



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

Diseño de Prótesis de Mano con un solo Actuador

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Mecánico

P R E S E N T A

José Agustín Vizcayno García

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Jesús Manuel Dorador González



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2019

*“Haz las cosas lo más simple que puedas,
pero no te limites a lo simple”*

- *Albert Einstein*

Agradecimientos

A mis padres Jorge y Leticia por siempre haberme apoyado durante todos estos años y por siempre darme su mejor consejo cuando lo necesitaba.

A mis hermanos por su ejemplo y ayuda.

A mis tíos, primos, amigos y a toda mi familia que siempre me dieron su apoyo.

A la Universidad Nacional Autónoma de México por haberme dado la oportunidad de formarme como profesional y persona en la máxima casa de estudios.

Este trabajo se realizó en el marco del proyecto PAPIME PE109818 “Enseñanza de la ergonomía”.

Al Doctor Jesús Manuel por las enseñanzas que me aportó y haberme guiado en este proyecto.

Índice

INTRODUCCIÓN	5
Resumen.....	5
Abstract	5
Objetivos	6
LAS PRÓTESIS Y SU DISEÑO	7
1.1. Evolución de las Prótesis	7
1.2. Panorama de la Necesidad de Prótesis en México	11
1.3. Antecedentes del Proyecto	11
1.4. Metodología de Diseño	14
NECESIDADES DEL USUARIO Y PROYECTOS ACTUALES.....	16
2.1. Análisis de las Necesidades del Usuario.....	16
2.1.1. Recopilar datos sin procesar de los clientes	16
2.1.2. Interpretar los datos sin procesar en términos de las necesidades de los clientes..	17
2.1.3. Organizar las necesidades en una jerarquía de necesidades primarias, secundarias, y de ser necesario, terciarias	17
2.1.4. Establecer la importancia relativa de las necesidades.....	18
2.1.5. Reflexionar en los resultados y el proceso.....	19
2.2. Estado del Arte	19
PROCESO DE DISEÑO.....	21
3.1. Especificaciones del Producto	21
3.2. Diseño Conceptual	25
3.2.1. Revisión de la Mano Cyborg Beast	26
3.3. Generación del Concepto.....	30
3.3.1. Mecanismos para flexionar y extender los dedos.....	30
3.3.2. Mecanismo para la oposición del pulgar	35
3.3.3. Generación de la palma	37
3.4. Diseño de Detalle	38
3.4.1. Dedos.....	38
3.4.2. Pulgar.....	39
3.4.3. Palma.....	39

FABRICACIÓN Y PRUEBAS.....	42
4.1 Construcción del Prototipo	42
4.1.1 La impresión en 3D.....	42
4.2 Pruebas de Funcionalidad	45
4.2.1. Agarre de Gancho.....	45
4.2.2. Punta Fina.....	46
4.2.3. Prensa.....	46
ANÁLISIS DE LA MANO	47
5.1 Análisis Cinemático del Mecanismo.....	47
5.2 Análisis estructural.....	51
CONCLUSIONES	55
TRABAJO A FUTURO	55
REFERENCIAS ELECTRÓNICAS.....	57
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60

INTRODUCCIÓN

Resumen

Este trabajo presenta el desarrollo del diseño de una prótesis de mano con un solo actuador que proporciona 3 movimientos. El trabajo comienza describiendo cómo fueron las prótesis en los siglos pasados y su evolución, hasta dar a conocer el panorama de las personas que necesitan prótesis actualmente en el país.

El trabajo describe el desarrollo de algunos pasos dentro de la metodología de diseño que sirvieron para dar forma al diseño obtenido, ya que toma en cuenta desde surgimiento de la idea, la elección del mercado al que está dirigido y el usuario objetivo. Se analizan sus necesidades para determinar las especificaciones y se describe cómo se van a satisfacer las necesidades del usuario usando datos de proyectos existentes, después, se comienza el proceso de creación del concepto evaluando las diferentes soluciones que se propusieron, hasta llegar a crear un concepto, el cual, se diseñó a detalle para imprimirse en 3D.

Ya con el prototipo impreso, se ensambló para hacerle las pruebas de funcionalidad y comprobar físicamente que puede realizar los tres movimientos planteados con un solo motor. Una vez que se tenía funcionando el prototipo, se realizó un análisis del movimiento de los dedos utilizando el método de cinemática directa. También, se hizo un análisis estructural de los dedos para ver si es posible que resistan una carga de 10 [kg]. Por último, se agregó, qué es lo que se necesitaría añadir para que el proyecto fuese una prótesis de mano lista para salir al mercado.

Abstract

This work presents the development of a prosthetic hand design with just one motor which gives 3 movements utilizing the design methodology. The work starts describing how the prosthesis were in the past's centuries and their evolution. The panorama of the people who need prosthetics in the Country is presented.

The work describes how the steps of the methodology of design were applied to obtain the design, it includes about since the origin of the idea until the market and the user who will use it were chosen. It analyzes the user's necessities to know what the new design would need and describes how those necessities will be satisfied using the obtained data of the existing projects, then, it starts the concept's creation processes evaluating the proposed solutions, until the concept was created and designed in detail to be printed in 3D.

The prototype was assembled to make the functionality tests and check physically if the prototype can realize the three planned movements with one motor. A finger's movement analysis was made utilizing the direct kinematics method.

INTRODUCCIÓN

A structural analysis of the finger was performed to see if it can resist a load of 10 [kg]. A final chapter with the further work was added to state what activities must be done to turn the propose design into a prosthetic hand ready to go out to the market.

Objetivos

- Crear el diseño de una prótesis de mano para usuarios que hayan sido amputados o tengan una malformación entre el tercio distal y el tercio proximal del antebrazo.
- Realizar un prototipo en el cual, se pueda probar su funcionalidad y analizar su comportamiento.
- Obtener el diseño siguiendo una metodología basada en el Ulrich [28].

Capítulo 1

LAS PRÓTESIS Y SU DISEÑO

1.1. Evolución de las Prótesis

Las amputaciones son un proceso quirúrgico que se ha aplicado desde tiempos ancestrales en la medicina con la finalidad de remover parte o la totalidad de alguna extremidad que se encuentre en un estado de disfuncionalidad o que exista la posibilidad de que el padecimiento se extienda a otra sección del cuerpo. Debido a que este proceso se ha realizado durante muchos años, ha dejado la necesidad de poder crear dispositivos que puedan regresar parcialmente los movimientos que los pacientes podían realizar con la extremidad amputada.

En la búsqueda de obtener una solución para el problema de la falta o atrofiamiento de nuestro cuerpo por la razón que sea, hemos tenido que recurrir a lo que hoy en día conocemos como prótesis, que son dispositivos ajenos a nuestro cuerpo que pueden regresar una o varias funciones que realizaba la parte del cuerpo perdida. Las prótesis han tenido una historia y evolución conforme a como la tecnología ha mejorado con el paso de los años, comenzando con una función meramente estética, hasta llegar al punto a casi igualar a la parte biológica, dando saltos tecnológicos muy grandes entre sus inicios y lo que existe hoy en día.

Para poder explicar cómo se llegó al diseño de la prótesis propuesta en este trabajo es necesario dar un breve repaso por su evolución y así darnos cuenta de que el avance tecnológico marcó la mejora de cada prótesis en ese tiempo, ya sea desde los materiales, mecanismos, hasta; la introducción a la electrónica que fue la que ayudó a dar un gran paso para obtener las mejores prótesis.

BREVE HISTORIA DE LAS PRÓTESIS

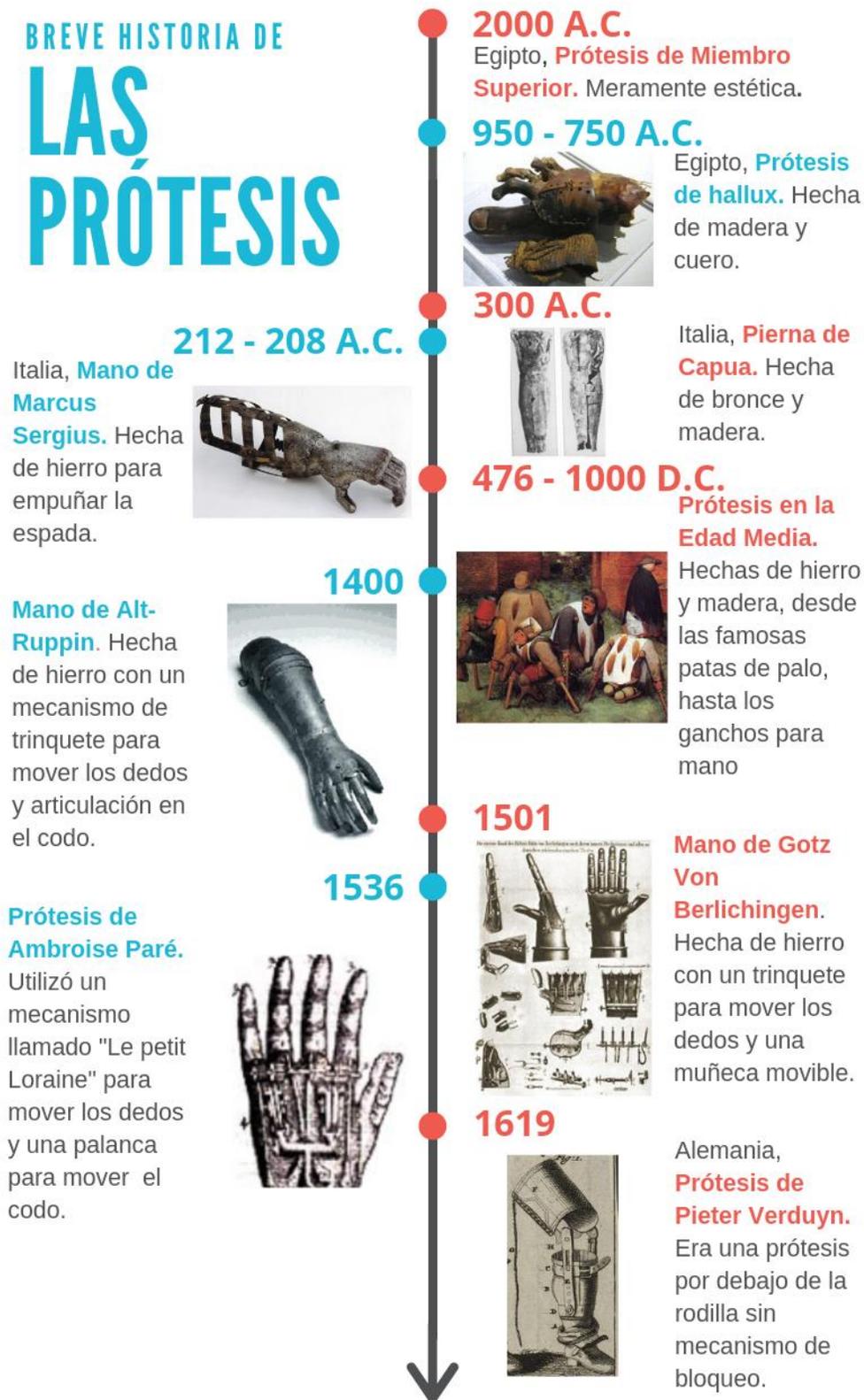


Figura 1.1. Línea del tiempo de la historia de las prótesis [1, ..., 5, 37, 38].

Londres, **Pierna de James Potts.**

Hecha de acero, madera y tripa de gato, la cuál, era una pierna de encaje con tendones que permitía moverla.

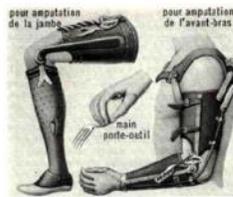


1800

1818

Alemania, **Prótesis de Peter Beil.**

Hecha de madera, cuero y polímeros naturales, era un brazo que podía mover los dedos al accionar el hombro y cadera.



1860

Crimea, **Prótesis de Von Beaufort.** Creó un brazo que accionaba el codo con una palanca en el tórax y movía los dedos con el hombro.



1862

EUA, **Pierna Doctor Bly.**

Hecha de marfil, siendo una pierna con tobillo y rodilla articulada y tobillo intercambiable.



1912

EUA, **El Hook.**

Hecha de acero y polímeros. Gancho acoplado al brazo, movido por la cintura escapular



1915

Alemania, **Prótesis de Sauerbrunch.**

Mano que se movía por la unión quirúrgica de los musculos con los tendones artificiales.



1944

Alemania, **Prótesis de Mano con Actuador.** Fue la primera prótesis de mano movida por un actuador externo al cuerpo humano.



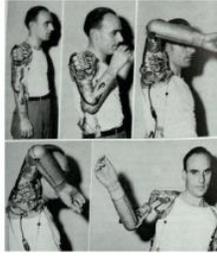
1945

Alemania, **Prótesis de Reiter.** Primera prótesis en incluir un control mioeléctrico llamado "control de tres estados"



1954
EUA, **Brazo Electrónico.**

Fue la primera prótesis en tener el codo y el hombro con actuadores independientes, dando la pauta a las prótesis modernas.



1956

EUA, **Soquet de Succión.** Fue desarrollada la primer prótesis con un soquet que trabajaba con presión de vacío.



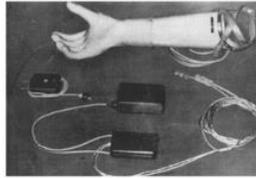
1958

Prótesis Cosméticas. Hechas de plástico, su función era meramente estética.



1959

Rusia, **Mano Rusa.** Era una prótesis en la cuál se le incorporaron baterías para energizar los actuadores.



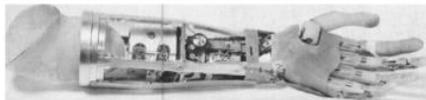
1968

EUA, **Boston Arm.** Esta prótesis fue la primera en usar el control mioeléctrico para el codo



1973

Rusia, **Mano SVEN.** Retomó el control mioeléctrico con retroalimentación con sensores y fué la primera en presentar 6 grados de libertad.



1999

Canadá, **Mano Toronto Bloorview Macmillan.** Esta prótesis logró introducir los mecanismos de los dedos, los actuadores y el controlador dentro de la mano. De donde se basaron las prótesis actuales, donde todos los sistemas están empaquetados en la mano



1.2. Panorama de la Necesidad de Prótesis en México

En México las prótesis son una necesidad de la población, ya que, hoy en día no se pueden dar abasto con las prótesis que se tienen disponibles dentro del territorio mexicano porque aproximadamente 75 personas son amputadas diariamente según la Academia Nacional de Cirugía y con datos tomados en 2014 existen cerca de 900,000 amputados de todas las edades en el país.

Mientras que los proveedores de prótesis en el país como: el DIF logra dar 400 prótesis al año, el INR 120 prótesis, el CRIMAL IAP Querétaro proporciona 130 prótesis, el CRIT llega a otorgar 775 prótesis a pacientes. Se puede ver que la producción de prótesis en el país no llega a proporcionar ni 1500 prótesis en un año, de las cuales se dividen en los diferentes tratamientos para cada tipo de lesión que conlleva determinada prótesis.

Con los datos que se tienen, aproximadamente cada año se amputan un promedio de 27mil pacientes, que por lo general necesitan un tipo de tratamiento y que muchas veces es necesario que se le otorgue una prótesis para que pueda recuperar un poco de como era su vida antes de la lesión. Esto nos lleva a ver una problemática muy severa debido a que solo se atienden de manera correcta al 5.5% de los pacientes que fueron amputados, aunado a que existe cierta población con enfermedades degenerativas o que sufren padecimientos desde su nacimiento y necesitan una prótesis. Tomando en cuenta que, al otorgarse una prótesis, también se debe dar la debida rehabilitación para darle el máximo beneficio. Dejando una oportunidad para el desarrollo de tecnología y de profesionales para que algún día se pueda cubrir en su totalidad la necesidad que la población tiene hasta la fecha.

1.3. Antecedentes del Proyecto

Este trabajo es una iniciativa debido a las necesidades que tiene una gran parte de la población en nuestro país y el mundo. La mayoría de las personas sufren lesiones en el ámbito laboral y en la vida diaria por diversas razones, lo que les puede provocar una discapacidad. Dado el caso que sufrieran un accidente donde se tenga que realizar una amputación o se haya sufrido alguna degeneración en su cuerpo y sea necesario que se le coloque un dispositivo ajeno a su cuerpo para poder tratar o sobrellevar su padecimiento, que puede ser una prótesis o una ortesis. El costo de estos dispositivos en el mercado actual es muy elevado para la mayoría de la población en México que sufre de este problema.

Dado el caso que tuvieran la necesidad de una prótesis de mano porque parte o la totalidad de su mano sufrió daños irreversibles que la prótesis es la mejor solución. Entonces, es donde el verdadero problema comienza porque como se explicó en el punto anterior hay una gran escasez de material protésico accesible en México, porque siempre está la posibilidad de poder comprar una prótesis comercial, en las diferentes empresas que fabrican prótesis en el mundo. Pero justamente estas son las que tienen un precio más elevado siendo poco probable que el poder adquisitivo de los lesionados sea tan solvente para comprar la prótesis y la terapia necesaria para utilizarla correctamente.

