



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Prototipo de mano protésica
fabricada en manufactura
aditiva**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero Mecánico

P R E S E N T A

Irving Aarón Flores Hernández

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Jesús Manuel Dorador González



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2022

Dedicatoria

A Dios dedico este proyecto, por permitirme llegar hasta donde estoy, porque sin su amor y misericordia, no hubiera podido lograr nada en mi vida.

A mi padre, por su cariño, por todo su trabajo, por su valentía, porque siempre te has esforzado para sacarnos adelante.

A mi madre, por todo su amor y cuidados desde que éramos pequeños, por siempre estar con nosotros a pesar de las situaciones difíciles.

A mi hermano porque siempre hemos estado juntos, siempre nos hemos apoyado, aunque la situación sea complicada, nunca dejaremos de ser unidos. Porque esa es la educación que tenemos.

A mi abuelita Cris, por siempre estar al pendiente de nosotros, por su amor y nunca dejarnos solos.

A mi abuelo Severiano, por mantener unida a la familia, por ser un gran ejemplo y por todo el cariño que nos brinda.

A mi abuelita Ernestina, por su amor, porque siempre nos recibe con alegría y nunca nos dejara solos.

A mis tíos y primos, porque siempre nos abren las puertas de su casa, porque siempre me han apoyado y nunca me dejaron solo.

A mi amigo Miguel, por todos estos largos años de apoyo, por todas las aventuras que hemos vivido y por las que faltan por vivir.

Agradecimientos

Agradezco rotundamente al Dr. Dorador, por darme la oportunidad de participar en sus proyectos de desarrollo, por brindarme su apoyo para realizar esta tesis.

Este proyecto se realizó en el marco del programa DGAPA-PAPIIT IT101121.

Contenido

Introducción.....	1
Objetivo.....	1
Alcances.....	1

Capítulo 1: Anatomía y funciones del miembro superior.

1.1 Miembro superior.....	3
1.1.1 Hombro.....	3
1.1.2 Brazo.....	4
1.1.3 Antebrazo.....	5
1.1.4 Mano.....	7
1.2 Sujeción de objetos.....	14

Capítulo 2: Amputaciones y prótesis.

2.1 Amputaciones.....	17
2.2 Discapacidad en México.....	18
2.3 Prótesis de miembro superior.....	20
2.3.1 Prótesis Estética.....	22
2.3.2 Prótesis Mecánica.....	23
2.3.3 Prótesis Mioeléctrica.....	25

Capítulo 3: Especificaciones de diseño, diseño conceptual y de configuración.

3.1 Especificaciones de diseño.....	29
3.2 Diseño conceptual.....	30
3.2.1 Sistema mecánico.....	31
3.2.2 Sistema de actuadores.....	36
3.2.3 Sistema de transmisión.....	40
3.2.4 Sistema de potencia.....	42
3.3 Selección de conceptos.....	44
3.4 Diseño de configuración	47

Capítulo 4: Diseño de detalle.

4.1 Diseño de la mano.....	50
4.2 Diseño de los dedos.....	53
4.2.1 Análisis de trayectoria.....	54

4.2.2 Tornillos de potencia.....	61
4.3 Diseño de la palma.....	65
4.4 Diseño del pulgar.....	68
4.5 Análisis de fuerzas.....	70
4.6 Análisis de velocidad y aceleración del mecanismo.....	82
4.7 Prototipo final.....	85
4.7.1 Ensayo de tracción.....	89
4.7.2 Análisis FEM.....	97

Capítulo 5: Fabricación del prototipo, pruebas y resultados.

5.1 Fabricación de piezas.....	103
5.2 Ensamble final del prototipo.....	107
5.3 Pruebas de sujeción.....	109
5.4 Comparación con otras manos protésicas.....	115

Conclusiones.....	117
--------------------------	------------

Recomendaciones.....	118
-----------------------------	------------

Trabajo a futuro.....	118
------------------------------	------------

Apéndice A. Planos del prototipo.....	119
--	------------

Referencias.....	137
-------------------------	------------

Introducción

Una de las cualidades más importantes del ser humano, que le brindó una importante ventaja evolutiva sobre otras especies, es la capacidad de lograr la marcha únicamente con los miembros inferiores y usar los miembros superiores, para realizar diferentes acciones motoras, como golpear, sujetar y manipular distintos elementos con el propósito de crear herramientas esenciales para subsistir.

El uso de la mano es fundamental para los seres humanos, debido a que nos permite realizar movimientos controlados para llevar a cabo actividades que en su mayoría son indispensables para cumplir nuestras necesidades, o bien nuestras labores personales del día a día.

Desde la antigüedad se tiene noción de poder reemplazar una extremidad faltante con algún objeto, que permita al usuario, volver a adquirir la función motora perdida.

Hoy en día, las prótesis de miembro superior son tan avanzadas, que el usuario puede recuperar en gran parte, los movimientos que realizaba antes de su amputación, mejorando así su calidad de vida.

Pero no todas las personas tienen la posibilidad de adquirir una prótesis de esta gama, debido a su alto costo en el mercado y por ello, se buscan alternativas que permitan tener acceso a esta tecnología.

Por ello en este proyecto se diseñará un prototipo de prótesis de miembro superior que brinde la posibilidad de recuperar algunas de las funciones perdidas.

Objetivo:

- Diseñar un prototipo de prótesis de miembro superior derecho para desarticulación de muñeca, que sea capaz de sujetar objetos de hasta 600 gramos.

Alcances:

- Integrar una muñeca de desconexión rápida al diseño del prototipo.
- Se fabricará y ensamblará el prototipo, para probar su funcionamiento.

Capítulo 1
Anatomía y funciones del miembro superior.

1.1 Miembro Superior

Se denomina miembro superior a las extremidades que se encuentran fijadas en la parte superior del tronco, que permiten llevar a cabo acciones motoras finas, como la sujeción y manipulación de diferentes objetos de nuestro entorno.

La extremidad inferior está compuesta por 4 zonas principales, que interactúan de forma sincronizada, con el propósito de tener movimientos suaves y eficientes.

1.1.1 Hombro

Es considerada la unión del miembro superior al tórax, conformado por el acromion, la escápula, clavícula y la articulación glenohumeral.

Se conforma principalmente de 5 músculos, el primero de ellos, el *Deltoides*, ubicado en la parte lateral de la clavícula, que flexiona, abduce y rota el brazo lateralmente. Mientras que el *Redondo mayor*, aduce el brazo

El músculo *Supraespinoso*, es el encargado de iniciar el movimiento de abducción.

Por otro lado, los músculos *Infraespinoso*, *Redondo menor* y *Subescapular*, son los encargados de rotar lateralmente al hombro.



Imagen 1. Hombro

Imagen tomada de D'Aguzan, 2018. [2]

Movimientos del hombro:

La articulación del hombro posee 3 grados de libertad, permitiendo movimiento en los planos sagital, transversal y coronal, respectivamente.

Los movimientos de flexión y extensión se llevan a cabo en el plano sagital y consisten en elevar los brazos partiendo desde la posición neutra hacia arriba.

Si bien, la flexión se ve limitada por el Acromion, permitiendo un rango de giro de 45° a 50°, mientras que la extensión tiene un rango más amplio de 180°.

El segundo movimiento que permite esta articulación es el de Abducción y consiste en partir desde una posición neutra y alejar el miembro superior del tronco, permitiendo un alcance de 180° en el plano frontal.

Finalmente, el primer movimiento de rotación se puede realizar al aducir 90° el hombro y comenzar a rotar sobre la articulación del hombro.

El segundo movimiento de rotación consiste en partir de una posición neutra, elevar el antebrazo a 90° con respecto al hombro y dirigir el movimiento hacia el abdomen y en sentido contrario respectivamente, permitiendo un arco de 30° en dirección al tórax y 80° alejándose del mismo. Pero si el hombro se encuentra flexionado 90° y el movimiento se dirige hacia el abdomen, el radio de giro será de 140° y 30° en dirección de la espalda con respecto al plano frontal.

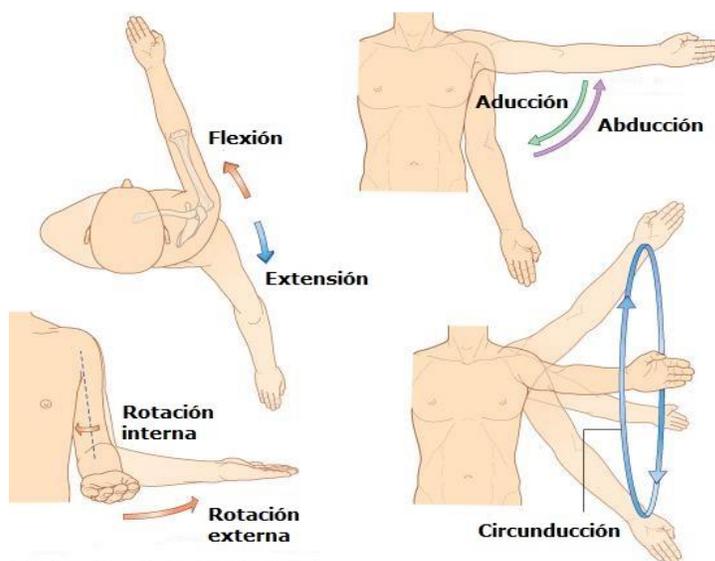


Imagen 2. Movimientos del hombro.

Imagen tomada de E, 2017. [3]

1.1.2 Brazo

Es la región más larga del miembro superior, conformado por un hueso largo y robusto, el Húmero, que se une desde la clavícula hasta el codo.

Son 4 músculos que conforman esta región, cuya acción principal actúa sobre la articulación del codo, permitiendo movimiento al antebrazo.

El *bíceps braquial*, *braquial* y *coracobraquial*, son los encargados de llevar a cabo la flexión del antebrazo, mientras que el *tríceps braquial*, es un grupo extensor del antebrazo.

Músculos del brazo

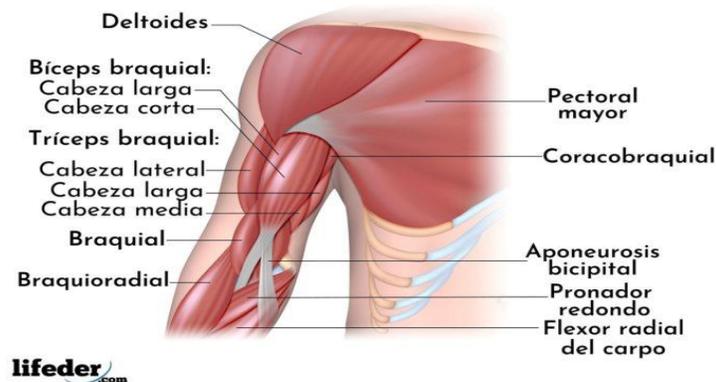


Imagen 3. Músculos del brazo.

Imagen tomada de Parada, 2021. [4]

1.1.3 Antebrazo

Es la segunda región más larga del miembro superior, conformada por dos huesos; Radio y Cúbito, que conectan al codo con la mano.

