



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE NUEVO LEÓN

División de Estudios Profesionales



TITULACION INTEGRAL (TESIS PROFESIONAL)

Proyecto: Diseño y construcción de un exoesqueleto para rehabilitación de movilidad en los dedos

Alumno: Jeshua Antonio Garduño López

Numero de control: 11280123

Ingeniería Mecatrónica

Asesor: Dr. Carlos Hernández Santos

Revisores: M.C. Gloria Alicia Martínez Malacara

Dr. Apolonio Arnoldo Fernández Ramírez

FEBRERO 2017

Resumen

En el presente trabajo se desarrolla un exoesqueleto para rehabilitación de miembros superiores (mano), el cual simula el movimiento de los dedos con el fin de ayudar a los pacientes con su rehabilitación y de esta manera mejorar su calidad de vida.

Para poder elaborar y dar vida a este proyecto es sumamente importante poder identificar la creciente evolución y desarrollo tecnológico que con el paso de los días se ha estado dando en los exoesqueletos, así como no dejar de lado los equipos de rehabilitación para establecer los criterios a tomar en cuenta y de esta manera visualizar los beneficios que aportará el mecanismo a la humanidad.

Por estas razones se propone la elaboración de un exoesqueleto con el fin de rehabilitar el miembro superior, de este modo se tendrá que tener en cuenta y conocer ciertos antecedentes básicos, lo que nos dará un panorama más amplio de los alcances del dispositivo. Así como los conocimientos necesarios para desarrollar el exoesqueleto, por lo cual el trabajo se conforma de la siguiente manera:

En el primer capítulo iniciamos dando una introducción de la problemática que se está atacando en dicho trabajo incluyendo parte de la solución que viene siendo la rehabilitación la cual a su vez requiere del desarrollo de ciertos aparatos entre ellos incluidos los exoesqueletos para hacer más efectivo su proceso. También hablará de los robots donde sin duda en el sector salud y específicamente en la rehabilitación juegan un rol de suma importancia ya que gran parte de estos aparatos debido a su función y conformación son considerados dentro de la gama de robots.

En el segundo capítulo nos adentraremos en una parte vital para la resolución de la problemática la cual es el análisis del cómo se conforma la mano tanto en estructura, músculos, articulaciones, además de incluir algunas de las técnicas de rehabilitación en la mano y se da una introducción de los modelos matemáticas para la solución de la cinemática del robot.

En el tercer capítulo tomaremos en cuenta las consideraciones necesarias para el correcto funcionamiento se propondrá un diseño mecánico para su posterior construcción. En el cuarto capítulo y una vez teniendo el diseño se obtendrá la cinemática del robot la cual incluye la cinemática directa e inversa

Y para finalizar en el quinto capítulo se realizarán las conclusiones finales sobre el proyecto y hablaremos sobre los trabajos futuros a implementar en el exoesqueleto.

Agradecimientos

*A mis padres por apoyarme incondicionalmente en todos
y cada uno de los proyectos emprendidos, incluyendo el presente;
por facilitarme el camino gracias a sus consejos y su valiosa ayuda,
porque sin ellos sin duda este camino recorrido no sería el mismo
y sin duda hubiera sido muy complicado y lleno de obstáculos
por eso y mucho más "GRACIAS PADRES".*

*A mis compañeros y amigos y personas queridas, quienes sin duda
y a lo largo de mis estudios me tendieron la mano cuando
lo necesité y cada uno de los que me apoyó en el desarrollo
del presente trabajo, un agradecimiento especial a la Ing. Leyda Jauregui
por su apoyo incondicional para la realización y culminación del documento.*

*A mi asesor por darme la oportunidad de formar parte
de este equipo de trabajo "exoteam" quienes además de ser
compañeros de trabajo/proyecto, han llegado ser buenos amigos,
a mis revisores y demás colaboradores que contribuyeron y
apoyaron a lo largo del desarrollo del proyecto*

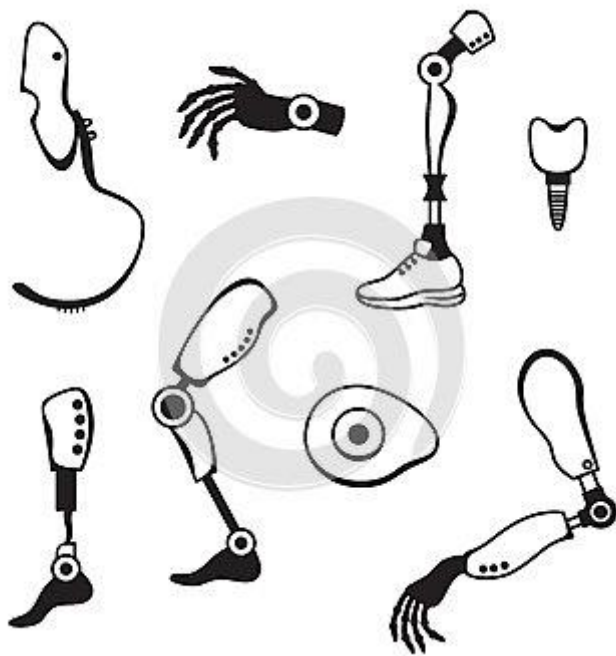
Contenido

Resumen.....	2
Agradecimientos.....	3
Contenido	4
Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1 Justificación.....	1
1.2 Objetivo General	3
1.2.1 Objetivos Específicos.....	3
1.3 Hipótesis	4
1.4 Alcances y limitaciones.....	5
1.5 Descripción del problema.....	6
1.6 Los robots en la rehabilitación.....	11
1.7 Estado del arte.....	17
1.7.1 Antecedentes de Exoesqueletos.....	21
1.7.2 Aplicaciones de los exoesqueletos	25
1.7.3 Clasificación de Exoesqueletos	31
1.7.4 Exoesqueleto de miembro superior y mano	35
Capítulo 2. Modelado de la mano.	47
2.1 Conformación de la mano humana.....	47
2.1.1 <i>La muñeca</i>	49
2.1.2 La mano.....	52
2.2 Rangos de movilidad de la muñeca y de la mano	54
2.3 Terapias de rehabilitación en la mano.....	60
2.4 Herramientas matemáticas para robótica	68
2.5 Conclusión	72
Capítulo 3. Diseño.	74
3.1 Diseño conceptual.....	74

3.2 Diseño mecánico	79
3.3 Conclusiones	86
Capítulo 4. Cinemática del Robot.....	88
4.1 Análisis Cinemático.....	88
4.2 Cinemática directa.....	91
4.3 Cinemática inversa	93
Capítulo 5. Conclusiones y trabajos futuros.....	99
5.1 Conclusiones	99
5.2 Trabajos futuros	100
Bibliografía.....	101

CAPÍTULO

1



INTRODUCCIÓN

Capítulo 1. Introducción.

1.1 Justificación

En la actualidad es común encontrarse con enfermedades que afectan de una u otra manera el correcto funcionamiento de la movilidad de los miembros de las personas, estos son hechos crecientes entre el día a día que vivimos constantemente entre personas con ciertas limitaciones o discapacidades en miembros superiores.

Hoy en día estas situaciones representan una problemática creciente y de la cual se requieren aportaciones que ayuden o contribuyan a obtener un mejor desempeño de cada uno de los aparatos y/o elementos conformantes del cuerpo humano; la buena movilidad de miembros superiores e inferiores resulta ser de suma importancia ya que son fundamentales en su desenvolvimiento y desarrollo de las actividades cotidianas, por ende la rehabilitación juega un papel importante cuando una persona pierde la movilidad total o parcial de alguno de sus miembros.

Adentrándonos al tema central que se abarcará en el presente trabajo la mano juega un rol importante en la vida del ser humano puesto que es una de las principales estructuras para explorar y comunicarse con nuestro exterior. Una lesión en la mano impediría la realización de funciones esenciales, produciendo diversos efectos poco favorables que van desde una alteración en los patrones de uso hasta una mano completamente discapacitada, para ello el paciente que ser valorado por un especialista y poder determinar una rehabilitación que se acople a la necesidad específica del paciente tratado.

La rehabilitación está enfocada en dos objetivos. Primero recuperar la fuerza muscular que básicamente es la capacidad del musculo para contraerse y segundo recuperar la resistencia que es la capacidad de realizar el mismo movimiento repetidas veces. La asistencia del fisioterapeuta para realizar el ejercicio puede variar dejando que el paciente haga el ejercicio completamente solo, ayudar a realizar el ejercicio o incluso asistirlo completamente. Existen diferentes tipos de ejercicios de rehabilitación como los ejercicios de fortalecimiento, estos incrementan la cantidad de fuerza que el musculo puede generar. En un ejercicio isométrico, la longitud de la fibra muscular es constante, de forma que la contracción muscular ocurre sin movimiento articular.

Un ejercicio isotónico es un ejercicio dinámico realizado con una carga o resistencia constante, pero sin controlar la velocidad del movimiento, en estos ejercicios la tensión de una fibra muscular es relativamente constante. El ejercicio isocinético origina un movimiento articular constante para esto se varía la resistencia en una respuesta a la fuerza muscular aplicada. La ventaja del ejercicio isocinético es que el músculo puede fortalecerse de forma óptima manteniendo un rango de movimiento articular completo, cosa que no es posible con los isométricos ni con los isotónicos. La desventaja del ejercicio isocinético es que requiere del uso de una máquina para variar la resistencia mientras se mantiene una tasa constante de movimiento (Hoppenfeld and Murphy, 2001). En las últimas décadas, muchos robots dedicados a la rehabilitación de extremidades superiores (Roccon et al., 2008) e inferiores se han desarrollado para recobrar la movilidad de las extremidades afectadas.

Para atacar esta problemática y ayudar a tener una buena rehabilitación, surgieron tecnologías para la asistencia de personas como son los exoesqueletos, que son dispositivos electromecánicos diseñados para incrementar el rendimiento físico del usuario, así como tener una rehabilitación constante. Estos son estructuras capaces de transmitir la fuerza para simular el movimiento que se requiere.

Este proyecto va enfocado al diseño y construcción de un exoesqueleto que permita una rehabilitación para personas con poca o nula movilidad de las manos, con el objetivo de la terapia de rehabilitación y una rápida recuperación del paciente.

1.2 Objetivo General

Realizar diseño y construcción electrónica de un exoesqueleto que permita la rehabilitación de los dedos de la mano en el ser humano.

1.2.1 Objetivos Específicos

- Investigación exhaustiva del estado del arte acerca de la conformación de la mano humana, dirigiendo dicha investigación a los dedos específicamente.
- Diseñar y construir un exoesqueleto que permita la movilidad efectiva de los dedos.
- Realizar la cinemática del mecanismo.
- Realizar la simulación del prototipo a desarrollar.
- Manufacturar partes del exoesqueleto.

1.3 Hipótesis

Puesto que la frecuencia de personas necesitadas de rehabilitación se propone el desarrollo del diseño y elaboración de un exoesqueleto para la mano, para de esta manera combatir la problemática que se aborda.

Usando el exoesqueleto repetida y cotidianamente se busca que el paciente mejore y/o adquiera una movilidad progresiva en los miembros a estimular en el proceso de rehabilitación con el fin de que la mano realice más movimientos que ayuden al paciente a su integración en las actividades de su entorno.

Dicho lo anterior y por esta razón se dará paso al desarrollo del exoesqueleto robótico para la mano, puesto que el mecanismo a desarrollar colaborará en la rehabilitación de este miembro y de esta manera asistir a los pacientes con afectaciones que lo requieran.

Con base en lo anterior el paciente podrá tener una rehabilitación adecuada permanente y/o continua dependiendo del seguimiento que se proporcione sin realizarlo propiamente en un centro de rehabilitación.

1.4 Alcances y limitaciones

En el presente trabajo realizaremos un exoesqueleto para rehabilitación para movilidad de los dedos de la mano del ser humano, donde el alcance que tendremos será diseñar cada una de los elementos que conformarán el exoesqueleto y la elaboración de dichos elementos conformantes, dejando el mecanismo ensamblado para la realización de las pruebas de control, las cuales están fuera del alcance directo que nos compete en desarrollo del proyecto.

Dentro de las limitaciones que tendremos durante el desarrollo del proyecto son las siguientes:

- Disponibilidad de la maquinaria y herramientas en laboratorio para la manufactura de las piezas conformantes del mecanismo.
- Suministro del material en tiempo y forma para la manufactura de las piezas del exoesqueleto.
- Que el diseño propuesto funcione correctamente una vez que se tenga el prototipo físicamente.
- Que el prototipo sea lo suficientemente ergonómico para el paciente.
- Que el sistema de control no tenga inconvenientes en su instalación en el prototipo diseñado.

1.5 Descripción del problema

En el tiempo ha emergido la Robótica médica y la Robótica de rehabilitación, esta última con el objetivo de aplicar las tecnologías en robótica (medición, actuación, control, etc.) para la rehabilitación y asistencia de personas discapacitadas. Actualmente se calcula que en todo el mundo hay aproximadamente 185 millones de personas que necesitan una silla de ruedas a diario. La preocupación del ser humano por mejorar la calidad de vida de las personas con problemas de movilidad, ha llevado a la necesidad de crear instrumentos de ayuda, un ejemplo son los exoesqueletos. Dentro de la Robótica de rehabilitación surge una interacción doble entre el dispositivo y la persona. [1]

La discapacidad por deterioro de las habilidades motoras, en personas económicamente activas, ocasiona que dicha población deje de trabajar, o en el mejor de los casos se incorpore a otro tipo de actividades. El objetivo del Programa Nacional para la atención de las personas discapacitadas 2001 – 2006 fue “promover entre la sociedad una nueva cultura de integración de las personas con discapacidad y su incorporación al desarrollo...” (INEGI 2004, Las personas con discapacidad en México, una visión censal). En el Censo General de Población y Vivienda 2000, del 100% de la población con discapacidad motriz, el 50.8% tenían 60 años o más, el 38.5% se concentraba en la población productiva, es decir en edad de trabajar y el 10.1% en menores de 15 años.

La Población Económicamente Activa (PEA) en un país, representa el esfuerzo de cada uno de sus habitantes que se encuentran en edad para realizar trabajos, si dentro de esta población se encuentra gente que por alguna razón está discapacitada y no es considerada apta para la producción, entonces suelen convertirse no sólo en una carga económica para su familia, sino para la sociedad. Si se lograra que al porcentaje actual de la PEA se incorporen discapacitados con oportunidades de trabajo mejor a los que actualmente tienen, su desempeño y autoestima indudablemente mejoraría.

La tecnología ha ayudado a los discapacitados a reincorporarse a la vida productiva, sin embargo, muchos de ellos no logran una completa rehabilitación y su oportunidad de encontrar empleo se ve minimizado por su incapacidad de paraplejia. [2]

Pero esto no sólo afecta a las personas con estas características, la sociedad deja de obtener una producción adecuada debido a que personas que se encuentran en edad productiva no se incorporan por problemas en sus habilidades motoras.

El ubicar el costo beneficio de la rehabilitación en personas económicamente activa permite conocer la necesidad de apoyo a esta población para su pronta incorporación al medio productivo. Además de motivarlos al sentirse que pueden apoyar económicamente a su familia, dejando de ser una carga.

Una de las áreas de aplicación más conocidas de la robótica cooperativa está en el sector industrial: existe un interés en su aplicación en el diseño de prótesis para personas que hayan perdido un miembro, la tele manipulación con destreza es una aplicación tecnológica muy deseable en la actualidad. Estas investigaciones pretenden extender el impacto de la robótica cooperativa en la rehabilitación de miembros y/o asistencia permanente a través de la interacción exoesqueleto-paciente.

La discapacidad afecta no sólo a la persona, sino también al núcleo familiar y a la comunidad de la que forma parte. Hidalgo se encuentra en el lugar 10 en el censo del 2000 con una población de 2.1 discapacitados por cada 100 habitantes, mientras que Chiapas se encontró en el último lugar de las entidades con 1.3 discapacitados por cada 100 habitantes. De lo anterior el porcentaje más alto de población con tipo de discapacidad motriz es del 45.3% seguido del visual. [2]

Sin embargo, se han establecido diversos convenios como el de la Organización Internacional del Trabajo, ratificado por México en abril del 2001, donde se pugna por un derecho que tienen estas personas de trabajar con igualdad de oportunidades.

La discapacidad es la condición de desventaja motriz de una persona; el discapacitado es una persona que tiene impedida o entorpecida alguna de las actividades cotidianas consideradas normales, por alteración de sus funciones intelectuales o físicas.

El INEGI proporciona la distribución porcentual de la población por causa de discapacidad según grupo de edad, misma que se muestra en la Figura 1. [3]

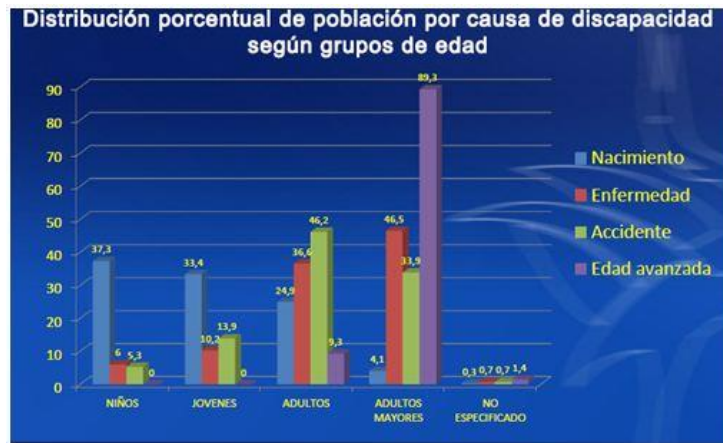


Figura 1. 1, Personas con discapacidad, Fuente: INEGI.

Cómo se puede observar en la Figura 1 es en la edad avanzada o adultos mayores donde se encuentra el mayor porcentaje; sin embargo, no se puede dejar de observar que lo que corresponde a discapacidades por accidentes también es un porcentaje importante y sobre todo en la edad adulta, que es donde la población es considerada productiva.

Las enfermedades perceptivas, cognitivas y músculo esqueléticas, que deterioran las habilidades motoras, se incrementan con la edad. En la década de los 50, el 4.9% de la población mundial eran personas mayores de 65 años y actualmente es el 20%. Se estima que para el año 2050 la población de adultos mayores excederá el 35%, con lo cual se espera se incremente de manera importante el número de discapacitados en el mundo.

Es importante retomar que anualmente 15 millones de personas en el mundo sufren un infarto y 5 millones quedan discapacitadas en forma permanente. Información que muestra que los discapacitados corresponden a una tercera parte de las personas que sufren un infarto.

En el caso de México hay que observar que uno de los porcentajes más altos en el 2000 se encontró en adultos siendo su discapacidad la motriz, misma que con rehabilitación o aparatos exoesqueletos apoyarían su inserción en la población productiva, este dato lo podemos observar en la Figura 1.2. [3]

Porcentaje de población por grupos de edad según tipo de discapacidad.

Grupos de edad	Motriz	Auditiva	Lenguaje	Visual	Mental
Total	45.3	15.7	4.9	26.0	16.1
Niños	35.1	12.0	10.3	15.1	33.9
Jóvenes	31.4	11.2	10.1	17.3	36.4
Adultos	43.2	12.0	4.7	28.7	15.7
Adultos mayores	55.1	21.0	1.4	30.5	3.7

NOTA: La suma de los tipos de discapacidad puede ser mayor a cien debido a la población con más de una discapacidad; el porcentaje se calculó en relación al total de personas con discapacidad en cada grupo de edad.

Figura 1. 2, Porcentaje de población por grupos de edades, Fuente: INEGI.

Según la OMS, existen más de mil millones de personas en el mundo que tiene algún tipo de minusvalía; casi 200 millones presentan dificultades considerables en su funcionamiento. Además, los discapacitados arrojan peores resultados sanitarios, académicos, de participación económica y de pobreza. Datos que van en aumento y que deberían de hacernos preocupar.

Hacer que una persona discapacitada pueda ser más independiente puede parecer un avance, una alegría inicial que contrastará con la decepción final cuando vea que seguirá sin sentir las extremidades afectadas, que seguirá sin poder controlar sus necesidades, que tendrá que mantener su medicación. El crecimiento del número de personas con discapacidades motoras de marcha ha llevado a la ingeniería a desarrollar nuevas técnicas para asistir la caminata. Una de las técnicas en desarrollo son los exoesqueletos de marcha. Estos dispositivos tienen como finalidad brindarles a los pacientes la posibilidad de recuperar movilidad y de esta manera integrarse a la sociedad activamente, superando las limitaciones físicas asociadas a la incapacidad de caminar. Los exoesqueletos son una alternativa tecnológica a las sillas de ruedas o a las artesas pasivas en la que el paciente realiza soporte y balanceo apoyado en caminadores, muletas o bastones.