En el campo de las prótesis de miembro superior existe un nicho en el mercado y, por tanto, la oportunidad para innovar. El proyecto nació en un inicio al realizar investigaciones durante el

servicio social en el Departamento de Ingeniería en Sistemas Biomédicos donde se encontró que el 14% del total de los amputados en el mundo pertenecen a amputaciones de miembro superior, eso quiere decir que, aproximadamente el 0.17% de la población mundial sufre de este padecimiento. Y en México se obtuvo una información semejante, dado que, aproximadamente el 15% de los amputados son de la extremidad torácica que incluye amputaciones de tipo:

- Desarticulación de muñeca
- Transradiales
- Desarticulación de codo
- Transhumerales
- Interescapulotorácico
- Desarticulación de hombro
- Transcarpiana
- Transmetacarpiana
- De cintura escapular

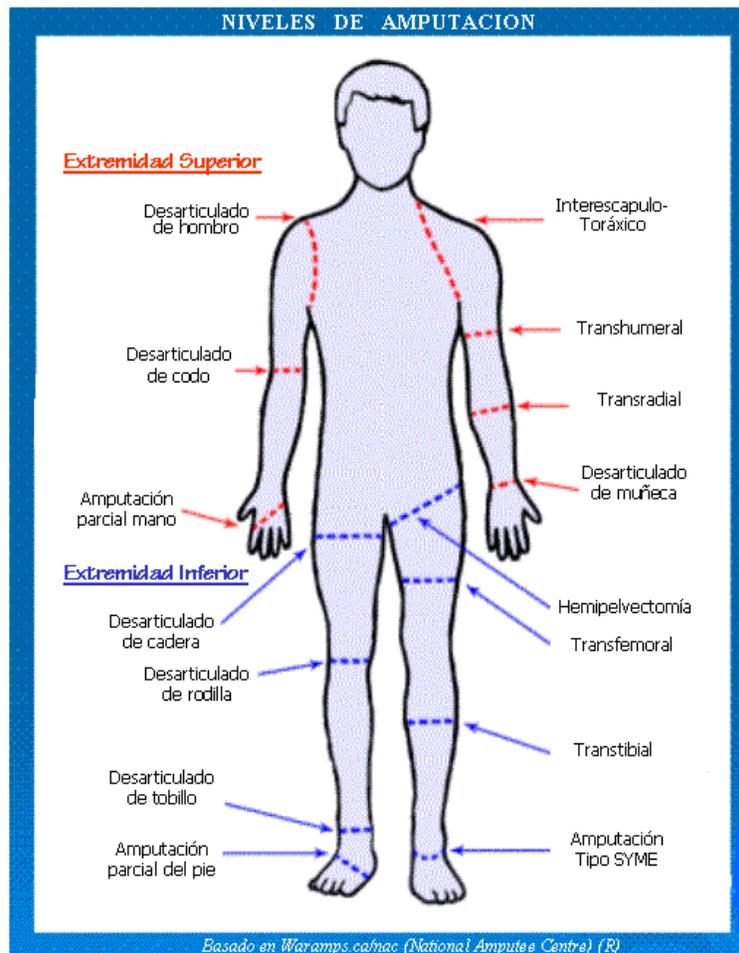
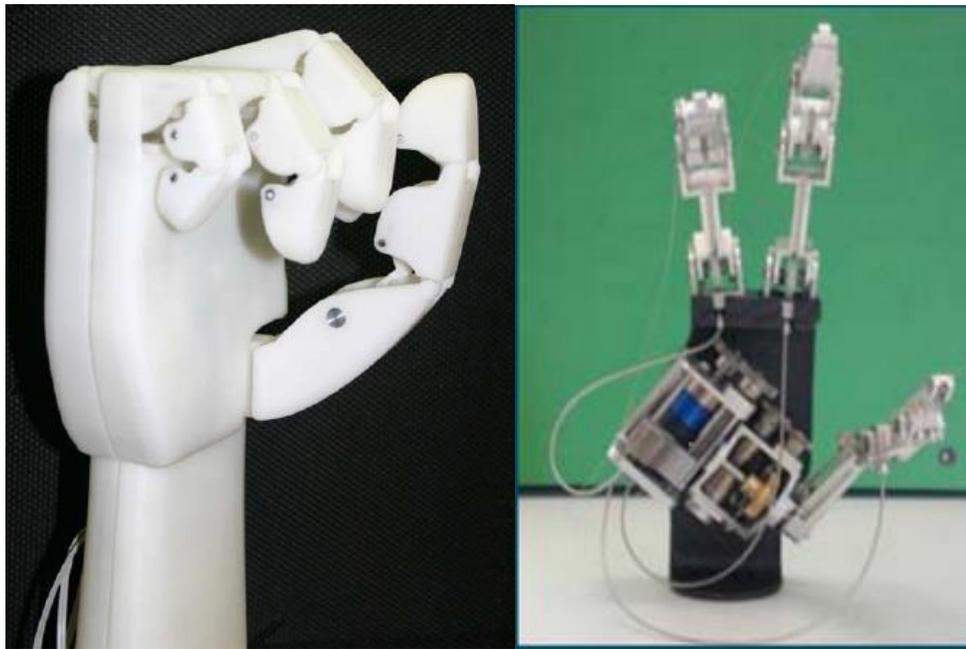


Figura 1.2. Tipos de amputaciones [9].

Siendo un panorama tan amplio y no pudiendo abarcar todos los tipos de prótesis para cada padecimiento, el proyecto se enfocó en la parte de amputaciones de brazo, que presentan el 13.2%

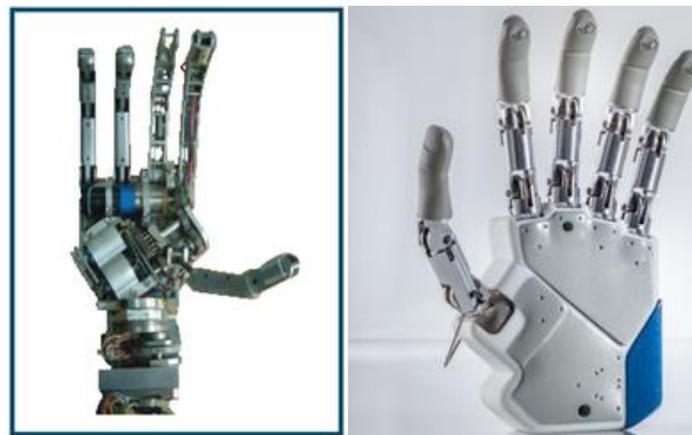
del total de los amputados. Se tomó esta decisión porque en este tipo de prótesis no es necesario involucrarse con prótesis que necesariamente sean injertadas dentro del cuerpo humano y solo fuesen externas, pero a su vez representaba un reto ingenieril poder diseñar una, que pudiera servir correctamente como prótesis y no solo como mano robótica o las denominadas manos de escritorio. Y también lograr un diseño que estuviese compuesto de menos piezas buscando que tuviera un costo mucho menor a las que existen en el mercado hoy en día, siendo más accesibles y con ella permitiéndoles realizar algunos de los movimientos que podían realizar antes de la amputación.



a)

b)

Figura 1.3. Ejemplo de mano de escritorio. a) Mano CDMIT I [11]. b) RTR II [12].



a)

b)

Figura 1.4. Ejemplo de mano robótica. a) MANUS – HAND [13]. b) IH2 AZURRA HAND [14].



Figura 1.5. Ejemplo de manos protésicas. a) Hero Arm [15]. b) Southampton – Remedi Hand [16].

1.4. Metodología de Diseño

Es el conjunto de procedimientos, técnicas o pasos que un ingeniero, diseñador o cualquier persona sigue para crear un producto. Existen muchas metodologías de diseño, en donde varios autores proponen la estructura que ellos consideran se debe seguir para tener éxito en la creación de un diseño y que les ha funcionado, la mayoría sigue los mismos conceptos y solo varían el orden de los procedimientos o le agregan pasos a su método. En este trabajo se tomó como base la metodología de diseño explicada por Ulrich [28]. Con algunas modificaciones se consiguió el método usado:

1. Identificación de oportunidades

Este punto se basa cuando no se tiene absolutamente nada o se quiere realizar una innovación en cierto mercado. Entonces, se hace una búsqueda con los clientes de todo ese mercado para obtener información sobre que les gustaría que hubiera, que les ayudara a resolver un problema que tienen en la vida diaria. También, con la experiencia e inventiva del equipo de diseño, se puede obtener una oportunidad para innovar en el mercado.

2. Planeación del producto

Se debe tener una planeación del producto porque en una empresa, se deben asignar recursos para desempeñar cada proceso que involucra al desarrollo del producto. Y así, dar una tarea a equipos de trabajo especializados y se agilice todo el proceso.

3. Análisis de las necesidades del usuario

En este punto se debe elegir el usuario objetivo, porque siempre existen diferentes tipos de usuario para cada producto y es crucial elegir hacia quien va dirigido específicamente. Una vez que se tiene identificado el usuario al que va dirigido el producto, se hace un análisis de las necesidades que el usuario tiene relacionadas con ese producto, porque con ese análisis se va a determinar que necesita tener el producto para que sea exitoso en el mercado.

4. Especificaciones del producto

Una vez que se tiene el usuario objetivo y lo que necesita del producto, es necesario dar una cuantificación de cómo se van a resolver las necesidades del usuario, para así, dar la pauta al diseño que se va a realizar. Es necesario dar una revisión extensa de lo que ya existe de productos de la misma clase para saber dónde se va a situar el producto con respecto a la competencia y no repetir algo ya hecho. Con base en ello, establecer las especificaciones cuantificables del producto a diseñar.

5. Generación del concepto

En este punto se usa la información obtenida anteriormente para dar forma física al proyecto que se está realizando. Los diseñadores del equipo deciden los sistemas o divisiones que va a tener el producto, para que sea más fácil ir creando parte por parte, haciendo una lluvia de ideas donde todos proponen una solución, que para ellos es la mejor. Para que, al final se evalúe cada solución analizando cuál resuelve mejor las necesidades del usuario, para así, ir obteniendo un concepto de la solución.

6. Diseño de detalle

Ya con el concepto creado, es necesario ver cómo va a ser cada parte del concepto para poder hacer un prototipo físico. Se evalúan materiales, sistemas de accionamiento y cada detalle para crear un prototipo funcional.

7. Construcción del Prototipo

En este punto se utiliza el diseño que se obtuvo en la parte de diseño de detalle para analizar cómo se va a fabricar el prototipo, por lo general, se realizan cambios ligeros al concepto final porque como se tiene un material que resultó el mejor para cada parte del concepto. Se debe elegir el proceso de manufactura por el cual se va a realizar, por lo tanto, se hacen los ajustes para que las piezas puedan ser fabricadas.

8. Pruebas del prototipo

Ya con el prototipo hecho exitosamente, se debe revisar su funcionamiento, resistencia y todas las pruebas a las que el usuario va a someter el producto.

Capítulo 2

NECESIDADES DEL USUARIO Y PROYECTOS ACTUALES

2.1. Análisis de las Necesidades del Usuario

La determinación de las necesidades del cliente o del usuario en este caso es complicado, debido a que no sólo no es una práctica muy correcta el estar encuestando a los usuarios de una prótesis de miembro superior debido a que es un tema que para muchos es algo sensible y no es recomendable llegar y preguntar a las personas amputadas que es lo que esperan de su prótesis, sino que además se requeriría encuestar a personas que hayan usado diversos tipos de prótesis para tener información confiable.

Las necesidades de cliente son fundamentales para el desarrollo de algún producto porque todo producto va a ir dirigido hacia ciertas personas y se necesita conocer sus necesidades o deseos sobre lo que requieren para ciertas actividades. Para poder iniciar el proceso de búsqueda de necesidades del usuario, es necesario conocer el cliente objetivo y al mercado al que va dirigido, y para este trabajo se ha buscado un mercado de clase media-baja y usuarios objetivo principalmente que perdieron su mano al estar realizando labores de trabajo y deben estar trabajando constantemente porque son uno de los sustentos económicos para su familia. Para la búsqueda de las necesidades del usuario se basó en el método de 5 pasos del Ulrich [28], el cual establece los siguientes pasos:

2.1.1. Recopilar datos sin procesar de los clientes

Como se mencionó en la parte inicial de este apartado, no se acudió directamente con personas amputadas para encuestarlas, por lo tanto, se planteó la pregunta principal: ¿Qué es lo que el usuario busca o desearía que fuera o tuviera su prótesis para que pudiese desempeñar su vida diaria? Bajo esas restricciones se planteó un panorama que un usuario de prótesis realmente desea es tener su mano de vuelta, con todas las funciones que podía hacer con su mano biológica y así se consiguieron las siguientes necesidades del usuario:

Tabla 2.1. Necesidades recopiladas de los clientes.

NECESIDAD	
Fiable	Maniobrable
Resistente al agua	De fácil reparación
Funcional todo el día	Desmontable
Resistente	Cómoda
Ligera	Ergonómica
Estética	De fácil ajuste
Bonita	Intuitiva de usar
Que tenga varias funciones	Barata

2.1.2. Interpretar los datos sin procesar en términos de las necesidades de los clientes

Al recopilar las necesidades de los usuarios, por lo general no se encuentran como un ingeniero o un diseñador las entiende. Entonces, se tiene que realizar la labor de interpretación para entender lo que realmente tiene que hacer el producto para satisfacer al cliente.

Tabla 2.2. Descripción de cada necesidad dada por los clientes.

NECESIDAD	DESCRIPCIÓN
Fiable	Trabaje debidamente sin importar las condiciones.
Resistente al agua	Que pueda trabajar, aunque esté en un ambiente húmedo.
Funcional todo el día	Pueda estar funcionando 24 horas sin que presente una falla.
Resistente	Compuesta de materiales que puedan resistir impactos, pesos moderados y compresiones que sufre una mano cualquiera por el contacto en el medio.
Ligera	Que sea lo más liviana posible.
Estética	Tenga un diseño semejante a una mano humana.
Bonita	Que tenga un diseño que sea agradable a la vista.
Que tenga varias funciones	Presente la mayor cantidad de movimientos que se pueden hacer con una mano.
Maniobrable	Sus dimensiones y diseño sean adecuados para permitir el movimiento de todo el cuerpo sin perjudicarlo.
Facilidad de reparación	Las piezas se puedan adquirir con facilidad y sea intuitivo el poder desarmarla.
Desmontable	Que se pueda quitar y poner en todo momento.
Cómoda	No lastime cuando se esté usando.
Ergonómica	Después de un largo periodo de uso siga manteniendo confortabilidad, porque es compatible con la estructura del cuerpo humano.
De fácil ajuste	Cualquier persona la pueda ajustar sin el uso de herramientas especializadas.
Intuitiva de usar	Para poder usarla no se tenga que recibir un entrenamiento de mucho tiempo.
Barata	Que sea de un precio accesible para la mayoría de la población.

2.1.3. Organizar las necesidades en una jerarquía de necesidades primarias, secundarias, y de ser necesario, terciarias

Para este paso es necesario establecer jerarquías para cada necesidad y darle el enfoque a las de mayor valor porque existen prioridades en el diseño porque, por ejemplo, es prioridad que la mano sea resistente a que sea bonita y así el cliente obtenga un producto adecuado según sus necesidades.

Tabla 2.3. División de las necesidades por orden de importancia.

GRADO	NECESIDAD
Primarias	<ul style="list-style-type: none"> - Fiable - Ligera - Resistente - Ergonómica - Barata - Maniobrable - Estética
Secundarias	<ul style="list-style-type: none"> - Resistente al agua - Que tenga varias funciones - Intuitiva de usar - De fácil ajuste - Facilidad de reparación
Terciarias	<ul style="list-style-type: none"> - Funcional todo el día - Cómoda - Desmontable - Bonita

2.1.4. Establecer la importancia relativa de las necesidades

Este paso tiene dos grandes maneras de hacerse, la primera es confiar en el diseñador con su experiencia en el usuario objetivo para poder tomar las decisiones sobre cuáles serán las necesidades del usuario en las que se enfocarán la mayor parte de los recursos, y la segunda manera es una encuesta con los usuarios para que ayuden a determinar la decisión. Debido a que no es posible hacer la encuesta, se tomó la primera forma de identificación de las necesidades.

Se basó en la experiencia de las investigaciones previas a este proyecto para decidir las necesidades a desarrollar y a enfocarse, que son:

- Resistente
- Barata
- Maniobrable
- Que tenga varias funciones
- Ligera
- Ergonómica

La decisión que se tomó se basó principalmente en la ponderación de que, lo que un usuario busca es, que sea lo más parecida a su mano biológica y que pueda ser accesible, ya que, la mayoría de las personas que tienen la necesidad de una prótesis no cuentan con una gran solvencia económica.

2.1.5. Reflexionar en los resultados y el proceso

El proceso tuvo sus variaciones por el problema de no poder tener un contacto directo con los usuarios o clientes. Por lo tanto, la manera de mejorar el proceso es hacerlo con el método tradicional en tener contacto directo con los usuarios objetivo y buscar la forma de asistir a un centro de rehabilitación donde los que apliquen las encuestas sean especialistas en el tema y que ayuden a sentir seguridad al usuario y no se tengan resultados erróneos en la encuesta.

2.2. Estado del Arte

El estado del arte o benchmarking es una recopilación de la información de los productos que existen en el mercado actualmente que representan una competencia y se asemejan al producto que se está diseñando. Esta recopilación se basa en mayor medida para poder obtener datos cuantitativos de lo que puede hacer la competencia y así decidir los alcances del producto a diseñar.

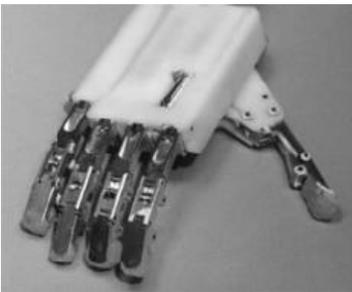
También ayuda para conocer lo que ya se hizo en proyectos anteriores, y con esa información saber si dio o no dio buenos resultados. De esta manera se ahorra tiempo en no realizar los mismos errores que otro equipo de diseño ya cometió y obtener información para basarse en el diseño futuro. Existen casos en que no se realiza correctamente el estudio del estado del arte y se puede crear un producto igual al que otros diseñadores ya habían hecho, lo cual, puede ser considerado como un plagio, por lo tanto, es muy importante antes de proponer cualquier diseño, hacer una revisión extensiva sobre lo que ya existe para no caer en problemas y ayudar a la hora de crear el diseño conceptual.

