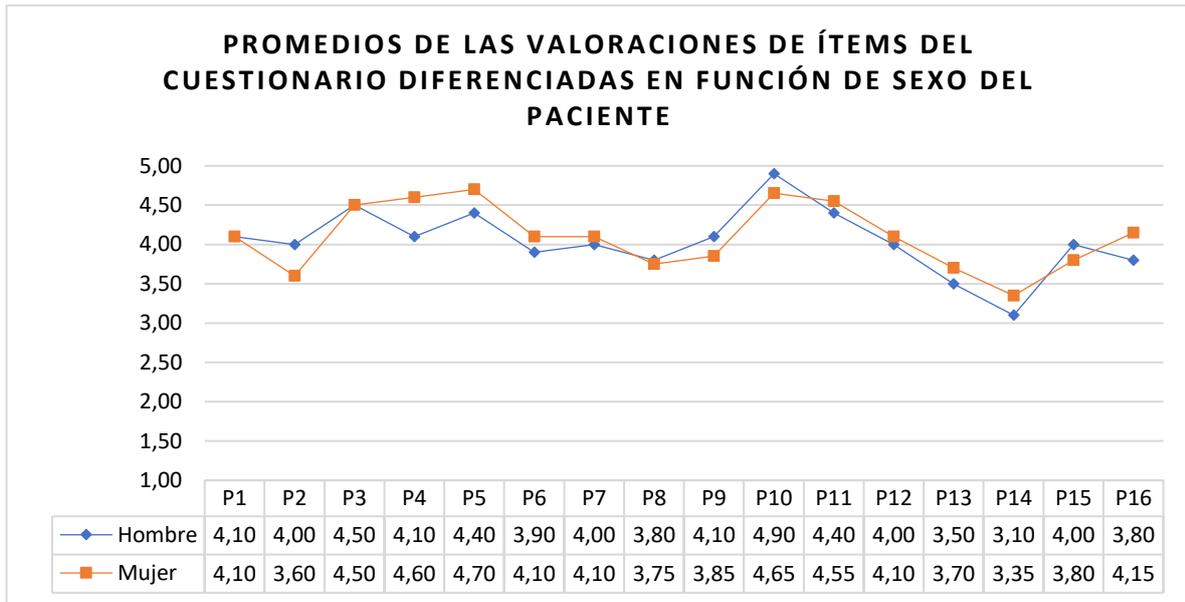


Imagen 105: Promedios de las valoraciones de ítems del cuestionario diferenciadas en función de sexo del paciente.
Fuente: (Elaboración propia, 2022).

Se estableció gráficamente el promedio de las valoraciones en base a la pregunta “Recomendaría el uso de Exo-Glove System”. Como puede comprobarse en la imagen 106. La valoración es positiva con valores superiores al 4 en la mayoría de las preguntas siendo significativa la pregunta 10 que se indica que hay seguridad en el uso del ARTH-AID System y el valor más bajo está en la pregunta 4 que hace referencia a la colocación del guante, en este caso no es sencillo.