Una característica común en los pocos modelos de exoesqueletos para sujetos con discapacidad de marcha existentes es que el sujeto debe realizar esfuerzo con las extremidades superiores a través de caminadores o bordones canadienses para mantener el equilibrio, restando de esta manera la autonomía del sujeto para realizar otras actividades con las extremidades superiores mientras se encuentra en pie o caminando. Aunque los exoesqueletos son una alternativa efectiva para sujetos con discapacidad de marcha, existen problemas tecnológicos que no han permitido que ellos sean instrumentos ampliamente difundidos o comercializados. Las estrategias de control son uno de los problemas más importantes en el diseño de los exoesqueletos por la confiabilidad y robustez que estas deben brindar. Una correcta estrategia de control no solo permite realizar los seguimientos de las referencias de marcha garantizando la estabilidad del sistema, sino también la optimización del consumo energético. Este último es importante para darle al exoesqueleto portabilidad energética. [4]

El problema que se engloba es la limitada, poca o nula movilidad en los dedos problemática de la cual nos estamos basando para dar una aplicación del exoesqueleto a proponer que permita contribuir de buena manera a la solución de dicho problema.

1.6 Los robots en la rehabilitación

La medicina representa un área de gran aplicación para los sistemas de control debido a la interacción, que en la actualidad ocurre, entre sistemas robóticos y el ser humano. Los robots médicos asocian fundamentalmente información de acción física que permita el mejoramiento significativo de la habilidad humana para desempeñar tareas importantes, como en intervenciones quirúrgicas, terapias de rehabilitación o simplemente ayudar a personas con discapacidad en las tareas de la vida diaria.

Una Enfermedad Vascul ar Cerebral (EVC) se define como el conjunto de trastornos cerebrales originados por la afección temporal o permanente a causa de una hemorragia o ausencia del riego sanguíneo, y que a su vez puede provocar un infarto cerebral. Los efectos de una EVC pueden variar desde leves hasta severos y pueden incluir parálisis, problemas de raciocinio, del habla, de visión y de la coordinación motora. Las EVC son un grave problema de salud, ya que representan la segunda causa de muerte y primera de discapacidad a nivel mundial, según datos de la Asociación Mexicana de Enfermedad Vascul ar Cerebral.

En la actualidad, gran parte de la actividad en terapia física y robótica de rehabilitación se ha centrado en la capacidad de rehabilitar el movimiento de las personas que han sufrido un evento de EVC o lesiones de la médula espinal. Las principales razones de este énfasis son (a) un número relativamente grande de pacientes en estas condiciones, (b) los altos costos asociados a la rehabilitación, y (c) el alto grado de avance que los pacientes pueden experimentar con una rehabilitación intensiva. De forma tradicional, la neuro-rehabilitación suele ser suministrada por terapeutas profesionales, incluyendo terapia física, ocupacional y terapia del habla. Este proceso lleva mucho tiempo, en donde el paciente aprende todos los días y realiza movimientos intensivos durante muchas semanas. Estudios realizados presentan evidencia científica de que la neuro-rehabilitación es un objetivo lógico para la automatización, debido a la naturaleza repetitiva de las tareas, la naturaleza mecánica, y porque el avance en la recuperación del paciente está vinculada con la cantidad de repeticiones que realice en su terapia. Además, un terapeuta robot puede evaluar cuantitativamente el avance, adaptando la terapia al paciente, permitiendo una planeación congruente de un programa de terapia.

En los últimos años se han diseñado diversos sistemas robóticos para rehabilitación, cuya eficiencia ha sido probada mediante diversos estudios clínicos. La gran mayoría de los avances logrados tienen que ver con la recuperación de la movilidad en extremidades superiores, para hombro y codo, y extremidades inferiores, para rodilla y tobillo. No obstante, pese al rápido crecimiento del sector, todavía se necesita trabajar intensamente para identificar nuevas soluciones de hardware y software, nuevos sistemas de control e instrumentos de validación de los resultados motores y funcionales. Por lo tanto, el desarrollo de dispositivos y esquemas de control de interacción, así como la integración de diversos sistemas sensoriales, resultan de gran importancia para garantizar terapias más personalizadas que permitan lograr una correcta rehabilitación y la reintegración de los pacientes a su vida cotidiana.

Recientemente, la comunidad de investigadores mexicanos que se dedican a la robótica ha mostrado un interés creciente en el desarrollo de aplicaciones enfocadas a procesos de terapia de rehabilitación. Se han presentado nuevos y mejorados diseños de sistemas robóticos para este fin, buscando con ello mejorar aspectos como un bajo costo, facilidad de uso, seguridad, capacidad, portabilidad, etcétera. Otra característica muy importante es que un sistema robótico logre estimular a los pacientes, con la finalidad de que la terapia no sea vista como un ejercicio fastidioso, aburrido o rutinario; para ello se ha buscado mejorar las interfaces para hacerlas atractivas, incluyendo juegos o dinámicas que permitan una evolución más placentera para el paciente. Por ejemplo, una terapia asistida por robots consiste en mover el efector final del robot de acuerdo con una serie de metas definidas en una interfaz gráfica de usuario (típicamente a través de juegos de video). Si durante el desarrollo de la terapia el paciente no pudiera desempeñar la tarea en respuesta a los estímulos visuales, el robot debe ser capaz de asistir y guiar al paciente para completar el ejercicio requerido por la terapia. De manera particular, el campo de la realidad virtual ha sido utilizado como complemento a las terapias de rehabilitación convencionales de pacientes que han sufrido una EVC. Dadas las ventajas de este tipo de sistemas, en algunos proyectos se plantea el uso de objetos de realidad virtual mezclados con escenarios del mundo real, generando con esto lo que se conoce como realidad aumentada, donde se pretende diseñar tareas de terapia más atractivas y estimulantes para el usuario.

Las aportaciones de la comunidad científica en esta área se han incrementado día con día y esto se ha visto reflejado en el creciente número de trabajos de investigación que se han presentado en las ediciones más recientes de congresos de la Asociación Mexicana de Robótica e Industria, la Sociedad Mexicana de Ingeniería Biomédica y la Asociación Mexicana de Control Automático, entre otras. Algunos de estos trabajos han surgido del trabajo interdisciplinario que realizan profesores-investigadores de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP) y que incluyen la colaboración de algunos investigadores de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP) y el Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica (IPICYT). Entre los proyectos que han surgido de esta colaboración se pueden mencionar el desarrollo de un sistema robótico para rehabilitación de hombro-codo, así como un sistema de terapia ocupacional basado en realidad aumentada. En el caso del sistema de terapia ocupacional ya se encuentra en una etapa inicial de evaluación y validación, en las instalaciones de la UASLP con la participación de especialistas del Instituto de Terapia Ocupacional (ITO). Para el financiamiento de estos proyectos se ha contado con el apoyo de las instituciones educativas en cooperación con la Secretaría de Educación Pública y el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. Las colaboraciones entre los profesores participantes han generado la publicación de artículos en revistas indexadas, congresos nacionales e internacionales, y la codirección de trabajos de tesis de licenciatura y posgrado.

Evidentemente un investigador no puede ser ajeno a las problemáticas sociales del país. Así, en situaciones adecuadas, resulta apropiado proponer soluciones tecnológicas a estos problemas tomando en cuenta sus consecuencias éticas y sus efectos sociales. La problemática en salud que representa la discapacidad ha motivado la aplicación de diversas herramientas tecnológicas, entre las cuales, la robótica se ha desarrollado en este campo a gran velocidad y aún representa un gran reto para investigaciones futuras. [5]

Como parte de la tecnología y sus avances dentro de la rehabilitación, la ingeniería toma un rol importante puesto que es la encargada de llevar a cabo el desarrollo de los modelos ya sean experimentales o puestos en marcha así como la realización de los estudios pertinentes tomando en cuenta todas las causas, características y demás detalles que conlleve la elaboración de algún aparato de rehabilitación.

La ingeniería de rehabilitación es el uso de la ciencia y los principios de la ingeniería para desarrollar soluciones y dispositivos tecnológicos para asistir a las personas con discapacidades, y para ayudar a la recuperación de las funciones físicas y cognitivas perdidas debido a una enfermedad o lesión.

Los ingenieros de rehabilitación diseñan y construyen dispositivos y sistemas para satisfacer un amplio rango de necesidades que puedan asistir a las personas con su movilidad, comunicación, audición, visión y cognición.

Estas herramientas ayudan a las personas con sus actividades y tareas cotidianas relacionadas con el trabajo, la vida independiente y la educación.

La ingeniería de rehabilitación puede incluir observaciones relativamente simples de cómo los trabajadores ejecutan tareas, y luego hacer adaptaciones para eliminar lesiones y molestias futuras.

En el otro extremo del espectro, la ingeniería de rehabilitación más compleja es el diseño de interfaces sofisticadas cerebro computadora que permiten que una persona con discapacidad severa pueda operar computadoras y otros dispositivos de asistencia con sólo pensar en la tarea que desea realizar.

Los ingenieros de rehabilitación también desarrollan y mejoran métodos de rehabilitación utilizados por individuos para recuperar funciones perdidas debido a una enfermedad o lesión, como la movilidad de una extremidad (brazo o pierna) después de un infarto cerebral o el reemplazo de una articulación.[6]

La investigación continua en ingeniería de rehabilitación involucra el diseño y desarrollo de dispositivos de asistencia nuevos e innovadores. Un área de investigación importante se enfoca en el desarrollo de nuevas tecnologías y técnicas para terapias mejoradas que ayuden a la gente a recuperar funciones físicas o cognitivas perdidas debido a una enfermedad o lesión. Por ejemplo:

Robótica de rehabilitación: que involucra el uso de robots como ayuda en la terapia en lugar de únicamente como dispositivos de asistencia. La robótica de rehabilitación inteligente ayuda en el entrenamiento de la movilidad para personas que sufren de alteración del movimiento, tal como después de un infarto cerebral.

Rehabilitación virtual: la cual utiliza ejercicios de simulación de realidad virtual para rehabilitación física y cognitiva. En comparación con las terapias convencionales, la rehabilitación virtual puede ofrecer varias ventajas. Es entretenida y motiva a los pacientes. Proporciona medidas objetivas tales como un rango de movimiento o resultados de juegos que se pueden almacenar en la computadora que opera la simulación. Un paciente puede realizar los ejercicios virtuales en casa y ser monitoreados por un terapeuta a través del Internet (conocidos como tele-rehabilitación), lo cual ofrece conveniencia así como costos reducidos.

Prótesis mejoradas: como piernas artificiales más inteligentes. Esta es un área donde los investigadores continúan haciendo avances en diseño y función para imitar mejor el movimiento natural de las extremidades y la intención del usuario.

- Aumento del uso sofisticado de computadoras: como la interfaz entre el usuario y varios dispositivos para permitir una mayor independencia e integración en la comunidad a las personas con discapacidad severa. Por ejemplo, las interfaces cerebro-computadora que usan los impulsos eléctricos del cerebro para que las personas puedan aprender a mover el cursor de la computadora o un brazo robótico que pueda alcanzar y coger cosas.
- Desarrollo de nuevas tecnologías: para analizar el movimiento humano, para entender mejor la electrofisiología del músculo y la actividad cerebral, y para monitorear con mayor precisión las funciones humanas. Estas tecnologías continuarán impulsando la innovación en dispositivos de asistencia y estrategias de rehabilitación.[6]

Debido a que dentro del desarrollo de aparatos tecnológicos para la rehabilitación se presentan ciertas características propias, las cuales si no se toman en cuenta tal cual como debe ser ponen en riesgo el desarrollo efectivo del proyecto aun siendo atractivo e interesante tecnológicamente hablando; algunos de estos aspectos que suelen no tomarse en cuenta se mencionan a continuación:

- Detección de las necesidades del (los) usuario(s).
- Evaluación efectiva de los resultados.
- Aspectos éticos y sociales
- Uso de tecnología económica
- Uso de tecnología proporcionada al problema.

- En resumidas palabras para la rehabilitación el uso de robots es sumamente importante porque estos aparatos facilitan a los especialistas a evaluar las situaciones de cada paciente así como su recuperación mediante los diversos métodos de rehabilitación usados en donde de manera directa intervienen las diversas herramientas que se tienen al alcance, incluidos los exoesqueletos.

1.7 Estado del arte

Los robots desde sus inicios se han construido para realizar tareas hechas inicialmente de forma manual. Esta finalidad ha llevado a menudo a construirlos con una estructura antropomórfica, guardando cierta semejanza con el brazo humano. Todo ello hace que esta tecnología sea traspasable al campo de la rehabilitación de forma relativamente simple, concretamente para construir elementos prostéticos y ortéticos.

El avance en el diseño las de prótesis ha estado ligado directamente con el avance en el manejo de los materiales empleados por el hombre, así como el desarrollo tecnológico y el entendimiento de la biomecánica del cuerpo humano.

Una prótesis es un elemento desarrollado con el fin de mejorar o reemplazar una función, una parte o un miembro completo del cuerpo humano afectado, por lo tanto, una prótesis para el paciente y en particular para el amputado, también colabora con el desarrollo psicológico del mismo, creando una percepción de totalidad al recobrar movilidad y aspecto.

La primera prótesis de miembro superior registrada data del año 2000 a. C., fue encontrada en una momia egipcia; la prótesis estaba sujeta al antebrazo por medio de un cartucho adaptado al mismo.

Con el manejo del hierro, el hombre pudo construir manos más resistentes y que pudieran ser empleadas para portar objetos pesados, tal es el caso del general romano Marcus Sergius, que durante la Segunda Guerra Púnica (218-202 a. C.) fabricó una mano de hierro para él, con la cual portaba su espada, ésta es la primera mano de hierro registrada.

En la búsqueda de mejoras en el año de 1400 se fabricó la mano de alt-Ruppin construida también en hierro, constaba de un pulgar rígido en oposición y dedos flexibles, los cuales eran flexionados pasivamente, éstos se podían fijar mediante un mecanismo de trinquete y además tenía una muñeca movable. El empleo del hierro para la fabricación de manos era tan recurrente, que hasta Goethe da nombre a una de sus obras inspirado en el caballero germano Götz von Berlichingen, por su mano de hierro.[7]



Figura 1. 3, Mano de alt-Ruppin construida con hierro en el año 1400, Fuente: XXX.

No es sino hasta el siglo XVI, que el diseño del mecanismo de las prótesis de miembro superior se ve mejorado considerablemente, gracias al médico militar francés Ambroise Paré, quien desarrolló el primer brazo artificial móvil al nivel de codo, llamado "Le petit Loraine" el mecanismo era relativamente sencillo tomando en cuenta la época, los dedos podían abrirse o cerrarse presionando, además de que constaba de una palanca, por medio de la cual, el brazo podía realizar la flexión o extensión a nivel de codo. Esta prótesis fue realizada para un desarticulado de codo. Paré también lanzó la primera mano estética de cuero, con lo que da un nuevo giro a la utilización de materiales para el diseño de prótesis de miembro superior. [7]



Figura 1. 4, Primer brazo artificial móvil, Fuente: XXX.

En el siglo XIX se emplean el cuero, los polímeros naturales y la madera en la fabricación de prótesis; los resortes contribuyen también al desarrollo de nuevos mecanismos para la fabricación de elementos de transmisión de la fuerza, para la sujeción, entre las innovaciones más importantes al diseño de las prótesis de miembro superior, se encuentra la del alemán Peter Beil. El diseño de la mano cumple con el cierre y la apertura de los dedos pero, es controlada por los movimientos del tronco y hombro contra lateral, dando origen a las prótesis autopropulsadas.

Más tarde el Conde Beafort da a conocer un brazo con flexión del codo activado al presionar una palanca contra el tórax, aprovechando también el hombro contra lateral como fuente de energía para los movimientos activos del codo y la mano. La mano constaba de un pulgar móvil utilizando un gancho dividido sagitalmente, parecido a los actuales ganchos Hook. [7]



Figura 1. 5, Prótesis de mano con pulgar móvil y gancho dividido sagitalmente [7], Fuente: XXX.

Las prótesis a lo largo del tiempo han sufrido avances tecnológicos han logrado ayudar a que los avances que se proyectan respecto al funcionamiento e impacto sea cada vez más cercano a los resultados deseados.

1.7.1 Antecedentes de Exoesqueletos.

Un exoesqueleto es un mecanismo que se fija sobre el cuerpo con la finalidad de amplificar fuerza y alcance, además de su aplicación en la industria para la realización de diversas tareas; también se ha diseñado para ayudar a personas con discapacidades.

¿Qué es un exoesqueleto?

El término exoesqueleto significa: esqueleto externo y se utiliza en biología para describir la estructura exterior y rígida de insectos o crustáceos. Por extensión, en el campo de la robótica y ortésica se utiliza este término para describir las estructuras externas rígidas que proporcionan soporte a las funciones motoras de la persona. De esta manera, podemos definir un exoesqueleto robótico como un mecanismo estructural externo cuyos segmentos y articulaciones se corresponden con las del cuerpo humano (estructura antropomórfica).

Se adapta o acopla a una persona de modo que el contacto físico entre el operador y el exoesqueleto permite una transmisión directa de potencia mecánica y señales de información, por lo tanto, el exoesqueleto debe ser ajustable o adaptable con el fin de alinear sus articulaciones con los centros de rotación de las articulaciones del cuerpo humano tales como hombro, codo y muñeca. Tomando en cuenta que se presenta un contacto físico entre la persona y el dispositivo robótico para proporcionar la potencia mecánica, debe existir una interfaz que tenga en cuenta las características del tejido blando del sistema muscular. Igualmente se deben considerar aspectos especiales como son la seguridad, robustez y habilidad del mecanismo robótico. Un exoesqueleto robótico es un mecanismo que permite ayudar a aquellas personas que padecen de limitaciones de movilidad a valerse de nuevo por sí mismas debido a que a través de la práctica repetida de movimientos con dispositivos robóticos los pacientes que se recuperan de un derrame cerebral, pueden volver a aprender como estirar y flexionar sus extremidades así como proporcionan energía para personas de la tercera edad o con parálisis para mover sus miembros.

Funcionamiento:

Al intentar mover una extremidad, unos sensores que están en contacto con la piel captan la actividad eléctrica del musculo y transmiten señal a una unidad de control.

La unidad de control responde activando un motor, que respalda al movimiento del paciente y lo ayuda a mover su extremidad. Los sensores monitorean y amplían de forma constante la actividad, permitiéndole al paciente practicar el movimiento y controlar su brazo. En el desarrollo de este proyecto se implementaron los conocimientos de distintas materias que se sustentan la investigación. Sistema de Control Motor Humano Una tendencia en la robótica de rehabilitación es el desarrollo de mecanismos protésicos y ortésicos biocinéticas.

Este objetivo requiere el desarrollo de tecnologías de actuación que proporcionen un comportamiento similar a los músculos, metodologías de control que exploten los principios biológicos. [8]

Los primeros trabajos en exoesqueletos iniciaron en la década de 1960 en los laboratorios de aeronáutica de la Universidad de Cornell [8].

A principios de la década de 1970, bajo el concepto de un amplificador humano, General Electric con el patrocinio de la armada estadounidense desarrollo el proyecto Hardiman [9], mediados de los 70, Vukobratovic desarrollo el primer exoesqueleto para sujetos con paraplejia, el cual fue controlado con un conjunto de servosistemas sincronizados [10].

Los últimos 10 años se han caracterizado por los avances en las estrategias de control y diseño de actuadores más eficientes para exoesqueletos amplificadores humanos [11].

El uso de exoesqueletos en el campo medico ha permitido devolverla la movilidad en pacientes con discapacidades motoras causadas por lesiones neuro-musculares, distrofia muscular o la pérdida de fuerza causada por el proceso natural del envejecimiento. Los exoesqueletos para uso médico también se conocen como órtesis activas. Una de las modalidades de los exoesqueletos confines médicos son los destinados para tratamientos terapéuticos de reentrenamiento del proceso de marcha. Exoesqueletos para reentrenamiento de marcha como Lokomat fabricado por Hocoma permiten identificar la fuerza ejercida por el sujeto por medio de la medida de señales más eléctricas. La medición de las señales mioeléctricas mientras se realiza la terapia de marcha permiten implementar controles que cumple-mente el esfuerzo del sujeto para lograr una caminata natural [12].

Un punto común de partida de estos estudios es tomar el cuerpo del sujeto como un sistema mecánico que está formado por múltiples eslabones correspondientes a segmentos del cuerpo, en el trabajo con exoesqueletos se deben acoplar dichos segmentos a una estructura exterior la cual forma el exoesqueleto.

La preocupación del ser humano desde hace muchos milenios por mejorar la calidad de vida de las personas que por accidentes o problemas congénitos han perdido la capacidad de movilidad o de manipular objetos, ha llevado a que se creen a lo largo de la historia diferentes dispositivos que pueden aliviar en parte distintos tipos de discapacidades.

Entre los siglos XV y XIX, existieron nuevos avances en la tecnología de las prótesis corporales, estos ya se fabricaban con hierro, acero, cobre y madera. Las guerras que se dieron durante estos siglos, impulsaron a realizar nuevos diseños de prótesis lo cual cambio de forma radical su fabricación.

Los exoesqueletos mecánicos, con propósitos médicos e industriales han saltado desde mediados del siglo XX. Gracias al avance de la ciencia ya podemos hablar de los primeros exoesqueletos dentro de la medicina los cuales ayudan a tener una mejor rehabilitación de algunos movimientos perdidos.

Tal ejemplo en la medicina es el exoesqueleto de Berkeley, la persona discapacitada puede ponérselo y a pesar de que se vea como una máquina pesada está realizada en aleaciones ligeras para evitar el peso al discapacitado y gracias a él las personas con la movilidad reducida obtienen un mejor desempeño ya que el esfuerzo lo realiza la máquina.