Southampton - Remedi Hand [16]



Tiene 6 motores CD, 2 para el pulgar y uno para cada uno de los otros dedos. Tiene un mecanismo de 6 barras y caja reductora de engranes con tornillos sin fin para conectar el motor y la caja. Cada dedo logra una fuerza máxima de 9.2 [N], su fuerza máxima de agarre de toda la prótesis es de 36 [N]. Pesa 400 [g] y acciona con comandos mioeléctricos.

Toronto Bloorview Macmillan Hand [18]



Cuenta con un motor CD que mueve a mecanismos de 5 barras para el pulgar y de 7 barras para los demás dedos. Su fuerza máxima de agarre es de 35 [N] y solo esa 280 [g].

Vincentevolution 3 [19]



Tiene 6 motores CD acoplados por tornillos sin fin a mecanismos de 4 barras, 2 motores para el pulgar y 1 más para cada uno de los otros dedos. Cada dedo puede alcanzar una fuerza en la punta de 8.44 [N] y el peso aproximado de cada dedo es de 37 [g].

I-limb Ultra [20]



Cuenta con 5 motores CD, con una transmisión de tornillo sin fin a un mecanismo de 4 barras. Tiene una fuerza máxima de agarre de 136 [N] y la mano puede soportar una carga máxima de 90kg sobre ella, pesa 479g y tiene un precio entre USD \$ (60,000 – 120,000)

Bebionic3 Hand [21]



Tiene una fuerza máxima de agarre de 140 [N] logrado con 5 motores CD, cuenta con el sistema de transmisión diseñado exclusivamente por Ottobock y además los dedos funcionan con un mecanismo de 4 barras. Su peso ronda entre los 560 a 600 [g]. Con un precio de USD \$ 11,000

Michelangelo Hand [22]



Tiene un peso aproximado entre los 460 y 510 [g]. Cuenta con una fuerza máxima de agarre de aproximadamente 70N que los logra con 2 motores DC. Usa un mecanismo de bielas para mover los dedos junto con una transmisión mediante un control mioeléctrico. Y su precio ronda entre los USD \$(73,000 – 120,000).

Capítulo 3

PROCESO DE DISEÑO

3.1. Especificaciones del Producto

En este apartado estableceremos lo que dará la pauta para poder encontrar nuestro diseño conceptual partiendo de las metas a lograr. Se intentará dar la información cuantitativa de cómo se van a resolver las necesidades del usuario obtenidas del análisis que se hizo para seleccionarlas. Las necesidades están en palabras clave, las cuales hay que desarrollar para poder cumplir con la idea general de las palabras plasmadas.

Tabla 3.1. Desglose de las palabras clave en necesidades reales.

NÚMERO	NECESIDAD	DESGLOSE
1	Resistente	Soporte golpes
2		Dura
3		Se pueda aplastar
4		Impermeable
5		Componentes de buena calidad
6	Ligera	Tenga un peso bajo
7		Constituida de materiales livianos
8		No sea más pesada de un lado que del otro
9	Maniobrable	Sus dimensiones no sean excesivas
10		Cuente con un control que permita su funcionamiento sin limitar el movimiento del cuerpo
11		Sea fácil darle mantenimiento
12	Barata	Precio accesible
13		Bajo número de componentes
14		Que las piezas y repuestos se obtengan fácilmente
15	Que tenga varias funciones	Haga la mayor cantidad de movimientos posibles
16		Todo el mecanismo de accionamiento este dentro de la mano
17		La batería también se encuentre dentro de la mano
18		Fuerza necesaria de levantamiento
19		Fuerza de agarre
20		Posibilidad de agarrar objetos grandes
21	Poder sostener objetos pequeños	
22	Ergonómica	Sea lo más parecido a una mano humana
23		La superficie sea lisa para no dañar al cuerpo mediante sus interacciones

Una vez teniendo las necesidades claras después de desglosarlas basándonos en lo que es necesario que tenga el producto para que cumpla con la palabra clave de las necesidades del usuario, por ejemplo, resistente y por ello tenemos el siguiente desglose:

- Soporte golpes: al estar usando una mano como nos movemos en un ambiente en constante movimiento, es muy común golpearla con muchas cosas porque nos distraemos y así es necesario que soporte impactos.
- Dura: también solemos sostener o rozar objetos rígidos haciendo la necesidad de que la mano también lo sea
- Se pueda aplastar: como todo humano siempre está en diferentes posiciones todo el día, hay ocasiones que solemos aplastar las manos, por eso, se debe tener una estructura resistente que soporte cargas de compresión
- Impermeable: el ser humano es un organismo dependiente del agua y es necesario manipularla o estar en contacto con ella.
- Componentes de buena calidad: todos los componentes deben funcionar cierto tiempo de manera correcta para que se cumpla todo lo demás.

Ahora que ya tenemos las necesidades reales a resolver, se les tiene que dar un valor al cual se va a llegar. Este valor necesita tener unidades de medida y presenta el nombre de métrica, al cual vamos a dar una a cada necesidad como presenta la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Se le agrega una necesidad para poder cuantificarlas

No. DE NECESIDAD	MÉTRICA	UNIDADES
1	Resistencia impactos	Pa
2	Dureza del material de la carcaza	HB
3	Resistencia a cargas de compresión	Pa
4	Resistencia al agua	Subjetivo
5	Garantía en componentes	años
6	Masa total	g
7	Materiales	Subjetivo
8	Distribución del peso	Subjetivo
9	Dimensiones de la mano	cm x cm
10	Controlador de la mano	Listo
11	De fácil mantenimiento	Subjetivo
12	Costo unitario	\$USD
13	Número de piezas	#
14	Disponibilidad de refacciones	Listo
15	Número de movimientos	#
16	Mecanismo dentro del volumen de control	Listo
17	Dimensiones de la batería	cm x cm
18	Máxima fuerza de levantamiento	N
19	Máxima fuerza de agarre	N
20	Radio máximo de objetos a agarrar	cm
21	Radio mínimo de objetos a agarrar	cm
22	Forma de mano humana	Subjetivo
23	Forma de mano humana	μm

Nota: En las métricas que se tiene la connotación de subjetivo, no se les puede dar una unidad de medida porque no hay forma de cuantificarlas, pero deben ser resueltas y serán descritas en la parte del diseño de detalle.

Para poder obtener los valores reales se hizo un benchmarking, y así, conocer los valores actuales de la competencia que se obtuvo del diseño preliminar después de conocer las necesidades del cliente presentado en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3. Datos de la competencia para cada necesidad.

No. DE NECESIDAD	UNIDADES	REMEDI	BLOORVIEW	VINCENT	I-LIMN	BEBIONIC3	MICHELANGELO
3	Pa	-	-	-	-	-	-
4	Subjetivo	Si	Si	Si	Si	Si	Si
5	años	-	-	-	-	-	-
6	g	400	280	-	479	560	460
9	cm x cm	-	-	-	18 x 8	20 x 19.2	23 x 16
12	\$USD	-	-	-	60000	11000	73000
15	#	-	-	3	5	6	2
16	Listo	Si	Si	Si	Si	Si	Si
17	cm x cm	-	-	-	-	-	-
18	N	36.8	-	33.6	-	48.8	-
19	N	36	35	-	136	140.1	70
22	Subjetivo	No	Si	Si	Si	Si	Si

Nota: Existen varios vacíos representados con un “-” debido a la escasez de información pública.

Las necesidades que no fue posible encontrar información sobre la competencia se trabajarán con los supuestos de que es lo que debe poder sufrir una mano para que cumpla con los requerimientos del cliente al realizar actividades cotidianas. Estas, son propuestas del diseñador, para saber hasta dónde quiere que llegue el diseño y partir de esas bases, se sabrá si fue un buen diseño si se cumplió con los requerimientos propuestos o en dado caso será aún mejor si los superó.

Tabla 3.4. Datos de las especificaciones que se deben cumplir para satisfacer las necesidades de los clientes.

NÚMERO	NECESIDAD	MÉTRICA	UNIDADES	VALOR OBJETIVO
1	Resistente	Resistencia impactos	Joules	2058
2		Dureza del material de la carcasa	HB	10
3		Resistencia a cargas de compresión	Pascales	26500
4		Resistencia al agua	Subjetivo	Si
5		Garantía en componentes	Años	3
6	Ligera	Masa total	Gramos	700
7		Materiales	Subjetivo	-
8		Distribución del peso	Subjetivo	-
9	Maniobrable	Dimensiones de la mano	cm x cm	18.5 x 8
10		Controlador de la mano	Listo	-
11		De fácil mantenimiento	Subjetivo	Si
12		Costo Unitario	\$	20000
13	Barata	Número de piezas	#	30
14		Disponibilidad de refacciones	Listo	Si
15	Que tenga varias funciones	Numero de movimientos	#	3
16		Mecanismo dentro del volumen de control	Listo	Si
17		Dimensiones de la batería	cm x cm	8.5 x 5.4
18		Máxima fuerza en cada dedo	N	25
19		Máxima fuerza de agarre	N	100
20		Radio máximo de objetos a agarrar	cm	10
21		Radio mínimo de objetos a agarrar	cm	0.5
22	Ergonómica	Forma de mano humana	Subjetivo	Si
23		Aspereza del acabado	µm	180

3.2. Diseño Conceptual

Para concebir el diseño de la prótesis de mano, se tomaron en cuenta las necesidades del cliente, así como diseños previamente investigados. Agregando ciertas restricciones debido a que no se pueden abarcar todos los usuarios de prótesis de miembro superior.

Restricciones:

- La prótesis va a ser dirigida para usuarios con el codo funcional
- Que su lesión se encuentre entre el tercio distal y el tercio proximal del antebrazo.
- Su movilidad va a ser con actuadores, ya sean motores o actuadores lineales eléctricos.
- Solo se utilizará un actuador para los 5 dedos.
- Cuento con tres falanges de movimiento.

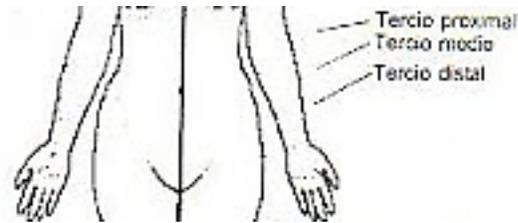


Figura 3.1. División del antebrazo en tercios [24].

Las restricciones se plantean principalmente por las necesidades del cliente, que se describieron anteriormente y porque son las consideraciones que se tomaron en cuenta después de realizar un benchmarking. La primera restricción se hace debido a que este trabajo se enfoca al diseño de una mano protésica. La segunda se pone porque así se restringe a un tipo de prótesis que abarque los usuarios que tengan parte del brazo y el codo funcional, así, se podría adaptar la prótesis con un socket solo diseñando una mano. La tercera es debido al tipo de prótesis que se decidió diseñar en este trabajo. La cuarta se decidió porque al tener menos actuadores hace que sean muchos menos componentes. Y por último la quinta se decidió porque después de revisar la movilidad de una mano con tres falanges [26] y una con dos [25], es mejor un agarre de objetos con tres falanges.

3.2.1. Revisión de la Mano Cyborg Beast

Después de realizar el benchmarking, se encontró que existen una gama de prótesis de reciente aparición en el mercado que no se incluyeron en el estado del arte debido a que no eran el tipo de prótesis a la que iba dirigido el proyecto, un ejemplo, está la mano Cyborg Beast. Es una prótesis cuyos planos y diseño son de acceso libre al público, al encontrar los archivos de impresión [27], se imprimieron para revisar su funcionamiento y obtener ideas para seguir con la metodología del diseño.

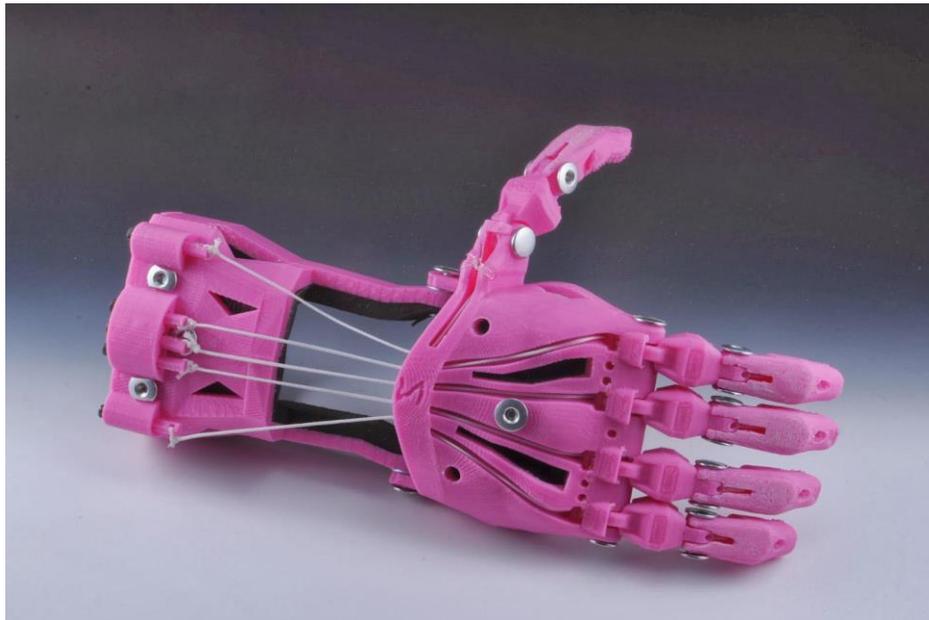


Figura 3.2. Prótesis Cyborg Beast ensamblada [27].

Descripción de su funcionamiento

Su mecanismo está basado en un conjunto de canales que pasan a través de toda la mano, los cuales, funcionan como guías de cables de algún tipo de material flexible que venga en forma de hilo, el cual, va desde la punta de un dedo y pasa por el centro de todas las falanges, hasta llegar al socket que se sujeta al brazo. Cuando se flexiona el muñón cambia la distancia entre las dos piezas y jala los cables permitiendo que los dedos se flexionen. El mecanismo de retorno de los dedos consta de unos elásticos que también pasan por conductos dentro de la mano que, en su posición natural, la mano se presenta abierta.

Esta prótesis fue pensada para los usuarios que sufrieran algún atrofiamiento de la mano y conservasen parte de ella, junto con su muñón, la cual, funciona con el método ya explicado y, por lo tanto, solo tiene un movimiento que puede proporcionar. Entonces al girar el muñón hacia abajo se jala permitiendo que los dedos se cierren como se muestra en la Figura 3.4, para después, una vez que se deje de aplicar fuerza se hace el mismo proceso, pero esta vez quien hace el trabajo de retorno serán las ligas, dejando la mano abierta como la Figura 3.3.

La manufactura principal de la mano se basó en impresión 3D, usando un polímetro llamado Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS) siendo uno de los materiales para impresión 3D más usados porque no tiene un precio elevado y si tiene una fractura, es posible soldarlo aplicando acetona para derretirlo y unir las piezas que fracturaron. En lugar de pernos se utilizaron tornillos de un octavo de pulgada junto con su respectiva tuerca para que no se moviera. Para los tendones que mueven la mano se utilizó hilo de Nylon de 0.6 [mm] porque presenta una buena resistencia a la tensión y es sumamente flexible. Por último, para los tendones que regresan se utilizó un elástico en forma de hilo de aproximadamente 1.3 [mm] de espesor.

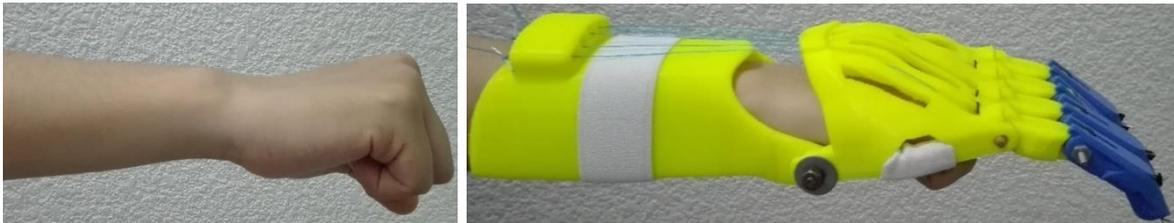


Figura 3.3. Prótesis Cybor Beast sin accionar.

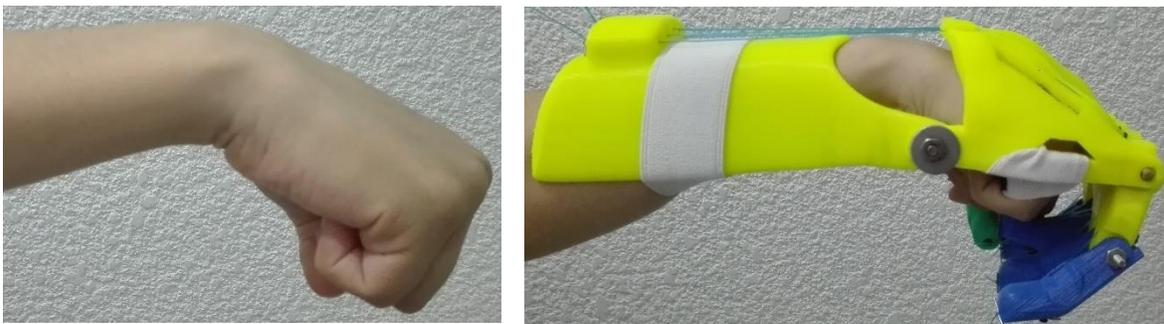


Figura 3.4. Prótesis Cyborg Beast accionada.

Para probar el funcionamiento de la prótesis se ocupó una persona que tuviera la mano pequeña para que pudiera entrar en la cavidad donde se supone el lesionado introduciría parte de su mano, ya que, se imprimió el mayor tamaño para el que se diseñó esta prótesis.

Después de revisarla y analizarla, obtuvimos lo siguiente:

Tabla 3.5. Resultado del análisis de las pruebas de funcionamiento de la Cyborg Beast.