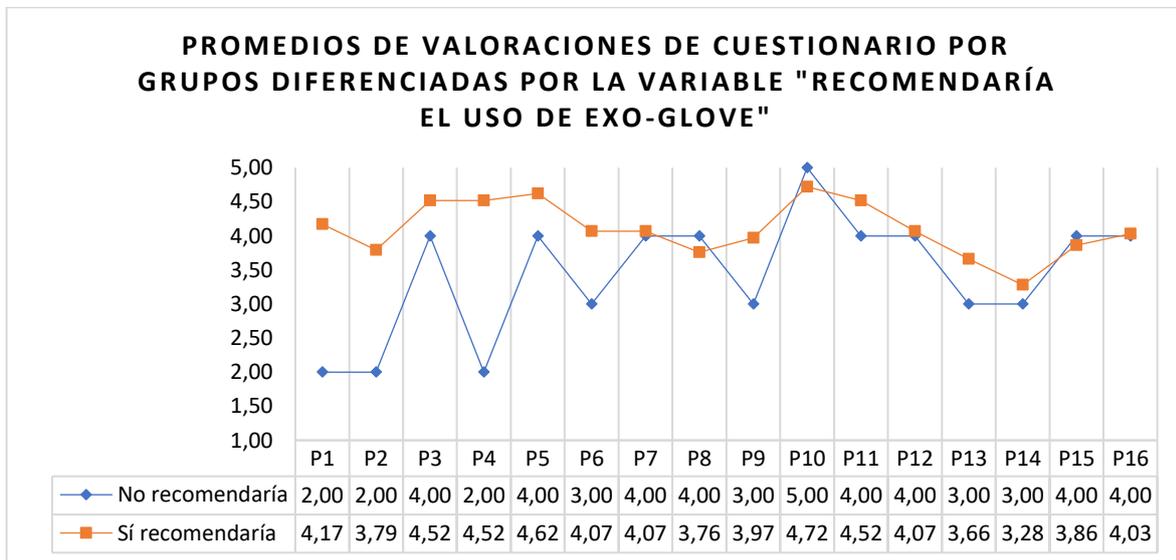


Imagen 106: Promedio de las valoraciones en base a la pregunta Recomendaría el uso de Exo-Glove System.
Fuente: (Elaboración propia, 2022).

El promedio de las valoraciones en base a la pregunta “Continuaría con el uso de Exo-Glove System” Como puede comprobarse en la imagen 107. La valoración es positiva con valores superiores al 4 en la mayoría de las preguntas siendo la respuesta más frecuente estar de acuerdo con la continuación del

uso del producto.

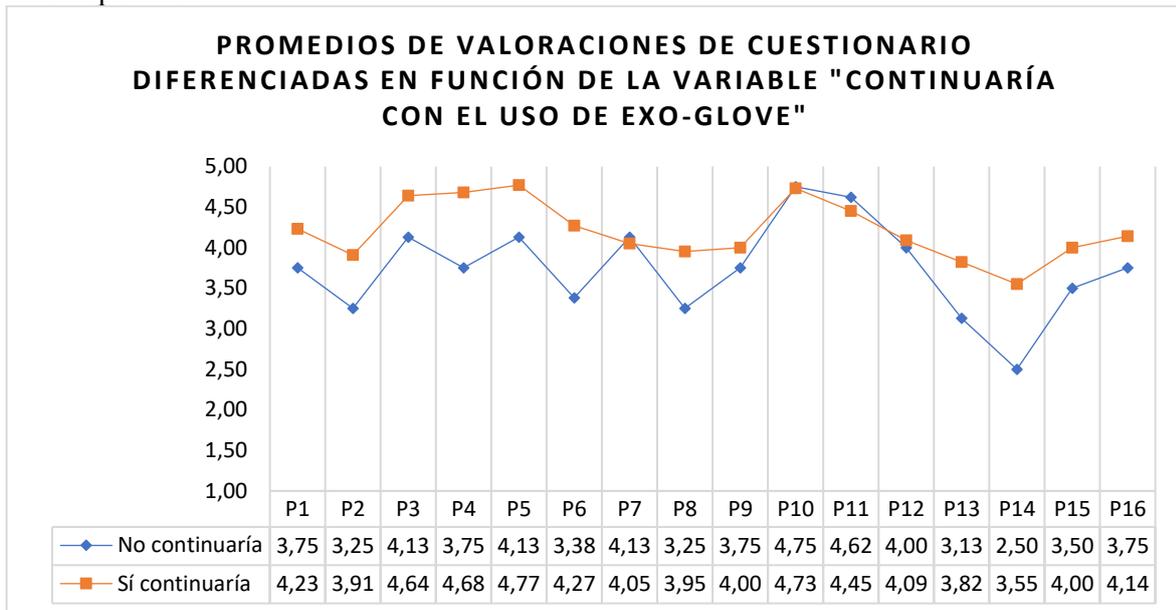


Imagen 107: Promedio de las valoraciones en base a la pregunta continuaría con el uso de Exo-Glove.
Fuente: (Elaboración propia, 2022).