J.M. Climent (Climent, citado en E-innova, s.f, p.1) en su libro *Opera quirúrgica*, nos habla de un compendio de férulas (estructuras) renacentistas que puestas todas juntas parecen una armadura, la cual es un exoesqueleto del renacimiento.

Un exoesqueleto en la medicina está diseñado básicamente para asistir a la persona para cubrir todas las necesidades que normalmente no podrían hacer, lo único que se necesita es tener bien estudiado los movimientos del cuerpo. (E-innova, 1-7)

Debido a la complejidad del cuerpo humano, gran cantidad de investigadores han probado, diseñado y propuesto distintas formas para controlar dichas estructuras.

Un concepto básico de un sistema de exoesqueletos es, una armadura externa que cubre una parte del cuerpo.

En este trabajo el enfoque de los exoesqueletos va directamente a los miembros superiores específicamente a los dedos de la mano, por ello en el siguiente tema a pesar de que los exoesqueletos tienen diversas aplicaciones nos concentraremos en los que directamente nos interesan y que se apegan a nuestro tema central.

Por otra parte los exoesqueletos pueden ayudar a pacientes con discapacidades específicas a mejorar en su motricidad mediante el enfoque de entrenamientos enfocados a objetivos específicos y de acuerdo a las necesidades que el paciente requiera individualmente.

1.7.2 Aplicaciones de los exoesqueletos

Los exoesqueletos consisten en un mecanismo estructural externo acoplado a la persona y cuyas juntas y eslabones corresponden a las de la parte del cuerpo humano que emula. La principal característica de estas interfaces hombre-máquina, es que el contacto entre el usuario y el exoesqueleto permite transferir potencia mecánica y señales de información.

Los humanos han usado durante mucho tiempo las armaduras como exoesqueletos artificiales para su protección, especialmente en combate. Los exoesqueletos mecánicos han comenzado a ser usados con propósitos médicos e industriales, saltando del terreno de la ciencia-ficción, pero aún se encuentran en estado de prototipo.

Durante su funcionamiento, una serie de sensores biométricos detectan señales nerviosas que el cerebro envía a los músculos de nuestras extremidades cuando vamos a comenzar a andar. La unidad de procesamiento del exoesqueleto responde entonces a estas señales, las procesa y hace actuar el exoesqueleto en fracciones de segundos. Estos dispositivos son potencialmente de gran utilidad en la rehabilitación de personas discapacitadas o con debilidad muscular.

En el área de la robótica de rehabilitación hay una tendencia al desarrollo de exoesqueletos capaces de aplicar fuerza entre segmentos de la cadena cinemática del miembro superior. [13]

Por ello algunas de las tantas aplicaciones de los exoesqueletos son las siguientes:

- **Rehabilitación**

Los exoesqueletos para rehabilitación como bien su nombre nos lo indica están enfocados a apoyar a pacientes con alguna discapacidad o en su defecto poca/nula movilidad en algún miembro de su cuerpo a tener una pronta recuperación o ayudar a su desenvolvimiento dentro de la sociedad.

Estos aparatos varían dependiendo de las necesidades de los pacientes y de los cuales pueden ser para extremidades inferiores, superiores, torso e incluso neuronales.

- **Militar**

Para aplicaciones militares existen ya un significativo número de exoesqueletos entre los que destacan los siguientes:

Exoesqueleto bleex

"Berkeley Lower Extremity Exoskeleton (BLEEX)", capaz de aumentar la fuerza del piloto, ayudándolo a cargar herramientas pesadas; este exoesqueleto surgió con el fin de ayudar a soldados, rescatistas, bomberos y personal de emergencia los cuales debido a sus labores requieren llevar cargas pesadas.



Figura 1. 6, Soldado usando el exoesqueleto "Berkeley Lower Extremity Exoskeleton"(Bleex), Fuente: (14).

Exoesqueleto HULC

“Human Universal Load Carrier HULC”; Entre sus principales características se encuentran las siguientes, es un exoesqueleto antropomórfico que proporciona una capacidad de carga al usuario de hasta 200 libras en cualquier terreno, tiene un diseño de ahorro de energía que permite su uso en largas jornadas.



Figura 1. 7, Soldado usando un exoesqueleto HULC [14].

Estos son solo algunos de los variados modelos que existen para fines militares los cuales con el paso del tiempo y con el avance tecnológico se han ido mejorando.

- **Personas de la tercera edad**

Los exoesqueletos para cubrir esta necesidad se asemejan a los que tienen fines de rehabilitación, además de incluir elementos motorizados que facilitan la movilidad y transportación de personas de la tercera edad cuyos reflejos y capacidad de respuesta se ven disminuidos.

Es bien sabido que conforme la edad de una persona va en aumento sus capacidades de respuesta y reflejos se ven afectados haciéndolos más lentos y en ocasiones con dificultades o limitaciones para moverse de algún miembro de su cuerpo (piernas, brazos, manos, dedos, etc.) y es ahí donde este tipo de exosqueletos hace su aportación.



Figura 1. 8, Esqueletos motorizados, Fuente: XXX.

- **Asistencia o sustitución de algún miembro**

Estos exoesqueletos funcionan cuando una persona pierde un miembro de su cuerpo el cual es sustituido por un mecanismo que tendrá como función suplir dicha extremidad y en ocasiones dependiendo de la complejidad y estructura diseñada podría simular ciertos o en su totalidad movimientos que la extremidad realizaría.

Estos exoesqueletos podrían confundirse con prótesis.

- **Soporte postural**

Estos exoesqueletos están de igual manera relacionados con la clasificación descrita con anterioridad para personas de la tercera edad. La función de este tipo de exoesqueletos es mejorar posturas en el ser humano.

Algunos de los usuarios de este tipo de exoesqueletos son también personas con discapacidad, las cuales debido a problemas neuromusculares pueden perder la capacidad de realizar actividades diarias debido a la debilidad muscular; siendo síntomas de diversas enfermedades y afectaciones que conjugándose con el envejecimiento llegan a afectar los nervios que controlan los músculos y que los afectan directamente.

A continuación se muestra una tabla de patologías que derivan en problemas que afectan la movilidad de los músculos.

Tabla 1. 1, *Patologías y causas comunes en problemas neuro-musculares que causan debilidad* Fuente: [15].

Causas comunes de debilidad muscular
Apoplejía
Lesión de la médula espinal
Lesión nerviosa periférica (neuropatía periférica)
Inmovilización prolongada
Osteoartritis, artritis reumatoidea
Terapia prolongada con corticosteroides
Diabetes (neuropatía diabética)
Poliemielitis
Esclerosis lateral amiotrófica
Síndrome de Guillain-Barre
Distrofia muscular, distrofia miotónica
Miotonía congénita
Miopatía

- **Teleoperación**

La teleoperación comprende el conjunto de tecnologías que permiten a un operador la realización de tareas a distancia, teniendo su aplicación específica en el desarrollo de tareas en entornos que conlleven un riesgo al operador o bien sean inaccesibles.

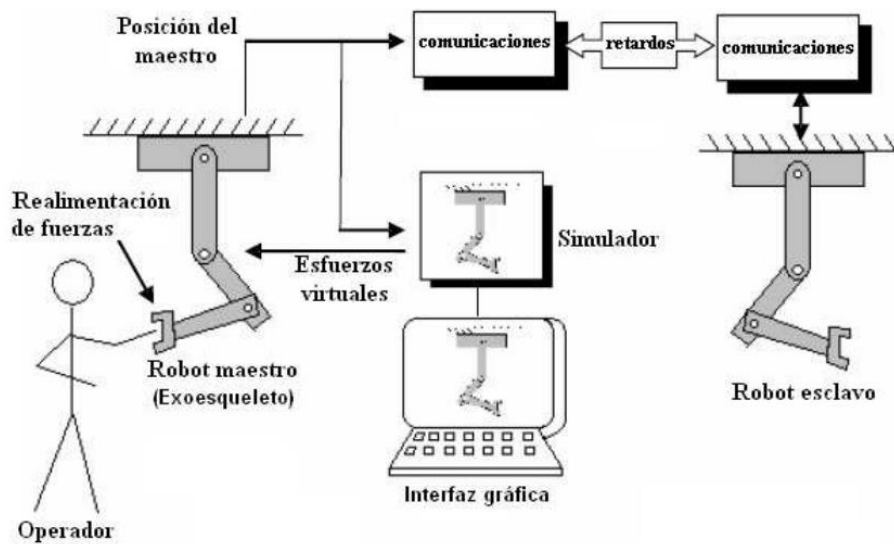


Figura 1. 9, Elementos que intervienen en un sistema de teleoperación. En este escenario un exoesqueleto robótico puede actuar como el robot maestro. Fuente: [15].

Un exoesqueleto utilizado como dispositivo maestro en un sistema de teleoperación, configurado en modo bilateral, permite al operador unido al exoesqueleto (maestro) controlar un brazo robótico (esclavo). Las fuerzas aplicadas sobre el brazo robótico por el entorno son reflejadas al maestro y aplicadas por la estructura y actuadores del exoesqueleto al brazo del operador. [15]

1.7.3 Clasificación de Exoesqueletos

Los exoesqueletos se pueden clasificar según la aplicación a la que va dirigida o en relación a las necesidades que va a cubrir, por ejemplo como vimos en el subtema anterior de acuerdo al uso que se le dará al mecanismo también se diseñan y sea partes mecánicas, sistema de control, robustez, eslabones y demás características que influyen en la operación y desempeño; todas estas especificaciones que conforman el exoesqueleto son tomadas en cuenta para su clasificación.

Para llevar a cabo una clasificación de los exoesqueletos, se deben tomar en cuenta también las diferentes topologías, configuraciones, tipos de sensores, análisis, modelo del miembro sobre el que se desea implementar y el control que se adaptará.

Una topología para fines prácticos, son las especificaciones que requerirá la aplicación y las topologías más importantes a tomar en cuenta se mencionan a continuación:

- **Antropomórfica:** se rige en tener un diseño tomando en cuenta cinemática, grados de libertad, distancias, posiciones y características que tengan consideración respecto al modelado del cuerpo humano
- **Número de DOF:** (degrees of freedom por sus siglas en inglés), esto es un parámetro importante para tomar en cuenta ya que cada elemento cuenta con determinados grados de libertad lo que nos permite realizar los movimientos de la manera en que los conocemos y estos movimientos son los que se tiene como objetivo que realice el exoesqueleto a presentar,
- **Tipos de actuadores:** esta consideración también es de suma importancia tomar en cuenta en cada momento, ya que los actuadores son elementos encargados de permitir que el movimiento programado se ejecute correctamente.
- **Transmisión de potencia:** este punto va de la mano con los actuadores puesto que necesitan de estos para poder operar o en ocasiones amplificar señales, movimientos, convertir un tipo de energía en otra, etc.
- **Aplicación del robot:** este tema es importante mencionarlo nuevamente ya que esto va a ayudar a definir de acuerdo a los puntos anteriores la selección de elementos que se pueden adaptar a nuestra necesidad.

La siguiente tabla nos muestra algunas posibles combinaciones de las topologías descritas anteriormente, que dependiendo de la necesidad que queramos satisfacer se puede jugar o ajustar las diferentes variantes que intervienen en la importantísima tarea de elegir las mejores opciones disponibles que van acorde al nuestro diseño.

Tabla 1. 2, Combinaciones para proponer un diseño de exoesqueleto. Fuente: XXX.

Exoesqueleto	Completo	Extremidad inferior	Extremidad superior
Aplicación	Rehabilitación	Militar	Comercial
Topología	Antropomórfica	No-antropomórfica	Pseudo-antropomórfica
	Pasivo		Activo
DOF	7 (3 cadera, 3 tobillo 1 rodilla)	17 (3 cadera, 3 tobillo 1 rodilla, 10 dedos)	
Control	PID	Difuso	Redes Neuronales
Mecanismo	Sistema libre		
Análisis	Cinemático	Cinemático inverso	Dinámico
	Modelación de piezas	Elemento finito	Manufactura
	Acondicionamiento señales		Procesamiento de señales
Modelo de caminar a seguir	ZMP		Dynamic Walking

Existen varias clasificaciones de estos dispositivos en función del tipo de actuadores utilizados (eléctrico, hidráulico, neumático, etc.), el tipo de control, la cadena cinemática y la aplicación como objetivo. La mayoría de los dispositivos actuales son interfaces sujetas a una base externa. Otra clasificación se puede hacer teniendo en cuenta su portabilidad. Basándonos en su portabilidad podemos clasificar a los exoesqueletos como no portátiles y portátiles. [15]

Y a pesar de las variadas clasificaciones que se pueden tener respecto a los exoesqueletos para nuestra aplicación que va enfocada a rehabilitación de los dedos, tomaremos como base la última que se mencionó y tomaremos la clasificación como exoesqueletos portátiles y no portátiles, clasificación que se esquematiza en la figura 1.10.

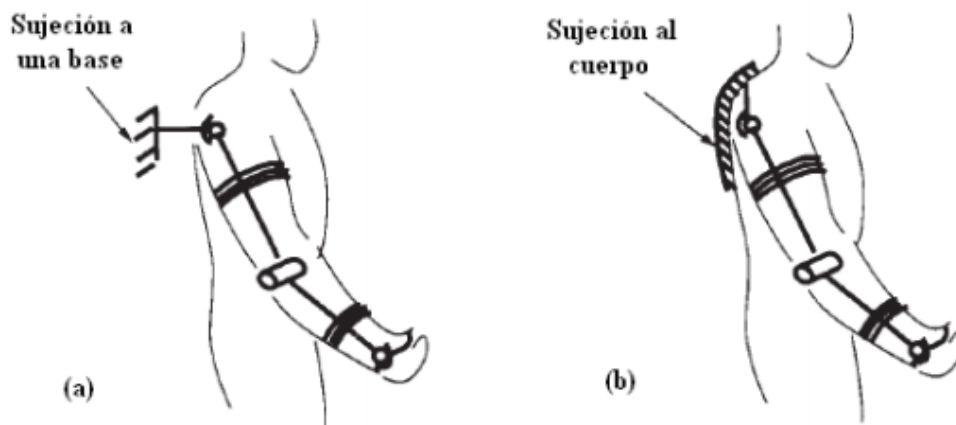


Figura 1. 10, Clasificación de interfaces exoesqueléticas teniendo en cuenta su portabilidad: a) Exoesqueletos no-portátiles. b) Exoesqueletos portátiles. Fuente: [15].

Exoesqueletos no portátiles

Dentro de esta categoría se incluyen las estructuras exoesqueléticas que se encuentran ancladas a una base fija, tal como el suelo, la pared o el techo. En general estas interfaces son más pesadas y complejas que los exoesqueletos portátiles. Debido a que suelen tener la capacidad de producir fuerzas de salida mayores. Además, la seguridad es especialmente importante en su diseño.

En este tipo de dispositivos, el peso y volumen de los actuadores no llega a ser una restricción en el diseño, teniendo en cuenta que éstos pueden residir en la base y transferirse las fuerzas de actuación a través de transmisiones como cables y poleas. De esa forma, estos dispositivos pueden construirse utilizando tecnologías tradicionales en actuación. [15]

Exoesqueletos portátiles

Estas interfaces portátiles se distinguen de las anteriores en que el soporte sobre el que se apoya todo el peso del exoesqueleto es el propio usuario o un dispositivo móvil con el usuario, como por ejemplo una silla de ruedas. De esta forma los exoesqueletos portátiles ejercen las fuerzas de reacción sobre el usuario en los puntos de sujeción, mientras en los dispositivos no-portátiles dichas fuerzas son ejercidas sobre la base.

La característica de portabilidad en un dispositivo obliga a diseñar interfaces de bajo peso y volumen, para evitar problemas de fatiga. Los actuadores deben disponer de una alta relación potencia-peso y potencia volumen para poder ser utilizados en estas interfaces. Se clasifican en dos grandes grupos: los exoesqueletos para el brazo y para la mano (tipo guantes).

Adicionalmente, las interfaces exoesqueléticas portátiles requieren un compromiso en el número de grados de libertad. La restricción de peso impide un gran número de actuadores, pero a la vez se necesitan un mínimo de grados de libertad para poder ejercer las fuerzas de forma apropiada sobre el brazo de la persona. [15]

1.7.4 Exoesqueleto de miembro superior y mano

Estos exoesqueletos son principalmente para fines de rehabilitación de las cuales las patologías pueden ser diversas.

En la actualidad también existe una diversidad de aparatos que contribuyen al movimiento de la mano ya sea con fines de rehabilitación o de fortalecimiento de músculos de las diferentes partes que conforman el miembro superior incluidos los dedos. Con el avance que día con día de la tecnología, permite que estos aparatos sean cada vez más sofisticados y novedosos, lo cual requiere el uso de fuerzas externas que activen los sistemas utilizados para generar el trabajo que se pretende haciendo que sean aparatos que necesiten de mayor conocimiento al operarlo además de que requiera de cuidados y mantenimientos específicos a estos elementos para un funcionamiento óptimo.

En las siguientes paginas hablaremos enumeraremos algunos de los exoesqueletos para miembro superior que se han realizado, así como sus antecedentes y la evolución con el paso del tiempo y con la aportación tecnológica.

En 1993, la Universidad de California de Berkeley, presenta un extensor hidráulico que determina las reglas para el control de un sistema robótico cargado por humanos, especificando la relación entre la fuerza humana y la fuerza de carga, como se muestra en la Figura 1.11.

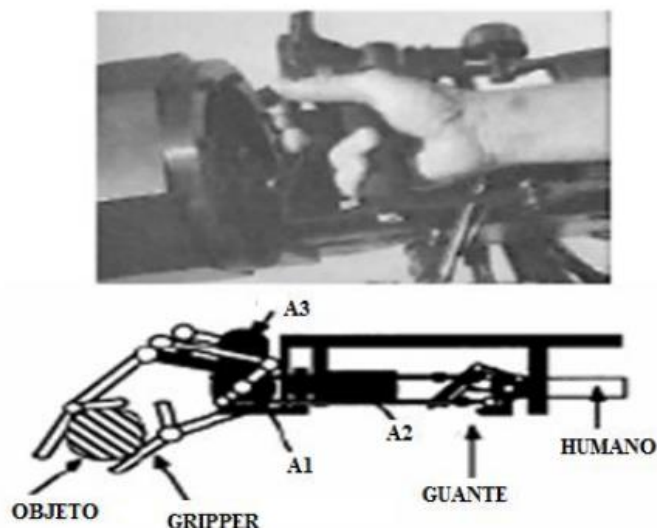


Figura 1. 11,Extensor hidráulico. Fuente: [13].

En 2003, la Universidad de Salford presentó un exoesqueleto para reducir la carga que conllevan los tratamientos psicoterapéuticos para la rehabilitación de pacientes, lo cual se ilustra en la Figura 1.12.



Figura 1. 12,Exoesqueleto para rehabilitación en tratamientos psicoterapéuticos Fuente:[13].

En 2003 la Universidad de Tokio, proporciona soporte muscular que ayuda tanto a trabajadores manuales como para personas que necesitan de ayuda para realizar movilidad en el brazo, en la Figura 1.13 se observa el prototipo realizado.



Figura 1. 13, Soporte Muscular para Trabajadores, Fuente: 13.

Estos modelos mencionados se consideran como precursores de los exoesqueletos que conocemos actualmente, ya que no tenían el avance y desarrollo tecnológico que ahora vemos en cada modelo que se diseña hoy en día.

Los exoesqueletos que se mencionan a continuación contienen un grado de complejidad mayor así como una inclusión de tecnología haciéndolos más sofisticados.

En primer lugar tenemos el estudio donde se habla sobre la integración de un brazo humano con una articulación motorizada controlada por otra persona de forma natural, este proyecto fue desarrollado en la Universidad de Washintong en el año 2005 y se muestra en la Figura 1.14 que vemos a continuación.



Figura 1. 14, Integración del brazo humano con articulación motorizada. Fuente: [13].

En el mismo año, Saga University presentaba un exoesqueleto para asistir a las extremidades humanas superiores para su rehabilitación diaria, los movimientos que lograba eran flexión-extension de hmbro, codo, muñeca, etc; siendo un precursor de los exoesqueletos para fines de rehabilitación modernos. Este modelo se ejemplifica en la Figura 1.15.

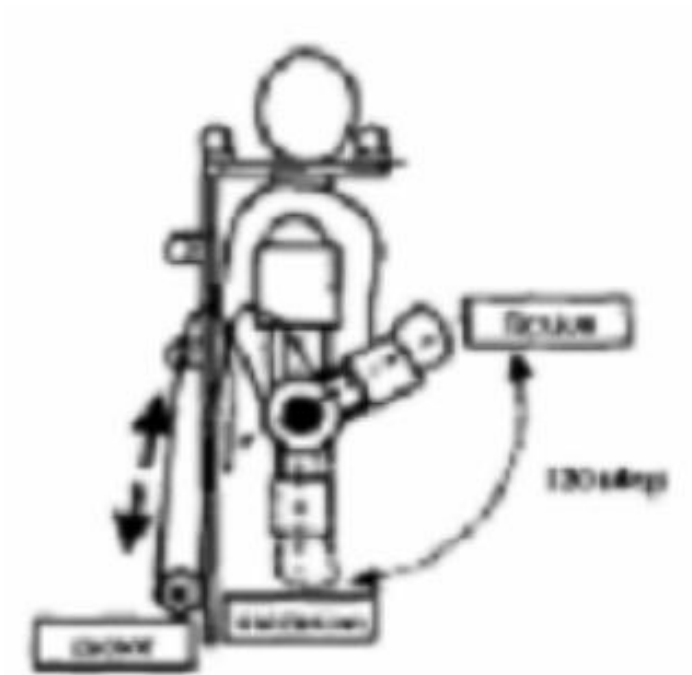


Figura 1. 15, Exoesqueleto para rehabilitación. Fuente: [13].