Se integra por tres capas de grupos musculares. La capa superficial contiene al *pronador redondo*, *flexor radial del carpo*, *palmar largo* y *flexor cubital del carpo*, cuya función principal es flexionar y abducir la mano.

El segundo grupo muscular o comúnmente llamado capa intermedia, está compuesto por un solo músculo, llamado *flexor superficial de los dedos*.

Finalmente, la capa profunda, está constituida por el *flexor profundo de los dedos*, *flexor largo del pulgar* y *pronador cuadrado*.

Cabe destacar que los músculos de la capa superficial e intermedia cruzan la articulación del codo, mientras que los músculos de la capa profunda, envuelven directamente el radio y cúbito.

Músculos del antebrazo (brazo derecho)

Cara anterior Cara posterior

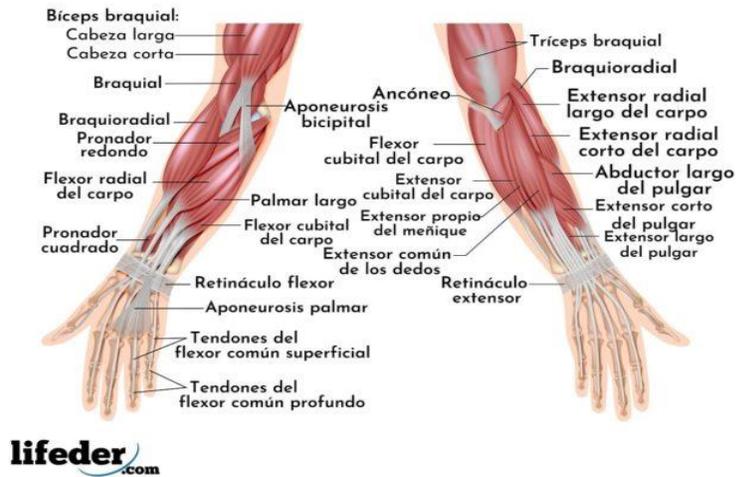


Imagen 4. Músculos del antebrazo.

Imagen tomada de Parada, 2021. [4]

Movimientos del codo:

El codo es la articulación que une el brazo con el antebrazo, gracias a esta articulación; podemos realizar actividades de suma importancia para nuestra supervivencia, como el hecho de flexionar el antebrazo, con el fin de llevar alimentos a nuestra boca.

Esta articulación permite el movimiento de flexo extensión del antebrazo y de prono supinación del mismo elemento.

Los movimientos de flexión y extensión se realizan respecto a las articulaciones húmero cubital y húmero radial. Consiste en flexionar y contraer el antebrazo con respecto al brazo, teniendo un rango de hasta 145°, medido desde el eje neutro del brazo.

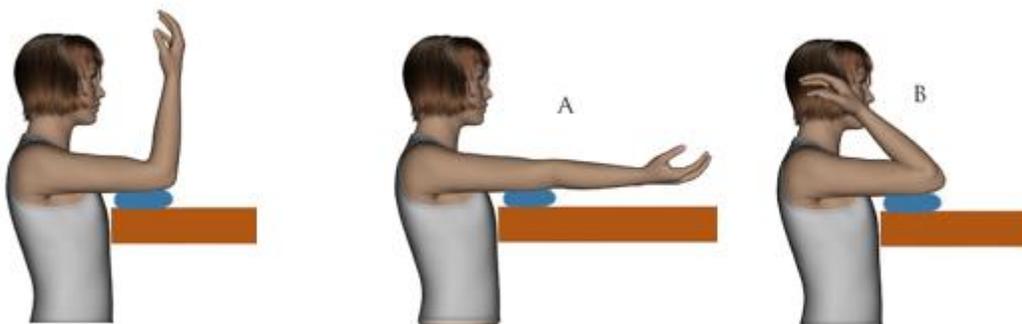


Imagen 5. Flexo extensión del codo.

Imagen tomada de Elisa, 2017. [5]

Por otra parte, en las articulaciones radio cubital proximal y distal, se lleva a cabo la pronosupinación, que es la rotación del antebrazo con respecto a su eje longitudinal, permitiendo que la mano pueda situarse en cualquier posición.

La forma de saber la amplitud de giro es colocar el antebrazo en ángulo recto con respecto al brazo y girar, permitiendo un ángulo de 85° en dirección al tronco y 90° en dirección opuesta.

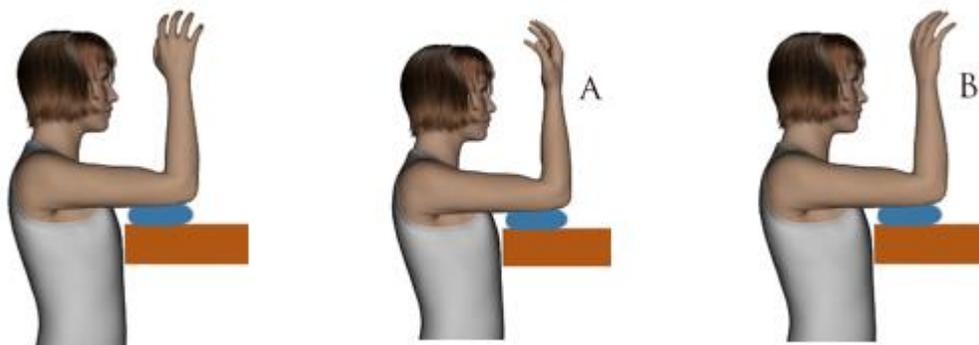


Imagen 6. Pronosupinación.
Imagen tomada de Elisa, 2017. [5]

1.1.4 Mano

Es la parte final del miembro superior, conformada por el carpo, metacarpo y falanges correspondientes a cada dedo.

Los músculos de la mano se ubican en 5 capas de grupos musculares, el primero de ellos, localizado en el compartimiento tenar, se conforma por *Abductor corto del pulgar*, *flexor corto del pulgar* y *oponente del pulgar*.

En el compartimiento aductor, únicamente tenemos al *Aductor del pulgar*.

Para el tercer compartimiento, llamado compartimiento hipotenar, se compone por los músculos hipotenares, cuyos nombres son; *Abductor del dedo meñique*, *flexor corto del dedo meñique* y *oponente del dedo meñique*.

Los músculos lumbricales o comúnmente llamados músculos cortos de la mano, se localizan en el compartimiento central.

Finalmente, los músculos *interóseos* envuelven a los metacarpianos.

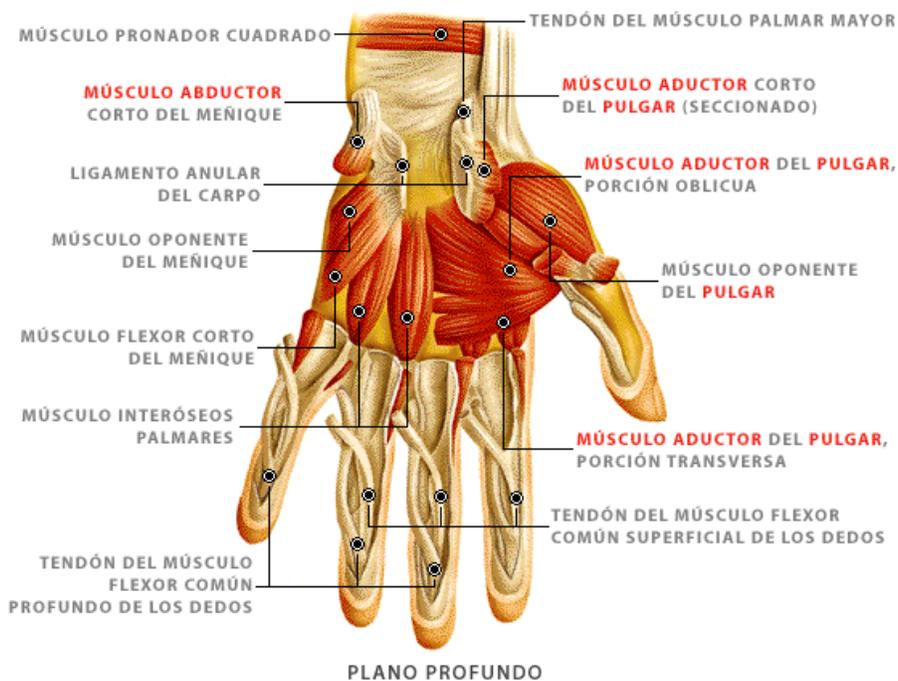


Imagen 7. Músculos de la mano.
Imagen tomada de L, Magazine, 2021. [6]

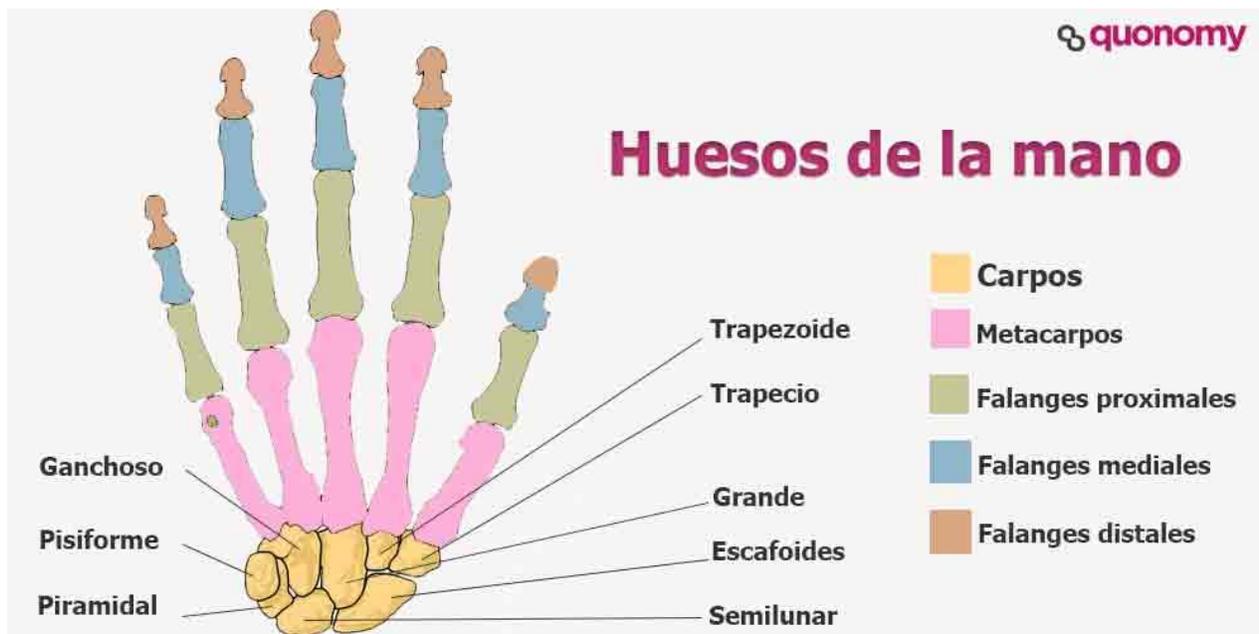


Imagen 8. Huesos de la mano
Imagen tomada de Caraballo, 2019. [7]

Movimientos de la muñeca:

En el plano sagital, esta articulación permite los movimientos de flexión y extensión de la mano, es decir, que la palma de la mano se aproxima a la cara interior del antebrazo, mientras que, en la extensión, el dorsal de la mano; se dirige a la cara exterior del antebrazo. Cabe destacar que, para ambos movimientos, el rango de giro es de 85° con respecto al eje neutro del antebrazo.