6.9. Conclusiones

La metodología de diseño y desarrollo utilizada en el sistema ARTH-AID ExoGlove ha demostrado ser efectiva en la validación del dispositivo tanto para pacientes como para terapeutas. Los resultados de las encuestas de satisfacción realizadas a los usuarios del sistema han confirmado su efectividad y cumplimiento con las expectativas de los pacientes. Además, la validación de la encuesta de satisfacción en términos de usabilidad, funcionalidad e impacto del dispositivo nos permitirá analizar de manera sistemática y adecuada nuevos sistemas de exogantes para la rehabilitación terapéutica en el futuro. Algunas de las preguntas incluidas en la encuesta han sido validadas estadísticamente y pueden ser utilizadas como preguntas clave en encuestas similares para obtener resultados fiables.

Los datos estadísticos obtenidos en pacientes indican que el sistema ARTH-AID ExoGlove es universal, es decir, se adapta a personas de cualquier género y edad. Además, los pacientes informan sentirse cómodos con el uso del sistema y, en general, lo recomendarían.

El diseño asistido por ordenador y el prototipado rápido fueron herramientas fundamentales en la creación del dispositivo de rehabilitación, estas técnicas han permitido la creación de un dispositivo altamente especializado que cumple con las necesidades específicas de los pacientes con artritis reumatoide.

De hecho, Los programas informáticos han permitido crear modelos precisos del dispositivo, teniendo en cuenta las limitaciones físicas de los pacientes y las especificaciones necesarias para la rehabilitación de la mano. Esto ha permitido la creación de un dispositivo que es cómodo para el paciente y que se ajusta de manera segura y efectiva a la mano. Por otro lado, el prototipado rápido ha permitido la creación de varios prototipos del dispositivo en un corto período de tiempo. Esto ha permitido realizar pruebas rápidas y ajustar el diseño para mejorar su eficacia y comodidad para el paciente.

Podemos decir por tanto que las técnicas orientadas al diseño asistido por ordenador y el prototipado rápido han permitido la creación de un dispositivo altamente especializado, que cumple con las necesidades específicas de los pacientes con artritis reumatoide. La utilización de estas técnicas ha permitido la creación de un dispositivo que es cómodo, seguro y efectivo para la rehabilitación de la mano

6.10. Referencias

- Almenara, M., Cempini, M., Gómez, C., Cortese, M., Martín, C., Medina, J., ... y Opisso, E. (2017). Usability test of a hand exoskeleton for activities of daily living: an example of user-centered design. *Disability and Rehabilitation: Assistive Technology*, Vol.12(1), 84-96. (Consultado el 23/01/2020).
- Elousa Oviden, P & Zumbo, Bruno (2008). Coeficientes de fiabilidad para escalas de respuesta categórica ordenada. *Universidad de Oviedo. Psicothema*, 20(4), 891-901. www.psicothema.com/pi?pii=3572.
- Fries, J. F., Spitz, P., Kraines, R. G., y Holman, H. R. (1980). Measurement of patient outcome in arthritis. *Arthritis y Rheumatism*, Vol.23(2), 137-145. (Consultado el 08/01/2020).
- Juana-Mariel Dávila-Vilchis, Juan C. Ávila-Vilchis, Adriana H. Vilchis-González, LAZ-Avilés, (2020). Design Criteria of Soft Exogloves for Hand Rehabilitation-Assistance Tasks, *Applied Bionics and Biomechanics*, <https://doi.org/10.1155/2020/2724783>
- Proulx, C. E., Higgins, J., y Gagnon, D. H. (2021). Occupational therapists' evaluation of the perceived usability and utility of wearable soft robotic exoskeleton gloves for hand function rehabilitation following a stroke. *Disability and rehabilitation. Assistive Technology* 1–10. <https://doi.org/10.1080/17483107.2021.1938710>.



Conclusiones y Futuras líneas de Investigación



CAPÍTULO 7

ARTH_aid
Exo Glove

7.1. Conclusiones

De acuerdo con las hipótesis planteadas al inicio de la tesis, el sistema ARTH-aid y el ARTH-aid ExoGlove han demostrado ser un dispositivo fisioterapéutico económico y fácil de usar para el control y seguimiento de enfermedades como la artritis reumatoide, lo que ha sido confirmado por los resultados obtenidos en la encuesta de satisfacción realizada a un grupo de pacientes crónicos.