Al mismo tiempo (2005), en el Instituto de Automática Industrial-CSIC, de igual manera presentó WOTAS, que es un exoesqueleto activo para las extremidades superiores de las personas, su funcionamiento se basa en la integración de sistemas robóticos que tienen la capacidad de aplicar fuerzas externas para contrarrestar el temblor producido por el Parkinson que sufren los pacientes, en la Figura 1.16 podemos observar el exoesqueleto y los elementos que lo conforman.

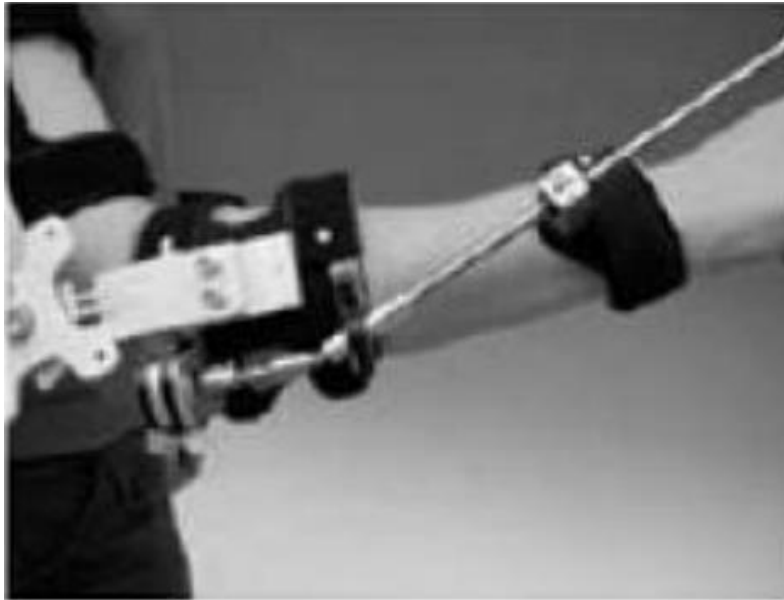


Figura 1. 16, WOTAS. Exoesqueleto para reducir temblor de Parkinson. Fuente: [13].

En el mismo Año, la Universidad de Okayama, desarrolla ASSIST, el cual es un soporte conformado por actuadores de tipo neumático ligeros para cumplir con el movimiento de abducción y aducción de la muñeca, fijando los elementos de en tres puntos de mano y brazo para tener soporte y rigidez del exoesqueleto, en la Figura 1.17 se muestra el funcionamiento de ASSIST.



Figura 1. 17, ASSIST, soporte para abducción y aducción de la muñeca. Fuente: [13].

Continuando durante el mismo año 2005 es desarrollado PERCO Light Exoesqueleto (LEXOS), que es también un exoesqueleto en forma de brazo, con cuatro grados de libertad cuyo propósito es retroalimentar la fuerza del brazo humano, es un mecanismo más robusto que debido a los fines que se quiere, así lo demanda el diseño; y este exoesqueleto se muestra en la Figura 1.18.



Figura 1. 18, LEXOS, Exoesqueleto para retroalimentación del brazo. Fuente : [13].

De modelos más recientes se incluye WREX (Wilmington Robotic Exoskeleton Arm), el cual fue diseñado para cubrir necesidades principalmente de niños y su función primordial es asistir en sus actividades diarias y en ocasiones puede acoplarse también como aparato de rehabilitación para personas en recuperación de accidentes cerebrovasculares dando soporte a los miembros superiores. Una de las ventajas de este prototipo es que debido a su fabricación es en gran proporción de material impreso en 3D se puede adaptar a varios modelos fácilmente para diferentes medidas ya sea para diferentes personas o en medida que el niño crece; en la figura 1.19 se muestra el exoesqueleto por si solo y adaptado a un paciente.



Figura 1. 19, Exoesqueleto de asistencia para niños (WREX), Fuente: [16].

Otro modelo de exoesqueleto para brazo es el Titan Arm, cuyo desarrollo con fines de rehabilitación y fortalecimiento en ejercicios terapéuticos, unas de sus características principales es que integra un sistema de control que calcula los movimientos realizados de una manera más en tiempo real, esto se logra gracias a los sensores magnéticos que se le adaptan; además de ser un exoesqueleto relativamente compacto y ligero. Este modelo se muestra en la Figura 1.20.



Figura 1. 20, Exoesqueleto para aumentación de miembro superior Titan Arm., Fuente : [16].

El siguiente exoesqueleto es ya un producto puesto que se comercializa, hablamos del Armeo Power que ayuda a la rehabilitación de las habilidades motoras de los miembros superiores; va dirigido a la comunidad que sufre de discapacidades en el brazo, es un aparato bastante sofisticado y algunas de las características y aportes que ofrece son las siguientes: Cuenta con 6 grados de libertad, ofrecen fuerza según la necesidad del paciente, simula actividades de la vida diaria, cuenta con herramientas que documentan el progreso del paciente para poder tener un control y poder analizar los avances y resultados de cada paciente con mayor facilidad; es sin duda una gran opción para usar por terapeutas en pacientes con las características que se mencionaron anteriormente. Este robot como se muestra en la Figura 1.21, cuenta con un tecnología más avanzada en comparación a los exoesqueletos que me comparan en páginas anteriores.



Figura 1. 21, Exoesqueleto para rehabilitación de miembro superior Armeo Power. Fuente:[16].

Otro exoesqueleto que se considera dentro de esta comparativa es MyoPro, que es una órtesis ligera, portable y adaptable al usuario; la cual asiste al movimiento de brazos debilitados. Como bien se observa esta órtesis se adapta en casi la totalidad del brazo para cumplir con función correctamente, además que no causa limitaciones al usuario puesto que su diseño es ergonómico, característica importante a considerar para tener satisfacción del usuario.

En la Figura 1.22 se ilustra el uso de MyoPro por un paciente.



Figura 1. 22, Exoesqueleto de asistencia MyoPro. Fuente: [16].

Y para culminar esta comparativa de exoesqueletos de miembro superior agregaremos un prototipo de la empresa Ciber Glove System, quienes diseñan un exoesqueleto flexible con fines de aportar a la realidad virtual, siendo su objetivo principal recrear el sentido del tacto en la realidad virtual, para generar una fuerza al tener ese contacto virtual; aunque la aplicación es diferente al de la rehabilitación el principio del funcionamiento es el mismo y para llegar a tener un resultado satisfactorio para este prototipo se investiga el funcionamiento de tendones en los dedos para reproducir de manera artificial la sincronía de la mano de un apersona.

En la Figura 1.23 vemos el prototipo que hasta el momento ha generado de manera experimental la empresa Ciber Glove Systems.



Figura 1. 23, Prototipo Ciber Glove. Fuente: [17].

Como resumen se muestra una tabla comparativa donde se incluyen algunos de los exoesqueletos que se describieron.

Tabla 1. 3, Comparación de exoesqueletos para miembro superior. Fuente: [17]

	WREX [6]	Titan Arm [7]	ArmeoPower [8]	MyoPro [9]
Grados de libertad	4	4 (1 activo, 3 pasivos)	6 (todos activos)	1 (activo)
Peso	Variable	8kg (18 lb)	205 kg	1.25 kg (2.75 lb)
Carga admisible	N.A.	18 kg(40 lb)		7 Nm en la junta
Material principal	Metal, plástico (impreso 3D)	Aluminio	Varios	
Tipo de control	N.A.	Joystick	Joystick	Por la intención de movimiento del usuario
Actuadores	Motor con bandas elásticas (similar a	Motor eléctrico con cables de metal	Motores eléctricos	Motor DC
Sensores	N.A.	Sensores magnéticos de posición	Sensores angulares (2 por motor) y de fuerza (en la agarradera de mano)	Sensores mioeléctricos (sensibilidad de 3 μ V)
Alimentación	N.A.	Batería de polímero de litio (Li-Pol) de 2 horas de duración	Conectado a la red (100-240 V~ / 50/60 Hz)	Batería de 12 V 800mAh de NiMH

CAPÍTULO

2



*MODELADO DE LA MANO
HUMANA*

Capítulo 2. Modelado de la mano.

2.1 Conformación de la mano humana

La mano humana es un elemento vital para el ser humano, puesto que es una extremidad que nos permite tener una inter relación con nuestro entorno; la mano tiene un grado de complejidad bastante elevado puesto que su conformación de huesos, tejidos, articulaciones y músculos está ligada directamente puesto que dependen una de otra para un desempeño correcto.

Cada uno de los elementos mencionados son funcionalmente elementales para el hombre, puesto que dar una explicación detallada de estos miembros no es el fin para nuestro proyecto; por lo que nos enfocaremos directamente a hablar de la muñeca y falanges ya que son los elementos que nos interesa estudiar para comprender su funcionamiento y aplicarlo al exoesqueleto que desarrollaremos.

La mano humana, pese a su complejidad, resulta ser una estructura perfectamente lógica, completamente adaptada a sus múltiples funciones. Su arquitectura refleja el principio de Occam de la economía universal. Es uno de los más bellos logros de la naturaleza. [18]

El ser humano tiene 2 manos, las cuales entre las funciones destacadas que realizamos con ellas son actividades motoras, burdas y sutiles. A su vez la mano compone de dedos los cuales su conformación constituye una de las zonas con mayor densidad de nervios y esto lo podemos constatar porque a través de ellos percibimos y recibimos una retroalimentación física y táctil al tener un contacto directo con objetos, personas, y/o sensaciones que se perciben a través del sentido del tacto.

La posición que tienen las manos y dedos en la estructura del cuerpo humano nos otorga ciertos beneficios como por ejemplo tener una buena capacidad de posicionamiento y además de tener un agudo sentido del tacto.

De manera general la mano humana se compone de los siguientes elementos enlistados:

- Los pulgares opuestos
- Amplia Palma o metacarpo
- Cinco dedos en cada palma
- Antebrazo
- Muñeca o carpo
- Dorso

Cada uno de los elementos mencionados son funcionalmente elementales para el hombre, puesto que dar una explicación detallada de estos miembros no es el fin para nuestro proyecto; por lo que nos enfocaremos directamente a hablar de la muñeca, falanges y en caso de ser necesario, el antebrazo; ya que son los elementos que nos interesa estudiar para comprender su funcionamiento y aplicarlo al exoesqueleto que desarrollaremos.

2.1.1 La muñeca

La muñeca es una de las articulaciones biomecánicas más complejas del cuerpo humano, pues si bien se posee una gran movilidad, esta se produce bajo fuerzas de compresión, cizallamiento, y torsión las cuales tienden a una desestabilización. Para evitar esta problemática y con el detalle (en contra) de no contar con grandes masas musculares alrededor de ella, la muñeca necesita un complejo sistema capsulo ligamentoso. Una buena movilidad y estabilidad son algunas de sus características biomecánicas más esenciales. [19]

La muñeca se compone principalmente de siete huesos que se estructuran en dos hileras transversales. En la hilera proximal se sitúan el escafoides (*as scaphoideum*), el semilunar (*as lunatum*) y el piramidal (*as triquetrum*). En la hilera distal se encuentran el trapecio (*as trapezium*), el trapezoide (*as trapezoideum*), el hueso grande (*as capitatum*), el ganchoso (*as hamatum*). El hueso pisiforme (*as pisiforme*), incluido por varios autores en el grupo de los huesos carpianos de la hilera proximal, presenta características funcionales diferentes a las de las demás huesos carpianos proximales, por lo que otros autores lo consideran como un elemento independiente, con función sesamoidal respecto al tendón del cubital anterior (*flexon carpi ulnaris*). [19]

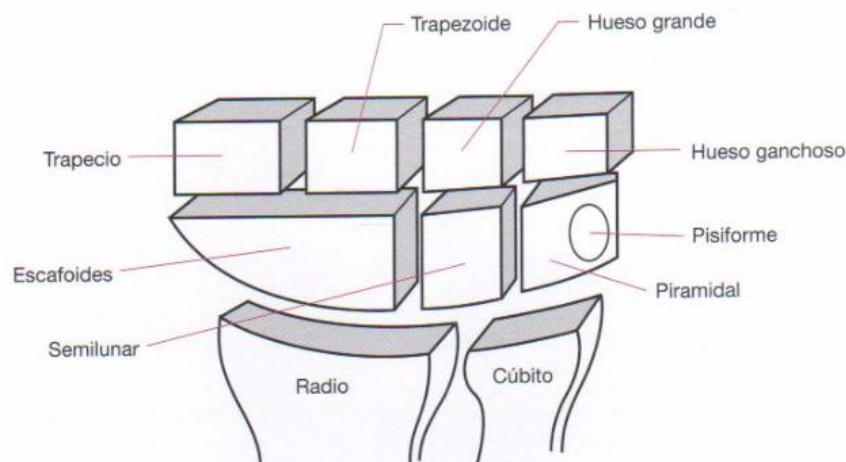


Figura 2.1 Huesos que conforman la muñeca [20]

El carpo es relacionado con los huesos del antebrazo mediante la articulación radiocarpiana y distalmente con las bases de los cinco metacarpianos mediante sus articulaciones. Entre las hileras proximal y distal se encuentran las articulaciones mediocarpiana y entre los distintos huesos de cada hilera están las articulaciones intercarpianas.

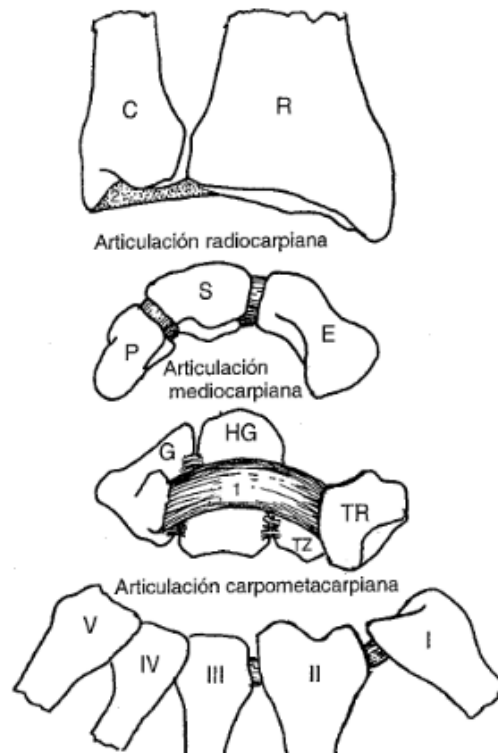


Figura 2.2 Representación esquemáticas de la muñeca y sus articulaciones [19]

En la muñeca los ligamentos son intracapsulares, es decir, se encuentran dentro del espesor de la capsula articular, esta estructura además está formada por tejido adiposo sinovial, siendo una cara palmar más gruesa.

Existen dos tipos de ligamentos:

- Extrínsecos
- Intrínsecos

Los ligamentos extrínsecos de manera general relacionan los huesos del carpo con el radio o el cúbito, mientras que los intrínsecos relacionan los huesos carpianos entre sí. Los primeros son más largos y resistentes a los traumatismos.

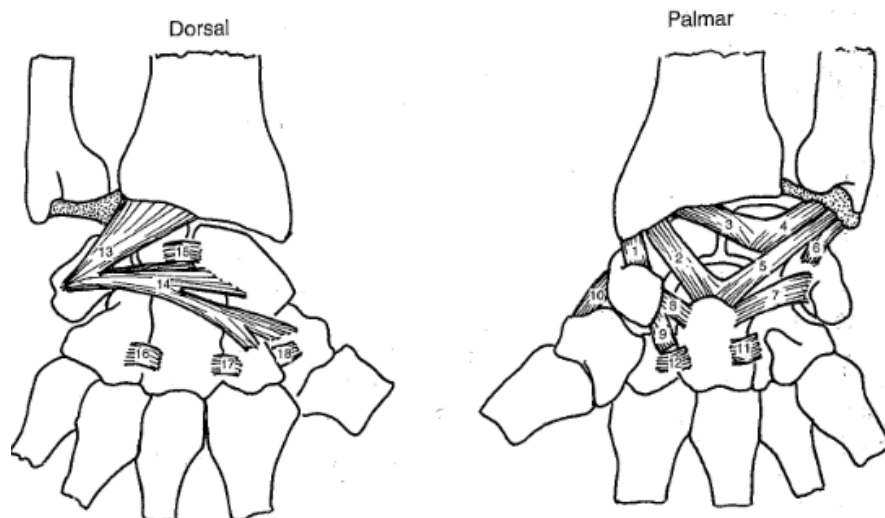


Figura 2.3 Esquema de ligamentos de la muñeca [19]

2.1.2 La mano

Los movimientos de los dedos se describen en relación con el eje de la mano y no del cuerpo entero. En otras palabras, la mano posee su propia línea media, que cursa longitudinalmente a lo largo del tercer hueso metacarpiano y el dedo medio (radio). La abducción y aducción de los dedos, incluido el pulgar, están en relación con la línea media, de modo que separar los dedos entre sí constituye abducción y aproximarlos, aducción. Las articulaciones metacarpofalángicas están compuestas por una superficie irregularmente convexa que se articula con una «concauidad» poco profunda, la cual permite un movimiento considerable. Las falanges, en cambio, son articulaciones en gozne y se limitan a flexión y extensión. Al igual que los metacarpianos, las falanges poseen una base proximal, una diáfisis y una cabeza (distal), convenientemente diseñadas para apilarse una tras otra. Los dedos están compuestos por tres falanges, una a continuación de la otra, salvo en el caso del pulgar, que presenta dos.

El extremo proximal de la falange proximal incluye una faceta oval cóncava que se ajusta a su cabeza convexa, asociada al metacarpiano.

El extremo distal (cabeza) de la falange proximal presenta una acanaladura suave (similar al surco de una polea) que recibe la base de la falange media.

Esta última posee dos facetas cóncavas con un suave re-borde entre ellas, para ajustarse al surco antes mencionado.

La cabeza de la falange media es similar a la cabeza de la falange proximal, con una acanaladura de polea para recibir a la falange distal.

La falange distal se adecua al surco antedicho, en tanto presenta una cabeza no articular que porta una tuberosidad palmar rugosa para la fijación de los pulpejos de las puntas de los dedos. [18]

Los metacarpianos se articulan con un borde irregular de la fila distal del carpo. [20]

Los dedos (en cada mano) se identifican de la siguiente manera.

- Dedo índice
- Dedo medio
- Dedo Anular
- Dedo meñique
- Dedo pulgar

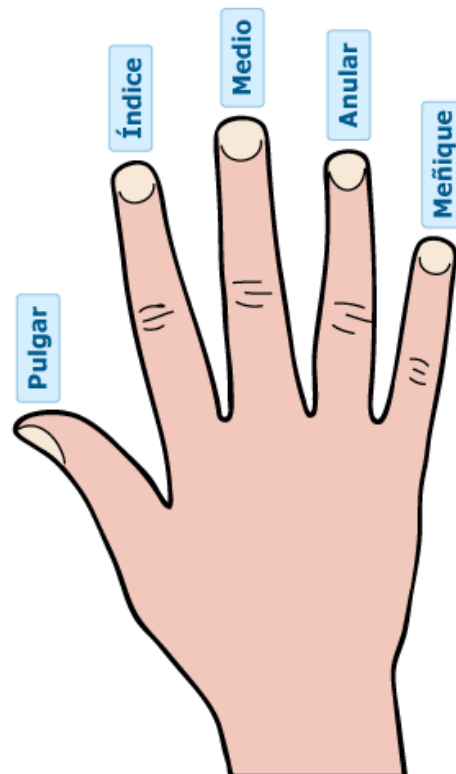


Figura 2.4 Representación de los dedos

Este último está conectado al trapecio y puede ser girado a 90° (perpendicularmente a la palma de la mano), mientras que el resto de los dedos únicamente tienen un movimiento de 45° .

Los dedos de la mano están diseñados para un uso funcional preciso en formas aparentemente infinitas. [18]

2.2 Rangos de movilidad de la muñeca y de la mano

Las diferentes partes del cuerpo tienen rangos de movimientos los cuales son teóricamente iguales en todas las personas, para nuestro análisis tomaremos en cuenta estos rangos de movimiento para la muñeca y la mano, para de esta manera crear el diseño del mecanismo que le dará vida a nuestro exoesqueleto.

Para la muñeca tenemos que, presenta movimientos que están mediados por las articulaciones que forman radio y cubito con los huesos que conforman la mano; estos movimientos son los siguientes:

- **Flexión – Extensión:** El arco total formado es de 170° dividiéndose 80° para la flexión y 70° para la extensión.