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Fácil manufactura	Cuenta con un solo movimiento
Sus componentes son fáciles de encontrar	Solo es para usuarios con el muñón funcional
Fácil Reparación	Es muy difícil agarrar objetos menores a 3cm de diámetro
Mecanismos Simples	Incomoda
Pocas piezas	Difícil de ajustar
	No es muy resistente

La Cyborg Beast es un buen diseño, debido a que tiene ciertas ventajas sobre las prótesis que hay en el mercado, el problema es que no cumple con las necesidades de nuestros clientes, pero se puede usar como referencia para saber qué se puede utilizar y qué no, después de haber trabajado con ella. Al ser impresión en 3D y tener pocas piezas, su manufactura se facilita mucho, al igual que el armarla. Lo realmente complicado es ajustarla para que tenga las tensiones necesarias y genere el movimiento coordinado de los dedos, porque en ocasiones si queda más largo el hilo, y los dedos no se moverán igual.

Se le realizó una modificación a la Cyborg Beast para comprobar cómo sería el movimiento si se accionara con un motor, por lo que se usó una polea como carrete para sujetar los cables. Ahora, al girar la polea para enrollar los cables como se muestra en la Figura 3.6, que va a fungir como el movimiento que realizaba el muñón, pero como si se substituyera con un motor y así saber si el movimiento empeora o mejora a la forma de moverlo originalmente.

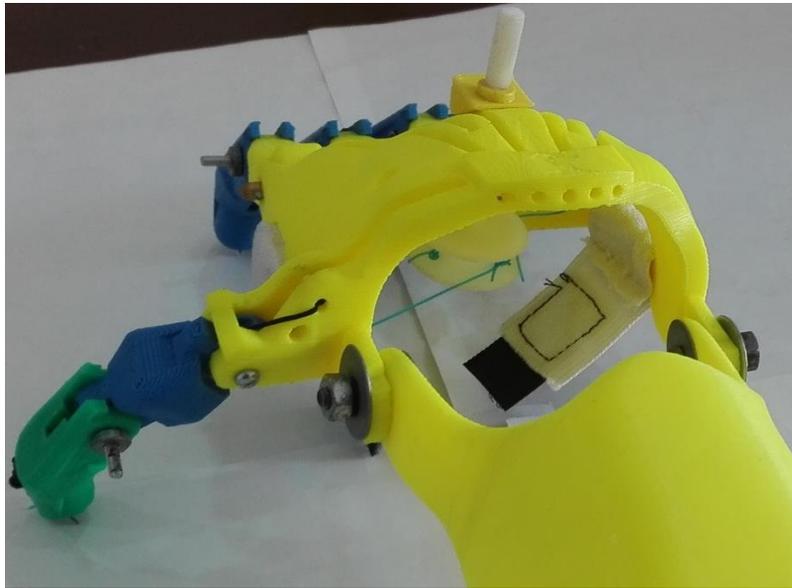


Figura 3.5. *Cyborg Beast* modificada con una polea para mover los dedos sin accionar.

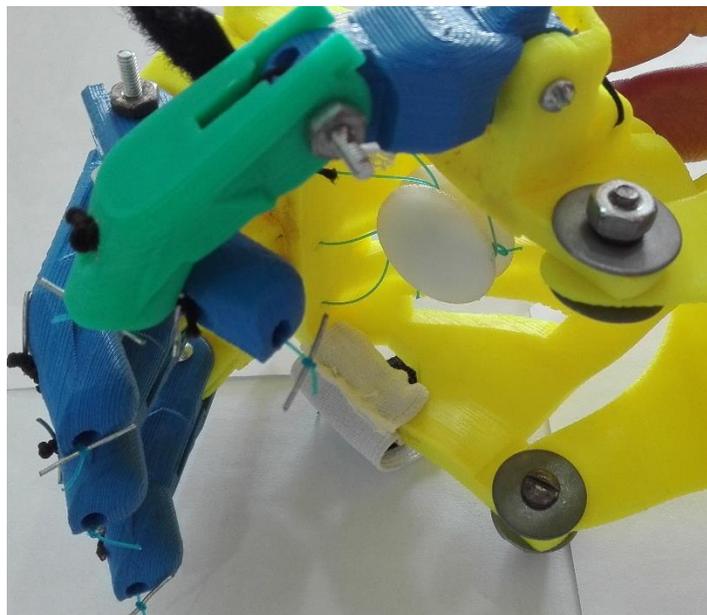


Figura 3.6. *Cyborg Beast* accionada por la polea.

El movimiento de la mano es mejor, se necesita menos fuerza para mover los dedos debido a que el hilo ya no pasa por todos los conductos de arriba que generaban fricción y que hacían que se requiriera más fuerza. El experimento deja ver que, al cambiar la posición de hilo, hace que ya no tenga una larga travesía a través de canales y reduce la fricción, haciendo óptimo colocar un motor en la posición de la polea que tenga mayor par y este fijo completamente para que ahora el usuario no tenga que accionar la prótesis por sí mismo. En este caso, no tiene ningún sentido colocarle un motor a la *Cyborg Beast* porque fue diseñada para que el usuario la moviera con su muñón, pero muestra que es posible hacer un diseño con el motor al centro que permitiría un buen movimiento para jalar los tendones.

3.3. Generación del Concepto

Para obtener el concepto del prototipo que se creó, fue necesario plantear los puntos que son relevantes para el diseño:

- Mecanismo para flexionar y extender los dedos
- Mecanismo para la oposición del pulgar
- Generación de la palma

3.3.1. Mecanismos para flexionar y extender los dedos

Un mecanismo es el que se encarga de transmitir el movimiento en cualquier sistema movable, algunos tienen la variante de poder incrementar la fuerza si se hacen arreglos. Existen diferentes tipos de mecanismos que se pueden ocupar para transmitir el movimiento de los dedos y son los siguientes:

1. Mecanismos de Barras

Son mecanismos que transmiten el movimiento por medio de eslabones (barras) unidos generalmente por un perno, los cuales reducen el movimiento a un grado de libertad. Al conjunto de 3 o más eslabones se les conoce como cadenas cinemáticas que dependiendo de su configuración se pueden obtener muchos tipos de movimientos. El más común es el mecanismo de 4 barras.

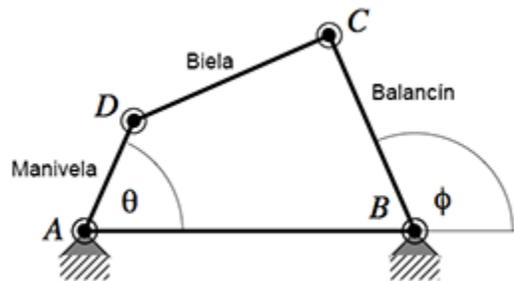


Figura 3.7. Mecanismo de 4 barras [29].

2. Tren de Engranajes

Llamados así porque son un conjunto de engranes consecutivos que se enlazan uno con otro para crear movimiento. Los engranes son ruedas que en la parte de la circunferencia exterior tienen dientes que al juntar con otro engrane permite que, si un engrane gira, el otro que se encuentre unido también girará, pero, en sentido contrario. Dependiendo de su configuración se pueden crear trenes de engranes que incrementen y/o decrementen la velocidad y/o la fuerza. Existen muchos tipos de engranes.

Engranajes Rectos.
(Spur Gear Drive)

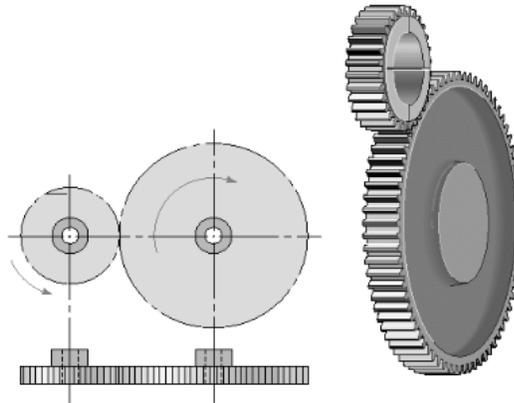


Figura 3.8. Engranajes rectos [31].

3. Cables

El movimiento a partir de cables está basado en el uso de componentes de longitudes variables que son flexibles en forma de cilindros alargados que presentar resistencia a la tensión. Al aplicarles una fuerza de tensión, pudiendo ser enrollados en un carrete, se van a recorrer permitiendo mover lo que se encuentre acoplado a su punta.

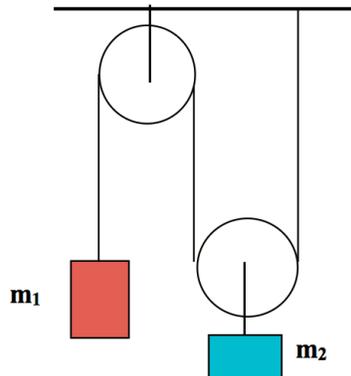


Figura 3.9. Arreglo de poleas que mueven dos masas a través del cambio de longitud del cable, siendo un tipo de movimiento por cables [32].

4. Sistemas Hidráulicos

Su funcionamiento está basado en dos principios físicos que son el de Pascal y Bernoulli que dictan que, si un fluido incompresible y estable dentro de un recipiente de paredes indeformables, se le aplica una presión, esta será igual en todas sus direcciones. También, establecen que, si un fluido

sin viscosidad con un régimen de flujo, llevará cierta energía que, será constante en todo su recorrido.

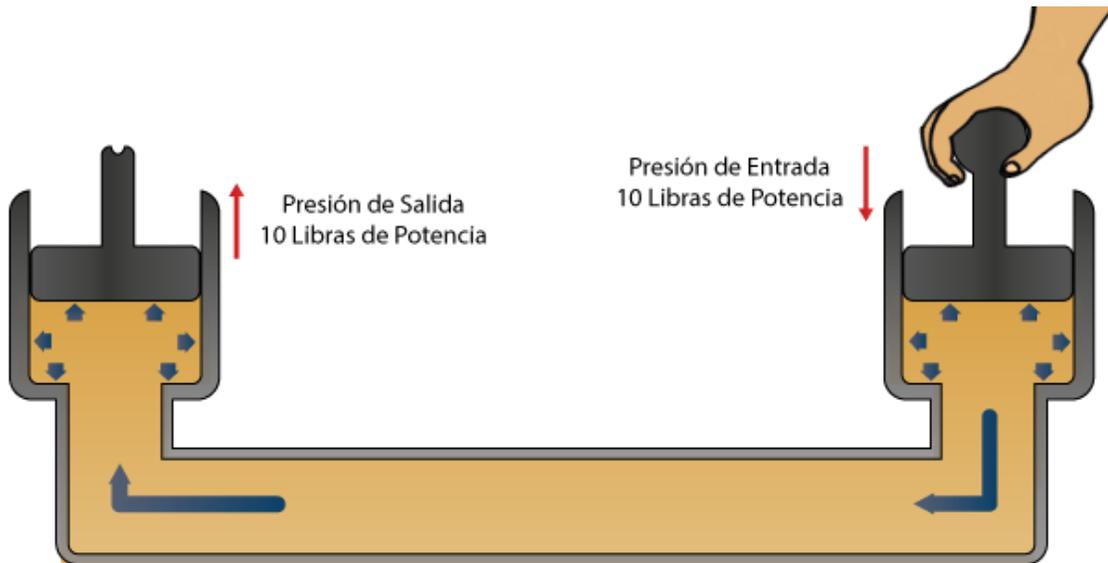


Figura 3.10. Principio de funcionamiento de los sistemas hidráulicos [34]

5. Músculos Artificiales

Son creados para realizar los mismos movimientos que puede realizar un músculo natural que se puede deformar y realizar esfuerzos muy elevados repetidas veces. El funcionamiento de la mayoría de los músculos artificiales es, que, al aplicarle una diferencia de potencial entre dos electrodos, este produce una deformación por compresión y permite que las caras ajenas a la deformación inicial se alarguen considerablemente.

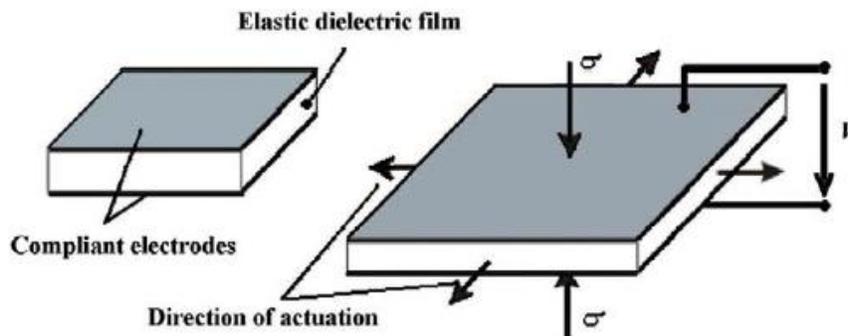


Figura 3.11. Mecanismo de actuación de un elastómero dieléctrico [35].

Una vez que se conocen los tipos de mecanismos que se tomarán en cuenta para el diseño de la prótesis hay que analizar las cualidades de cada uno y evaluarlos contra los demás haciendo una ponderación que nos permita decidir cuál de los mecanismos es el mejor para las características que se quieren lograr para satisfacer las necesidades de los usuarios.

Para ello, se realizan matrices de selección donde se ponderan en este caso los mecanismos con ciertos criterios de selección resultantes de las necesidades del usuario y se les da cierto valor debido a sus características para obtener la mejor opción.

Tabla 3.6. Matriz de evacuación de mecanismos.

CRITERIOS DE SELECCIÓN	BARRAS	ENGRANES	CABLES	HIDRÁULICO	MÚSCULOS ARTIFICIALES
Precio	4	3	5	2	1
Manufactura	3	3	5	2	4
Ensamble	4	4	5	2	3
Facilidad para encontrar piezas	4	3	5	2	1
Ajuste	5	5	3	4	2
Peso	4	4	5	3	5
Tamaño mínimo	3	2	5	4	4
Máxima fuerza que entregan	4	5	2	5	3
Confiabilidad	4	5	3	4	2
Numero de Componentes	3	1	5	2	4
Suma	38	35	43	30	29
Lugar	2	3	1	4	5

Cada criterio puede tomar un valor máximo de 5 siendo el mejor sistema para ese criterio y solo puede tomar un valor igual o menor, hasta llegar a 1 que es el valor menor siendo así el peor de todos los sistemas en el criterio. Así se obtendrá un puntaje final que dará como resultado al mecanismo a elegir.

Por último, en la selección del mecanismo para la mano, se debe elegir el mecanismo de retorno, que como ya se tiene como base el mecanismo de accionamiento, que es el sistema de cables, la opción que trabaja bien en conjunto con ese mecanismo es el de elásticos. Debido a que hay que solo se tiene que colocar en el lado opuesto del eje neutro, para que en lugar de que el dedo gire hacia abajo, ahora gire hacia arriba. Como se puede apreciar en la mano Cyborg Beast, que es una liga elástica, la cual, pasa por una serie de conductos que pasan por arriba del eje neutro de rotación de los dedos y genera un momento hacia arriba que deja los dedos de la mano abiertos como en la Figura 3.12. Hasta que el mecanismo de cables genere el momento hacia el otro sentido para cerrar la mano Figura 3.13.

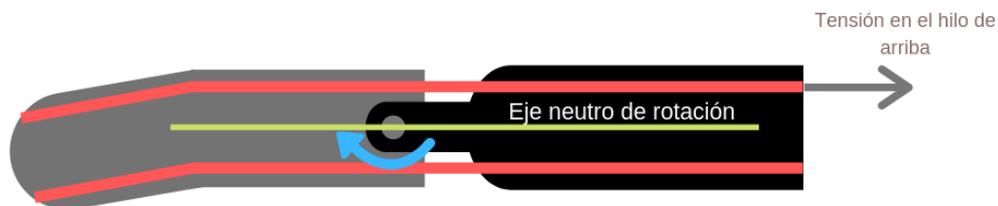


Figura 3.12. Muestra como al jalar el hilo de arriba, se genera un momento flector que la falange distal gire hacia arriba, permitiendo que la mano se abra.



Ilustración 3.13. Muestra como al jalar el hilo de abajo, se genera un momento flector que permite que la falange distal gire hacia abajo, haciendo que la mano se cierra.

Una vez que se tiene la muestra de cómo trabajan los dedos si se le aplicasen tensiones en los conductos de arriba o abajo. Se ha decidido tomar que la mano se encuentre en su posición natural totalmente abierta, porque si fuese lo contrario, lo que estaría proporcionando la fuerza de sujeción de objetos serían los elásticos, siendo un mal diseño porque los elásticos proporcionan muy poca fuerza de tensión. Entonces, la fuerza de cierre será proporcionada por el motor que con una reducción puede proporcionar fuerzas relativamente grandes, siendo los cables de tensión en los conductos de abajo y para el retorno serán los elásticos, que para regresar no es necesario mucha fuerza.

El diseño de un dedo va a servir para el dedo índice, medio, anular y meñique. Va a constar de tres falanges y un mecanismo interno de cables, los cuales solo se verán como conductos en los dedos. En este caso se partió desde un dibujo a mano alzada para comenzar a iterar soluciones, después de obtener varias soluciones en papel añadiendo y quitando, se creó la solución final de las tres falanges en papel Figura 3.14.