Al considerar los factores determinantes para desarrollar e implementar un exoesqueleto para la mano que sea asequible y fácilmente adaptable, se consideran tres aspectos fundamentales:

1. **Diseño:** El diseño del exoesqueleto debe ser ergonómico y funcional, teniendo en cuenta los requisitos biomecánicos y de ergonomía del paciente. Debe proporcionar una buena flexibilidad y resistencia mecánica, así como adaptabilidad a las necesidades individuales del usuario.
2. **Tecnología:** El exoesqueleto debe ser capaz de adaptarse a diferentes estilos de movimiento y ofrecer una respuesta adecuada para cada uno de ellos. La tecnología debe permitir una fácil operación, una buena precisión en los movimientos y una respuesta adecuada a los cambios en el entorno en relación con las actividades del adulto mayor con artritis reumatoide.
3. **Costo:** El exoesqueleto debe ser asequible para el usuario. El precio debe ser proporcional al valor y beneficios que ofrece. Debe tener un costo suficientemente bajo como para ser accesible para la mayoría de los pacientes.

Los factores mencionados anteriormente han sido evaluados en esta tesis mediante un modelo de encuestas multicriterio, que ha considerado diferentes perspectivas como el diseño, la tecnología y el costo. Este modelo de encuestas ha demostrado ser una herramienta útil para ayudar a los diseñadores a tomar decisiones informadas al elegir las mejores características para el desarrollo de exoesqueletos que cubran necesidades específicas.

Los parámetros funcionales que determinan el uso del ARTH-aid ExoGlove por parte de fisioterapeutas en los procesos y sesiones de rehabilitación en pacientes crónicos de artritis reumatoide han sido evaluados mediante la encuesta de satisfacción. Los datos obtenidos en términos de ergonomía, confort, facilidad de uso, ajuste, precisión y eficiencia, así como los resultados de la evaluación, han demostrado que el ARTH-aid ExoGlove cumple con los requisitos y expectativas de los profesionales de la salud. Además, el modelo multicriterio ha sido utilizado para evaluar el diseño, la tecnología y el costo del exoesqueleto. Los resultados han mostrado que el ARTH-aid ExoGlove es una herramienta útil para la rehabilitación de pacientes con artritis reumatoide, ya que es ergonómica, eficiente, asequible y fácilmente adaptable. Esto ha determinado que este tipo de dispositivos sean considerados útiles y sean recomendados por los especialistas.

Se considera que las técnicas de Diseño Asistido por Ordenador (DAO) y Prototipado (PR) son efectivas y operativas para el desarrollo e implementación de exoesqueletos de la mano personalizados para manos con artritis reumatoide. Esto se debe a que han permitido la creación de componentes articulables que han sido implementados en el guante final y que han sido testados por pacientes y terapeutas.

Basándonos en los resultados obtenidos en esta tesis, podemos decir que existen una serie de conclusiones que validan y complementan las hipótesis planteadas inicialmente, tanto a nivel general como a nivel de validación de la encuesta de satisfacción con usuarios. Estas conclusiones nos

permiten interpretar y valorar aspectos técnicos y funcionales en el desarrollo del ARTH-aid System.