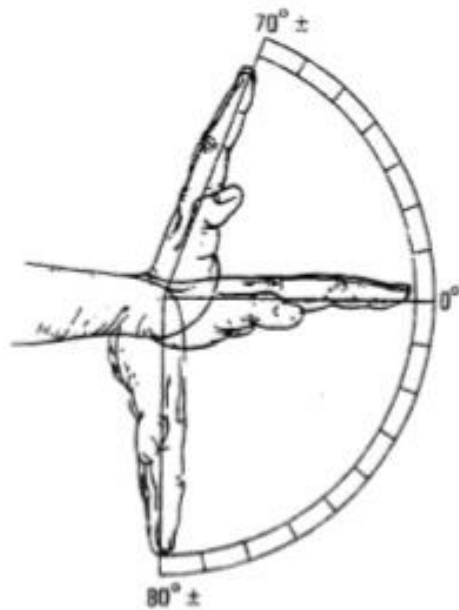


Figura 2.5 Flexión – Extensión de la muñeca.

- **Desviación:** Esta puede ser radial o cubital y describen un arco total de 50° dividiéndose 30° para la desviación cubital y 20° para la desviación radial.

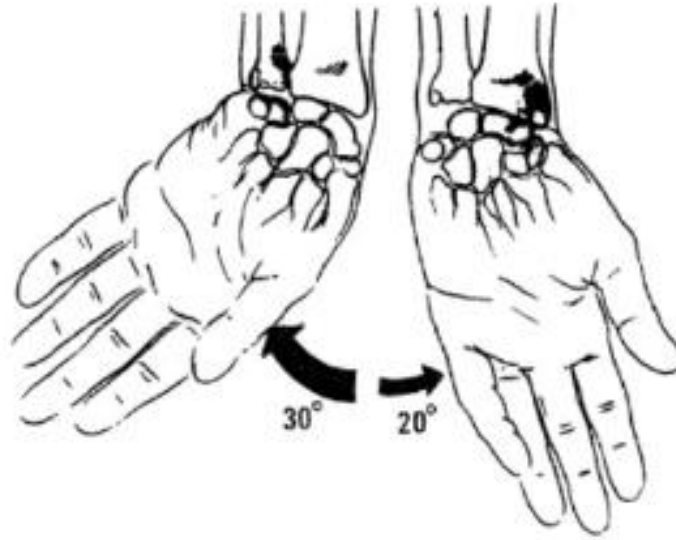


Figura 2.6 Desviación de la muñeca.

Para la mano por tener más miembros conformantes (en comparación con la muñeca), los movimientos que posee son mayores.

Por tener los dedos y en especial el pulgar, la mano posee números movimientos en los cuales intervienen las articulaciones falángicas entre las que destacan los metacarpos; los principales rangos de movimientos de la mano son los siguientes:

- **Flexión – Extensión Metacarpofalángica:** el arco total de movimiento es de 120° a 135° y está dividido en 90° para la flexión y 30 a 45° para la extensión.

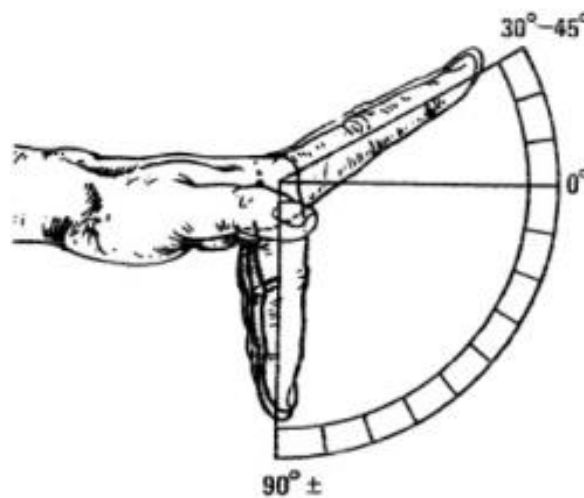


Figura 2.7 Flexión – Extensión. Metacarpofalángica.

- **Flexión – Extensión Interfalángica proximal:** tiene un arco de movimiento total de 100° asociados únicamente para la flexión, en la normalidad no existe extensión de esta articulación.

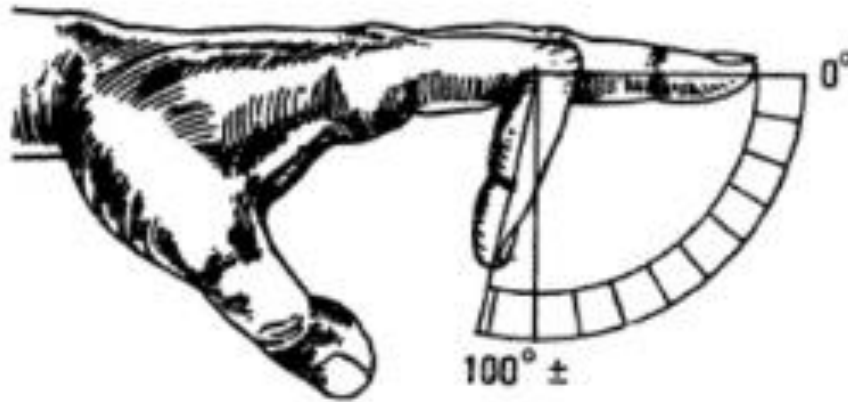


Figura 2.8 Flexión – Extensión. Interfalángica proximal.

- **Flexión – Extensión interfalángica distal:** tiene un arco de movimiento total de 90° a 100° dividido en 90° para la flexión y 0° a 10° para la extensión.

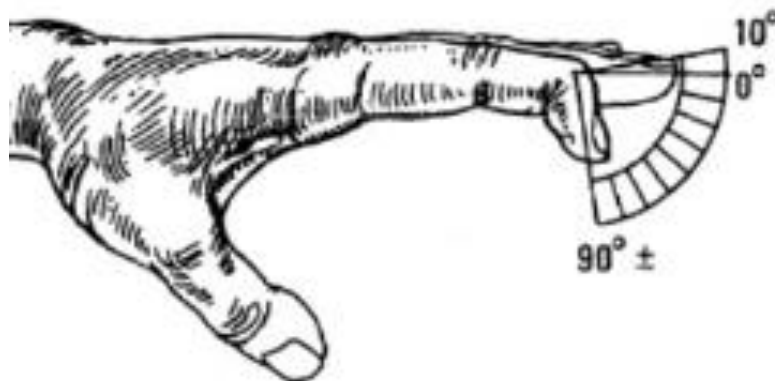


Figura 2.9 Flexión – Extensión. Interfalángica distal.

- **Abducción – Aducción de los dedos:** es el movimiento en el cual los dedos se juntan y se separan entre sí, en la abducción deben separarse 20° entre si y en la aducción se juntan y se tocan entre sí.

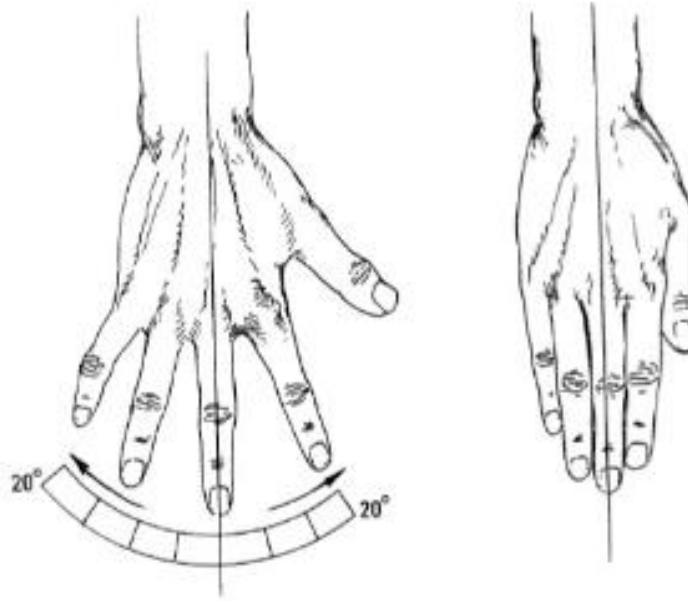


Figura 2.10 Abducción – Aducción de los dedos

- **Flexión - Extensión del pulgar:** En la normalidad, este movimiento será capaz de que toquemos la punta del meñique con la de nuestro pulgar si ambos están flexionados.

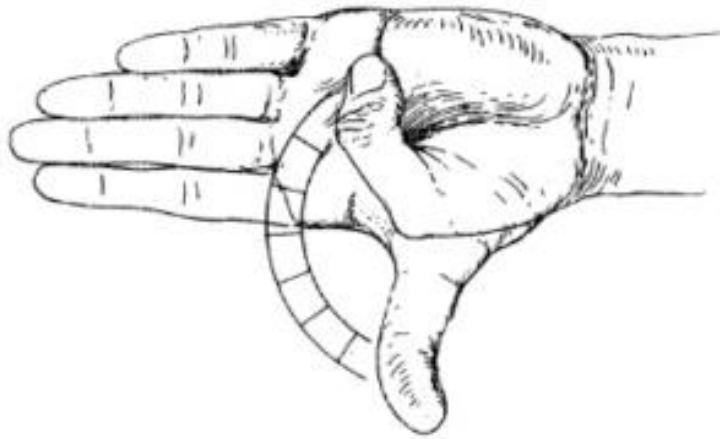


Figura 2.11 Flexión – Extensión del pulgar.

- **Flexión – Extensión Metacarpofalángica del pulgar:** Describe un arco de 50° en flexión si haber ángulo de extensión.

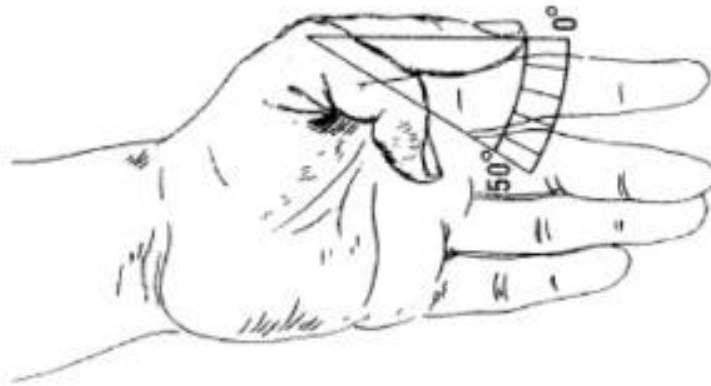


Figura 2.12 Flexión – Extensión Metacarpofalángica del pulgar.

- **Flexión – Extensión Interfalángica del pulgar:** Tiene un arco total de movimiento de 90° a 110° de movimiento dividiéndose en 90° para la flexión y 0° a 20° para la extensión.

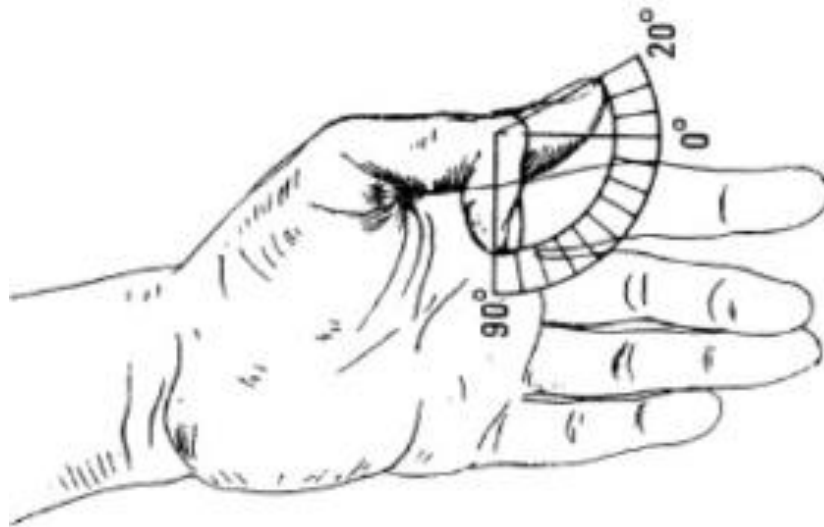


Figura 2.13 Flexión – Extensión Interfalángica del pulgar.

- **Abducción – Aducción palmar del pulgar:** Rango total de movimiento de 70° solo en flexión.

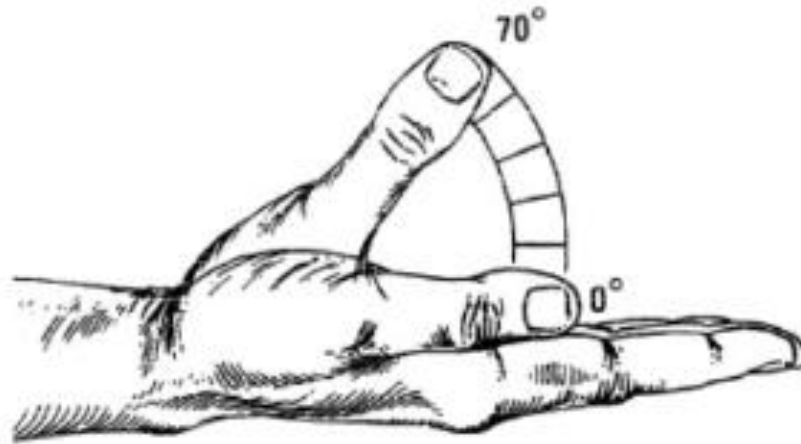


Figura 2.14 Abducción – Aducción palmar del pulgar.

De esta manera tenemos un rango de movimientos para cada sector de la mano para tomar en cuenta en el diseño del mecanismo y así asegurar que el movimiento a realizar por el exoesqueleto se asemeja al movimiento natural de las articulaciones en cada punto a considerar.

2.3 Terapias de rehabilitación en la mano

En la mano como en cualquier extremidad del cuerpo que requiera de aparatos de rehabilitación, debe existir una valoración previa de las posibles alteraciones y anomalías en la posición. En reposo, la muñeca se encuentra en una posición intermedia entre la flexión y la extensión, mientras que los dedos muestran una ligera flexión (una relación de 4:1 respecto a la extensión).

Para el desarrollo del exoesqueleto es necesario abundar en temas de rehabilitación, puesto que será el parteaguas de su funcionamiento, con el fin de que esas técnicas de rehabilitación sean mayormente sustituidas por dicho aparato.

Algunas de pruebas realizadas más comunes por los clínicos expertos en rehabilitación se describen a continuación.

Musculo flexor profundo de los dedos:

- **Procedimiento:** El clínico coloca dos dedos de su mano (índice y corazón) en la cara palmar de los dedos afectados del paciente (se encuentran en extensión) y le pide que flexione únicamente la falange distal. La exploración debe realizarse siempre en cada dedo por separado.
- **Valoración:** El musculo flexor profundo de los dedos está situado en la capa profunda de los músculos flexores del antebrazo. Sus tendones se insertan en la base de las falanges distales de los dedos.
Cuando no es posible flexionar la falange distal, ello se debe a una lesión del tendón (desgarro tendinoso); si la flexión del dedo se acompaña de dolor debe pensarse en una tenosinovitis.

Hay que diferenciar la artrosis de la articulación distal (enfermedad de Heberden) de la limitación de la movilidad articular. [21]



Figura 2.15. Musculo flexor profundo de los dedos. [21]

Musculo flexor largo y extensor largo del dedo pulgar:

- **Procedimiento:** El clínico sujeta el dedo pulgar del paciente por la articulación metacarpofalángica y le pide que realice una flexión y una extensión de la falange distal del dedo. El musculo flexor largo del pulgar está situado en la capa profunda de la musculatura flexora y su tendón se inserta en la base de la falange distal del pulgar.
- **Valoración:** La dificultad de flexión y extensión de la articulación distal del dedo pulgar indica una lesión (desgarro tendinoso) o una enfermedad del tendón.



Figura 2.16. Musculo flexor largo y extensor largo del dedo pulgar. [21]

Prueba de Muckard

Determinación de tenosinovitis aguda o crónica del tendón de los músculos abductor largo y extensor corto del pulgar (enfermedad de Quervain).

- **Procedimiento:** El paciente efectúa una desviación cubital de la mano por la articulación de la muñeca; los dedos se encuentran en extensión y el pulgar en aducción.
- **Valoración:** La aparición de dolor sordo en la apófisis estiloides del radio que se irradia al pulgar y al antebrazo indica tenosinovitis de los tendones de los músculos abductor largo y tensor corto del pulgar. También aparece tumefacción y dolor a la presión en el primer tendón extensor. La abducción del pulgar contra resistencia produce dolor. Es necesario el diagnóstico diferencial de la artrosis de la primera articulación carpometacarpiana y la estiloiditis radial.



Figura 2.17. Prueba de Muckard. [21]

Signo de Finkelstein

Indica enfermedad de Quervain.

- **Procedimiento:** El paciente rodea con los dedos de la mano en presa su pulgar, flexionado en oposición sobre la palma, y efectúa una desviación de la muñeca hacia el lado cubital de la extremidad (movimiento activo o pasivo).
- **Valoración:** La aparición de dolor y crepitación en la apófisis estiloides del radio indica tenosinovitis inespecífica de los músculos abductor largo y extensor corto del pulgar (para la etiología v. la prueba de Muckard).

La exploración dirigida de esta articulación y la radiografía hacen posible un diagnóstico certero; la prueba debe efectuarse en ambas manos.



Figura 2.18. Signo de Finkelstein. [21]

Prueba de Grind

Valora la prueba de artrosis de la articulación carpometacarpiana del dedo pulgar.

- **Procedimiento:** El clínico sujeta el dedo pulgar (doloroso) y efectúa movimientos a lo largo de su eje mayor.
- **Valoración:** El dolor de la articulación carpometacarpiana suele deberse a artrosis. La presencia de dolor a la presión y la inestabilidad dolorosa de esta articulación constituyen signos adicionales que sugieren un desgaste articular. El paciente también se queja de dolor en la articulación cuando debe efectuar un movimiento de oposición del pulgar contra resistencia.



Figura 2.19. Prueba de Grind. [21]

Prueba funcional de Brunnell.

Indica una contractura de la musculatura interna de la mano debida a isquemia.

- **Procedimiento:** La mano del paciente se encuentra en extensión. En la primera parte de la prueba, el clínico valora la flexión activa y pasiva de las tres articulaciones del dedo. En la segunda parte fija la articulación proximal (de la base del dedo) en extensión y comprueba nuevamente la flexión de las articulaciones media y distal de las falanges de los dedos.
- **Valoración:** Si existe una contractura de la musculatura interna de la mano debido a isquemia, es posible realizar una flexión activa o pasiva de las articulaciones interfalángicas medias y distales mediante una fijación de la articulación interfalángica proximal, debido al acortamiento de los músculos interóseos. Mediante una flexión de la muñeca pueden flexionarse las articulaciones interfalángicas medial y distal. La prueba permite diferenciar una contractura por isquemia de otros cambios articulares, como rigidez articular, deformidades tendinosas e infecciones de las vainas tendinosas. Como consecuencia de un aumento de la presión de las fascias de los músculos de la mano se produce, durante la flexión de la articulación proximal de los dedos con extensión de las falanges media y distal, un reforzamiento del arco transversal de la palma de la mano y una aducción del pulgar en extensión.

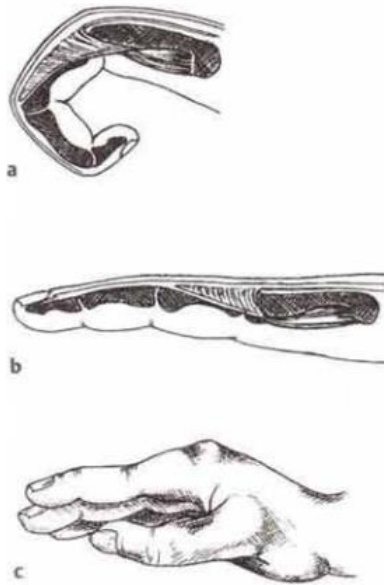


Figura 2.20. Prueba funcional de Brunnell. [21]

Prueba de sujeción grosera

- **Procedimiento:** Se pide al paciente que sujete con fuerza un lápiz en la palma de la mano, cerrando el puño a la vez que el clínico intenta extraerlo. Si existe una limitación en la flexión de los dedos, se repite la prueba utilizando un objeto de mayor diámetro.
- **Valoración:** Las lesiones del nervio mediano o cubital no permiten realizar una flexión completa de los dedos; también la fuerza se encuentra disminuida y el resultado de la prueba será positivo.



Figura 2.21. Prueba de sujeción grosera. [21]

Prueba de sujeción en la palma de la mano.

- **Procedimiento:** La capacidad de cierre de la mano del paciente se comprueba con una pelota que debe sujetar con fuerza.
- **Valoración:** Se comprueba la fuerza de aducción del dedo pulgar y la capacidad de flexión de los dedos, con lo que se valora la función motora de los nervios mediano y cubital.



Figura 2.22. Prueba de sujeción en la palma de la mano. [21]

Técnicas de movilización de Mulligan.

La movilización con movimiento (MCM) implica una presión traslativa deslizante indolora aplicada por el profesional, casi siempre en ángulos rectos al plano de movimiento en que se observa la restricción, Al mismo tiempo, el paciente mueve la articulación activamente en la dirección de la restricción del dolor.