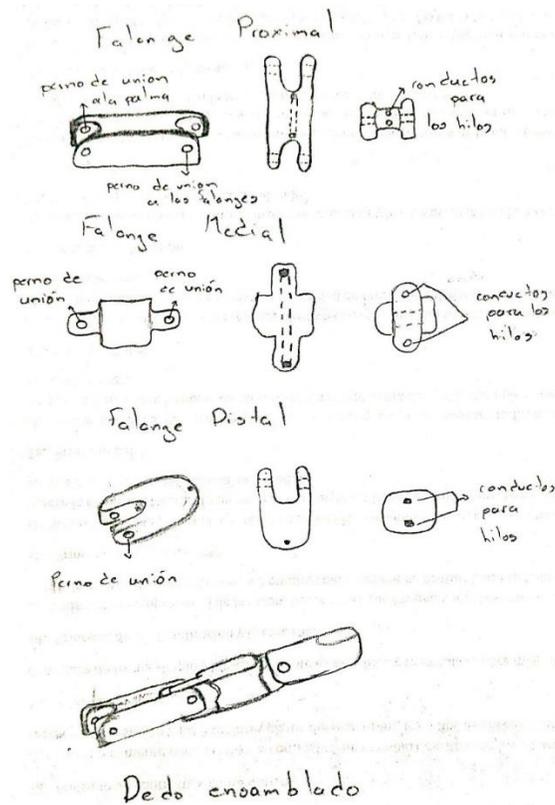


Figura 3.14. Concepto del dedo a mano alzada en papel

3.3.2. Mecanismo para la oposición del pulgar

Se decidió adicionar un mecanismo adicional al pulgar para poder agregarle más funcionalidades, porque en el caso de ser exactamente igual a los demás dedos solo sería una mano que cierra y abre los dedos en una posición predeterminada.

La solución se tomó siguiendo las restricciones que se establecieron para que el proyecto cumpla con los requerimientos de los usuarios, por lo tanto, se descartaron otros actuadores para cambiar la posición del pulgar porque incrementa el número de componentes, eleva el precio, el control tendría que ser más robusto y las baterías tendrían que ser más grandes por añadir motores. La solución que se planteó fue la utilización de un trinquete, que, dependiendo de la posición de este, será la función que va a poder realizar la mano. Previamente en las especificaciones se decidió que 3 funciones básicas son las que va a poder desempeñar la mano que van a ser:

- Punta Fina

La punta fina es esencial para poder sostener objetos pequeños como lapiceros, cucharas, llaves, etc.



Figura 3.15. Mano humana realizando el movimiento de punta fina.

- Prensa

El agarre de prensa tiene su función para poder sostener objetos de tamaño grande y mediano como botellas de agua, celulares, etc.



Figura 3.16. Mano humana realizando el movimiento de prensa.

- Agarre de Gancho

El agarre de gancho tiene su funcionalidad para sostener objetos que cuenten con un asa.



Figura 3.17. Mano realizando el agarre de gancho.

Por lo tanto, el trinquete constará de tres posiciones, cada una teniendo una posición diferente para la acción que la prótesis va a poder realizar en ese instante. La primera será la posición natural de la mano abierta, la cual, a la hora de accionar los dedos, se cerrarán pareciendo un gancho. La segunda posición va a estar dentro de un rango de ángulo agudo con respecto de la posición original del pulgar, permitido que cuando se cierran los dedos, la trayectoria tanto del pulgar como del dedo índice y medio se intercepte y genere el agarre de punta púa. Por último, la tercera posición es a noventa grados con respecto de la posición original del pulgar, que permitirá que todos los dedos de la mano se cierren al mismo tiempo generando la mayor fuerza posible. Al igual que para obtener la solución de los dedos, se comenzaron a dibujar ideas en papel para encontrar la mejor solución para el pulgar. Después de realizar muchas iteraciones se llegó a la conclusión que, la forma más fácil de poder acomodar el pulgar era dejando la uñeta del trinquete en el pulgar, mientras que las muescas del trinquete quedarían en la palma, así las muescas serían mucho más rígidas que si todo se encontrara en el pulgar, por lo tanto, el pulgar iba a constar de tres falanges con conductos internos para los cables y una uñeta capaz de rotar como se muestra en la Figura 3.18.

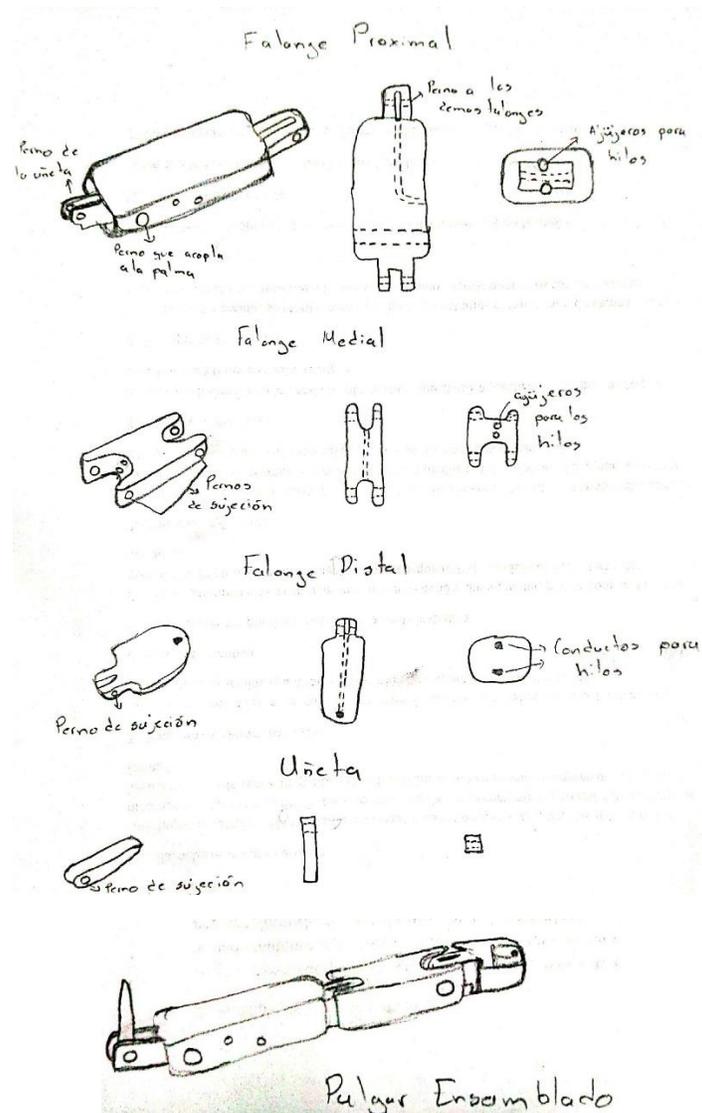


Figura 3.18. Concepto final del pulgar con todos los componentes.

3.3.3. Generación de la palma

La palma es la estructura principal de soporte para toda la prótesis y además debe de almacenar el motor, las muescas del mecanismo de trinquete, los carretes para los cables de los dedos, una transmisión de ser necesaria y los soportes para todos los dedos.

Se propone tomar la plantilla de una mano humana para obtener la geometría básica. Ya teniendo la posición del pulgar, los dedos y de las muescas para el trinquete, se ensamblará todo en el área que se tiene como plantilla para una vez que se tenga una configuración correcta que permita que todo quepa en el volumen de control indicado, se levantarán las paredes y añadirá una tapa que cierra con las paredes y confine todo dentro. Por último, se darán toques estéticos. Se obtuvo la configuración de la palma para alojar los dedos con la plantilla de mano tomada, se hizo un dibujo a mano alzada con la plantilla para que se acomodara todo en una palma en forma de placa Figura 3.19.

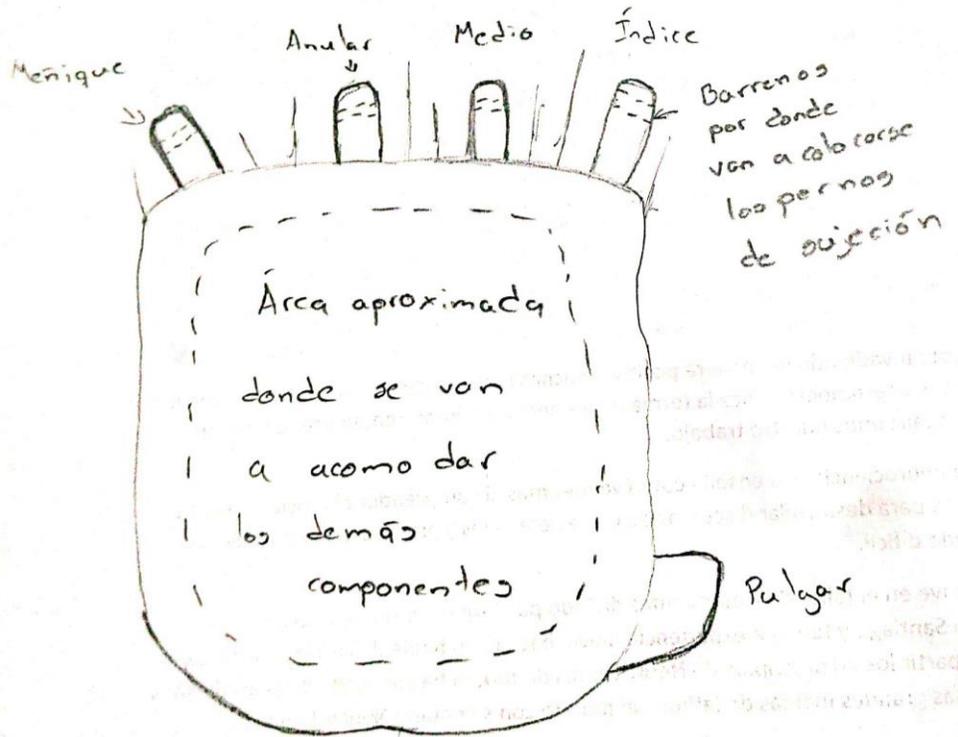


Figura 3.19. Configuración que tendrá la palma usando la plantilla tomada.

3.4 Diseño de Detalle

Esta es la parte de la metodología del diseño en la que se toma todo lo aprendido en las necesidades del usuario, el estado del arte y las especificaciones. Para dar vida al diseño conceptual y crear un modelo ya sea en papel, electrónico o físico de lo ya definido anteriormente. Aquí es donde cada diseñador hace innovaciones, porque, ya con los parámetros dados, propone una solución a lo ya definido.

3.4.1 Dedos

Para pasar al Diseño Asistido por Computadora (CAD) con el concepto que ya se tiene fue necesario presentar el material del dedo, y después de ver como facilitó la manufactura la impresión en 3D, se decidió que la mano también iba a estar hecha del mismo material, por lo tanto, solo habría que realizar las piezas con una parte plana donde se pudiera colocar en la impresora y no hubiera falla.

Como ya se tiene lo que sería el concepto de los dedos, pero es meramente un dibujo a mano alzada sin medidas, se prosiguió a pasar de un boceto a la computadora. Por lo que, se necesitan las medidas de las falanges. La medida tomada del promedio de mediciones de diferentes dedos mayores es de 9.2 [cm] de largo, de acuerdo con las tablas antropométricas [36]. Todos los dedos van a tener las mismas medidas y se van a restringir por el momento a un máximo de 8 [cm] de largo para cumplir con las especificaciones del producto. Las falanges se van a dividir en distal 3 [cm],

proximal 2 [cm] y medial 3 [cm]. Los conductos van a estar a 2.5 [mm] por encima del eje neutro de rotación.



Figura 3.20. Forma final del dedo en CAD.

3.4.2 Pulgar

El pulgar va a ser un poco más elaborado, ya que, además del dedo como tal, lleva un trinquete que es el que le va a dar la posición. El pulgar va a tener una longitud de aproximadamente de 8 [cm]. Y las falanges se van a dividir en: distal 2 [cm], medial 2 [cm] y proximal 4 [cm]. Como ya se había concebido el concepto en el dibujo a mano alzada, se comenzó a dar medidas ayudándonos de la información [36] y dando formas parecidas a los demás dedos. Se agregó un soporte donde se pudiera colocar la punta del elástico de la uñeta, donde fuera fácil y rápido quitarlo para que el pulgar volviera rápidamente a su posición natural, además en a la punta de la falange distal se colocó una perforación para que se pueda sujetar sin problema el hilo del pulgar Figura 3.21.



Figura 3.21. Imagen final del pulgar junto con la uñeta en el CAD.

3.4.3 Palma

La palma siendo la estructura principal de la mano y donde se van a sujetar todos los dedos y mecanismos, es lo último que se va a diseñar porque se toma todo lo que ya está listo y se busca que todo se pueda ensamblar de la mejor manera. Como ya se tenía la plantilla de la mano, se propuso hacer una placa con la geometría, donde lo primero que se vio fue, como poder unir los

dedos a la palma ya en 3D. Ya con una idea de cómo se van a acoplar los dedos, se contempló la posición del trinquete y la posición del pulgar, que serían al centro y parte baja de la mano para que pudiera hacer los movimientos que se desea y dejando espacio suficiente para los carretes y el motor. Una vez que se encontró una solución compatible que cumplía bien con todo que debía llevar la mano se pasó a la computadora dejando como resultado una placa con todos los componentes en su sitio. Con ayuda de la placa, se pudieron encontrar las posiciones correctas de las muescas del trinquete y los conductos que iba a tener la palma para los cables figura 3.22.

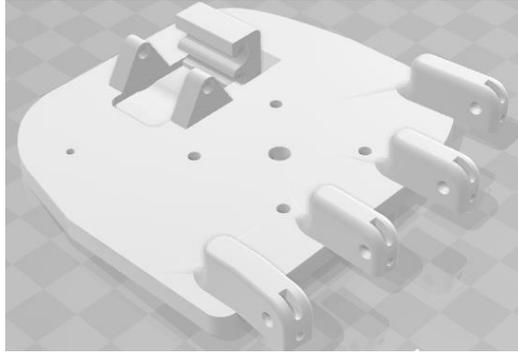


Figura 3.22. La palma junto con el trinquete en una placa plana.

La parte que siguió fue un agregarle paredes donde se va a confinar todo dentro de una carcasa para que se viese lo más parecido a una mano real. Se vio que era complicado imprimir las muescas del trinquete siendo una misma pieza con la palma, así que, se extrajo y se dejó su espacio para que fuera atornillada y la impresión quedara mejor. Por último, se dejó espacio para una tapa y se hicieron barrenos para ajustarla con tornillos y tuercas Figura 3.23.



Figura 3.23. Figura final de la palma con las paredes de la carcasa.

Se terminó haciendo el CAD completo de la mano y generando bien una carcasa junto con la tapa. Se ensambló toda la mano en el software para ver que no hubiera colisiones en el movimiento y tener una primera aproximación de cómo se iba a ver realmente la mano físicamente.



Figura 3.24. Ensamble de todas las piezas en el CAD final añadiendo una tapa a la palma.



Figura 3.25. Ensamble de la palma sin tapa.

Capítulo 4

FABRICACIÓN Y PRUEBAS

4.1 Construcción del Prototipo

Esta es la etapa en la cual es momento de darle vida al concepto ya creado y hacer un prototipo físico. Porque es necesario probar su funcionalidad fuera de la computadora y que se compruebe su funcionamiento físicamente. Así se podrá saber si se cumplieron con las especificaciones objetivo planteadas.

Se decidió hacer dicho prototipo en impresión 3D, ya que, como no es el producto final que va a salir al mercado, ni el producto final que va a usar una persona, no es necesario que se decidan los materiales finales en este momento. La impresión 3D es un método muy rápido y que facilita mucho la manufactura de piezas con geometrías complejas y que no son de gran tamaño. Tal vez la resistencia de los polímeros con los que se puede imprimir una pieza en 3D no es muy elevada, pero, como el prototipo solo va a servir para comprobar la funcionalidad del diseño que se ha creado, las piezas hechas con ese proceso de manufactura cumplen perfectamente con los requerimientos para realizar las tareas para las que van a ser utilizadas.

4.1.1 La impresión en 3D

La impresión 3D es uno de los varios procesos de manufactura aditiva en la que se une material bajo control computacional en tres dimensiones. La cual va soldando el material capa tras capa para formar un sólido, por lo general, solo la superficie externa de la geometría diseñada es la que se verá como un sólido y las capas internas son hexágonos, rombos o figuras geométricas que den estructura a la pieza. Antes la impresión en 3D solo era considerada como una forma de prototipado rápido porque se puede generar cualquier tipo de piezas, pero en el presente se han creado varios métodos nuevos, materiales y acabados que permitieron que la impresión en 3D derivara a una nueva rama de la manufactura que se llama manufactura aditiva. El proceso para imprimir en 3D es simple, el cual, una vez que se tiene el CAD listo, se guarda con la extensión “.stl”. Este archivo ya contiene todo lo necesario para imprimir en 3D, lo que hace la computadora es convertir el archivo del CAD a líneas de código G modificado para las impresoras 3D. Este código contiene líneas de comando de posicionamiento para el extrusor de las impresoras y solo hay que conectar la computadora a la impresora, dependiendo del modelo y del software de la impresora, es como se hace la operación, por lo general, solo se ajusta la pieza y su posición en la cama de impresión y dar parámetros sobre el material de impresión, para posteriormente imprimir.