- Se ha verificado la mano dispone de una serie de limitaciones funcionales dimensionales que afectan a las articulaciones de la mano que condicionan las medidas de las articulaciones que sean generadas mediante sistemas DAO y PR ya que a la hora de diseñar el exoguante se necesitarán comprobar medidas, ajustes en los rangos de movimiento.
- En el desarrollo programado de ejercicios a realizar por su sistema de exoguante para pacientes se debe tener en cuenta la clasificación de los tipos de agarre de objetos con la mano, que de manera tradicional sirve a los terapeutas para evaluar el avance de la enfermedad.
- Los sistemas de rehabilitación de la mano en enfermedades crónica en la actualidad se limitan a mitigar la pérdida funcional de movimiento y aprehensión de la mano. Así mismo, se considera que para el diseño de un exoguante es necesario tener en cuenta, los límites que ofrezca el paciente en base al estado o avance de su enfermedad, debido a que en muchas ocasiones solamente puede existir una rehabilitación de mantenimiento/tratamiento y no de recuperación completa.
- A partir del entendimiento de los parámetros establecidos en el análisis comparativo de productos se presentaron características particulares de identificación de relación con los que se permitió determinar una manera adecuada de realizar un análisis de tipologías existentes para casos relacionados dentro de métodos para el desarrollo de productos en diferentes ámbitos. En la mayoría de los casos, una clasificación por tipología se realiza mediante la aplicación de una metodología de análisis de clasificación de características, que se refiere a la identificación de los principales rasgos y características de los productos existentes para identificar patrones comunes. Esta metodología se basa en la recopilación de los datos de productos específicos, la comparación y el análisis de los datos recopilados para determinar las características clave y los patrones comunes. Esta información se utilizó para clasificar al exoesqueleto de acuerdo con su tipología, lo que permitió tomar decisiones informadas para el desarrollo del exoesqueleto.
- Los resultados obtenidos han permitido establecer aquellos requerimientos más importantes desde el punto de vista del paciente y el fisioterapeuta; y que se centran en la flexibilidad y el control de la fuerza del aguante, de esta manera los resultados más interesantes y relevantes están determinados por el mantenimiento determinado por el correcto uso de materiales, y la activación simplificada relacionada con la aplicación que se encarga de la respectiva medición de los datos. El ARTH-aid ExoGlove ha integrado herramientas digitales con tecnologías de prototipado rápido para generar las articulaciones de apoyo y de esta manera contribuir en la creación de un guante ergonómico que sea asequible y fácilmente adaptable. Esto permite al paciente controlar su movimiento con la mayor precisión y eficiencia posible. Además, el producto se puede adaptar a las necesidades individuales. Esto lo convierte en una excelente opción para la rehabilitación de pacientes con AR de mano.
- Se ha formalizado una encuesta que han permitido validar el ARTH-aid System de manera global y el ARTH-aid ExoGlove como exoesqueleto para la mano en los procesos de rehabilitación de la mano en pacientes con artritis crónica. La validación de la encuesta de satisfacción creada para este sistema puede ser utilizado para evaluar sistemas de características similares ya que estadísticamente se ha comprobado su fiabilidad y rigor. El hecho fundamental de crear una encuesta de la usabilidad, la funcionalidad y el impacto verificada para pacientes permitirá en el futuro analizar de manera adecuada nuevos desarrollos de exoesqueletos de la mano para la rehabilitación terapéutica en general. De hecho, ciertas preguntas como “Me ha sido fácil usar el ARTH-AID ExoGlove en mis actividades cotidianas” dentro del bloque de Impacto de

rehabilitación, han sido evaluadas de manera significativa permiten determinar su fiabilidad estadística para ser utilizadas en el futuro.

- Se considera que la metodología de diseño y desarrollo del ARTH-aid ExoGlove para pacientes ha permitido validar el dispositivo tanto en pacientes como en terapeutas y que en el futuro servirá para mejorarlo de cara a implementar nuevas funcionalidades.
- En base a los datos estadísticos obtenidos con pacientes el ARTH-aid ExoGlove System funciona de manera universal es decir se adapta a cualquier sexo. La edad de los pacientes no influye en el proceso de tratamiento en relación con el uso y que desde el punto de vista ergonómico el paciente se siente cómodo y recomendaría el uso del ARTH-aid ExoGlove System en general.
- El presente estudio sistémico de exoesqueletos ha permitido plasmar un método relacionado con el diseño y desarrollo de productos, que puede ser aplicado a diferentes campos de la ingeniería, como la biomédica, donde el desarrollo de productos como el ARTH-aid ExoGlove es una necesidad.

Los resultados obtenidos en esta investigación, combinados con la herramienta multicriterio de evaluación de exoesqueletos, han permitido evaluar el diseño, la tecnología y el costo del ARTH-aid ExoGlove. Esta herramienta es una forma útil de ayudar a los desarrolladores a tomar decisiones informadas al elegir los mejores exoesqueletos para sus necesidades.

Las conclusiones obtenidas sugieren que el exoesqueleto ARTH-aid ExoGlove es una herramienta útil para la rehabilitación de pacientes con AR, que ofrece una buena flexibilidad, resistencia mecánica, adaptabilidad y asequibilidad.