Los movimientos de aducción y abducción son efectuados en el plano frontal y consisten en inclinar hacia los lados, siendo la abducción la inclinación en dirección al cuerpo, mientras que la aducción es en dirección saliente del cuerpo.

Para saber la amplitud de estos movimientos, se toma como referencia el eje medio del antebrazo y se traza un eje en el dedo medio. En el movimiento de abducción tiene un rango de 15° , mientras que la aducción tiene 45° .

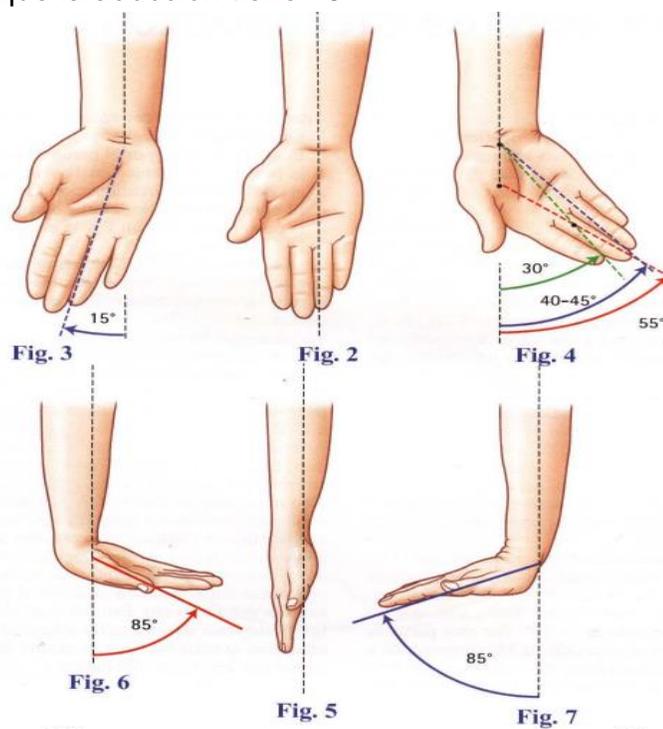


Imagen 9. Movimientos de la mano.

Imagen tomada de Kapandji, 2006 [8]

Tendones de la mano:

El tendón; es la parte final del tejido muscular y son los encargados de unir los músculos a los huesos, permitiendo con la contracción del músculo, el movimiento de las estructuras óseas.

En cuanto a los tendones de la mano, se dividen cada vez que se acercan más a las falanges, por consecuencia, de los cuatro dedos mediales, ninguno podrá moverse

libremente sin afectar el movimiento de otro dedo. Es decir, si movemos cualquier dedo medial, los tres dedos restantes se moverán.

Moore, Dalley y Agur (2010), [1], señalan que “Los tendones adyacentes se unen proximalmente en los nudillos (articulaciones metacarpofalángicas) mediante tres **conexiones intertendinosas** oblicuas que restringen la extensión independiente de los cuatro dedos mediales (especialmente del dedo anular). En consecuencia, normalmente ninguno de esos dedos puede encontrarse completamente flexionado si los otros están extendidos totalmente.” (p. 754).

Después de los nudillos, cada tendón envuelve las falanges, hasta llegar a la falange distal, permitiendo con ello, que cada dedo pueda flexionarse y moverse hacia los lados.

Movimiento de los dedos:

Las articulaciones de las falanges son esferoideas, por ello, permiten tres grados de libertad, siendo uno de ellos de rotación.

Aducción - Abducción: El movimiento de abducción consiste en mover los dedos hacia los lados en dirección de las caras laterales del antebrazo, mientras que el movimiento de Aducción; es lo contrario y consiste en mover el dedo pulgar, índice, anular y meñique, en dirección de la cara lateral del dedo medio

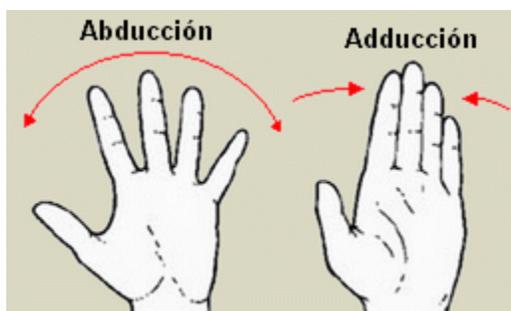


Imagen 10. Abducción y Aducción
Imagen tomada de Carletti, E. [9].

Flexión - Extensión:

El movimiento de flexión; consiste en mover los dedos en dirección de la palma, mientras que, en la extensión, los dedos se moverán en sentido opuesto.

Cabe señalar que, en la flexión, cada dedo tendrá un rango de movimiento diferente hasta llegar a la posición de puño.

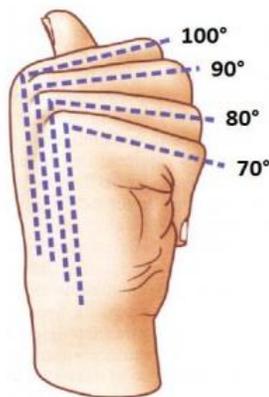


Imagen 11. Flexión de los dedos
Imagen tomada de Kapandji, 2006 [8]

En cuanto al pulgar, en el movimiento de aducción, el dedo pulgar se dirige hacia el dedo índice, teniendo un rango de 35° a 40°.

Mientras que, en el movimiento de flexión, el dedo pulgar se opone al dedo índice, teniendo un rango de 45° a 60° respectivamente.

Como ya se mencionó anteriormente, cada dedo está conformado por un metacarpiano y tres falanges. Además, que, en la sujeción de cuerpos, los dedos suelen envolver o prensar al objeto, de modo que, si se realiza el movimiento de flexión hasta llegar a la posición de puño, notaremos que los dedos se enrollaran a modo de espiral, así lo ha demostrado Littler.



Imagen 12. Rectángulo de oro
Imagen tomada de Kapandji, 2006 [8]

El concepto de espiral áurea es bastante conocido, ya que en la naturaleza puede ser hallado en diferentes lugares, ejemplo de ello es la forma de la concha de algunos moluscos, en los flósculos de girasoles, en algunas especies de cactus e incluso en la forma en que se alternan los pétalos de una rosa.

La “divina proporción” surge del cociente de la longitud y la anchura de un rectángulo que, sin importar las dimensiones, será un valor aproximado de 1.618.

Al tratarse de una espiral logarítmica, la tasa de crecimiento será el número de oro asociado al rectángulo.

Retomando el concepto de movimiento del dedo, podemos ver que la espiral áurea, tenderá a formarse cuando se cierra la mano en posición de puño.

Posiciones de la mano:

Usualmente se suele pensar que los dedos son paralelos, pero en realidad no es así. Si trazamos un eje transversal en cada dedo y los prolongamos, se intersectan en algún punto del espacio o del miembro superior, esto depende de la posición en la que se encuentre la mano.

➤ Palma extendida, dedos extendidos y separados:

Los dedos se extienden hasta quedar rectos y a su vez, se abducen lo más posible. Pero algo importante a señalar es que el dedo medio solo se extiende y no se mueve hacia los lados como lo hacen los cuatro dedos restantes.

Si proyectamos el eje transversal de cada dedo en dirección de la muñeca, notaremos que se intersectan aproximadamente en el tubérculo del escafoides.

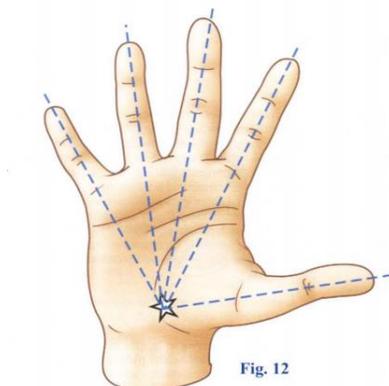


Imagen 14. Palma extendida

➤ **Imagen tomada de Kapandji, 2006 [8]**

➤ Posición neutra:

Esta posición, puede ser muy parecida a la anterior, pero la diferencia es que los dedos se abducen ligeramente y de forma involuntaria al extender los dedos.

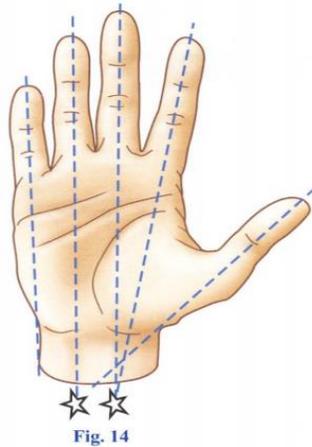


Fig. 14

Imagen 15. Posición neutra
Imagen tomada de Kapandji, 2006 [8]

> Puño:

Los dedos se cierran hasta que las yemas tocan la palma de la mano, mientras que el pulgar, se apoya en el dedo índice.

De igual manera, si trazamos líneas que pasen por el centro de los dedos y las extendemos en dirección al antebrazo, se notara, que intersecan en la arteria radial, justo por debajo de la muñeca.



Fig. 13

Imagen 16. Puño
Imagen tomada de Kapandji, 2006 [8]

> Palma extendida, dedos juntos y extendidos:

Iniciamos extendiendo los dedos y llegaremos a la posición neutra, después juntaremos los dedos hasta que las partes laterales se toquen.

De igual manera, si trazamos un eje que pase por la mitad de cada dedo, notaremos que no son paralelos entre sí y se intersecan en algún punto del espacio que no pertenece al

cuerpo, debido a que los dedos no son del todo cilíndricos y presentan variaciones de grosor a lo largo de las falanges.

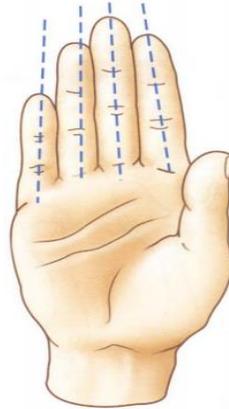


Fig. 15

Imagen 17. Palma extendida
Imagen tomada de Kapandji, 2006 [8]

1.2 Sujeción de objetos

Dependiendo del objeto a sujetar, los dedos se colocarán en distintas posiciones, pero el proceso de sujeción se realiza de la siguiente manera; Los dedos mediales se extienden y cuando se tiene contacto con el objeto los dedos se cierran, siguiendo el orden siguiente; Índice, medio, anular y meñique.

Por otro lado, el dedo pulgar, también se extiende antes de hacer contacto con el objeto y finalmente se abduce en dirección de la palma.