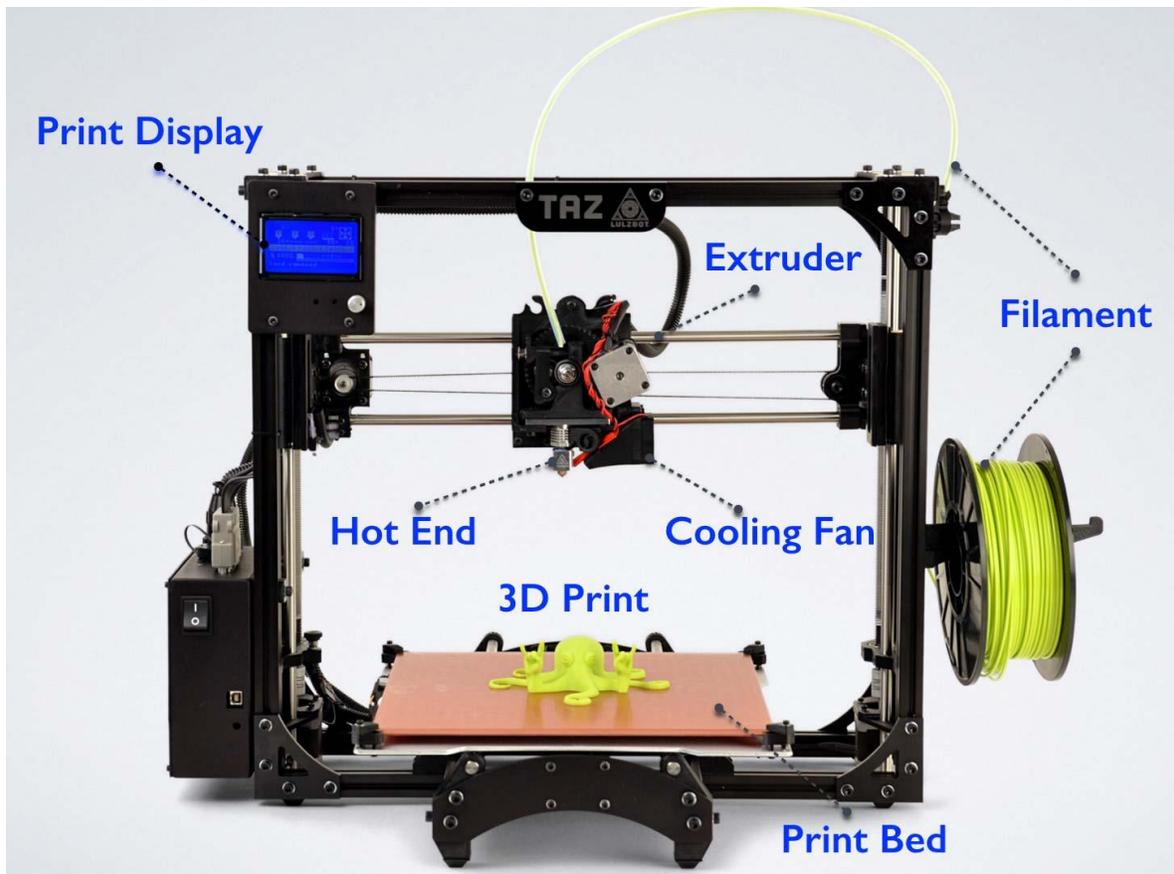


Figura 4.1. Partes de una impresora 3D [39].

Como ya se tenía el CAD final de la mano y no se puede imprimir toda la mano de una vez, porque si no sería una pieza sólida que no se movería. Se fue imprimiendo pieza por pieza, las cuales, se convertían en “. stl” para ingresarlas en el software Figura 4.2. Para la impresión en 3D del modelo se usó el polímero ABS.

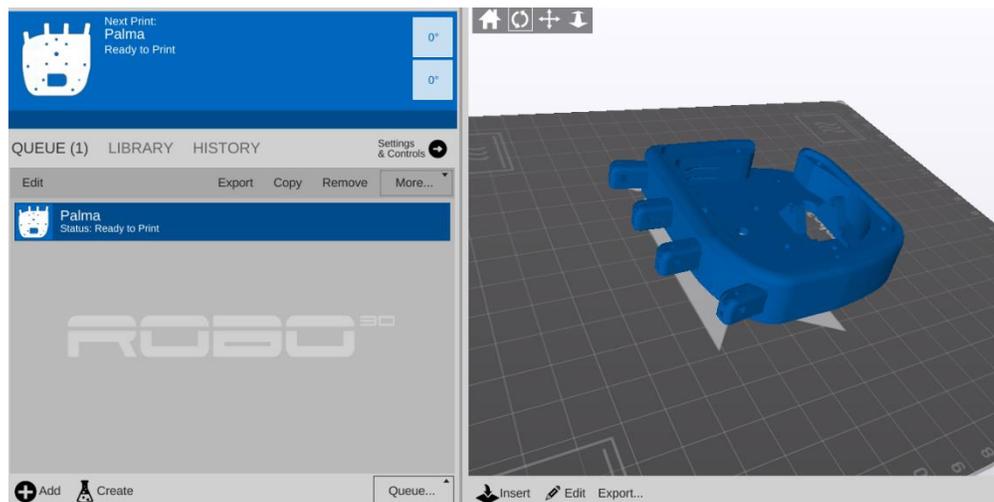


Figura 4.2. La generación de la palma en el software de la impresora 3D.

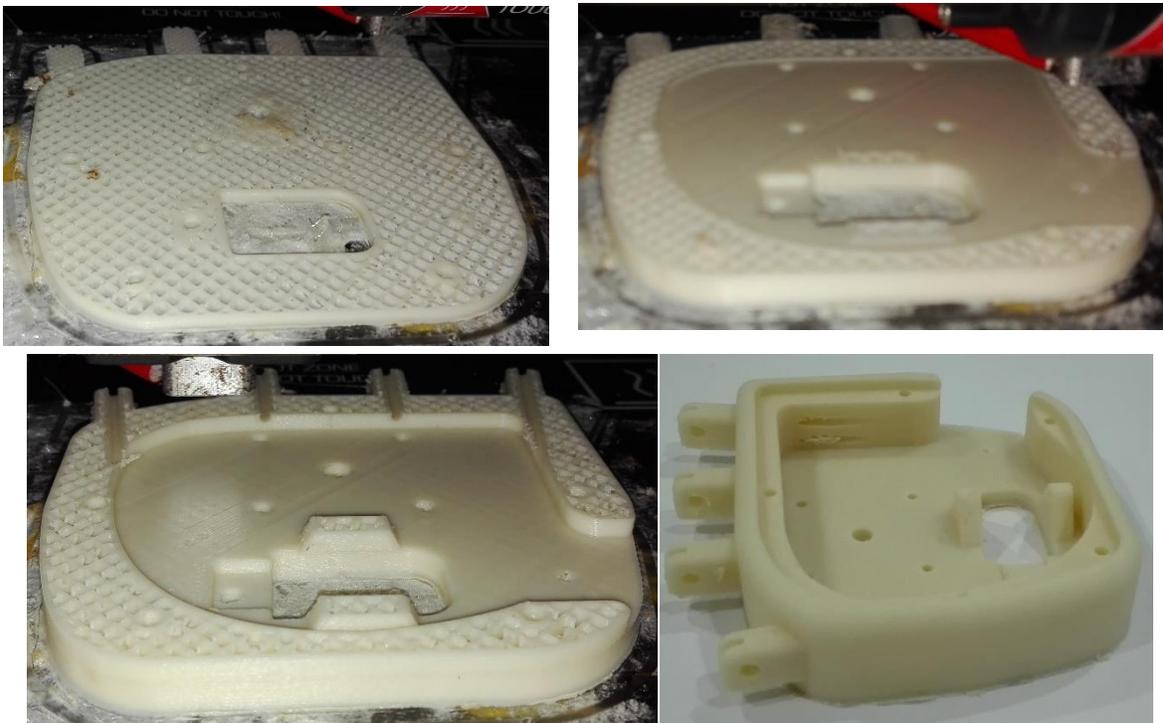


Figura 4.3. Proceso de impresión de la palma la cual va añadiéndose capa tras capa de material.

Una vez que se imprimieron todas las piezas Figura 4.3, es necesario limpiarlas, porque el material de soporte siempre va a dejar remanentes que se necesitan eliminar. Lo que restaba era ensamblar la mano, en el caso del diseño de esta prótesis se planteó que todas las uniones fueran con unión mecánica con tornillos de un octavo de pulgada fungiendo como los pernos de unión.

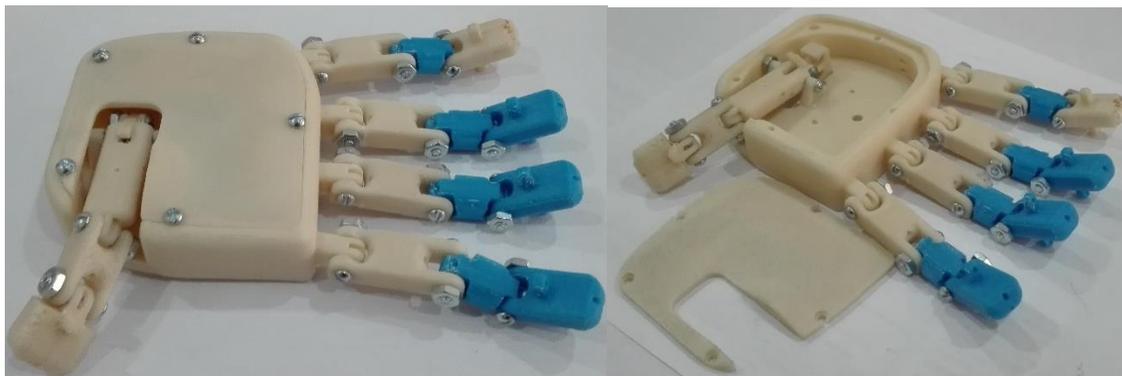


Figura 4.4. Prototipo de mano ensamblado.

4.2 Pruebas de Funcionalidad

En este apartado se va a probar con el prototipo impreso en 3D, que la mano pueda realizar los tres movimientos que se plantearon que iba a poder realizar en las especificaciones, son pruebas de funcionalidad. Para realizar las pruebas se utilizó un motor eléctrico para mover todos los dedos, como sería ya la prótesis terminada con un motor que moverá todos los dedos.

El motor que se utilizó en este apartado no es el óptimo ni el seleccionado para que se utilizara en la prótesis si saliera al mercado, se utilizó este motor porque presentaba el par necesario para mover todos los dedos sin necesidad de reducción.

A la mano se le colocaron los tendones y los elásticos de retorno para que ya pudiera realizar todos los movimientos.



Figura 4.5. Imágenes de la mano en su posición natural, totalmente abierta.

4.2.1. Agarre de Gancho

El agarre de gancho permite que se doblen los 4 dedos y así sostener cualquier tipo de objetos que tengan un asa, dejando al pulgar en su posición natural y siendo prácticamente inservible para este movimiento.

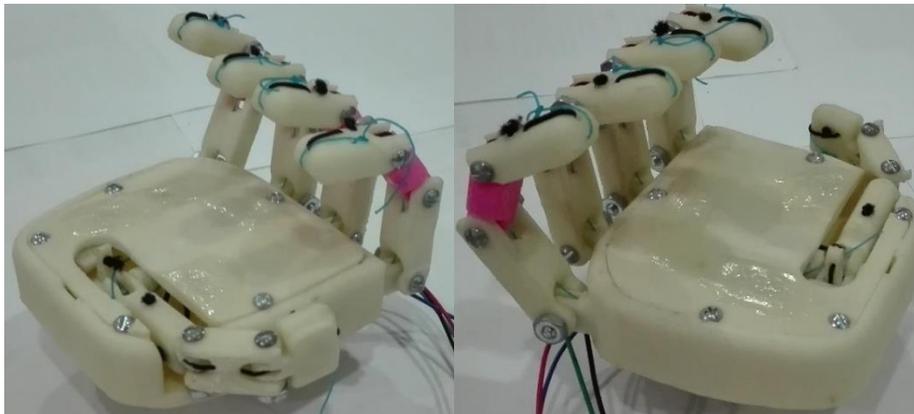


Figura 4.6. Forma de agarre de gancho de la mano.

4.2.2. Punta Fina

Aquí se cierran todos los dedos de la mano, pero dejando al pulgar en una posición donde en el momento de flexionar todos los dedos, el pulgar intercepta la trayectoria del índice y del dedo medio para tener un agarre entre dos dedos que pueda sostener los objetos pequeños.



Figura 4.7. Imágenes del agarre de punta fina.

4.2.3. Prensa

El agarre de prensa deja al pulgar totalmente al medio de la mano, al cerrarse los dedos permite que los dedos cierren primero y el pulgar se oponga para ejercer la mayor fuerza posible.

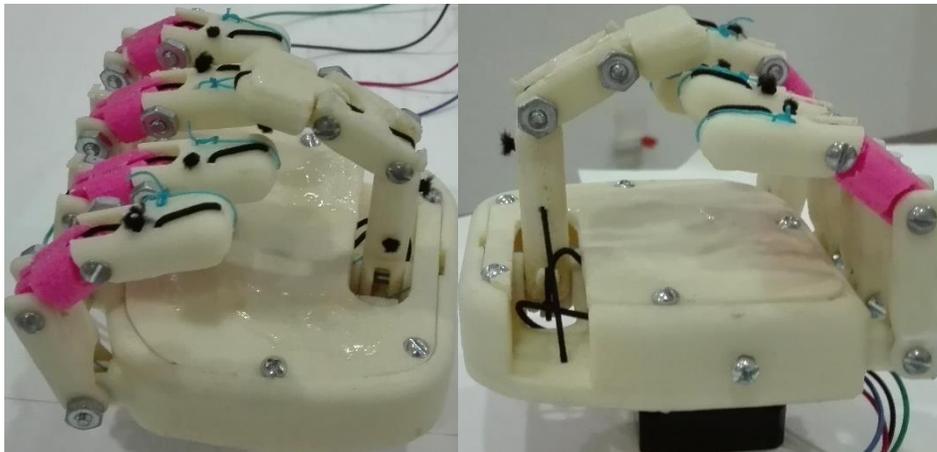


Figura 4.8. Imágenes del agarre de prensa.

Las pruebas de movimiento que se realizaron en este capítulo se concluyeron satisfactoriamente porque pudo realizar los tres movimientos planteados anteriormente con las trayectorias correctas. Mientras se realizaron las pruebas, se tuvo el problema que el motor no lograba mantener los dedos cerrados y llegar al final del desplazamiento de los dedos por falta de par, por lo cual, para cerrarlos completamente y mantenerlos se colocó un tornillo supresor a la polea para que, en el momento de cerrar los dedos, se mantuvieran cerrados. Esto se corregiría realizando la debida selección del motor y añadiendo una reducción para aumentar el par.

Capítulo 5

ANÁLISIS DE LA MANO

5.1 Análisis Cinemático del Mecanismo

El mecanismo basado en tendones que se utilizó en los dedos es muy simple de entender su funcionamiento, pero se quería describir su comportamiento mediante un modelo matemático.

Se utilizó la convención de Denavit-Hartenberg junto con el método de cinemática directa para poder describir el comportamiento de los dedos, ya que, al tener tres falanges, el dedo cuenta como una cadena cinemática.

Se comenzó con definir que cada falange es un eslabón.

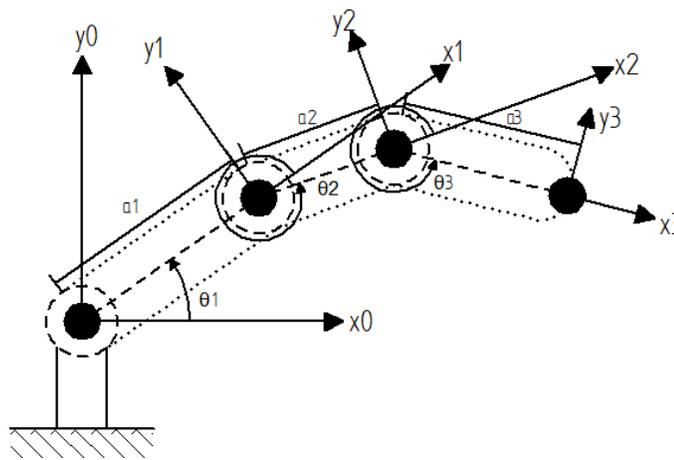


Figura 5.1. Representación de los dedos en eslabones.

Donde, cada eslabón presenta cuatro parámetros que son:

$\theta_i \rightarrow$ Rotación con respecto al eje Z

$d_i \rightarrow$ Distancia en que se desplaza cada eslabon en el eje Z

$a_i \rightarrow$ Distancia que se desplaza sobre el eje X

$\alpha_i \rightarrow$ Rotación sobre X trasladado

Los cuales para cada eslabón son:

Tabla 5.1. Datos de los eslabones para las matrices de transformación.

	θ_i	d_i	a_i	α_i
1	θ_1	0	$a_1 = 3 [cm]$	0
2	θ_2	0	$a_2 = 2 [cm]$	0
3	θ_3	0	$a_3 = 2.5 [cm]$	0

Para la transformación de Denavit-Hartenberg se usa la siguiente ecuación matricial:

$$A_i = R_{z,\theta_i} \text{Trans}_{z,d_i} \text{Trans}_{x,a_i} R_{x,\alpha_i}$$

Que representa una rotación en el eje Z, una traslación en el eje Z, una traslación en el eje X y una rotación en el eje X. Simplificando queda de la siguiente manera.

$$= \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & 0 \\ s\theta_i & c\theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c\alpha_i & -s\alpha_i & 0 \\ 0 & s\alpha_i & c\alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i c\alpha_i & s\theta_i s\alpha_i & a_i c\theta_i \\ s\theta_i & c\theta_i c\alpha_i & -c\theta_i s\alpha_i & a_i s\theta_i \\ 0 & s\alpha_i & c\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Mientras que al multiplicar esta matriz por la matriz n y si solo fuese un eslabón, son eso sería suficiente para representar su movimiento.

$$n = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} p_i = A_i n$$

Dando el vector final compuesto por tres componentes $\{x, y, z, \text{escalamiento}\}$. Siendo de más eslabones se tiene que multiplicar la matriz obtenida del primer eslabón que se encuentra en el marco de referencia inercial $\{x_0, y_0\}$, pero al obtener las ecuaciones para el siguiente eslabón no será si porque se va a encontrar en un nuevo marco de referencia no inercial, para volver a dejarlo con el marco de referencia se multiplica la matriz obtenida del primer eslabón por la del segundo eslabón.

Se tiene una matriz A_{01} resultante del primer eslabón y una matriz A_{12} resultante del segundo eslabón.

$$p_1 = (A_{01} \cdot A_{12}) \cdot n$$

Y se obtiene los vectores de la posición final del segundo eslabón. Las ecuaciones antes descritas se añadieron al programa de la manera siguiente para obtener una animación del movimiento del dedo Figura 5.2.