Por lo tanto, se recomienda que los investigadores y desarrolladores continúen investigando y desarrollando herramientas y tecnologías para mejorar el diseño, la tecnología y el costo del exoesqueleto ARTH-aid ExoGlove. Esto permitirá una mejor rehabilitación de pacientes con AR, asegurando una mejora significativa en su calidad de vida.

Ventaja sobre la terapia tradicional:

Una ventaja del dispositivo respecto a la fisioterapia tradicional es mejorar la calidad de vida del paciente ya que ofrece un control motriz mucho más fino y preciso en la rehabilitación de la mano. Con el dispositivo, se pueden medir con precisión la fuerza y el movimiento de los dedos, lo que permite al terapeuta ajustar la intensidad y la frecuencia de los ejercicios de forma personalizada según las necesidades del paciente.

Otra ventaja importante es la retroalimentación y el monitoreo exhaustivo a tiempo real de la rehabilitación motora de la mano. El dispositivo permite a los terapeutas medir y evaluar la progresión de la recuperación de manera más objetiva y cuantitativa, lo que puede mejorar el seguimiento y la eficacia de la terapia. Además, los pacientes pueden ver los resultados de su propio progreso y sentirse motivados para continuar con la rehabilitación.

Por tanto, el uso del dispositivo mejora la eficacia y la eficiencia de la fisioterapia en la rehabilitación de la mano, al permitir una intervención más precisa y personalizada, una evaluación objetiva y cuantitativa del progreso y una mayor motivación del paciente.

Es importante señalar que el dispositivo no está diseñado para ralentizar o detener la progresión de la enfermedad en sí misma, ya que la enfermedad subyacente que causa la disfunción motora no se ve directamente afectada por el dispositivo. En cambio, el dispositivo se enfoca en proporcionar una intervención terapéutica que busca mejorar la calidad de vida del paciente a través de la rehabilitación motora de la mano y la reducción de los síntomas de la enfermedad.

En este sentido, el dispositivo tiene una acción paliativa, ya que ayuda a aliviar los síntomas de la enfermedad y a mejorar la capacidad del paciente para realizar actividades diarias que de otro modo serían difíciles de realizar. Además, la retroalimentación en tiempo real y el monitoreo exhaustivo del progreso de la rehabilitación pueden ser útiles para evaluar la eficacia del tratamiento y realizar ajustes necesarios para optimizar los resultados. En conclusión, aunque el dispositivo no cura la enfermedad subyacente, puede ayudar a los pacientes a manejar mejor los síntomas y a mejorar su calidad de vida a través de la rehabilitación motora asistida.