Cabe destacar que el pulgar es el dedo más importante de la mano, ya que representa el 40% de las capacidades de la mano, debido a que puede oponerse a los demás dedos, ya sea para un agarre de precisión, o bien, para ejercer una mayor presión en el objeto.

Dependiendo la posición del pulgar, los tipos de agarre o prensión, son los siguientes:

➤ Agarre palmar:

Los dedos rodean al objeto, mientras que el pulgar, ejerce contrapresión, con movimientos potentes de los dedos en dirección de la palma.

P, ej., sujetar un cilindro.

➤ Agarre en gancho:

Normalmente, se realiza este agarre, cuando se sujeta un maletín. Por ello, los dedos medios, forman un arco con respecto a la palma.

➤ Prensión manipuladora de precisión:

Se realizan movimientos finos y controlados de los dedos, en donde el objeto, se encuentra prensado por el pulgar e índice y dos o tres dedos mediales en distintos puntos del cuerpo. Ejemplo de ello, es el sujetar un lápiz

➤ Agarre de pinza:

Se considera la compresión de un objeto entre dos dedos el pulgar e índice. Pero también puede ser entre el pulgar y el dedo medio.

P, ej., sujetar una moneda.

➤ Agarre cilíndrico:

Comúnmente llamado agarre supino. Toda la superficie de la mano envuelve el objeto

➤ Agarre esférico:

La característica más importante de este agarre es que la palma tomará una forma cóncava y cada dedo envuelve al objeto. La principal característica es que un dedo, ya sea anular o meñique, tenderá a oponerse al pulgar y con ello, el objeto quedará bloqueado.

Otra cualidad importante de la mano es que puede adoptar distintas posiciones, dependiendo de la geometría, ya que, si el objeto a tomar es voluminoso, la palma de la mano se ahueca y forma un arco, pero si la superficie es plana, la mano se expande, tomando la forma del objeto.

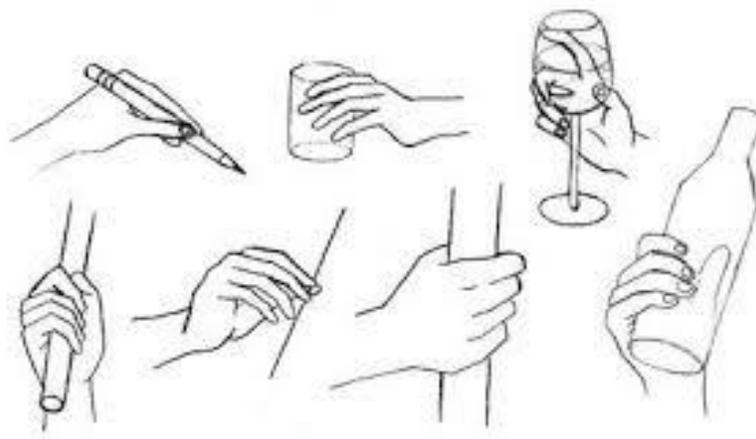


Imagen 18. Prensiones de mano
Imagen tomada de Fisioterapia, 2015. [10]

Capítulo 2.
Amputaciones y prótesis.

2.1 Amputaciones

Una amputación es la remoción parcial o total de alguna extremidad de forma perpendicular al eje longitudinal del segmento.

La pérdida de una extremidad puede ser consecuencia de diferentes factores, entre los que principalmente destacan:

➤ **Cirugía Oncológica:**

Una masa anormal de tejido corporal se aloja en alguna parte del cuerpo. Si las células cancerígenas se multiplican de forma descomunal, ocasionarán el proceso conocido como metástasis; que es la migración de una célula cancerígena a un tejido diferente del que se originó. Una gran cantidad de tumores malignos de diversos órganos, tienen como principal sitio de metástasis, el tejido óseo. Si el tumor hace metástasis, en algún hueso, este tendrá que ser removido.

Otro ejemplo es el Osteosarcoma, un tumor originado directamente en hueso y músculo.

➤ **Traumatismo grave:**

Los traumatismos son lesiones o heridas físicas en alguna parte del cuerpo, pero en este caso, la lesión es tan grave que es casi imposible que la parte afectada se recupere, por lo que se recurre a la amputación, para salvar la vida del paciente.

Ejemplo de ello son accidentes de tráfico o accidentes causados por derrumbes, donde alguna extremidad de la persona puede quedar atrapada en los escombros.

➤ **Necrosis extensa de tejido:**

La necrosis es la muerte celular de un tejido corporal, pero puede llegar a complicarse si se llega a la gangrena, es decir, falta de suministro de sangre e infección bacteriana. Por ello, la extremidad suele ser amputada, con el fin de evitar que la infección siga expandiéndose.

Usualmente varios casos de Necrosis suelen complicarse en pacientes con Diabetes mellitus, debido a la disminución de anticuerpos.

Niveles de amputación:

El especialista debe evaluar el caso del paciente, determinando el punto apropiado para llevar a cabo la amputación, garantizando una buena cicatrización, permitiendo que el muñón pueda ser funcional para el paciente.

En la siguiente imagen, se muestran los niveles de amputación de miembro superior e inferior.

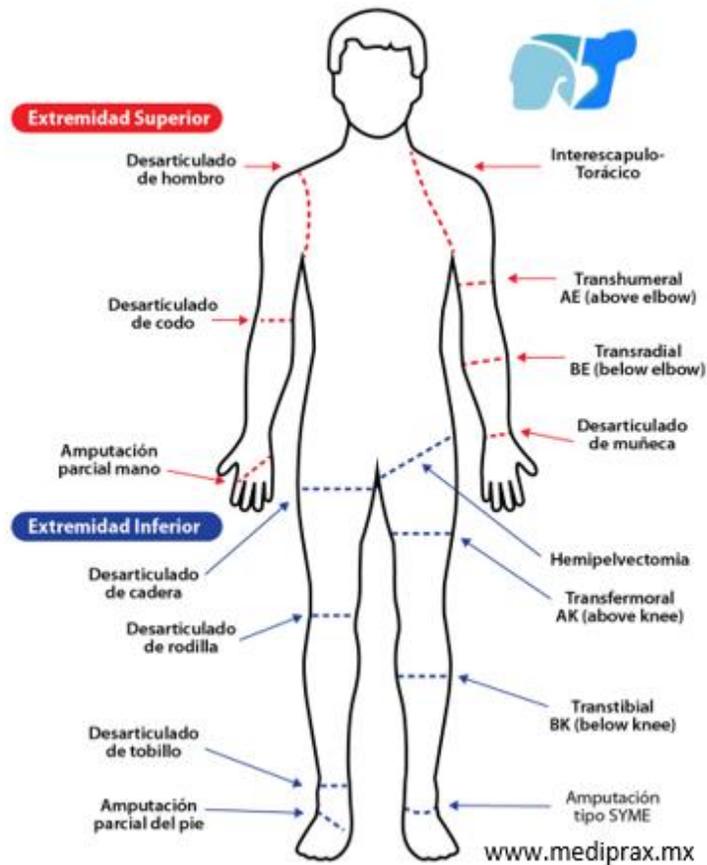


Imagen 19. Niveles de amputación.
Imagen tomada de Mediprax. [11]

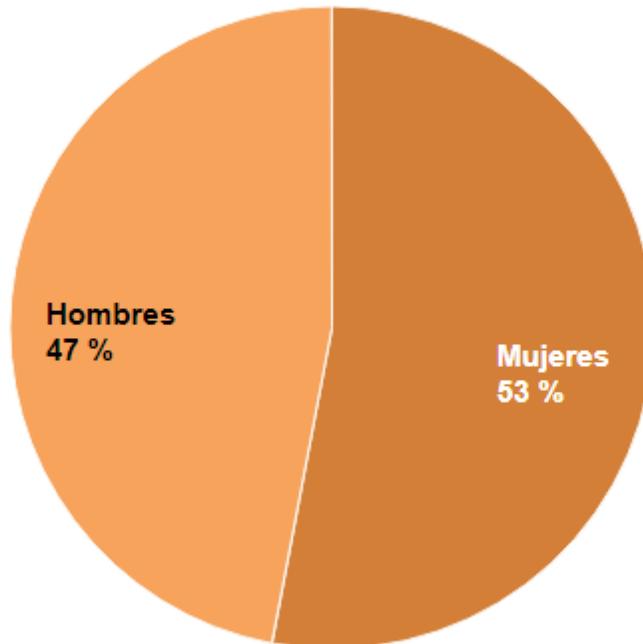
2.2 Discapacidad en México

De acuerdo con el *Censo de Población y Vivienda 2020* [12], realizado por el INEGI, en México hay 6,179,890 personas con algún tipo de discapacidad, que representa el 4.9% de la población del país.

Cabe mencionar que, el 47% de las personas con discapacidad son hombres, mientras que el 53% son mujeres.

Para llegar a esta cifra, el INEGI considera a personas con discapacidad a aquellas que tienen dificultad para realizar ciertas actividades básicas. Por ello, se clasifican en 6 grupos principales.

Mujeres y hombres con discapacidad 2020



Gráfica 1. Porcentajes de discapacidad
Imagen tomada de Cuéntame INEGI, 2020. [12]

➤ Caminar, subir o bajar.

Si una persona tiene dificultad para moverse, caminar o subir escaleras debido a la falta de una pierna, se considera parte de este grupo. También se incluyen a las personas que no pueden mover las piernas o tienen dificultad para moverlas y necesitan una silla de ruedas u otro aparato.

➤ Ver.

Se consideran a personas que tienen pérdida total de la vista o a los débiles visuales.

➤ Oír.

Se incluyen a personas que no pueden oír o que presentan debilidad auditiva.

➤ Hablar o comunicarse.

Las personas que tienen dificultad para comunicarse con los demás.

➤ Recordar o concentrarse

Personas que presentan dificultades para aprender una nueva tarea o tienen problemas para recordar información.

➤ Dificultad para bañarse, vestirse o comer.

Personas que tienen problemas para realizar tareas de cuidado personal.

En la siguiente gráfica se representan los porcentajes correspondientes a cada grupo.



Gráfica 2. Discapacidades en Mexico
Imagen tomada de Cuéntame INEGI, 2020. [12]

2.3 Prótesis de miembro superior

Una prótesis es un elemento artificial adaptado al cuerpo que tiene como objetivo reemplazar alguna parte del cuerpo o ayudar a recuperar parte de una función motora perdida.

El origen de las prótesis surge a lo largo de la antigua cultura egipcia, en donde únicamente se buscaba suplir la ausencia de la extremidad, siendo fabricadas en madera.

En la siguiente imagen, podemos observar hallux tallado en madera, siendo hallado en una momia egipcia.



Imagen 20. Prótesis egipcia
Imagen tomada de BBC Mundo, 2017. [13]

Siguiendo la línea temporal hasta el año 1509, el caballero Gotz Von Berlichingen mandó a fabricar una prótesis, que sería construida en hierro, con un peso estimado de 1.4[Kg], diseñada para combate, con el objetivo de poder empuñar una espada o una lanza.