Funciones

```

(* rotación en el eje x *)
Rx[ai_] := {{1, 0, 0, 0}, {0, Cos[ai], -Sin[ai], 0}, {0, Sin[ai], Cos[ai], 0}, {0, 0, 0, 1}};
(* rotación en el eje y *)
Ry[ey_] := {{Cos[ey], 0, Sin[ey], 0}, {0, 1, 0, 0}, {-Sin[ey], 0, Cos[ey], 0}, {0, 0, 0, 1}};
(* rotación en el eje z *)
Rz[ei_] := {{Cos[ei], -Sin[ei], 0, 0}, {Sin[ei], Cos[ei], 0, 0}, {0, 0, 1, 0}, {0, 0, 0, 1}};

(* traslación en el eje x *)
Tx[x_] := {{1, 0, 0, x}, {0, 1, 0, 0}, {0, 0, 1, 0}, {0, 0, 0, 1}};
(* traslación en el eje y *)
Ty[y_] := {{1, 0, 0, 0}, {0, 1, 0, y}, {0, 0, 1, 0}, {0, 0, 0, 1}};
(* traslación en el eje z *)
Tz[z_] := {{1, 0, 0, 0}, {0, 1, 0, 0}, {0, 0, 1, z}, {0, 0, 0, 1}};
(* transformación de Denavit Hartenberg *)
TDH[ei_, di_, ai_, ai_] := Rz[ei].Tz[di].Tx[ai].Rx[ai];
n = {0, 0, 0, 1};

```

Figura 5.2. Funciones de las ecuaciones de transformación.

La i en el programa funge como la distancia que jalaría el motor del tendón, por lo tanto, el cable solo se estira por 20 [mm]. Para poder relacionar la distancia que se elonga del cable con los ángulos que rotan los dedos se usó un factor N , que se obtuvo de hacer las mediciones en el prototipo físico al ir estirando el cable cuantos grados rotaba cada falange, se graficaron los valores y se obtuvo una pendiente que resultó ser el valor de la N para cada falange.

N1 = 5.6

N2 = 3.2

N3 = 3

Ya con estos valores, se sustituyó en la fórmula

$$\theta = distancia \times N_i$$

Transformaciones de los eslabones

```

For[i = 0, i ≤ 20, i++,

  e1 = (i * N1) * Degree;
  e2 = (i * N2) * Degree;
  e3 = (i * N3) * Degree;

  A01[i] = TDH[e1, 0, a1, 0];
  A12[i] = TDH[e2, 0, a1, 0];
  A23[i] = TDH[e3, 0, a3, 0];

  A02[i] = A01[i] . A12[i];
  A03[i] = A02[i] . A23[i];

  p1[i] = A02[i] . n;
  p2[i] = A03[i] . n;
]; (*cierra for*)

```

Figura 5.3. Ciclo de cálculo para 20 [mm] de recorrido del tendón.

Animación

```

^ Animate[
  Origen = {0, 0};

  E1 = {A01[i][[1, 4]], A01[i][[2, 4]]};

  P1 = {p1[i][[1]], p1[i][[2]]};
  P2 = {p2[i][[1]], p2[i][[2]]};

  Linea1 = Line[{Origen, E1}];
  Linea2 = Line[{E1, P1}];
  Linea3 = Line[{P1, P2}];

  punto1 = Point[Origen];
  punto2 = Point[E1];
  punto3 = Point[P1];

  Eslabon1 = Graphics[{Thickness[0.03], RGBColor[0.72, 0.07, 0.1], Linea1}];
  Eslabon2 = Graphics[{Thickness[0.03], RGBColor[0.66, 0.27, 0.36], Linea2}];
  Eslabon3 = Graphics[{Thickness[0.03], RGBColor[0.72, 0.07, 0.1], Linea3}];

  Pernos = Graphics[{PointSize[0.02], punto1, punto2, punto3}];

  Show[Eslabon1, Eslabon2, Eslabon3, Pernos, Frame → True,
    PlotRange → {{-7, 10}, {-2, 10}}, ImageSize → 700,
    {i, 0, 20, 1}, AnimationRunning → False]

```

Figura 5.4. Generación de las geometrías para la animación.

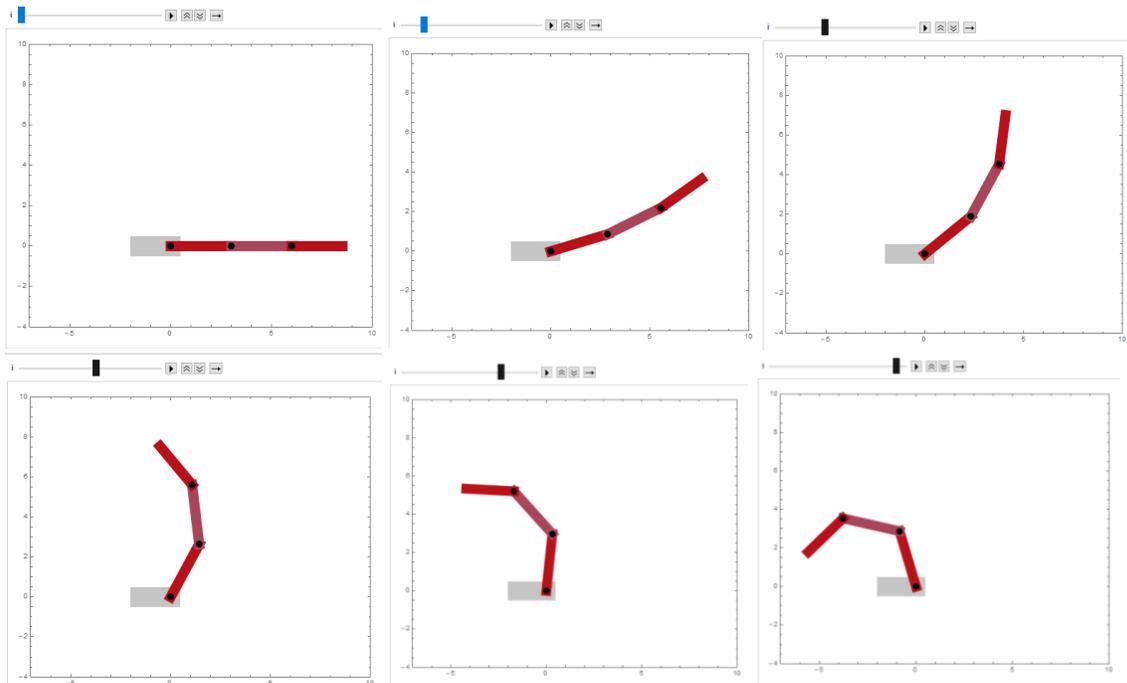


Figura 5.5. Movimiento que realizan las tres falanges para 20 [mm] que se jaló el cable, el rectángulo estático funge como la palma que no se mueve.

El programa realizado traza casi perfectamente las trayectorias de las tres falanges, tiene sus variaciones, porque en dado caso de aplicársele carga, el hilo que las mueve es elástico y presenta deformación, cambiando completamente las elongaciones. Y si se quisiera saber el desplazamiento con determinada carga en los dedos sería necesario volver a calcular los factores N para que el desplazamiento se corrija. Pero como se puede apreciar en la Figura 5.5 el dedo hace un recorrido similar al que haría la mano de una persona para hacer el movimiento de punta fina.

5.2 Análisis estructural

Se realizó un análisis estructural al aplicarle las fuerzas máximas para las que fue diseñado, propuestas en las especificaciones. El propósito de este apartado es obtener la información necesaria para saber dónde es más probable que fallen las piezas, así, reforzar esos puntos si se quiere llegar a manipular objetos con las fuerzas. Para llevar a cabo el análisis estructural se ocupó un análisis FEM de una paquetería de CAD para obtener los esfuerzos que sufre una pieza en determinado punto.

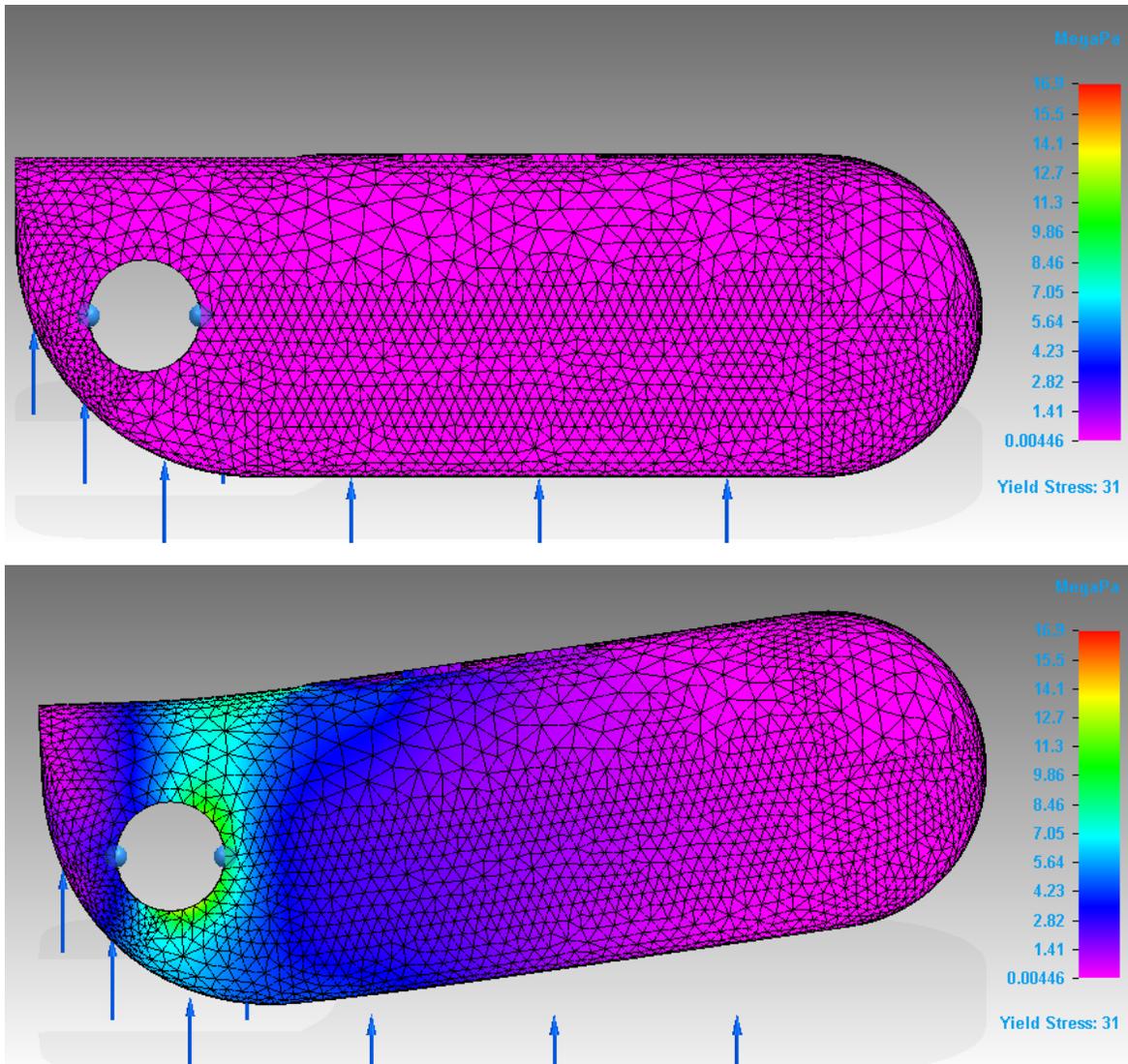


Figura 2. Imagen de la falange distal antes y después de la deformación por la carga.

La falange proximal del dedo no va a fallar, el esfuerzo de fluencia es aproximadamente de 31 [MPa], mientras que el esfuerzo máximo que está sufriendo la pieza es de 16.9 [MPa] con una carga de 10 [kg], así que la pieza solo sufrirá de una deformación elástica.

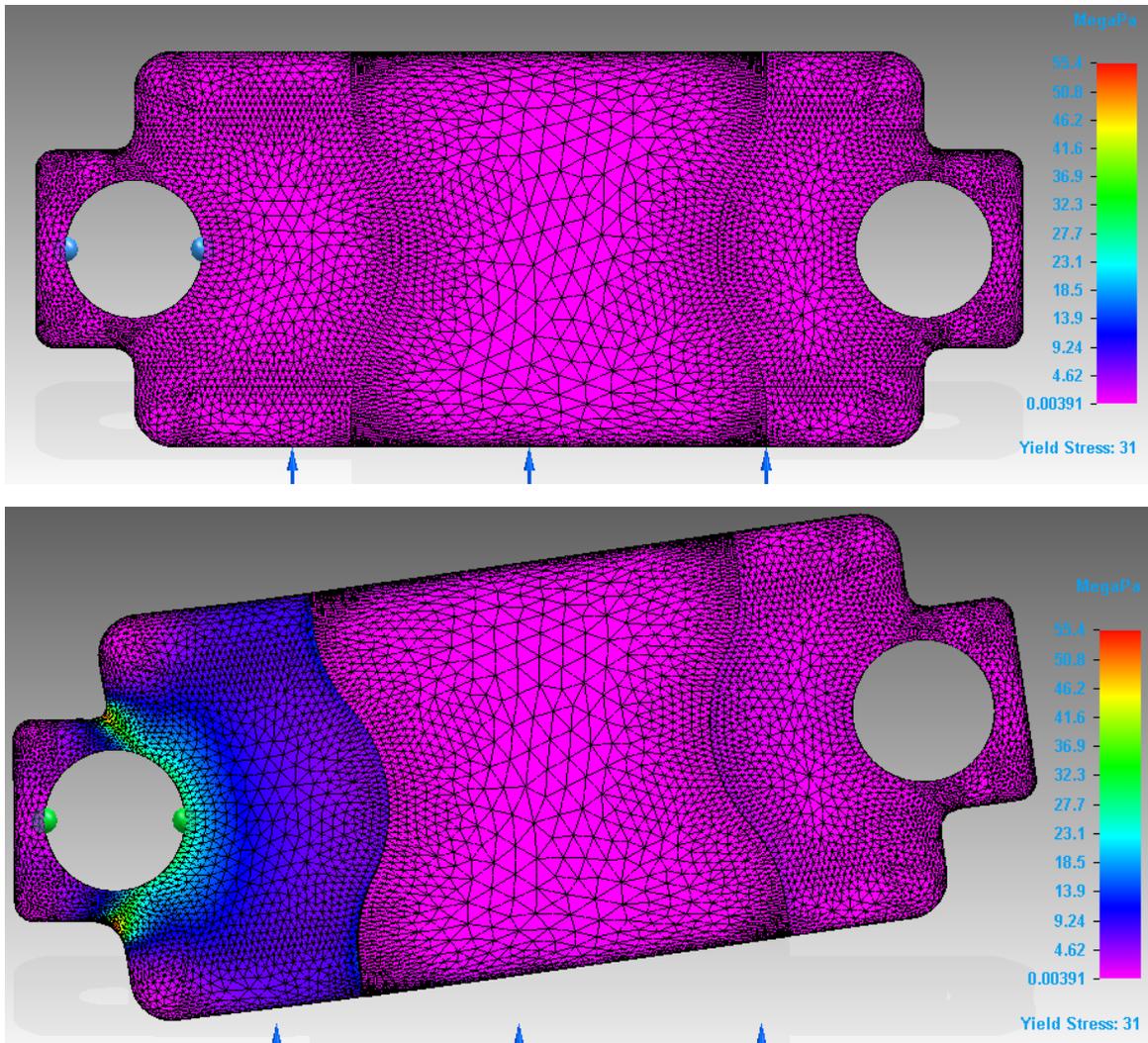


Figura 3. Imágenes de la falange media antes y después de la deformación generada por la carga.

Se puede ver que en esta simulación que la carga excede al esfuerzo de fluencia indicando, el grosor es de aproximadamente de 1.5 [mm] en la sección más delgada de la pieza, lo más probable es que haya fractura en esa parte con una carga de 10 [kg].

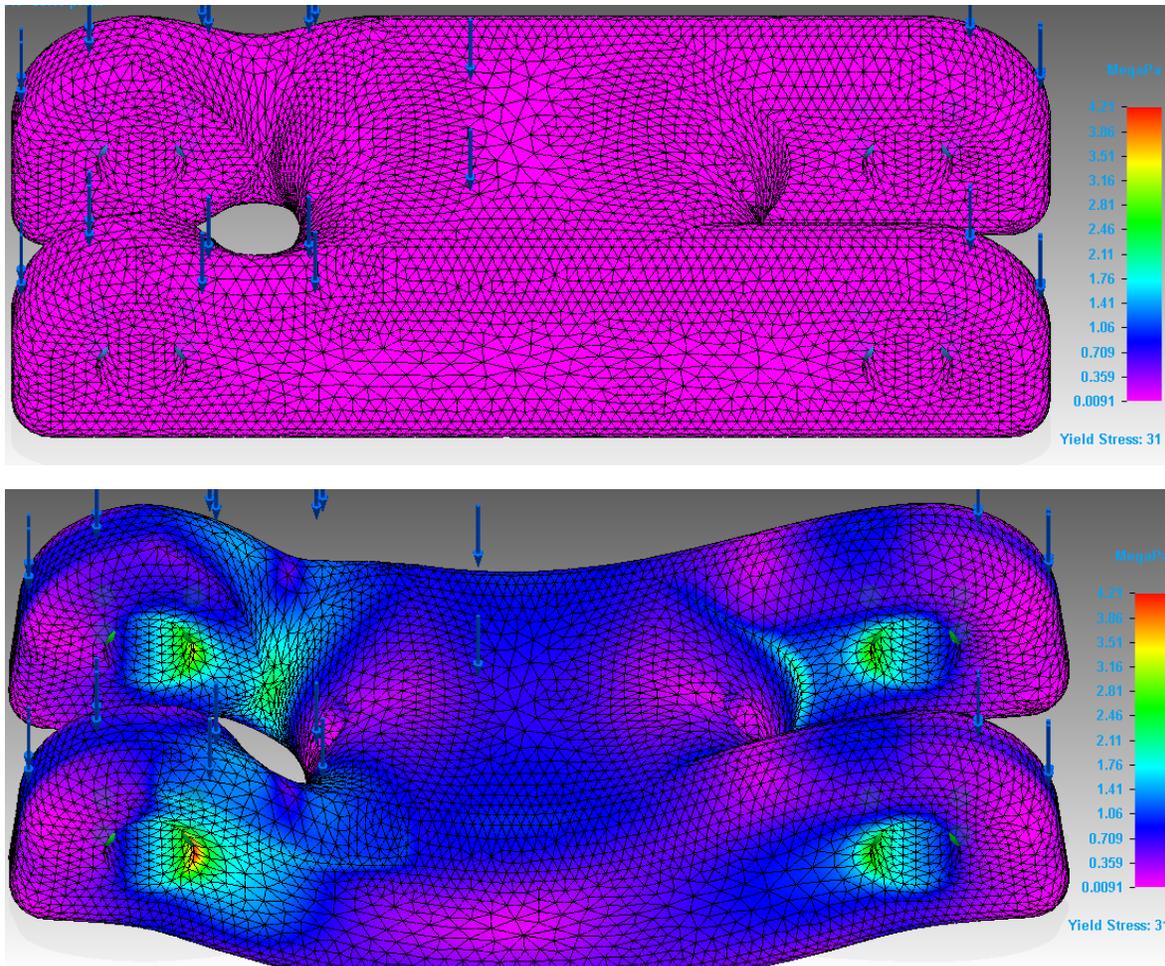


Figura 4. Imágenes de la falange proximal antes y después de la deformación.