- EL paciente sentado y el profesional estabiliza el extremo distal del hueso, uno haciendo contacto con la cara lateral y el otro con la cara medial del hueso.
- Con un dedo y el pulgar el profesional sostiene el extremo del hueso distal, nuevamente un dedo con contacto con la cara medial y el otro con la cara lateral del hueso.
- El profesional traslada los huesos entre si llevando suavemente uno hacia lateral y el otro hacia medial y viceversa.

- Mulligan señala que <en casi todos los casos se encontrará que en n sentido se produce dolor. Se elige el sentido indoloro y se indica al paciente que flexione su dedo rígido en tanto el profesional sostiene la movilización. Este movimiento debe ser indoloro y su recorrido debe aumentar>.
- EL procedimiento se repite varias veces, reevaluándose la amplitud del movimiento. [22]



Figura 2.23. Movilización con movimiento (Método de Mulligan). [22]

Ejercicio de palpación.

El profesional sostiene el codo flexionado de manera que su pulgar descansa sobre la cabeza del radio. Al mismo tiempo, la otra mano sujeta el antebrazo inmediatamente proximal a la muñeca y alternativamente la prona y supina. Los movimientos descritos se buscan mediante el tacto cerca del final de la pronación completa (la cabeza del radio se mueve hacia atrás) y la supinación completa (la cabeza del radio se desliza hacia delante). Esta palpación debe efectuarse en un antebrazo <normal> y en el otro <disfuncional>, sintomático, de modo que puedan notarse las diferencias en los movimiento descritos antes. [22]

Los tratamientos descritos anteriormente son solo algunos de los tantos que existen como métodos de rehabilitación para la mano, de los cuales debido a las afectaciones que padezca el paciente, se elegirán los que más se adecuen a sus necesidades.

2.4 Herramientas matemáticas para robótica

Para poder determinar un buen modelo matemático es necesario tomar seis sistemas cartesianos de referencia. Estos sistemas se usan para definir la posición y orientación de los tendones y también se pueden utilizar para describir la configuración de las articulaciones.

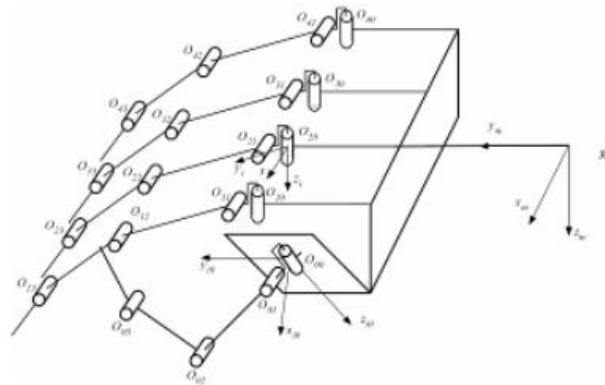


Figura 2.24. Modelo biomecánico de la mano humana. [23]

El eje Y se proyecta a lo largo del eje de las falanges y del metacarpiano, pasando desde el centro de rotación al centro de la superficie cóncava articular en el extremo proximal. El eje X se proyecta dorsalmente, y el eje Z se proyecta hacia el cuerpo.

Por medio de este sistema de referencia se puede determinar la posición de los dedos en un espacio de tres dimensiones. Cada par de puntos se expresa con respecto a los sistemas de referencia distal y proximal de cada articulación. Se

38 supone que los tendones se contraen permaneciendo constantes con respecto a los sistemas de coordenadas distal y proximal.

X_d, Y_d, Z_d son las coordenadas de un punto respecto al sistema distal.

X_p, Y_p, Z_p son las coordenadas de un punto respecto al sistema proximal.

X_o, Y_o, Z_o son las coordenadas del origen del sistema proximal expresada en el sistema distal.

Tanto el sistema distal como el proximal, se relacionan con una rotación y una translación.

Para el modelo matemático, es necesario tener definida la biomecánica que corresponda a la zona a evaluar para el desarrollo del exoesqueleto.

En orden a lo establecido en el modelo matemático, seis coordenadas cartesianas fueron establecidas, según lo muestra la ilustración 13. Estas coordenadas son usadas para definir la localización y la orientación de los tendones y también son utilizadas para describir el movimiento. Hay dos sistemas de coordenadas para las falanges proximales y mediales, y solo uno para las falanges distales y metacarpianas. [23]

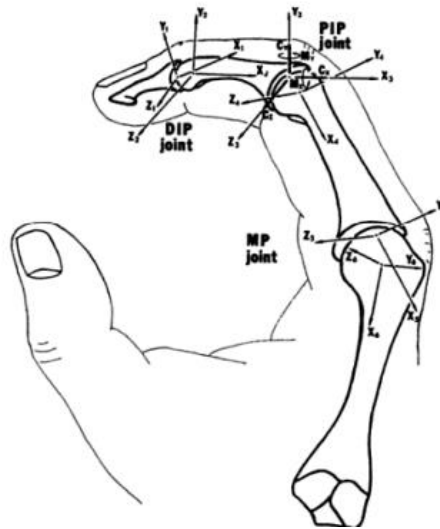


Figura 2.25. Sistema de coordenadas para definir marcos de referencia. [23]

Los sistemas primarios (2, 4 y 6) están localizados aproximadamente en el centro de rotación de las cabezas metacarpianas y de las falanges, y los sistemas secundarios (1, 3 y 5) están en el sistema proximal del centro de las superficies articulares cóncavas. La X es proyectada a lo largo del eje de las falanges y del metacarpiano, la Y está proyectada dorsalmente, y la Z está proyectada radialmente hacia el cuerpo. [23]

Estos sistemas de coordenadas es importante definirlos en cualquier proyecto que implique cálculos cinemáticos para a partir de ellas tener una referencia ubicada en lo que será la base del mecanismo.

En este apartado hablaremos de las herramientas para determinar el movimiento del robot con respecto a un sistema de referencia situado en la base, para obtener una descripción analítica del movimiento espacial y particularmente, la posición y orientación en el extremo final del robot.

Para ese análisis tendremos que resolver la cinemática del robot la cual se divide de la siguiente manera:

- **Cinemática directa:** determinar la posición y orientación del extremo final del robot, con respecto a un sistema de coordenadas de referencia, conocidos los valores de las articulaciones.
- **Cinemática inversa:** determinar la configuración que debe adoptar el robot para una posición y orientación del extremo conocidas.

Para solucionar la cinemática directa se utilizará el Algoritmo de Denavit-Hartenberg. De esta forma, se obtiene la posición del extremo del robot a partir de los valores de los ángulos del mismo, este procedimiento consiste en obtener la posición del robot conociendo los valores de los diferentes ángulos de los ejes del mismo utilizando el algoritmo mencionado.

Tabla 2.1. Parámetros Denavit-Hartenberg. [24]

Articulación	θ	d	a	α
1	q1	L1	0	90
2	q2-90	0	L2	0
3	q3	0	0	-90
4	q4	-L3	0	90
5	q5	0	0	-90
6	q6	-L4	0	0

Dónde:

- El parámetro θ_i es el ángulo que hay que girar sobre el eje z_{i-1} para que x_{i-1} y x_i quede paralelos.
- El parámetro d_i es la distancia sobre el eje z_{i-1} que hay que desplazar el sistema $i-1$ para que x_{i-1} y x_i queden alineados.
- El parámetro a_i es la distancia sobre el eje x_i que hay que desplazar el sistema $i-1$ para que su origen coincida con el sistema i .
- El parámetro α_i es el ángulo que hay que girar sobre x_i para que el sistema $i-1$ coincida con el sistema i .

Para solucionar el problema de la cinemática se puede determinar los diferentes valores de los ángulos de los ejes del robot para conseguir posicionar su extremo en un punto del espacio establecido por el usuario, este cálculo consiste en encontrar los valores que deben adoptar las coordenadas articulares del robot, para que su extremo se posicione y oriente según una determinada localización espacial. [24]

- Posicionamiento: involucra a los valores de los tres primeros ejes (q_1, q_2, q_3) y depende del punto del espacio objetivo (x, y, z).

Los cálculos correspondientes al mecanismo diseñado para el exoesqueleto del presente trabajo se muestran en el capítulo 4, el cual consiste en el desarrollo de la cinemática del robot.

2.5 Conclusión

La funcionalidad de la mano tiene base en la cualidad de transmitir y recibir información; una mano con estabilidad y movimiento no es suficientemente útil sin la información táctil o sin su trofismo, proporcionado por la integridad vascular y nerviosa, haciendo de esta, imprescindible en los segmentos corporales; su pérdida, aun parcial, genera un déficit mucho muy marcado, incluso más que en cualquier otra extremidad.

Por ende el exoesqueleto a desarrollar debe adaptar la forma de la mano, para ello su arquitectura se dispone características peculiares a tomar en cuenta.

En este capítulo nos dimos a la tarea de investigar a fondo los elementos vitales a considerar en la mano como los son características y funciones principales, articulaciones, ligamentos, músculos y rangos de movimientos, entre otros; de los cuales consideramos que son elementos vitales a tomar en cuenta al momento de modelar y diseñar el mecanismo que nos permitirá poder llegar al objetivo planteado, que es crear un exoesqueleto que permita la movilidad de los dedos de la mano.

La investigación realizada tiene un alto enfoque a permitirnos comprender la importancia que tienen el correcto funcionamiento de la mano para el ser humano, en el cual va implícito la correcta movilidad de los miembros conformantes como lo son los dedos.

CAPÍTULO

3



DISEÑO

Capítulo 3. Diseño.

3.1 Diseño conceptual

Para realizar un diseño, primeramente debemos comprender las soluciones para problemas no resueltos o bien, dar nuevas soluciones a problemas previamente resueltos y tener una secuencia lógica que nos lleve a realizar un diseño de un producto y para este proceso se dividió en 3 fases, las cuales se describen brevemente a continuación:

- **Fase 1.** Inicia el proceso de diseño y se lleva hasta un punto donde se incluye una serie de posibles soluciones y que permitan tener un concepto más amplio para resolver la problemática.
- **Fase 2.** En esta fase se realiza un diseño preliminar, estructurando el concepto de la primera fase. Se toman decisiones sobre características del prototipo como son: tamaño, materiales, formas, entre otras.
- **Fase 3.** En esta etapa, el diseño es llevado a la descripción completa, donde se le añade al producto detalles que llevan a un tener de cierta manera patrones y propiedades específicos como por ejemplo: tolerancias, propiedades de superficie, materiales, procesos de fabricación.

Para el diseño del mecanismo que conformará el exoesqueleto que se desarrolló en el presente trabajo se utiliza el software SOLID WORKS, el cual es una herramienta de diseño y simulación que nos permitirá realizar pruebas a nuestro prototipo para con ello garantizar que el diseño realizado cumpla de buena manera con los parámetros que se requieren para el correcto funcionamiento del mecanismo.

La mano, propiamente los dedos mecánicamente hablando constan de eslabones los cuales son las falange, falangina y falangeta cada uno de los que todos cuentan con una misma estructura a excepción del dedo pulgar el cual tienen variantes que nos lleva a tomar criterios diferentes para tomar en cuenta al diseñar el mecanismo que accionara el movimiento para este dedo.

Los dedos pueden contener 3 o 4 grados de libertad; para el elemento de 4 grados de libertad se conforma de la siguiente manera:

- 3 grados de flexión
- 1 grado lateral

Para el elemento de 3 grados de libertad son:

- 2 grados de flexión
- 1 grado lateral

De manera representativa los eslabones para el mecanismo del exoesqueleto para el dedo quedan de la siguiente manera (tomando en cuenta únicamente que la movilidad que se requiere es para los dedos).

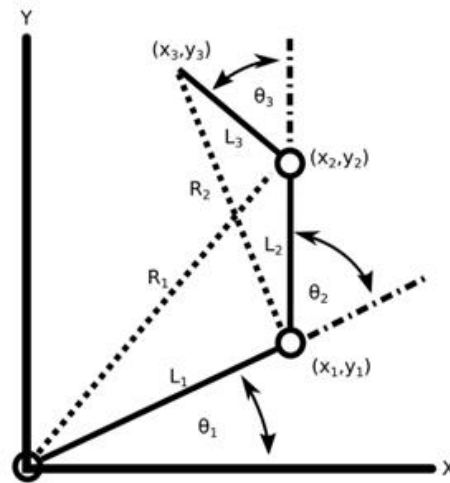


Figura 3.1. Eslabones del dedo.

En la figura 3.1 tenemos de manera gráfica la estructura que hace referencia la conformación de la mano, donde se muestran los tres eslabones que intervienen, donde los elementos marcados en cada uno de los eslabones serán los respectivos valores ya sea de la rotación de cada eslabón, las respectivas longitudes y las coordenadas de los puntos finales de cada eslabón, a continuación se describe cada elemento.

L_1 = Longitud de la falange proximal.

L_2 = Longitud de la falange medial.

L_3 = Longitud de la falange distal.

R_1 = Resultante entre L_1 y L_2 .

R_2 = Resultante entre L_2 y L_3 .

θ_1 = Ángulo entre L_1 y el eje X.

θ_2 = Ángulo entre L_2 y L_1 .

θ_3 = Ángulo entre L_3 y el eje Y .

x_1 = Valor de la coordenada en el eje de la falange proximal

y_1 = Valor de la coordenada en el eje Y de la falange proximal

x_2 = Valor de la coordenada en el eje de la falange medial

y_2 = Valor de la coordenada en el eje Y de la falange medial

x_3 = Valor de la coordenada en el eje de la falange distal

y_3 = Valor de la coordenada en el eje Y de la falange distal

Para la numeración de las eslabones tomaremos como base la unión de la falange con el nudillo, y teniendo como referencia la Figura 3.1, la falange sería nuestro eslabón número 1, la falangina el eslabón número 2 y la falangeta el eslabón número 3 y entre cada uno de ellos existen uniones las cuales son las articulaciones que son las encargadas de permitir un movimiento.

El enfoque para diseñar el prototipo a desarrollar, son las técnicas convencionales del diseño mecatrónico, puesto que son del tipo cualitativo y ayudan al desarrollo del exoesqueleto; clarificando los objetivos planteados y determinando características que serán importantes para el desarrollo del proyecto.

Dentro de los criterios que se identifican y que son claves en el diseño del exoesqueleto serán las siguientes:

- Movimientos adecuados del mecanismo conforme al movimiento de los dedos del ser humano.
- Fácil operación del mecanismo
- Que el exoesqueleto sea liviano y resistente.
- Reemplazar fácilmente piezas dañadas o averiadas.
- Fácil instalación a la mano del paciente.
- Ajustable a los diferentes tamaños de las manos.
- Bajo costo.
- Estructura resistente.

Para el diseño a realizar el aspecto de mayor importancia es que realice los movimientos deseados (que sean parecidos al de los dedos de una mano real).

En el presente trabajo se está tomando como base el diseño previamente realizado, el cual se modificó para tener mejoras estéticas y en el funcionamiento del exoesqueleto.

Los criterios que se tomaron en cuenta fueron, el tamaño de la mano y los dedos según las medidas de una mano estándar, el movimiento que se desea que realice el exoesqueleto y por último el material para tener un prototipo estética y funcionalmente aceptable.

Las medidas estándares de la mano se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 3.1. Tabla de longitudes de estándares de las falanges de la mano (unidades en mm)

Dedo	Tejidos blandos de la punta de la falange. (mm)	Falange distal (mm)	Falange medial (mm)	Falange proximal (mm)	Metacarpiano (mm)
I	5.67±0.61	21.67±1.60		31.57±3.13	46.22±3.94
II	3.84±0.59	15.82±2.26	22.38±2.51	39.78±4.94	68.12±6.27
III	3.95±0.61	17.40±1.85	26.33±3.00	44.63±3.81	64.60±5.38
IV	3.95±0.60	17.30±2.22	25.65±3.29	41.37±3.87	58.00±5.06
V	3.73±0.62	15.96±2.45	18.11±2.54	32.74±2.77	53.69±4.36

Los anchos de los dedos pulgar, índice, medio, anular y meñique son 2.3 cm, 1.8 cm, 1.9 cm, 1.7 cm y 1.5 cm respectivamente. Además, por fines prácticos la altura de las falanges se aproximarán en 1.2 cm de alto excepto el dedo pulgar midiendo 1.3 cm de alto.

La longitud de cada dedo se muestra a continuación:

- Dedo pulgar: 5.3 cm de largo x 2.3 cm de ancho x 1.3 cm de alto
- Dedo índice: 7.8 cm de largo x 1.8 cm de ancho x 1.2 cm de alto
- Dedo medio: 8.8 cm de largo x 1.9 cm de ancho x 1.2 cm de alto
- Dedo anular: 8.4 cm de largo x 1.7 cm de ancho x 1.2 cm de alto
- Dedo meñique: 6.7 cm x 1.5 cm de ancho x 1.2 cm de alto

El objetivo de manera general del exoesqueleto es simular el movimiento de los dedos, con el fin además de mantener una estética y una ergonomía del prototipo completo. Los dedos tendrán el mecanismo de extensión y flexión.

En la figura 3.2 se muestra un esquema general de la conformación del dedo donde se observa claramente cada una de las falanges y las articulaciones que hay entre una y otra.

- 1: Falange distal
- 2: Falange medial
- 3: Falange proximal
- 4: Articulaciones

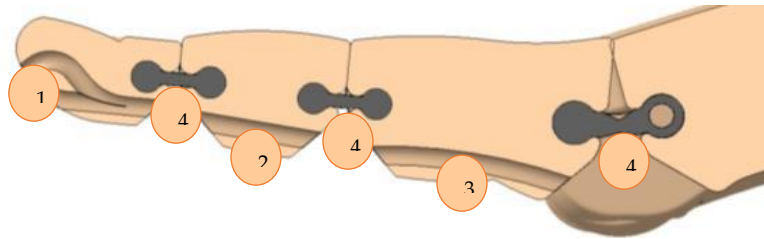


Figura 3.2. Esquema general del dedo.

Cada falange tendrá la propiedad de girar hasta 90° grados, esto gracias al espacio entre cada articulación. Para la manufactura de las piezas, para fines de pruebas se realizará en impresión 3D y para el prototipo final el material a utilizar será aluminio.

3.2 Diseño mecánico

Para esta fase del diseño, la cual consiste en plasmar los requerimientos que anteriormente se especificaron de manera real y en la cual se pueda sostener una idea visual y tangible para darle forma a nuestro exoesqueleto.

Como se mencionó con anterioridad el diseño que se propone fue realizado por el Ing. Daniel Andrés Córdoba al cual únicamente se le realizaron mejoras en ciertos elementos del mecanismo, pero funcionalmente no sufrió modificación alguna.

Para el diseño se tomaron en cuenta los parámetros y medidas estándares que se mencionaron al inicio del capítulo.

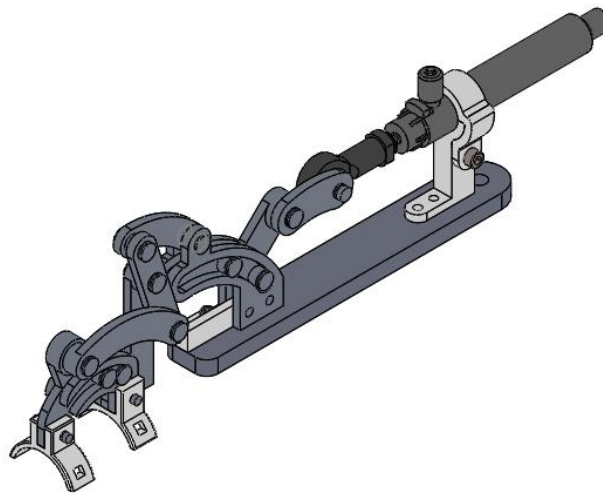


Figura 3.3. Diseño de mecanismo para un dedo

Para el diseño de la Figura 3.3 (que es el diseño inicial que se tomó como base), incluye el actuador a utilizar el cual va a transmitir el movimiento de los eslabones (Festo DFK-10-50-P) ver. Figura. 4.4.



Figura 3.4. Actuador Festo DFK-10-50-P.

Aunque en el presente trabajo, el control del mecanismo no está considerando dentro de los alcances; se contempla el actuador (ver Figura 3.4) dentro del diseño puesto que se requiere para crear una simulación más real en el software.

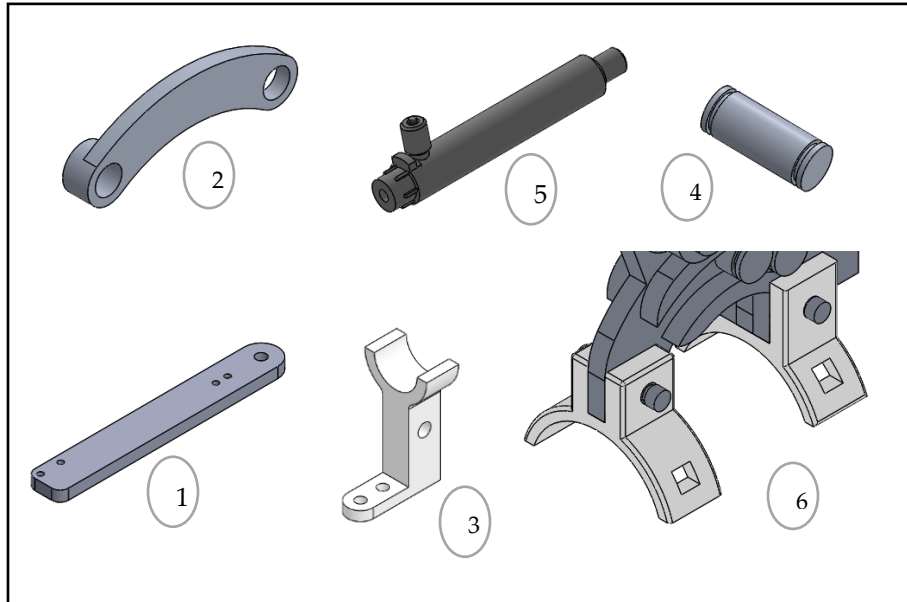


Figura 3.5. Elementos del mecanismo.