Imagen 21. Protesis Gotz Von Berlichinguen
Imagen tomada de Pardo, 2019. [14]

En el siglo XVII, Ambroise Paré diseñó la primera prótesis móvil, que era accionada por engranajes. Su función principal era el poder sujetar objetos livianos.



Imagen 22. Prótesis de Ambroise Paré
Imagen tomada de The History Notes, 2011. [15]

Tipos de prótesis

El avance de la tecnología se ha visto reflejado en esta rama, teniendo una gran variedad de prótesis, desde productos cuyo único objetivo es cumplir una función estética y que pueden llegar a ser indistinguibles de un brazo natural, hasta prótesis que realizan movimientos bastante precisos

Actualmente el desarrollo de prótesis sigue en aumento día con día, teniendo principalmente los siguientes tipos de prótesis en el mercado:

2.3.1 Prótesis Estética

La prótesis estética, está diseñada para reemplazar el miembro superior o parte de este, teniendo como principal propósito que la estética sea bastante resaltante.

Usualmente son fabricadas con polímeros rígidos envueltos en silicona o látex, para que pueda dar apariencia de una piel natural.

Algo importante de estas prótesis es que no poseen movilidad y que suelen ser costosas. La empresa *Dianceht* [16], se dedica a hacer prótesis estéticas y funcionales, que son fabricadas con silicón. Para ello realizan un modelo prácticamente idéntico en dimensiones a la extremidad sana del paciente, incluyendo el tono de pigmentación.

Una prótesis completa de mano ronda los \$6,000 USD, mientras que una completa de brazo cuesta \$11,000 USD.



Imagen 23. Prótesis estética para mano.

Imagen tomada de Dianceht. [16]



Imagen 24. Prótesis completa de brazo
Imagen tomada de Dianceht. [16]

2.3.2 Prótesis Mecánica

Su funcionamiento se basa en aprovechar movimientos del cuerpo, para dar movilidad a la prótesis. Usualmente en este tipo de prótesis se utiliza un arnés conectado al cuerpo, pero actualmente algunos modelos de prótesis fabricadas en manufactura aditiva, no requieren uso de arnés, ya que, a partir del movimiento, generalmente de flexión, de una articulación, accionan la prótesis.

A continuación, se muestra una prótesis para nivel de amputación de desarticulación de hombro. Mediante un arnés conectado al cuerpo y a través de movimientos del cuerpo, se abren y cierran las pinzas, debido a la tensión ejercida en los cables.



Imagen 25. Prótesis Mecánica
Imagen tomada de García Ferriz Ortopedia. [17]

Otro tipo de prótesis mecánica que se encuentra en el mercado, son prótesis diseñadas para pacientes con nivel de amputación interfalángica proximal o metacarpofalángica. En donde un mecanismo conectado al muñón recrea el movimiento natural haciendo uso de la parte restante del dedo.

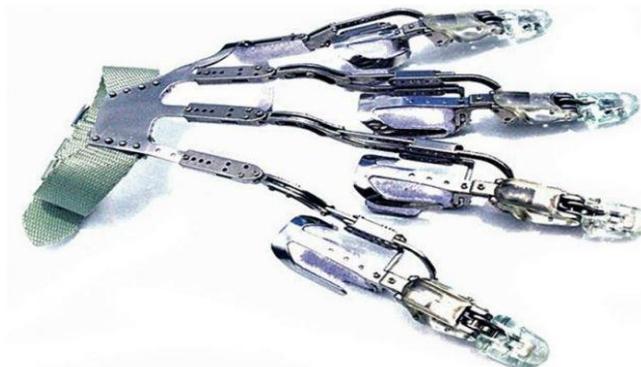


Imagen 26. X-Finger
Imagen tomada de Didrick Medical Inc. [18]

Para una amputación parcial de mano, la siguiente prótesis desarrollada por la empresa *P4H Bionics* [19], fabricada en manufactura aditiva, abre y cierra las falanges mediante el movimiento de la muñeca, ya que los cables se tensan, dando movimiento a los dedos.



Imagen 27. Prótesis Biomecánica 3D
Imagen tomada de P4H Bionics. [19]

Para un nivel de amputación de desarticulación de muñeca, la prótesis de la imagen 28, es accionada mediante el movimiento de flexión y extensión del codo.



Imagen 28. Prótesis para desarticulación de muñeca
Imagen tomada de El país, 2019. [20]

2.3.3 Prótesis Mioeléctrica

La prótesis mioeléctrica retoma las bondades de la estética y la mecánica. Se realizan diseños que usualmente son bastante semejantes a una mano, debido a que ya se incluyen dedos, cuyo funcionamiento está vinculado al uso de electrodos o sensores mioeléctricos que captan las señales eléctricas generadas por las contracciones musculares del muñón.

Actualmente en el desarrollo de prótesis de miembro superior se aplica inteligencia artificial y procesamiento de datos, para el desarrollo de nuevos e innovadores productos.

El fabricante de prótesis Ottobock desarrolló el modelo “*Bebionic*”, que utiliza inteligencia artificial, permitiendo una mejor conexión entre el paciente y la prótesis. Este modelo, puede ser utilizado por pacientes con un nivel de amputación transradial hasta transhumeral.

Para guardar las señales eléctricas provenientes del muñón, se coloca un brazalete de electrodos, para posteriormente ser almacenadas e interpretadas como indicadores de movimiento.

El paciente se somete a un entrenamiento, con el propósito de almacenar todas las señales provenientes. Después de esta etapa, la prótesis es entregada al paciente y de esta manera, la prótesis ya reconocerá las señales provenientes y actuará de acuerdo con los datos almacenados.



Imagen 29. Mano Bebionic
Imagen tomada de Ottobock. [21]

El costo de estas prótesis es bastante elevado, superando fácilmente la cantidad de \$600,000 MXN, por ello el acceder a esta tecnología es poco rentable debido a los precios manejados.

Con esta situación, en México comenzaron a desarrollarse estas prótesis, buscando optimizar los costos.

Una de las prótesis biónicas de miembro superior completo desarrollada en el país, fue fabricada y patentada por *Probionics*.

De igual manera, su funcionamiento consiste en captar por medio de electrodos, las señales eléctricas producidas por las contracciones musculares en el muñón, en donde el número de contracciones realizadas por el usuario, será un movimiento diferente.



Imagen 30. Brazo Biónico - Probionics
Imagen tomada de Notimex Especial, 2018. [22]

Otra alternativa para optimizar los costos y el peso de las prótesis, es el uso de la manufactura aditiva, donde se pueden obtener productos de buena calidad. En México, la empresa *P4H Bionics* [19], se dedica a fabricar prótesis mioeléctricas usando la técnica de Modelado por Deposición Fundida.



Imagen 31. Prótesis Biónica
Imagen tomada de P4H Bionics. [19]

Capítulo 3

Diseño conceptual y de configuración

3.1 Especificaciones de diseño

De acuerdo con la metodología de *Pugh [23]*, debemos partir de una necesidad para iniciar el proceso de diseño y con ello garantizar que el producto deberá satisfacer las necesidades del usuario, para que pueda entrar al mercado.

Se seleccionaron las especificaciones de diseño que son aplicables a este proyecto, dadas las circunstancias y objetivos planteados.

➤ Funcionamiento

Los dedos se flexionan y extienden partiendo de la posición de reposo mencionada en el capítulo 1. Asimismo, el pulgar se opondrá hacia el dedo medio e índice.

➤ Ambiente

El proyecto se realizó en la CDMX, siendo las condiciones climáticas:

- Rango de temperatura: 16°C a 25 °C
- Presión atmosférica: 73 KPa
- Rango de humedad relativa: 27% a 93%

Por ningún motivo el prototipo puede ser sumergido en líquidos, ya que no está diseñado para esta condición. Pero puede ser limpiado con un paño húmedo.

El prototipo debe ser lo suficientemente resistente para realizar movimientos que ejerce la mano en la vida cotidiana. Ejemplo: Saludar, sujetar objetos de máximo 600 g de peso, etc.

➤ Tiempo de vida

El modelo funcional desarrollado en esta tesis, no será conectado a un socket ni tampoco será utilizado por algún paciente.

➤ Instalación y mantenimiento

Para la instalación y mantenimiento se requerirán herramientas básicas, por ello se requiere contar con conocimientos básicos de electrónica y mecánica. El mantenimiento consistirá en revisar tornillería en general y lubricar con aceite de máquina, el sistema de transmisión del prototipo.

➤ Facilidad de manufactura

La mayoría de las piezas serán fabricadas en manufactura aditiva.

En cuanto a los motores y baterías, se utilizan componentes existentes en el mercado y serán fáciles de adquirir en plataformas digitales.

➤ Tamaño

Las medidas serán aproximadas a las medidas de un mexicano promedio adulto, de 24 a 50 años.

➤ Peso

El prototipo no deberá exceder un peso de 650g

➤ Ergonomía

Las dimensiones de la prótesis serán similares a las medidas antropométricas del usuario y los movimientos que realizará (agarre de precisión y agarre trípode), permitirán realizar actividades similares a las que se realizan con una mano natural.

➤ Calidad y confiabilidad

El prototipo deberá cumplir con las especificaciones antes mencionadas para tener ser un producto con el desempeño esperado por los usuarios.

3.2 Diseño Conceptual

Para cumplir las especificaciones de diseño mencionadas anteriormente, se deben seguir los siguientes puntos:

1. Generar conceptos que den soluciones a los requerimientos del prototipo.
2. Evaluar dichas soluciones, para seleccionar los conceptos que satisfagan las especificaciones de diseño anteriormente mencionadas.

A continuación, se muestra el diagrama de funcionamiento del prototipo.

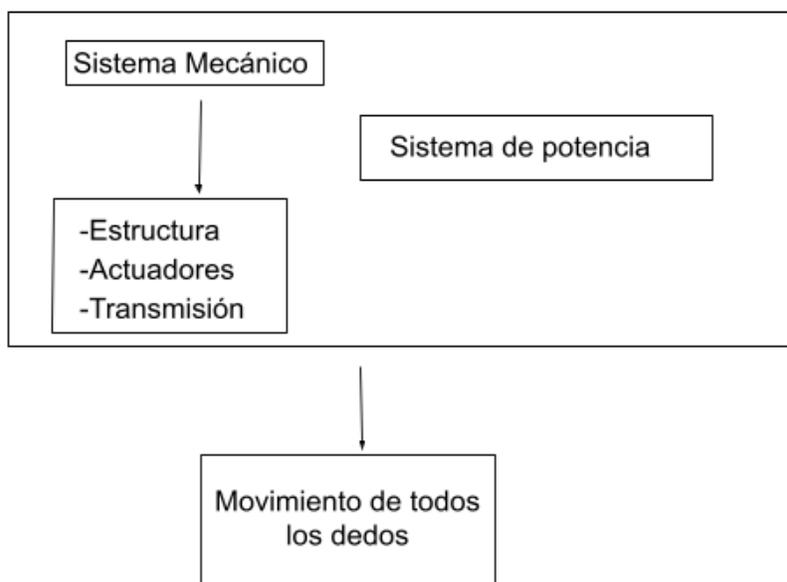


Imagen 32. Diagrama de funcionamiento del prototipo

3.2.1 Sistema mecánico

El sistema mecánico está conformado por tres elementos, que serán de soporte, generación y transferencia de movimiento.