7.2. Líneas de Investigación futuras

- En base a los resultados obtenidos en nuestra investigación, las líneas de investigación futuras se centrarán en el desarrollo de exoesqueletos para la rehabilitación de la mano en personas con artritis reumatoide. Estos exoesqueletos estarán fabricados con materiales plásticos y textiles que proporcionen flexibilidad y comodidad al usuario, permitiendo la rehabilitación de la mano sin causar tensiones ni aumentar el peso innecesariamente. Además, se buscará mejorar los materiales utilizados en el ARTH-aid ExoGlove para mejorar el control de los sensores y el agarre de los objetos. También se llevará a cabo una evaluación más extensa del ARTH-aid System con nuevos usuarios, teniendo en cuenta el nivel de atrofia muscular y el grado de cronicidad de la enfermedad, para poder programar rutinas de rehabilitación adecuadas que controlen los esfuerzos aplicados durante las sesiones.
- En base a la información desarrollada en la encuesta y más concretamente en la Tabla cruzada sobre la pregunta “Me he sentido cómodo/a usando el ARTH-AID ExoGlove” y la DIMENSION Usabilidad y Facilidad de uso del ARTH-AID ExoGlove se determina que el exoguante podría convertirse en un dispositivo de carácter preventivo usado por cualquier usuario ya que se ha comprobado estadísticamente que ningún nivel de significatividad y correlación de su utilización desde el punto de vista de la edad o de género del paciente, de esta manera se puede presentar como una herramienta preventiva para ayudar a prevenir lesiones en la mano y el brazo. Además, el dispositivo puede ofrecer una amplia variedad de configuraciones, lo cual facilitaría su adaptación a las necesidades individuales del usuario por sus características como son buena flexibilidad, resistencia mecánica, adaptabilidad y asequibilidad.
- Utilizar los exoguantes para realizar trabajos específicos con las manos que necesitan un esfuerzo especial y complementario permitirá:
 - Investigar y evaluar la aplicación de los exoguantes a pacientes con lesiones en la mano, y explorar otros usos terapéuticos, como mejorar la función de la mano en personas con algún tipo de discapacidad.
 - Facilitar el estudio de la eficacia de los exoguantes en la rehabilitación de pacientes con lesiones en la mano.
 - Investigar el uso de exoguantes para personas con problemas de movilidad, como la artritis reumatoide en edades tempranas.
 - Evaluar los riesgos asociados con el uso de los exoguantes para la salud y el bienestar del usuario.
 - Explorar la aplicación de los exoguantes para el tratamiento de enfermedades profesionales relacionadas con el uso de la mano como el síndrome del túnel carpiano.
 - Rehabilitar la mano del paciente sin causar tensiones o incrementar el peso. Así mismo, los materiales usados para crear las articulaciones mediante técnicas de prototipado rápido se centran en termoplásticos que provienen de materiales orgánicos, como el filamento plástico PLA que proviene de una encima de maíz, esto puede ser una ventaja para mejorar la seguridad y el rendimiento del dispositivo. Además, se pueden realizar estudios para evaluar el comportamiento del exoesqueleto en diferentes entornos, como una superficie plana, diferentes superficies irregulares, diferentes ángulos de inclinación y diferentes ángulos de rotación. Estos estudios

podrían contribuir a mejorar la eficiencia del dispositivo al proporcionar una mejor comprensión del comportamiento del usuario al colocarse el dispositivo.

- Otra área de investigación para el exoesqueleto ARTH-aid ExoGlove es el desarrollo de herramientas de seguimiento de terapia en tiempo real. Esto permitiría al usuario controlar los ejercicios realizados a lo largo de su rehabilitación, permitiéndole evaluar su progreso y obtener una mejor comprensión de los resultados de la terapia. Esta información podría ser útil para los profesionales de la salud para ajustar los programas de rehabilitación y mejorar los resultados
- A nivel técnico se considera que en el futuro será conveniente implementar un sistema de monitorización para recopilar los datos de los usuarios en tiempo real, lo que permitiría al personal médico evaluar mejor los resultados de la rehabilitación, el uso de actuadores por control remoto que enviarán señales inalámbricas evitando de esta manera el cableado, creando un guante realmente autónomo. El uso de sensores, que detecten la presión y la temperatura, podrían ser un avance significativo para mejorar la seguridad y la eficiencia del dispositivo. Además, se puede explorar la implementación de un sistema.
- La investigación ha llevado a la creación de una metodología de diseño industrial que puede ser utilizada para el desarrollo de productos en diferentes ámbitos. En el futuro, esta metodología podría ser aplicada en otros campos de investigación.