El mecanismo del dedo consta de los elementos enumerados en la Figura 3.5:

- 1.-Base del mecanismo
- 2.-Eslabones
- 3.-Base para actuador
- 4.-Ejes
- 5.-Actuador
- 6.-Sujetador para el dedo

Para el mecanismo diseñado las dimensiones generales elemento principal y de mayores dimensiones para el exoesqueleto de los dedos de la mano se muestran a continuación en la Figura 3.6., donde las dimensiones que se muestran están dadas en milímetros.

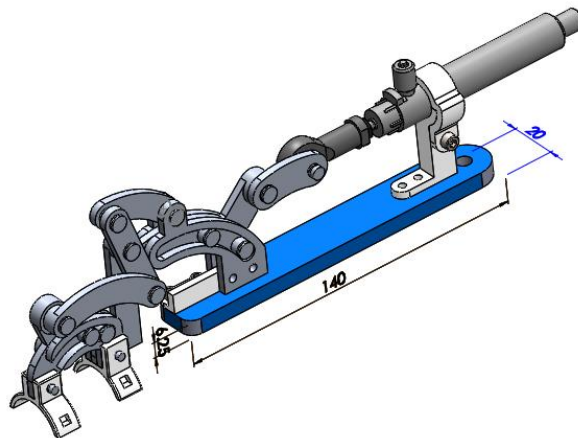


Figura 3.6. Medidas de la base del mecanismo (unidades en mm).

Puesto que los rangos de movimientos de los 4 dedos son prácticamente los mismos, se tomara el diseño del dedo que ya se tiene para realizar el prototipo para los 4 dedos, excluyendo hasta el momento el pulgar.

También es importante considerar que para el ensamblaje del mecanismo incluyendo los cuatro dedos, la base de apoyo para dichos mecanismos tendrá dimensiones proporcionales, esta base será montada sobre la cara posterior de la mano y parte del antebrazo.

Por lo que el prototipo integrando los cuatro dedos se muestra en la Figura 3.7.

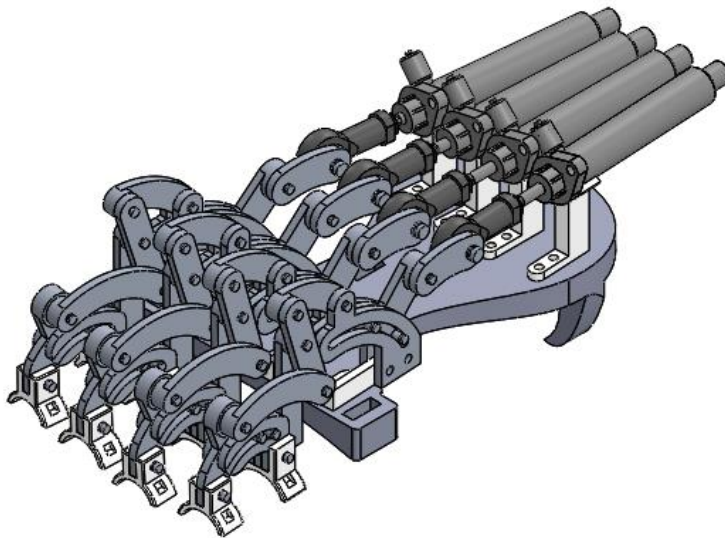


Figura 3.7. Diseño del prototipo de exoesqueleto para cuatro dedos vista isométrica.

Este diseño al igual que el mecanismo para un solo dedo contiene los mismos elementos, con la diferencia que al incluir los 4 dedos, la base de apoyo es de dimensiones mayores y con un diseño ergonómico que permite el fácil montaje al paciente.

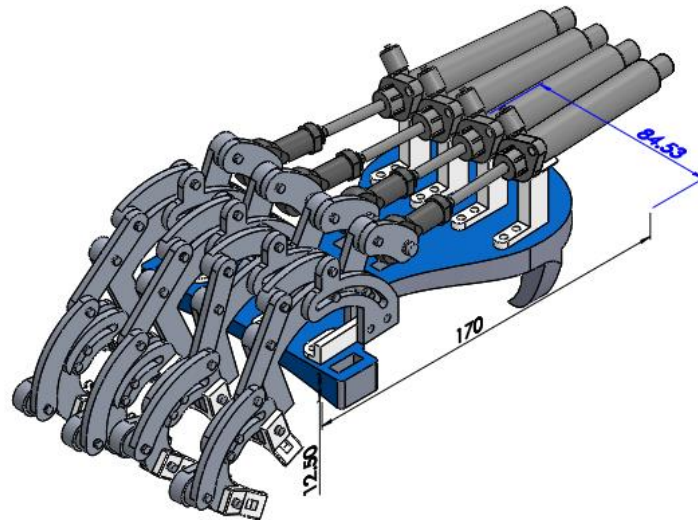


Figura 3.8. Dimensiones del ensamble del exoesqueleto de los cuatro dedos.

Dentro de las mejoras que se realizaron en el diseño fueron las siguientes:

- Rediseño de la base de apoyo para el mecanismo para los cuatro dedos
- Agarre tipo pulsera para una mejor sujeción
- Rediseño en la columna de soporte para actuador
- Reducción de eslabones sin afectar el funcionamiento del mecanismo
- Se realizaron pruebas con diferentes diámetros en los ejes

A continuación se muestran las vistas del prototipo en su estado inicial, donde se observa que los mecanismos de cada dedo están distribuidos de manera uniforme y en los cuales hay una ligera inclinación de 3° de separación entre uno y otro; en la Figura 3.9 observaremos una vista frontal donde se aprecia el diseño tipo pulsera de la base y el ensamble de los cuatro dedos, en la Figura 3.10. Observamos los eslabones de los que se compone el mecanismo y por último en la Figura 3.11. Se observa la inclinación que tienen los mecanismos de los dedos entre sí y por último en la Figura 3.12 se muestra el movimiento realizado por el mecanismo en los dedos.

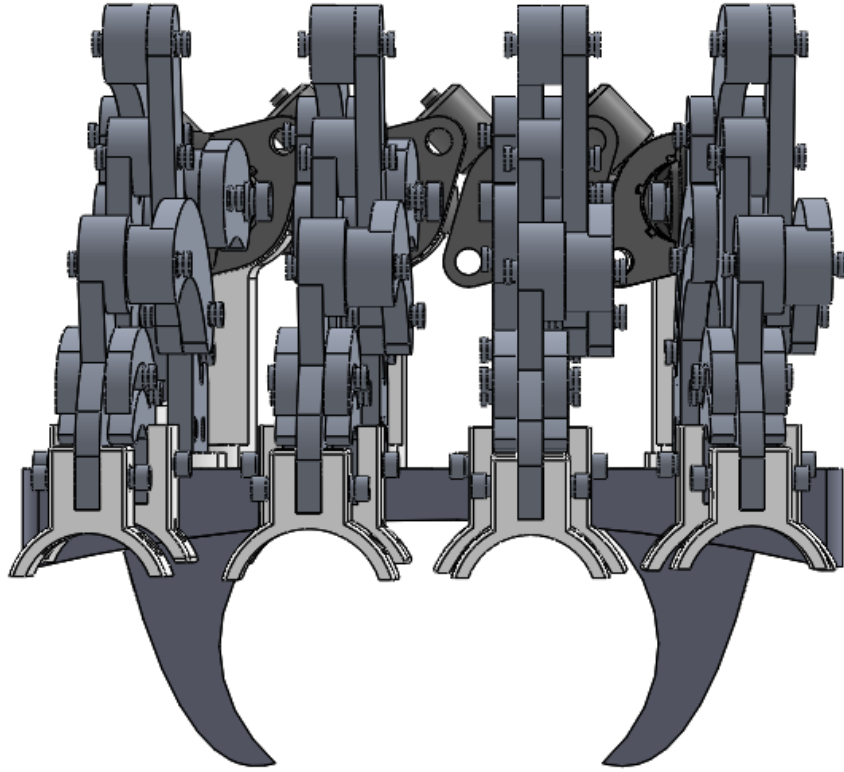


Figura 3.9. Vista frontal del mecanismo.

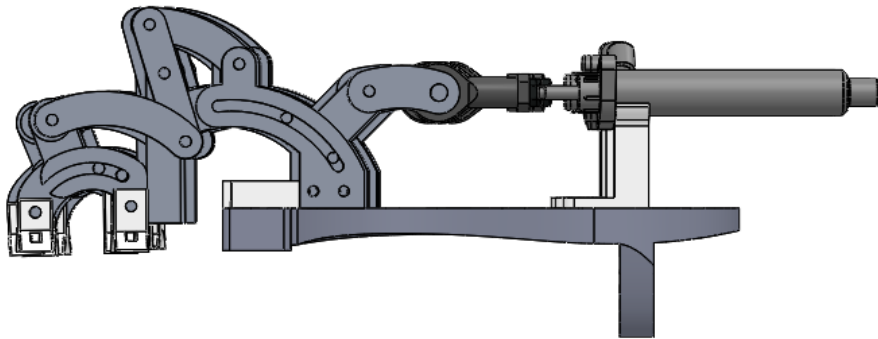


Figura 3.10. Vista lateral del mecanismo.

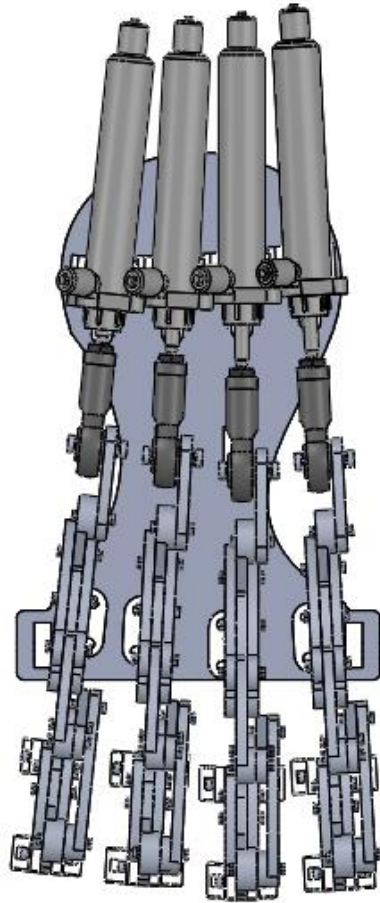


Figura 3.11. Vista superior del mecanismo.

En las Figuras (3.12., 3.13.) se muestra el movimiento de los mecanismos que realizara para simular la trayectoria del movimiento de cada dedo respectivamente.

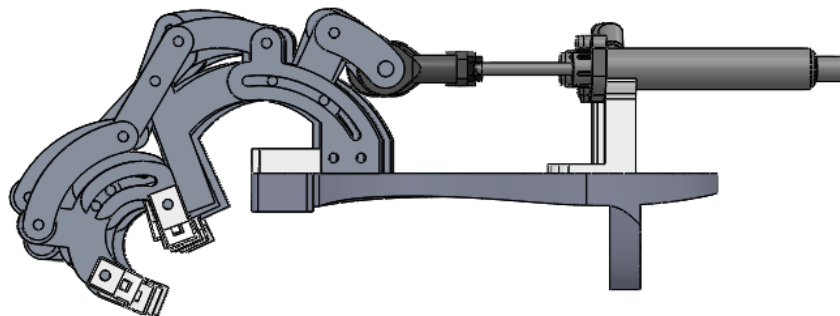


Figura 3.12. Posición del mecanismo simulando el movimiento de los dedos

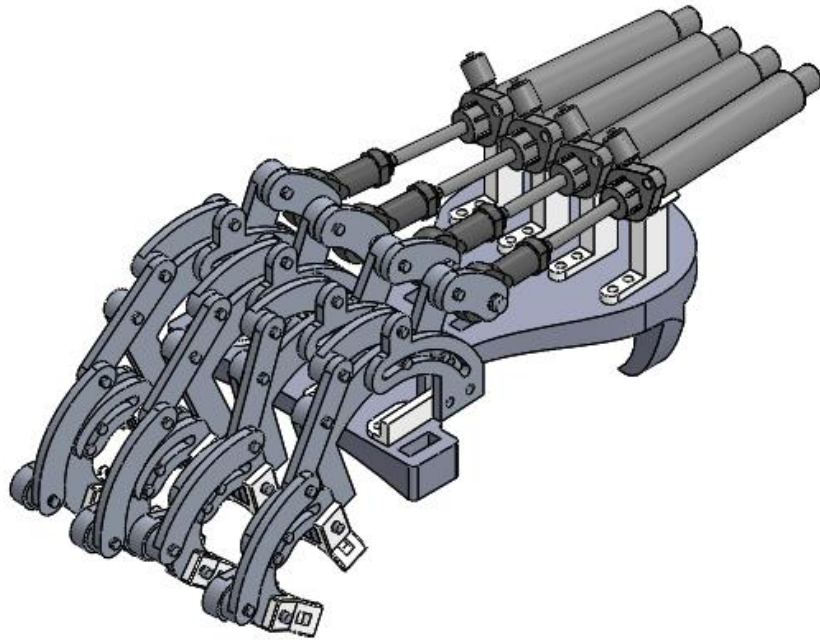


Figura 3.13. Isométrico de la simulación del el movimiento de los dedos

3.3 Conclusiones

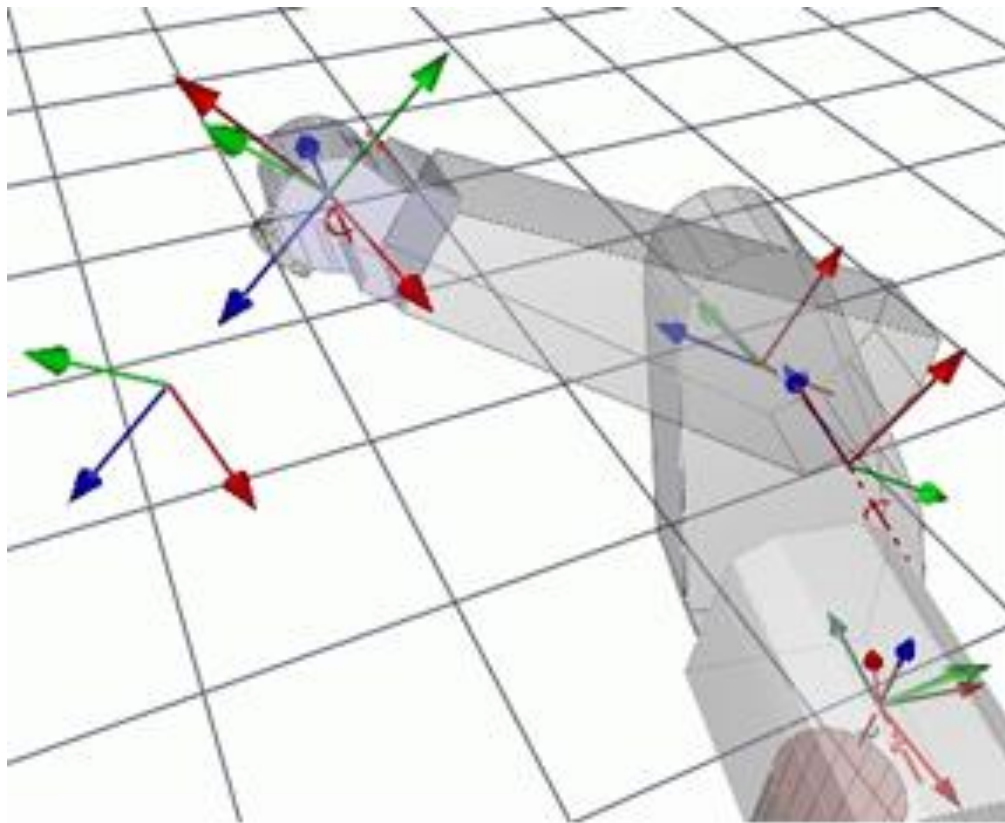
En este capítulo se menciona el desarrollo para el diseño del prototipo para el exoesqueleto a presentar y tal y como se describió, este diseño teóricamente es funcional puesto que el software nos permite realizar una simulación de los elementos del exoesqueleto.

El exoesqueleto para movilidad en dedos presenta un gran potencial de aplicaciones actualmente para la ayuda de pacientes que requieran rehabilitación para dar mayor movilidad en los dedos de la mano.

El prototipo se caracteriza por ser de bajo costo en comparativa con otros exoesqueletos que cumplen con funciones similares y/o iguales, lo que permite que se replicado fácilmente debido al diseño homologado que ya se tiene y de esta manera favorecer el uso para personas que lo requieran y que el costo no sea un impedimento para ello.

CAPÍTULO

4



CINEMÁTICA DEL ROBOT

Capítulo 4. Cinemática del Robot.

4.1 Análisis Cinemático

El modelo cinemático es usado para el estudio del movimiento del dedo con respecto al sistema de referencia. Con la cinemática buscamos tener una descripción analítica del movimiento en el espacio del robot en función del tiempo, y la relación de posición entre el punto inicial y el punto de orientación final del robot tomando en cuenta los valores de las coordenadas de las juntas.

En el presente capítulo del trabajo se desarrollará el análisis cinemático del dedo de la mano. La cinemática de avance determina cuál es la posición y orientación del punto final del robot con respecto a un sistema de coordenadas que se utilizan como referencia, conocidos los valores de las articulaciones y los parámetros geométricos de los elementos del robot. La forma inversa, la cinemática inversa resuelve la configuración que el robot tiene que adoptar para tomar la posición y la orientación del punto final del robot. La relación de estos dos tipos de análisis cinemático se muestra en la Figura 4.1.

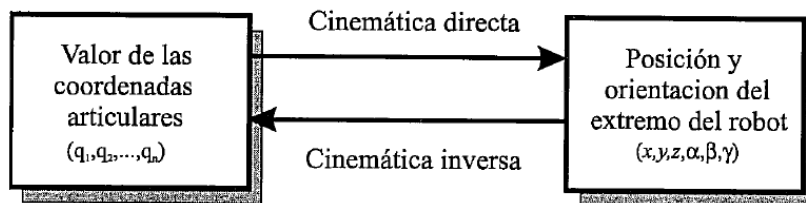


Figura 4.1. Análisis de relación entre cinemática directa y la cinemática inversa

A la solución del análisis cinemático directo y cinemático inverso, se utilizó el método geométrico, ya que este método es ideal para robots que tienen un poco de grados de libertad (DOF) o los casos en los que sólo se utilizan los primeros DOF.

La Figura 4.2 representa el esquema de los dedos de la mano en un plano cartesiano, donde es posible ver la falange proximal, la falange medial y la falange distal.

Dónde:

L_1 = Longitud de la falange proximal.

L_2 = Longitud de la falange medial.

L_3 = Longitud de la falange distal.

R_1 = Resultante entre L_1 y L_2 .

R_2 = Resultante entre L_2 y L_3 .

θ_1 = Ángulo entre L_1 y el eje X.

θ_2 = Ángulo entre L_2 y L_1 .

θ_3 = Ángulo entre L_3 y el eje Y.

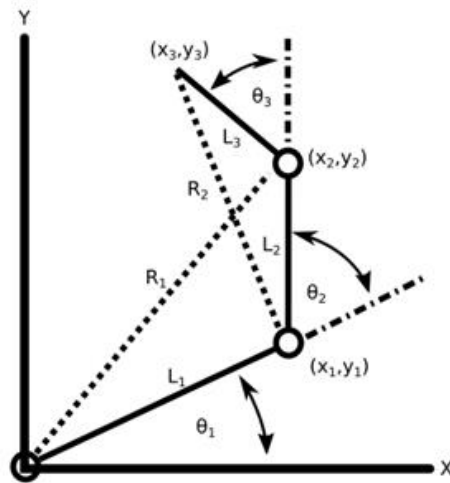


Figura 4.2. Diagrama de cuerpo libre del dedo de la mano.

El diagrama de cuerpo libre ilustrado en la Figura 4.2 representa de manera general la estructura del dedo de la mano y cada una de las longitudes de las falanges varían dependiendo de la edad, el sexo y el peso de la persona, aunque hay una relación de longitud entre ellas. (Davisdoof, 1990, Freivalds, 2004, Garrett, 1970) realizan el estudio antropométrico de los dedos, que consta de la longitud de las falanges, los rangos de flexión y extensión de las articulaciones, así como la localización del centro de gravedad de cada falange.

Tabla 4.1. Longitud porcentual de las falanges con respecto a la mano (Davidoff & Freivalds, 1993).