Estructura de soporte

El primer elemento del sistema mecánico es la estructura, cuyas funciones principales son el soporte y protección de las piezas físicas que conforman el prototipo.

El material empleado para el sistema de soporte debe ser de baja densidad y alta resistencia mecánica, por ello a continuación se mencionan algunos materiales que cumplen con estas características.

Fibra de carbono

Está formada por pequeñas fibras de 50 a 60 micras de diámetro, que a su vez se conforman de átomos de carbono unidos entre sí en cristales que son alineados al eje longitudinal de la fibra, obteniendo una alta resistencia y baja densidad.

La fibra de carbono puede ser *Turbofrática*, que es derivada del poliacrilonitrilo o bien *grafítica*, derivada de la brea de mesofase.

La fibra de carbono se emplea en la industria automovilística, en partes de aeronaves, piezas de barcos, material deportivo, prótesis, equipos de seguridad, etc. O bien en el refuerzo de otros polímeros, para obtener mejores propiedades.

Resistencia a la Tensión	3.8 [GPa]
Módulo de elasticidad	228 [GPa]
Densidad	1.81 [g/cm ³]

El precio de piezas fabricadas en fibra de carbono es elevado, ya que, desde la obtención de material, deben seguirse diversos tratamientos térmicos de carbonización y oxidación, además de agregar diferentes compuestos orgánicos de la familia de los éteres, con el fin de crear la estructura molecular hexagonal y color negro característico de la fibra.

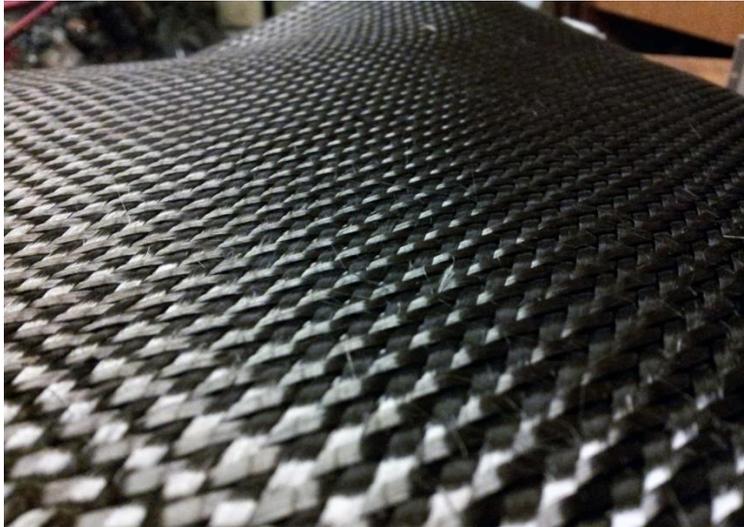


Imagen 33. Fibra de Carbono
Imagen tomada de Barta, 2018. [26]

Fibra de vidrio

Es un material compuesto por filamentos de dióxido de silicio, obtenidos al hacer fluir vidrio fundido a través de un espinerette. Los hilos formados se entrelazan hasta formar una malla flexible, que, al ser combinada con resina y catalizador, obtiene una gran resistencia, además de ser un aislante eléctrico y térmico.

Existen diversos tipos de fibra de vidrio, pero la más utilizada es el tipo E, teniendo las siguientes propiedades:

Resistencia a la tensión	3400 [MPa]
Resistencia a la compresión	1080 [MPa]
Densidad	2.6 [g/cm ³]

La fibra de vidrio es utilizada en el sector automotriz para la fabricación de piezas, además también tiene uso en la industria de bebidas, industria química, refrigeración, esto debido a las características aislantes que tiene.



Imagen 34. Fibra de vidrio
Imagen tomada de EcuRed. [28]

Nylamid

Es un polímero proveniente de la familia poliamidas que presenta buenas propiedades mecánicas, térmicas, eléctricas y resistencia al desgaste.

Usualmente es aplicado en la industria para sustituir piezas de acero que están expuestas al desgaste, ya que por su gran maquinabilidad, pueden fabricarse piezas complejas como engranes, poleas, cojinetes, ruedas, guías de desgaste, etc.

La producción y uso de este polímero genera un gran impacto en el medio ambiente, ya que es producido mediante combustibles fósiles, generando gases de efecto invernadero. Además, es resistente a la corrosión ambiental, por ello no es biodegradable, tardando de 100 a 500 años en degradarse, pero en este proceso, contaminan suelo, agua y aire, debido a que suelen ser tóxicos.

El Nylamid presenta una gran resistencia al impacto, auto lubricación, reducción de ruido, bajo peso y un coeficiente de fricción menor al de otros metales y polímeros.

Existen diferentes tipos de Nylamid en el mercado, siendo el más utilizado en la industria el tipo SL. Contiene partículas de bisulfuro de molibdeno y es fabricado mediante un proceso de extrusión.

Resistencia a la tensión	75.8 [MPa]
Resistencia a la compresión	96.5 [MPa]
Dureza Rockwell	R84(110)
Densidad	1.16 [g/cm ³]



Imagen 35. Nylamid SL
Imagen tomada de Midsa. [31]

ABS

Es un polímero obtenido por la combinación del acrilonitrilo, butadieno y estireno, caracterizado principalmente por su tenacidad y resistencia a impactos.

Una de las aplicaciones más importantes de este polímero es la fabricación de juguetes para niños o también es usado en algunas piezas interiores de automóviles y aviones.

Actualmente es uno de los polímeros más utilizados en FDM ya que es bastante rentable y fácil de maquinar. Sin embargo, ya se encuentran en el mercado filamentos ABS que son biodegradables, ya que el ABS de uso industrial, no es biodegradable.

La resistencia al impacto de un ABS se ve incrementada al aumentar la cantidad de butadieno, pero se ve afectada la resistencia a la tensión y al calor.

Resistencia a la tensión	29.8 a 65 [MPa]
Densidad	1.02 a 1.21 [g/cm ³]
Dureza Rockwell	R84(88 a 110)

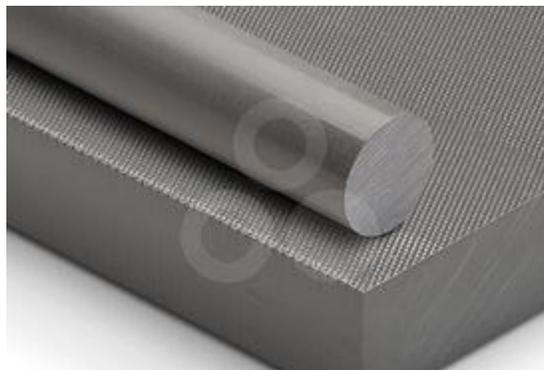


Imagen 36. Polímero ABS
Imagen tomada de Ensinger. [33]

PETG

Es uno de los copolímeros más utilizados en FDM, ya que ofrece propiedades muy similares a las de un ABS y es fácil de manufacturar al igual que el PLA.

Este material es fabricado a partir de la copolimerización del PET, que consiste en agregar ciclohexano dimetanol.

La aplicación principal se dirige a piezas que requieren cierta flexibilidad y resistencia a impactos.

Una de las características más relevantes del PETG es que no es biodegradable, pero es 100% reciclable.

Resistencia a la tensión	50 [MPa]
Densidad	1.27 [g/cm ³]
Resistencia al impacto	85 [KJ/m ²]



Imagen 37. Piezas fabricadas con PETG
Imagen tomada de Filament2print, 2019. [35]

PLA

Es un polímero biodegradable proveniente del ácido láctico.

Es uno de los materiales más populares en la manufactura aditiva ya que no requiere temperaturas elevadas para ser fundido y tiene buena estabilidad dimensional, además es obtenido a partir del maíz, reduciendo así el impacto ambiental.

Las propiedades del PLA son similares a las del PET, teniendo una baja resistencia a impactos, buena resistencia a la torsión y una dureza destacable.

Resistencia a la tensión	47 a 70 [MPa]
Resistencia a la compresión	66 a 86 [MPa]
Densidad	1.2 [g/cm ³]



Imagen 38. Piezas fabricadas con PLA
Imagen tomada de Tresdpro, 2019. [37]

3.2.2 Sistema de Actuadores

Este sistema es el encargado de producir movimiento en el prototipo. Usualmente los actuadores más utilizados en prótesis mioeléctricas de miembro superior son motores eléctricos, pero deben tenerse en cuenta las especificaciones de diseño, como son peso, costo, dimensiones, potencia y nivel de ruido.

Los actuadores que podrían cumplir algunos de estos requerimientos se muestran a continuación.

Motores de corriente continua

Son dispositivos que transforman la energía eléctrica en energía mecánica, gracias a fuerzas electromagnéticas que hacen rotar el mecanismo interno.

Se pueden encontrar en diferentes tamaños, pero una característica sobresaliente de estos motores es la potencia y velocidades que pueden entregar.

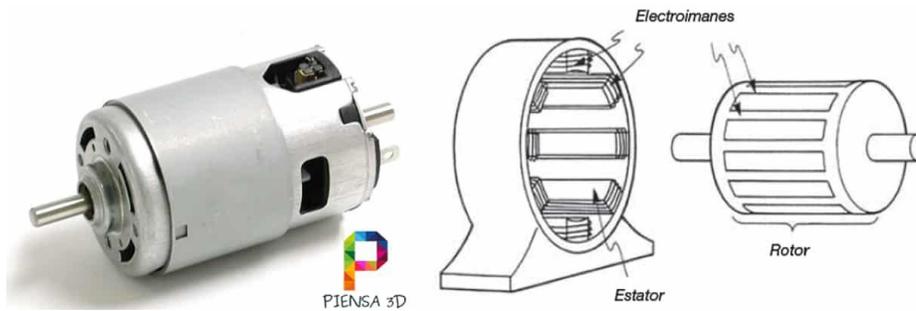


Imagen 39. Motor de corriente continua
Imagen tomada de Rodríguez, 2020. [38]

Servomotores

Son dispositivos eléctricos de accionamiento utilizados para el control de velocidad, par y posición dentro de un rango de operación.

El funcionamiento de un servomotor se basa en transformar pulsos eléctricos digitales en movimiento mecánico.

Usualmente son utilizados en sistemas que requieren un posicionamiento preciso y controlado, como por ejemplo robots quirúrgicos o en campos de automatización industrial.