7.3. Artículos publicados de carácter predoctoral realizados

1. Moya-Jiménez, R., Magal-Royo, T., Flores, M., & Caiza, M. (2023). Design and validation of an exoskeleton for hand rehabilitation in adult patients with rheumatoid arthritis. Proceedings of SAI Intelligent Systems Conference Ed. Springer, Cham 399-412. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-16078-3_27. Bases de datos: Scopus, SCImago. h-Index: 21, Impact Score (2021)2.16, SJR 0.39. Cuartil Q3 Artificial Intelligence, Information Systems, Software.
2. Moya-Jiménez, R., Magal-Royo, T., & Ponce, D. (2021). Tecnologías digitales innovadoras para el diseño de exoesqueletos para la mano aplicados en la rehabilitación de pacientes con artritis crónica. Proceedings INNODOCT/20. International Conference on Innovation, Documentation and Education Ed. Universitat Politècnica de València, 537-543. <https://doi.org/10.4995/INN2020.2020.11866>. Congreso internacional con evaluación por pares. Base de datos: Dialnet.
3. Morales, J.; Moya-Jiménez, R. (2022). Design and Development of a 3D Scanner Using Photogrammetry for the Generative Design of Low-Cost Hand Prosthesis Using Rapid Prototyping Technologies. En Proceedings INNODOCT/21. International Conference on Innovation, Documentation and Education. Editorial Universitat Politècnica de València. 1-8. <https://doi.org/10.4995/INN2021.2021.13277> Congreso internacional con evaluación por pares. Base de datos: Dialnet.
4. Jurado, M. V. F., Simbaña, M. J. C., Monar, E. P. J., Roberto Moya Jiménez, & Valenzuela, M. A. R. (2020). Diseño paramétrico: aplicación conceptual de la autopoiesis y diagramas de Voronoi a partir de la implementación del método adaptado de función de calidad. Tecnología & Diseño, Vol. (14), 21-37. <https://revistatd.azc.uam.mx/index.php/rtd/article/view/86/194>. Open Journal Systems con revisión a pares. Bases de datos: Latindex.
5. Moya-Jiménez, R., Magal-Royo, T., Ponce, D., Flores, M., Caiza, M. (2020). Hand Exoskeleton Design for the Rehabilitation of Patients with Rheumatoid Arthritis. In: Rodriguez Morales, G., Fonseca C., E.R., Salgado, J.P., Pérez-Gosende, P., Orellana Cordero, M., Berrezueta, S. (eds) Information and Communication Technologies. TICEC 2020. Book series. Communications in Computer and Information Science Vol 1307. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-62833-8_2. Bases de datos: Scimago, Scopus, EI Compendex. Índice de impacto: H-index: 55, SJR (2021)0.21, Q4: Computer Science,
6. Roberto Moya Jiménez; Teresa Magal Royo. (2020) Diseño y prototipado de un dispositivo de rehabilitación para la artritis reumatoide de mano con técnicas de prototipado rápido. III Congreso Internacional de Sistemas Inteligentes y Nuevas Tecnologías: Tendencias Interdisciplinarias en Salud, COINSIT 2020, 152 - 163, ISSN: 1646-9895 <http://www.risti.xyz/issues/ristie33.pdf>. Congreso Internacional con revisión a pares.
7. Roberto Moya Jiménez; Teresa Magal Royo, (2019). Diseño y prototipado de un dispositivo de rehabilitación para la artritis reumatoide de mano. Tsantsa: Revista de Investigaciones Artísticas 233 - 240. ISSN 1390-8448. <https://publicaciones.ucuenca.edu.ec/ojs/index.php/tsantsa/article/view/2934>. Bases de datos: DOAJ, Latindex, REDIB, CIRC. Clasificación D: Ciencias Sociales.

8. Roberto Moya Jiménez., Ponce, D., & Bermeo. (2019) Creación y diseño de un dispositivo que mitigue las afectaciones generadas por el uso de herramientas inadecuadas por los agricultores en las labores de fertilización, con experimentación mediante el prototipado rápido. Estudios sobre Arte Actual en el Congreso Internacional IDEA'19. Facultad de Artes de la Universidad de Cuenca (Ecuador), Vol. (7),55-61. ISSN:2340-6062 <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7067395> Bases de datos: e-Dialnet, Latindex.
9. Roberto Moya Jiménez & Andrea Paola Calle (2019). Estudio sistémico de metodologías de la Bauhaus para la aplicación y experimentación de la forma en el diseño de productos con nuevas tecnologías (caso de estudio Universidad Central del Ecuador). 8º Encuentro BID de centros de enseñanza de diseño 699 - 707. ISBN: 978-84-09-21553-9. https://issuu.com/bienaliberoamericanadedisenos/docs/publicacion_resumenes_8e.
10. Roberto Moya Jiménez; Teresa Magal Royo. (2018). Estudio sistémico de estructuras exoesqueléticas de la mano para la rehabilitación de la atrofia muscular debido a artritis en personas adultas 905 - 912. Memorias de Investigación 2018. Virrektorado de Investigación. ISBN: 978-9942-25-485-6. <https://investigacion.utpl.edu.ec/sites/default/files/2019/memorias/Memorias%20VII%20Investiga.pdf>.