La falange proximal, lo más probable es que sufra ligeras deformaciones instantáneas al momento de estar cargando con los 10 [kg] pero nada que se tenga que reforzar, porque la deformación está aumentada 10 veces para que sea notable.

Después de ver los resultados de las simulaciones de las tres falanges al aplicarles la carga, se puede notar que, tanto la falange proximal como la falange distal no presentan problemas en soportar la carga sin fallas, pero, a diferencia de la falange medial que presenta un esfuerzo que rebasa por mucho el esfuerzo de cedencia indicando, que lo más probable es que falle. El procedimiento posible para la corrección es el reforzamiento de la sección delgada modificando la geometría de la pieza para que no haya secciones de menos de 4 [mm] de espesor.

CONCLUSIONES

En este trabajo se logró con éxito crear una mano que puede servir como prótesis de mano si se le complementa con los puntos que serán descritos en el trabajo a futuro. El proceso de diseño se logró exitosamente, hubiera sido mejor, si hubiera habido la oportunidad de ir a encuestar al usuario real, se podría realizar en un trabajo próximo para retroalimentar el diseño que se tiene y posiblemente obtener una solución aún mejor. Se cumplió exitosamente con las especificaciones, aunque no se pudieron comprobar algunas, pero en los análisis realizados parece ser posible que se pueda lograr.

Se logró que el diseño final pareciera una mano humana, pero hace falta profundizar más y darle mejor estética con mejores acabados. Existe la posibilidad de añadir una especie de guante que además de su función estética, dé la función para que trabaje en ambientes húmedos.

Después de realizar las pruebas de funcionalidad con el prototipo, fue muy satisfactorio ver que los movimientos que se propusieron los realiza exitosamente y que se puede apreciar mucho más sobre mejoras y modificaciones de pequeños errores cuando se tiene un modelo físico que solo estar trabajando en papel y en computadora. Como ejemplo es que se puede añadir un movimiento más solo modificando algo muy sencillo en el pulgar.

Al estar realizando este trabajo tuve la oportunidad de aprender sobre manufactura aditiva para que las piezas salieran correctamente y que lo más importante para lograrlo es modificar los parámetros de impresión para lograr resultados elevados. Aprendí sobre un nuevo método para analizar el desplazamiento de mecanismos. También aprendí que no hay una sola metodología de diseño y que si la sigues dará resultado, si no, que debes pensar en cada detalle por mínimo que sea para que sea un diseño exitoso. Por último y más importante aprendí a pedir opiniones e ideas y que mi trabajo sea juzgado.

TRABAJO A FUTURO

La mano diseñada en este momento no puede contar como una prótesis, debido a que no tiene todos los aspectos para contar como una prótesis. Es necesario trabajar varios puntos en concreto sobre el proyecto para que ya sea una prótesis de mano, y estos son:

1. Motor y reducción

Es necesario hacer una búsqueda de los motores que existen en el mercado, para que, ya teniendo el conocimiento de sus características, se evalúen con respecto a los parámetros que se tienen de par, tamaño y consumo de energía, obtenidos para que se cumplan con las necesidades del usuario. Ya elegido el motor que mejor cumple con las características deseadas, se proseguirá a hacer el diseño de la transmisión para ajustar el par del motor con el que se estableció en las especificaciones de fuerzas requeridas.

2. Socket

Todas las prótesis deben contar con un socket que es el que se va a encargar de unir como tal al cuerpo del paciente con la prótesis. El diseño de este dispositivo no es general para todos los pacientes que abarca la prótesis, va cambiando sus dimensiones porque las lesiones tienden a variar en cada paciente. El punto aquí es hacer un diseño modular en el cual se tenga un parámetro sobre el cual se tomaron todas las dimensiones para proseguir con el diseño, con base en ello se tendría un diseño que modificando un parámetro se podían hacer sockets para varios usuarios. También se tendría que hacer un análisis sobre la unión del socket con la mano. La unión podría ser rígida haciendo la mano y el socket de una pieza o que sea movable con o sin actuadores, existen varias posibilidades que habría que analizar y se realizara en un trabajo a futuro.

3. Baterías

Las baterías se tendrían que escoger en base a cuanto se requeriría que fuese la autonomía de la prótesis por carga, tomando en cuenta el consumo de energía del motor y el controlador.

4. Control

Para que el proyecto sea una prótesis robusta que se pueda sacar al mercado es necesario que se tenga un controlador para los motores que trabajara de manera que al usuario se le facilitara más su uso. Habría que evaluar con los usuarios, los tipos de controladores que se podrían usar en una prótesis y cuál es el que se les hace el más cómodo para accionar su prótesis.

6. Materiales

Por último, si se hará una producción en masa, es necesario evaluar si los materiales y los procesos de manufactura para las piezas son los correctos, donde se vea la resistencia y la parte de costo beneficio para saber si la manufactura aditiva es la mejor opción.

REFERENCIAS ELECTRÓNICAS

- [1] Dorador, J., Ríos, P., & Flores, I. (2004). Robótica y Prótesis Inteligentes. Marzo 18, 2019, de Revista Digital Universitaria sitio web: http://www.revista.unam.mx/vol.6/num1/art01/art01_enero.pdf.
- [2] Tratamiento y Enfermedades. (2018). *Historia de las prótesis desde la antigüedad hasta nuestros días*. Marzo 8, 2019, de Brainstormer fuerza de ventas S.L. Sitio web: <https://tratamientoyenfermedades.com/historia-de-las-protesis/>.
- [3] Norton, K. (2007). *Un breve recorrido por la historia de la protésica*. Marzo 8, 2019, de Amputee Coalition Sitio web: <https://www.amputee-coalition.org/resources/spanish-history-prosthetics/>.
- [4] Goldberg, J. (2014). *On Paré and Prosthetics*. Marzo 8, 2019, de The New York Academy of Medicine Sitio web: <https://nyamcenterforhistory.org/tag/pieter-adriaanszoon-verduyn/>.
- [5] Timetoast. (2017). *Historia de las Prótesis*. Marzo 8, 2019, de Timetoast Sitio web: <https://www.timetoast.com/timelines/historia-de-las-protesis>.
- [6] Vázquez, E., Hiiar, M., & Ruiz, L. (2015). *Los amputados, un reto para el estado*. Marzo 11, 2019, de Academia Nacional de Medicina Sitio web: https://www.anmm.org.mx/actas2015/Acta_SO04032015.pdf.
- [10] Flores, I., & Dorador, J. (2009). *DISEÑO DE UNA MANO MECATRÓNICA PARA PRÓTESIS*. Marzo 11, 2019, de CONGRESO INTERNACIONAL ANUAL DE LA SOMIM Sitio web: http://somim.org.mx/memorias/memorias2009/pdfs/A1/A1_224.pdf.
- [12] Dario, P., Carrozza, M., Menssiasi, et al. (2019). *On the development of a cybernetic hand prosthesis*. Marzo 12, 2019, de Scuola Superiore Sant'Anna Sitio web: https://www.researchgate.net/publication/228876180_On_the_development_of_a_cybernetic_h_and_prosthesis.
- [13] Pons, J., Rocon, E., Ceres, R., et al. (2004). *The MANUS-HAND *Dextrous Robotics Upper Limb Prosthesis: Mechanical and Manipulation Aspects*. Marzo 12, 2019, de Centro de Recuperación de Minusválidos Físicos Sitio web: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1023%2FB%3AAURO.0000016862.38337.f1.pdf>.
- [14] Cordella, F., Gentile, C., Zollo, L., et al. (2016). *A Force-and-slippage control strategy for a poliarticulated prosthetic hand*. Marzo 12, 2019, de International Conference on Robotics and Automation (ICRA Sitio web: https://www.researchgate.net/publication/303886330_A_force-and-slippage_control_strategy_for_a_poliarticulated_prosthetic_hand.
- [15] Gibbard, J. (2019). *Hero Arm*. Marzo 12, 2019, de open bionics Sitio web: <https://openbionics.com/hero-arm-user-guide/>.
- [16] Cranny, A., Chappell, P., Beeby, S., & White, N. (2019). *Improving the functionality of a prosthetic hand through the use of thick film force sensors*. Marzo 12, 2019, de University of Southampton Sitio web:

https://www.researchgate.net/publication/37536234_Improving_the_functionality_of_a_prosthetic_hand_through_the_use_of_thick_film_force_sensors.

[18] Dechev, N., Cleghorn, N., & Naumann, S. (2000). *Toronto Bloorview Macmillan (TBM) Hand Multi-Fingered, Adaptive Grasp Prosthetic Hand: Better Function and Cosmesis*. Marzo 12, 2019, de University of Toronto Sitio web: [https://www.engr.uvic.ca/~mech350/Core-Files/SAMPLE-Presentation-\(TBM-Hand\).pdf](https://www.engr.uvic.ca/~mech350/Core-Files/SAMPLE-Presentation-(TBM-Hand).pdf).

[19] (2019). *VINCENTevolution 3*. Marzo 12, 2019, de VINCENT SYSTEMS Sitio web: <https://vincentsystems.de/en/prosthetics/vincent-evolution-3/>.

[20] (2019). *i-limb ultra*. Marzo 12, 2019, de Touch Bionics Sitio web: http://pdf.medicaexpo.es/pdf-en/touch-bionics/i-limb-ultra/80664-104347-_2.html.

[21] (2019). *be bionic3*. Marzo 12, 2019, de RSLSTEEPER Sitio web: http://bebionic.com/distributor/documents/bebionic3_technical_information_-_Lo_Res.pdf.

[22] (2016). *Michelangelo Hand*. Marzo 12, 2019, de ottobock Sitio web: <https://professionals.ottobockus.com/Prosthetics/Upper-Limb-Prosthetics/Michelangelo-Axon-Bus-System/Michelangelo-Hand-AxonHook/Michelangelo-Hand/p/8E500~5R-M>.

[24] Dávila, I., Pereira, J., & Orive, E. (2009). *PRINCIPIOS DE ANATOMÍA Y FISIOLÓGÍA*. Marzo 14, 2019, de BRIGADA VOLUNTARIA UNEFA TOVAR Sitio web: <http://brigadauniversitariaunefatovar.blogspot.com/2009/10/principios-de-anatomia-y-fisiologia.html>.

[27] Zuniga, J., Owen, I., & Binkley, P. (2014). *CYBORG BEAST HAND*. Febrero 19, 2018, de ENABLING THE FUTURE Sitio web: <http://enablingthefuture.org/current-design-files/cyborg-beast-hand/>.

[29] Manzano, J. (2016). *MECANISMOS ARTICULADOS PARA TRAZAR CURVAS*. Marzo 20, 2019, de LINKAGES Sitio web: <https://sites.google.com/site/tesislinkages/home>.

[30] Piovan, M. (2014). *MECANISMOS*. Marzo 20, 2019, de Universidad Tecnológica Nacional Sitio web: <https://www.frbb.utn.edu.ar/frbb/images/carreras/elementosdemaquinas/cap02-02.pdf>.

[31] FIME. (2005). *TRENES DE ENGRANES*. Marzo 20, 2019, de Universidad Autónoma de Nuevo León Sitio web: http://www.fime.uanl.mx/Homepage%20DSM_/APUNTES%20DINAMICA/CINEMATICA%20DE%20TRENES%20DE%20ENGRANES-ACAD.pdf.

[32] (2014). *Moving Pulley System Tension Reference*. Marzo 20, 2019, de Physics Forums Sitio web: <https://www.physicsforums.com/threads/moving-pulley-system-tension.759664/>

[33] Rodríguez, H. (2015). *Sistemas Hidráulicos de Transmisión de Potencia*. Marzo 20, 2019, de ingemecánica Sitio web: <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn212.html>

[34] (2015). *¿Cómo Se Transmite La Fuerza A Través de Fluidos?*. Marzo 20, 2019, de ACEROS Y SISTEMAS HIDRAULICOS DE MÉXICO Sitio web: <http://www.ashm.mx/blog/como-se-transmite-la-fuerza-a-traves-de-fluidos/>.

[38] Rosenbaum, S. (2013). *The Boston Arm*. Marzo 27, 2019, de Boston Magazine Sitio web: <https://www.bostonmagazine.com/health/2013/11/26/prosthetics-research-boston-arm/>.

[39] (2017). *Main Components of FDM 3D Printers*. Marzo 29, 2019, de My 3D Concepts Sitio web: <http://my3dconcepts.com/blog/>.

[40] *What is 3D Printing?*. Marzo 29, 2019, de 3DPrinting Sitio web: <https://3dprinting.com/what-is-3d-printing/>.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [7] Vela, Sánchez. (2016). *Los amputados y su rehabilitación. Un reto para el Estado*. México: InterSistemas.
- [8] BAROUTIH, AGNELLO M et VOLCKMANN P. *Amputations du membre supérieur*. Encycl. Méd. Chir. (Elsevier, Paris-France), Kinésithérapie Médecine physique-Réadaptation, 26-269-A-10, 1998, 10 p.
- [9] Hernández, C. (2013). *FRECUENCIA Y CAUSAS DE AMPUTACIÓN EN PACIENTES ATENDIDOS EN LA DIRECCIÓN DE ATENCIÓN A LA DISCAPACIDAD, POR EL PROGRAMA DE APOYO DE AYUDAS FUNCIONALES DEL DIF ESTADO DE MÉXICO, 2011-2012* (tesis de pregrado). Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca, Estado de México.
- [11] Flores, I., & Juárez, A. (2007). *DISEÑO DE PRÓTESIS MECATRÓNICA DE MANO*. (tesis de pregrado). Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F.
- [17] Pineda, A. (2016). *DISEÑO DE PRÓTESIS DE MANO Y MANUFACTURA DEL PROTOTIPO*. (tesis de maestría). Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F.
- [23] Belter, J., Segil, J., Dollar, A., et al. (2013). *Mechanical design and performance specifications of anthropomorphic prosthetic hands: A review*. Journal of Rehabilitation Research & Development, Volume 50 Number 5, 599 — 618. 2019, Marzo 12, De U.S. Department of Veterans Affairs Base de datos.
- [25] Ríos, A., & Roether, G. (2005). *DISEÑO, FABRICACIÓN Y PRUEBAS DE UN PROTOTIPO DE MANO PARA UNA PRÓTESIS DE MIEMBRO SUPERIOR*. (tesis de pregrado). Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F.
- [26] Cipriani, C., Controzzi, M., & Carozza, M. (2011). *The SmartHand transradial prothesis*. JOURNAL OF NEUROENGINEERING AND REHABILITATION, 8, 29. 2019, Marzo 14, De BioMed Central Base de datos.
- [28] Ulrich, K., & Eppinger, S. (2012). *Diseño y desarrollo de productos*. México: Mc Graw Hill.
- [35] Mirfakhrai, T., Madden, J., & Baughman, R. (2007). *Polymer artificial muscles*. *materialstoday*, 10, 8. 2019, Marzo 20, De ScienceDirect Base de datos.
- [36] Melo, J. (2009). *ERGONOMÍA PRÁCTICA Guía para la evaluación ergonómica de un puesto de trabajo*. Buenos Aires, Argentina: FUNDACIÓN MAPFRE.
- [37] Brazeiro, J., Petraccia, P., & Valdés, M. (2015). *Mano controlada por señales musculares*. (tesis de pregrado). Universidad de la República, Uruguay, Montevideo.
- [41] Ventimiglia, P. (2012). *Design of a Human Hand Prosthesis*. (project report for the degree of bachelor of arts). Worcester Polytechnic Institute, Massachusetts, EUA.
- [42] I. Páez, C. Gaviria. (2017). *Prótesis subactuadas de manos humanas: una revisión*. Ingenium, vol. 18. n.º 35, pp. 20-34, abril 9, 2017.

[43] Loaiza, J., Arzola, N. (2011). *EVOLUCIÓN Y TENDENCIAS E EL DESARROLLO DE PRÓTESIS DE MANO*. Dyna, vol. 78. Nro. 169, pp. 191-200, abril 9, 2019.

[44] Spong, M., Hutchinson, S., & Vidyasagar, M. (2004). *Robot Dynamics and Control*. EUA: John Wiley & Sons.

[45] Johnson, C. (1971). *Mechanical design synthesis with optimization applications*. Michigan,USA: Van Nostrand Reinhold Co.