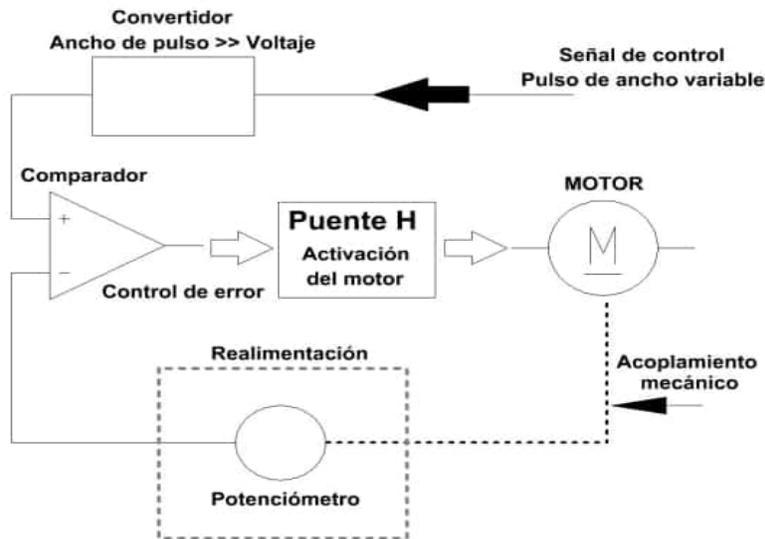


Imagen 40. Diagrama de Servomotor
Imagen tomada de CLR. [39]

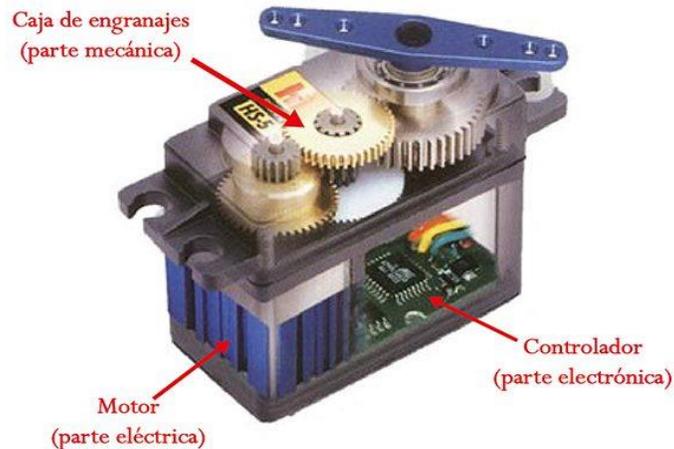


Imagen 41. Servomotor.
Imagen tomada de García, 2016. [40]

Motor a pasos

Es un motor de corriente continua cuya rotación se divide en un cierto número de pasos. Una revolución del motor se divide en 200 pasos, así cada paso hace girar 1.8° el motor. Este tipo de motores puede operar en diferentes modos de manejo, que son tres:

- Paso completo
- Medio paso
- Micro paso

Los motores paso a paso se dividen de acuerdo con la forma en que están contruidos y en el número de fases necesarias para alimentar sus bobinas.

- Imán permanente
- Reluctancia variable
- Híbrido
- Unipolares y Bipolares

Las ventajas principales de un motor a pasos es su fácil control, funcionamiento y movimientos precisos. Sin embargo, una desventaja de este motor es el consumo energético, ya que requiere energía eléctrica cuando está estático o en movimiento.

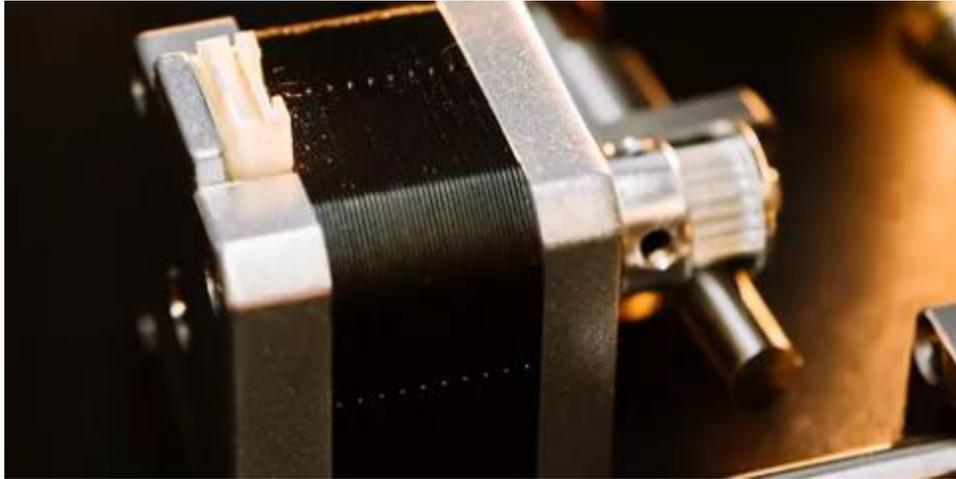


Imagen 42. Motor a pasos
Imagen tomada de TME, 2020. [41]

Motorreductores

Es un mecanismo formado por un tren de engranajes cuya función principal es regular la velocidad de un motor eléctrico.

Usualmente en este tipo de arreglos, se busca aumentar el par del motor, pero depende de la potencia y velocidad angular del motor, paso y diámetro de los engranes, para poder acoplar el tren de engranes correspondiente.

Dependiendo del uso que tenga, se pueden usar engranajes metálicos o engranes de plástico, fabricados en Nylon o Nylamid.

Las ventajas al usar este tipo de arreglos es que tienen un buen nivel de precisión y no generan muchas vibraciones en el sistema.



Imagen 43. Micro motorreductor
Imagen tomada de Pololu. [24]

3.2.3 Sistema de transmisión

Tiene la función de transmitir el movimiento que generan los actuadores hacia el mecanismo que permita realizar los movimientos deseados en el prototipo.

Algunos elementos de transmisión que podrían ser utilizados en el prototipo son:

Mecanismo de cuatro barras

Un mecanismo es un conjunto de elementos rígidos destinados a transmitir el movimiento generado por un actuador, hacia un esquema deseable.

Uno de los mecanismos más simples es el mecanismo de cuatro barras, que posee un grado de libertad, tres eslabones móviles y un elemento fijo.

El primer eslabón comúnmente llamado manivela, puede girar 360° con respecto a un eje fijo.

El segundo elemento es la biela, cuya función es transmitir hacia el balancín el movimiento de la manivela.

Finalmente, el balancín oscila un cierto ángulo α dependiente de las longitudes de los eslabones

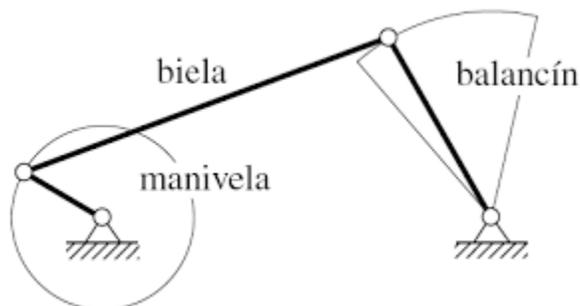


Imagen 44. Mecanismo de cuatro barras
Imagen tomada de Torres, 2009. [43]

Tren de Engranajes

Los engranajes son ruedas dentadas usadas para transmitir movimiento de un eje a otro.

Esto se consigue gracias a que los dientes de los engranajes se incrustan de forma precisa y al girar un engranaje, produce una fuerza perpendicular al radio del engranaje impulsado

Los trenes de engranajes están conformados por más de dos ruedas y son utilizados cuando la relación de transmisión que se desea obtener en dos ejes, no es suficiente lograrla con un par de ruedas, por ello se necesitan más ruedas para llegar a la relación deseada.

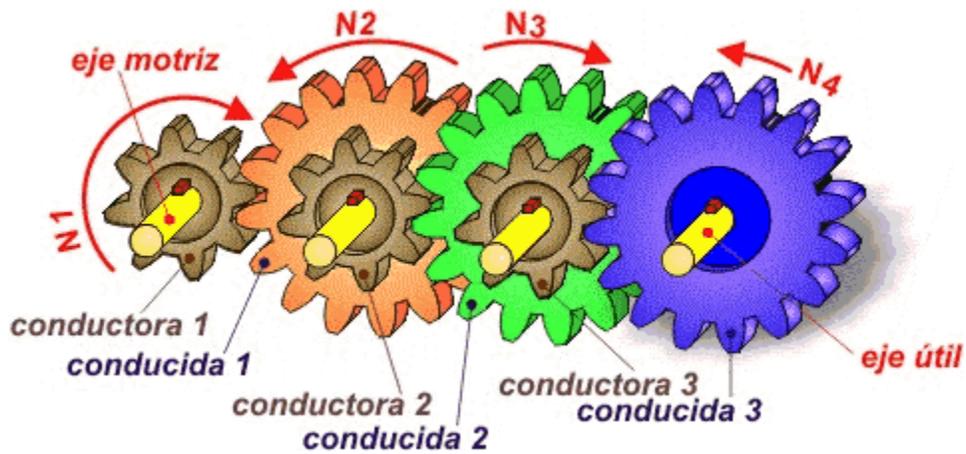


Imagen 45. Tren de engranes

Imagen tomada de MecanESO. [44]

Arreglo tornillo sin fin corona

Usado para transmitir movimiento entre ejes perpendiculares. Cuando el tornillo da una vuelta, el engranaje avanza un cierto número de dientes igual a las entradas del sinfín, ya que deben ser del mismo paso.

El engranaje no puede mover al tornillo, ya que es un mecanismo irreversible.

El tornillo sinfín se coloca en el eje de un motor eléctrico, mientras que los dientes del engrane se incrustan en los dientes helicoidales del tornillo.

engrane sin fin



tornillo sin fin

. Imagen 46. Tornillo sinfín-corona

Imagen tomada de Norton, 2011. [45]

Bandas y poleas

Una polea es una rueda montada en un eje, con una cuerda que rodea la circunferencia de la rueda.

Una banda es un elemento mecánico flexible utilizado para transmitir potencia. Se colocan sobre poleas acanaladas unidas a ejes o flechas.

Se fabrican principalmente de alambres con caucho a su alrededor, con ello se reduce el ruido, se evitan patinajes y son más resistentes.

Las bandas pueden transmitir movimiento en más de dos poleas siempre y cuando sean del mismo tipo. Si los ejes no son paralelos entre sí, la banda puede doblarse.

- Transmisión por bandas: Existe una polea motriz y una móvil, por ello se coloca la banda tensada entre las poleas.
- Transmisión por banda cruzada: Se aplica cuando el giro de los ejes tendrá que ser opuesto.
- Transmisión por banda semicruzada: Se utiliza cuando existen más de dos ejes que no están alineados de forma horizontal.