Falange	Proximal	Media	Distal
Pulgar	17.1%	-	12.1%
Índice	21.8%	14.1%	8.6%
Medio	24.5%	15.8%	9.8%
Anular	22.2%	15.3%	9.7%
Meñique	17.2%	10.8%	8.6%

La Tabla 4.1 muestra las longitudes correspondientes a las falanges de los dedos en porcentajes respecto a la longitud de la mano. Por otra parte, Ceccarelli presenta un estudio experimental de la fuerza desarrollada por las falanges de los dedos índice y pulgar al realizar el agarre (Ceccarelli et al., 2003). Figliolini presenta un análisis de movimiento del dedo índice de la mano, donde únicamente obtiene el rango de movimiento máximo y mínimo de cada falange (Figliolini et al., 2003), tal y como se muestra en la Figura 4.3 y la Tabla 4.2.

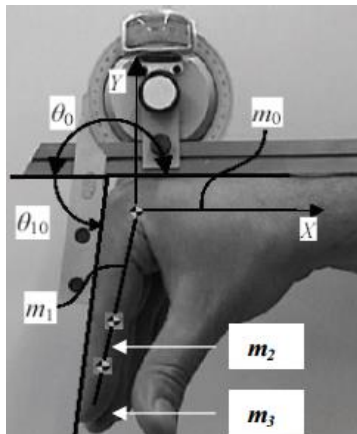


Figura 4.3. Medición del ángulo de flexión de cada falange.

Tabla 4.2. Longitud y ángulo promedio de flexión del dedo índice.

Falange	Longitud	Ángulo
m1	$l_1=43\text{mm}$	$\theta_{10}=83^\circ$
m2	$l_2=25\text{mm}$	$\theta_{21}=105^\circ$
m3	$l_3=23\text{mm}$	$\theta_{32}=78^\circ$

Estas referencias las tomaremos en cuenta al momento de determinar valores de cada uno de los eslabones que corresponderán a nuestro mecanismo.

4.2 Cinemática directa

Para nuestro caso y de manera general, el problema cinemático directo del mecanismo consiste en determinar la posición y orientación del extremo final del robot, que en nuestro caso sería la punta final del eslabón correspondiente a la falange distal, esto como lo hemos visto anteriormente, respecto a un sistema de coordenadas que se toma como referencia, conocidos los valores de las articulaciones y los parámetros geométricos de cada elemento del mecanismo.

Por ello, para nuestro mecanismo para cada dedo, y basándonos en la Figura 4.2., obtenemos las ecuaciones cerradas para la cinemática en el desarrollo presentado a continuación.

Para la falange proximal y como punto final (x_1, y_1) , tenemos las siguientes ecuaciones:

Para la coordenada correspondiente al eje x:

$$x_1 = L_1 \cos \theta_1 \quad (1)$$

Para la coordenada en el eje y:

$$y_1 = L_1 \sin \theta_1 \quad (2)$$

Las ecuaciones correspondientes al punto de la posición final (x_2, y_2) , de la falange media son las siguientes:

Para la coordenada correspondiente al eje x:

$$x_2 = L_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \quad (3)$$

Para la coordenada en el eje y:

$$y_2 = L_1 \sin \theta_1 + L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \quad (4)$$

Por último y para el tercer eslabón correspondiente a la falange el punto (x_3, y_3) , de la posición final de la falange distal:

Para la coordenada correspondiente al eje x:

$$x_3 = L_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) - L_3 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 - 90^\circ) \quad (5)$$

Para la coordenada en el eje y:

$$y_3 = L_1 \sin \theta_1 + L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) + L_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 - 90^\circ) \quad (6)$$

Las ecuaciones que se describen anteriormente correspondientes a los puntos finales de cada falange del dedo a analizar serán las ecuaciones principales y de las cuales nos basaremos para obtener más adelante la cinemática inversa del robot

Tabla 4.3. Ecuaciones de los puntos finales de las falanges de los dedos

$x_1 = L_1 \cos \theta_1$	(1)
$y_1 = L_1 \sin \theta_1$	(2)
$x_2 = L_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2)$	(3)
$y_2 = L_1 \sin \theta_1 + L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2)$	(4)
$x_3 = L_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) - L_3 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 - 90^\circ)$	(5)
$y_3 = L_1 \sin \theta_1 + L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) + L_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 - 90^\circ)$	(6)

4.3 Cinemática inversa

Para el análisis cinemático de un robot, y en nuestro caso, el análisis cinemático del mecanismo del dedo, también es necesario obtener la cinemática inversa para lo cual realizaremos los cálculos correspondientes en este apartado.

La cinemática inversa se realizará para obtener los ángulos θ_1 , θ_2 y θ_3 del exoesqueleto, y esta la hallaremos usando el método geométrico, donde L_1 , L_2 , L_3 y los puntos con las coordenadas (x_2, y_2) y (x_3, y_3) son valores conocidos. Primeramente obtendremos θ_2 , y R_1 que es la resultante entre el punto (x_2, y_2) y el origen como se observa en la Figura 4.2.

Usando las leyes de los cosenos obtenemos las siguientes ecuaciones:

Obteniendo R_1 tenemos el siguiente desarrollo:

$$R_1^2 = L_1^2 + L_2^2 - 2L_1L_2 \cos(180^\circ - \theta_2) \quad (7)$$

Se reduce a:

$$R_1^2 = L_1^2 + L_2^2 + 2L_1L_2 \cos \theta_2 \quad (8)$$

Iguualamos:

$$2L_1L_2 \cos \theta_2 = R_1^2 - L_1^2 - L_2^2 \quad (9)$$

Despejamos $\cos \theta_2$:

$$\cos \theta_2 = \frac{R_1^2 - L_1^2 - L_2^2}{2L_1L_2} \quad (10)$$

Y nos resulta la siguiente ecuación:

$$R_1^2 = x_2^2 + y_2^2 \quad (11)$$

Usando identidades trigonométricas tenemos:

$$(\sin \theta_2)^2 + (\cos \theta_2)^2 = 1 \quad (12)$$

$$(\sin \theta_2)^2 = 1 - (\cos \theta_2)^2 \quad (13)$$

$$\sin \theta_2 = \sqrt{1 - (\cos \theta_2)^2} \quad (14)$$

Usando las ecuaciones (10,14), y reemplazando tenemos:

$$\theta_2 = \text{atan2}(\sin \theta_2, \cos \theta_2) \quad (15)$$

Este es el procedimiento correspondiente al cálculo de θ_2 .

Para calcular θ_1 , es necesario utilizar el diagrama de la Figura 4.4 que se muestra a continuación.

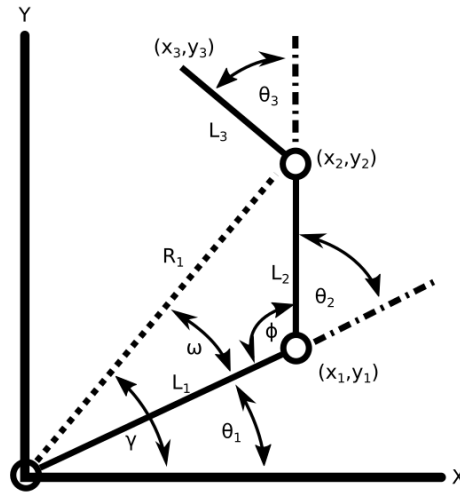


Figura 4.4. Diagrama de cuerpo libre para θ_1 .

Usando la ecuación (15), obtenemos lo siguiente:

$$\phi + \theta_2 = 180 \quad (16)$$

Despejando ϕ de la ecuación (16) tenemos:

$$\phi = 180 - \theta_2 \quad (17)$$

Donde la ecuación (17) es el valor del ángulo entre L1 y L2.

Usando la ley de senos tenemos el desarrollo para la obtención de las siguientes ecuaciones:

$$\frac{\text{sen} \phi}{R_1} = \frac{\sin \omega}{L_2} \quad (18)$$

Despejando $\sin \omega$:

$$\sin \omega = \frac{L_2}{R_1} (\text{sen} \phi) \quad (19)$$

Obtenemos:

$$R_1 = \sqrt{x_2^2 + y_2^2} \quad (20)$$

Usando la ecuación (19), sustituimos $\cos \omega$ en las identidades trigonométricas, resultando:

$$(\sin \omega)^2 + (\cos \omega)^2 = 1 \quad (21)$$

Despejando $(\cos \omega)^2$:

$$(\cos \omega)^2 = 1 - (\sin \omega)^2 \quad (22)$$

Obtenemos la siguiente ecuación:

$$\cos \omega = \sqrt{1 - (\sin \omega)^2} \quad (23)$$

Reemplazando tenemos el siguiente valor para ω :

$$\omega = \text{atan2}(\sin \omega, \cos \omega) \quad (24)$$

Usando la ecuación (24):

$$\gamma = \theta_1 + \omega \quad (25)$$

Despejando θ_1 :

$$\theta_1 = \gamma - \omega \quad (26)$$

Sustituyendo:

$$\gamma = \text{atan2}(y_2, x_2) \quad (27)$$

De esta manera es como llegamos a la ecuación para la obtención del valor correspondiente para θ_1 .

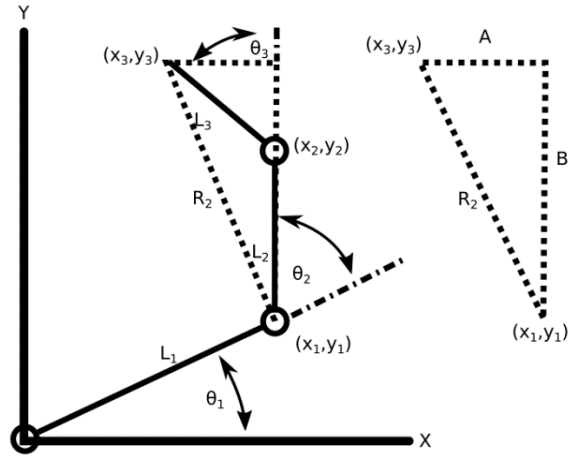


Figura 4.5. Diagrama de cuerpo libre para obtener θ_3 .

Usando como referencia el diagrama de la Figura 4.5 y usando la ley de los cosenos tenemos:

$$R_2^2 = L_2^2 + L_3^2 - 2L_2L_3 \cos(180^\circ - \theta_3) \quad (28)$$

Reduciendo:

$$R_2^2 = L_2^2 + L_3^2 + 2L_2L_3 \cos \theta_3 \quad (29)$$

Separando términos:

$$2L_2L_3 \cos \theta_3 = R_2^2 - L_2^2 - L_3^2 \quad (30)$$

Despejando $\cos \theta_3$:

$$\cos \theta_3 = \frac{R_2^2 - L_2^2 - L_3^2}{2L_2L_3} \quad (31)$$

Donde:

$$R_2^2 = A^2 + B^2 \quad (32)$$

$$A = x_1 - x_3 \quad (33)$$

$$B = y_3 - y_1 \quad (34)$$

$$x_1 = L_1 \cos \theta_1 \quad (35)$$

$$y_1 = L_1 \sin \theta_1 \quad (36)$$

Sustituimos $\cos \theta_3$ en las identidades trigonométricas y obtenemos:

$$(\sin \theta_3)^2 + (\cos \theta_3)^2 = 1 \quad (37)$$

Despejando $(\sin \theta_3)$:

$$(\sin \theta_3)^2 = 1 - (\cos \theta_3)^2 \quad (38)$$

$$\sin \theta_3 = \sqrt{1 - (\cos \theta_3)^2} \quad (39)$$

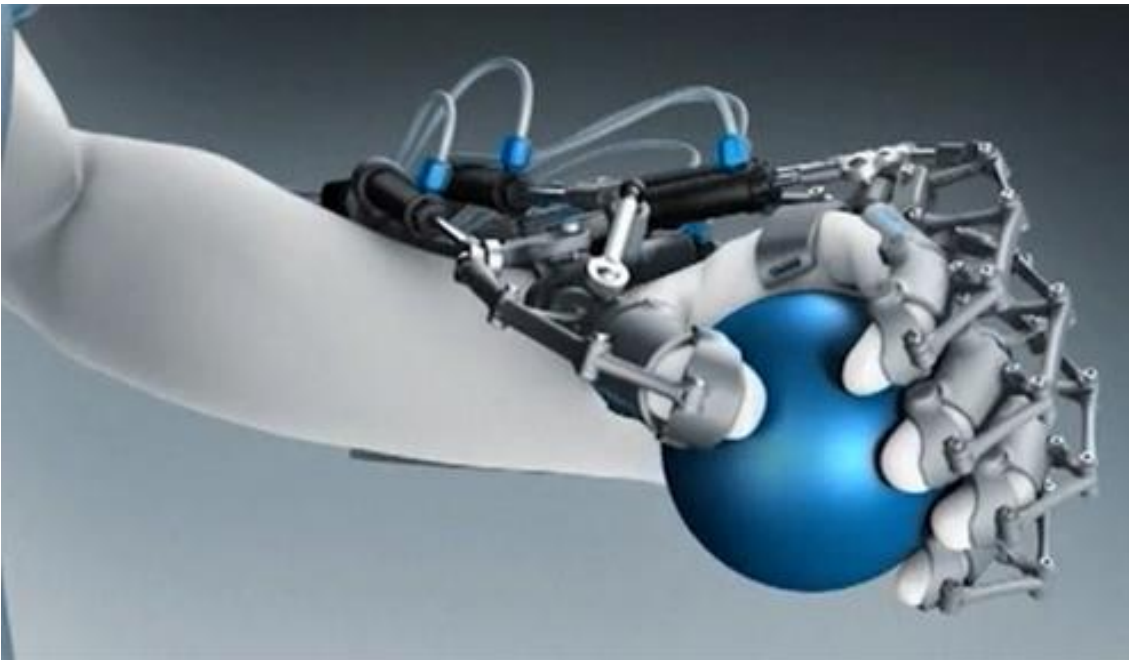
Reemplazando las ecuaciones (31,39) resulta:

$$\theta_3 = \text{atan2}(\sin \theta_3, \cos \theta_3) \quad (40)$$

Con esto concluimos los cálculos correspondientes a los ángulos θ_1 , θ_2 y θ_3 respectivamente con el desarrollo mostrado en las páginas anteriores.

CAPÍTULO

5



*CONCLUSIONES Y
TRABAJOS FUTUROS*

Capítulo 5. Conclusiones y trabajos futuros.

5.1 Conclusiones

Durante el desarrollo del proyecto se trabajó bajo diferentes condiciones, lo cual en su momento representaron, de diferentes formas, consecuencias buenas y malas en los objetivos planteados y en los entregables parciales y/o finales.

En términos general, el proyecto tuvo un desarrollo aceptable, exceptuando algunos puntos fuera de nuestro alcance, que nos limitaron de cierta forma en la continuación de las fases programadas en el transcurso de la elaboración del proyecto.

A continuación se mencionan los puntos más importantes y destacados en el desarrollo del proyecto.

- Se realizó un bosquejo de información teórica y técnica de sobre la conformación de la mano y dedos del ser humano para comprender su funcionamiento y entender de mejor manera el objetivo del proyecto.
- El diseño del exoesqueleto fue satisfactorio, puesto que realiza el trabajo deseado.
- Se realizaron una serie de rediseños y modificaciones en piezas y estructura del diseño original hasta llegar al diseño final y que se maquinará en el material que se desea el cual se definió como aluminio.
- Al cabo de un par de pruebas con diseños que requirieron modificaciones, los cuales se manufacturaron en material de prueba (impresión 3D) para realizar pruebas físicas de funcionamiento con el prototipo ensamblado.
- El prototipo diseñado cuenta con la cinemática la cual puede ser adaptada para diferentes medidas en los dedos de la mano de los pacientes (en caso de ser requerido).
- El prototipo diseñado se elaboró para que pudiera ser usado por diferentes pacientes sin tener que modificar las dimensiones ni elaborar nuevas piezas para acondicionar y ajustar a diferentes tamaños de dedos de la mano.

En conclusión podemos estar satisfechos con el resultado obtenido.

5.2 Trabajos futuros

- Maquinar el resto de piezas faltantes en aluminio para ensamblar el prototipo final, puesto que las maquinas a utilizar en el Instituto Tecnológico de Nuevo León sufrieron de un par de composturas y mantenimientos, lo cual retrasó el maquinado de dichas piezas.
- Ensamblar las piezas a maquinar y entregar el prototipo final.
- Adecuar el dedo pulgar al exoesqueleto.
- Rediseñar en caso de ser necesario por la adecuación del dedo pulgar.
- Adicionar el sistema de control para el exoesqueleto.
- Por recomendación de un experto en rehabilitación nos sugiere tomar en cuenta otro material para la manufactura de las piezas puesto que el aluminio pudiera causar daños colaterales en el paciente.

Bibliografía

[1] Anónimo. Exoesqueleto mecánico. Obtenida el 17 de enero del 2017, de http://www.feriadelasciencias.unam.mx/anteriores/feria22/feria262_01_exoesqueleto_mecanico.pdf

[2]. Anónimo. Sistemas inteligentes en exoesqueletos de rehabilitación. Obtenida el 17 de enero del 2017, de <http://www.uaeh.edu.mx/scige/boletin/tlahuelilpan/n1/e3.html>

[3] Cruz Juan, Exoesqueleto, Universidad San Juan, Argentina

[4]. Omicrono. ¿Son los exoesqueletos la solución para los minusválidos? Obtenida el 17 de enero del 2017, de <http://www.medciencia.com/son-los-exoesqueletos-la-solucion-para-los-minusvalidos/>

[5] Gutiérrez Mendoza Marco Octavio, Saberes y Ciencias Portada Número 38, La Robótica y su aplicación en terapias de rehabilitación, Junio del 2015.

[6] Instituto Nacional de Bioingeniería e imágenes biomédicas, Ingeniería de rehabilitación, Junio del 2013.

[7] Revista Digital Universitaria, Vol.6 Núm. 1, Robótica y Prótesis Inteligentes, Facultad de Ingeniería UNAM, Enero del 2004. http://www.revista.unam.mx/vol.6/num1/art01/art01_enero.pdf

[8]http://www.feriadelasciencias.unam.mx/anteriores/feria22/feria262_01_exoesqueleto_mecanico.pdf

[9] Lasso Iván, Masso Marylin, Exoesqueleto para reeducación muscular, Universidad del Cauca, Popayán.

[10]M Vukobratovic, D Hristic, and Z Stojiljkovic. Development of active anthropomorphic exoskeletons. *Med BiolEng*, 12(1):66–80, 1974.

[11] H. Kazerooni and Jenhwa Guo. Dynamics and control of human-robot interaction. In *American Control Conference*, 1993, pages 2398–2403, June 1993[33] H. Kazerooni and S.L. Mahoney. Dynamics and control of robotic systems worn by humans. In *Robotics and Automation*, 1991. Proceedings. 1991 IEEE International Conference on, pages 2399–2405 vol.3, apr1991

[12]N. Neckel, W. Wisman, and J. Hidler. Limb alignment and kinematics inside a lokomatrobotic orthosis. In *Engineering in Medicine and Biology Society*, 2006. EMBS '06. 28th Annual International Conference of the IEEE, pages 2698–2701, September of 2006.

- [13] G.H. Omar, P.V. Mario, V.C. Juan Pablo, *Esqueleto Robótico para Rehabilitación de Miembro Superior*, Instituto Politécnico Nacional, Mayo del 2011
- [14] Zoss A., Kazerooni H., Chu A. *On the mechanical design of the Berkeley Lower Extremity Exoskeleton*. IEEE International Conference on Robotics and Automation, August 2005.
- [15] Ruiz Olaya Luis Felipe, *Sistema Robótico Multimodal para Análisis y Estudios en Biomecánica, Movimiento Humano y Control Neuromotor*, Octubre 2008
- [16] Mio Zaldívar, Renato Alonso, *Diseño de un exoesqueleto para rehabilitación de miembro superior acondicionado por una interfaz cerebro-maquina*, Diciembre del 2014
- [17] Santoja Guerrero Ignacio, *Diseño e implementación de sistemas de control aplicados a un exoesqueleto para la rehabilitación de la mano*
- [18] Walter DeLany Judith, *Aplicación clínica de las técnicas neuromusculares, tomo I, Parte superior del cuerpo*, Primera Edición. 2006.
- [19] Miralles Marrero Rodrigo C., *Biomecánica clínica del aparato locomotor, primera edición*, 1998.
- [20] Cailliet Rene, *Anatomía Funcional Biomecánica*.
- [21] Buckup Klaus, *Pruebas clínicas para patología ósea, articular y muscular*, Editorial Masson, España, 1997.
- [22] Chaitow Leon, *Aplicación clínica de las técnicas neuromusculares, Parte superior del cuerpo*, Primera Edición, 2006.
- [23] C.A. Carlos Andrés, H.C. Jhosep Edgar, P.R. Carlos Uriel, *Análisis y diseño de un prototipo de una mano robótica con catorce grados de libertad, capaz de ser dirigida a través de internet en tiempo real*, Universidad Tecnológica de Pereira, 2012. (<http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/2690/629892H859.pdf?sequence=1>)
- [24] Rodríguez Zambrana Juan Carlos, *Modelo cinemático y control de in brazo robótico imprimible*, Universidad Carlos III de Madrid.
(http://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/16924/TFG_Juan_Carlos_Rodriguez_Zambrana.pdf?sequence=3)