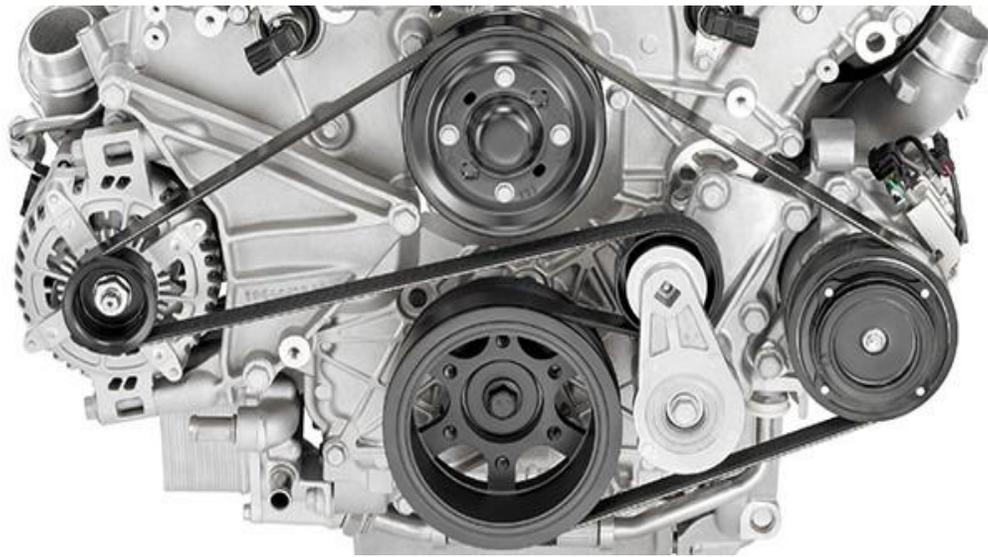


Imagen 47. Sistema de poleas
Imagen tomada de GMB. [46]

3.2.4 Sistema de potencia

El sistema de potencia es el encargado de suministrar energía a los sistemas que requieran una diferencia de potencial, para realizar los movimientos del prototipo.

Por ello se necesita una fuente de energía que sea capaz de suministrar energía eléctrica a los sistemas electrónicos y a los motores.

Baterías

Una batería es un dispositivo constituido por celdas electroquímicas que transforma la energía producida en una reacción química en energía eléctrica.

Debido a su composición, cada batería posee una carga determinada medida en amperios-hora, por ello mientras mayor sea su capacidad, podrá almacenar más carga en su interior.

Una desventaja significativa de las baterías es el impacto ambiental que generan, ya que es un gran contaminante de agua y suelo, por ello al cumplirse su ciclo vital, no deben ser tiradas a la basura y deben ser llevadas a un centro de recolección.

Existen dos tipos de baterías, que son primaria y secundaria. Las baterías primarias son aquellas que, iniciada la reacción química, no pueden volver a su estado original y con ello disminuye progresivamente la carga eléctrica. Pero cabe destacar que existen algunas baterías primarias que pueden volver a ser activadas si se reponen las sustancias químicas que la conforman.

Por otro lado, las baterías secundarias, son aquellas a las que se puede aplicar un suministro de energía eléctrica para restaurar parte de su composición química original, para volver a ser utilizadas las veces que se requieran, hasta que su tiempo útil llegue a su fin.



Imagen 48. Baterías
Imagen tomada de Ondarse, 2021. [47]

Fuente de alimentación AC-DC

Se denomina fuente de alimentación a un dispositivo capaz de convertir energía eléctrica tipo AC, en energía eléctrica tipo DC

La función que deben cumplir estos dispositivos es mantener una diferencia de potencial lo más estable posible, para suministrar energía eléctrica a dispositivos electrónicos.

Los dos tipos de fuentes de alimentación son:

- Fuente de alimentación regulada: La diferencia de potencial de salida, no puede aumentar o disminuir su valor.
- Fuente de alimentación variable: Se puede aumentar o disminuir la diferencia de potencial de salida, comúnmente en un rango de 0 a 30 v.



Imagen 49. Fuente de alimentación
Imagen tomada de Gastellou, 2020. [48]

3.3 Selección de conceptos

Matriz de decisión

Para generar una matriz de decisión, se deben evaluar los conceptos presentados en la sección (Diseño conceptual), con respecto a su cumplimiento con las especificaciones de diseño.

Los conceptos fueron calificados acorde a la siguiente escala:

- 3 = Malo
- 6 = Regular
- 9 = Bueno

A cada especificación de diseño se le asignó un porcentaje (0 - 100%) de acuerdo a la relevancia que cada especificación posee en el cumplimiento del objetivo total del diseño. Posteriormente, cada calificación se multiplicó por el porcentaje correspondiente a cada especificación y posteriormente fueron sumadas para obtener una calificación final.

Cabe destacar que, para llevar a cabo este proyecto, se cuenta con una máquina de Modelado por Deposición Fundida (MDF), de la marca *Creallity*®, modelo *Ender 3*. Por ello la facilidad de manufactura de algunos materiales puede ser buena.

Matriz 1: Material

Material	Resistencia 30%	Vida útil 20%	Facilidad de manufactura 15%	Baja densidad 25%	Facil adquisicion 10%	Total
Fibra de carbono	Calif: 9 2.7	Calif: 9 1.8	Calif: 3 0.45	Calif: 6 1.5	Calif: 9 0.9	7.35
Fibra de vidrio	Calif: 9 2.7	Calif: 9 1.8	Calif: 3 0.45	Calif: 6 1.5	Calif: 9 0.9	7.35
Nylamid	Calif: 6 1.8	Calif: 9 1.8	Calif: 3 0.45	Calif: 6 1.5	Calif: 6 0.6	6.15
ABS	Calif: 6 1.8	Calif: 6 1.2	Calif: 3 0.45	Calif: 9 2.25	Calif: 9 0.9	6.6
PETG	Calif: 6 1.8	Calif: 6 1.2	Calif: 6 0.9	Calif: 9 2.25	Calif: 9 0.9	7.05
PLA	Calif: 6 1.8	Calif: 6 1.2	Calif: 9 1.35	Calif: 9 2.25	Calif: 9 0.9	7.5

Matriz 2: Actuadores

Actuadores	Repetibilidad 9%	Bajo consumo energético 17%	vida útil 11%	Mantenimiento mínimo 8%	Tamaño 14%	Peso 13%	Torque 16%	Confiabilidad 12%	Total
Motor DC	Calif: 3 0.27	Calif: 3 0.51	Calif: 6 0.66	Calif: 9 0.72	Calif: 9 1.26	Calif: 9 1.17	Calif: 3 0.48	Calif: 6 0.72	5.79
Servomotor	Calif: 6 0.54	Calif:9 1.53	Calif: 9 0.99	Calif: 9 0.72	Calif: 3 0.42	Calif: 6 0.78	Calif: 9 1.44	Calif: 9 1.08	7.5
Motor a pasos	Calif: 9 0.81	Calif: 3 0.51	Calif: 9 0.99	Calif: 9 0.72	Calif: 3 0.42	Calif: 3 0.39	Calif: 9 1.44	Calif: 9 1.08	6.36
Motorreductor	Calif: 6 0.54	Calif: 9 1.02	Calif: 9 0.99	Calif: 9 0.72	Calif: 9 1.26	Calif: 9 1.17	Calif: 9 1.44	Calif: 9 1.08	8.22

Matriz 3: Transmisión

Transmisión	Repetibilidad 12%	Eficiencia 14%	Vida útil 11%	Mantenimiento mínimo 9%	Facilidad de manufactura 13%	Tamaño 16%	Peso 15%	Confiabilidad 10%	Total
Cuatro barras	Calif: 9 1.08	Calif: 9 1.26	Calif: 9 0.99	Calif: 9 0.81	Calif: 9 1.17	Calif: 6 0.96	Calif: 6 0.9	Calif: 9 0.9	8.07
Tren de engranes	Calif: 9 1.08	Calif: 9 1.26	Calif: 9 0.99	Calif: 6 0.54	Calif: 9 1.17	Calif: 6 0.96	Calif: 3 0.45	Calif: 6 0.6	7.05
Sin fin-corona	Calif: 9 1.08	Calif: 9 1.26	Calif: 6 0.66	Calif: 6 0.54	Calif: 6 0.78	Calif: 9 1.44	Calif: 6 0.9	Calif: 9 0.9	7.56
Bandas y poleas	Calif: 6 0.72	Calif: 6 0.84	Calif: 6 0.66	Calif: 6 0.54	Calif: 3 0.39	Calif: 6 0.96	Calif: 9 1.35	Calif: 6 0.6	6.06

Matriz 4: Potencia

Potencia	Eficiencia 30%	Vida útil 30%	Mantenimiento mínimo 10%	Confiabilidad 20%	Fácil adquisición 10%	Total
Baterías	Calif: 6 1.8	Calif: 3 0.9	Calif: 3 0.3	Calif: 6 1.2	Calif: 9 0.9	5.1
Fuente de alimentación	Calif: 9 2.7	Calif: 9 2.7	Calif: 9 0.9	Calif: 9 1.8	Calif: 6 0.6	8.7

Los elementos que tuvieron mayor puntuación en las matrices fueron:

Elemento	Imagen
PLA	

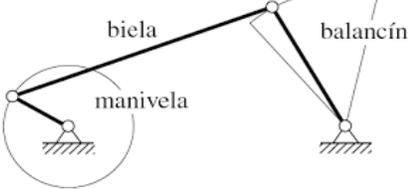
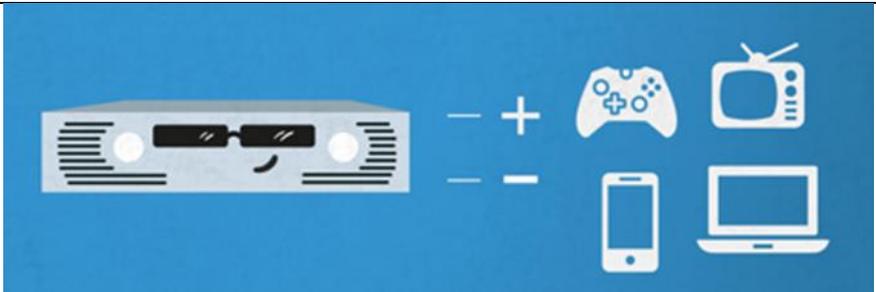
Motorreductor	
Cuatro barras	
Fuente de alimentación	

Tabla 1. Elementos seleccionados para la construcción del prototipo

3.4 Diseño de Configuración

La parte de diseño conceptual debe ser complementada con el diseño de configuración, para establecer su validez.

En el diseño de configuración debe de presentarse una o varias alternativas para la distribución de los sistemas que conformaran el prototipo.

Las propuestas pueden ser presentadas mediante un bosquejo, diagramas, dibujos o en CAD, para establecer las bases del diseño de detalle.

Propuesta de solución:

Una parte importante del sistema de transmisión, es un mecanismo que permita transformar movimientos de rotación en desplazamiento lineal, por ello se optó por utilizar el principio de tornillos de potencia; de esta manera el movimiento de rotación generado por el motorreductor, será transformado en un movimiento lineal que, a su vez, activara el mecanismo propuesto para las falanges.

Debido a que el prototipo utilizara una muñeca de desconexión rápida, se desarrolló un CAD, con el objetivo de comprobar el movimiento de los dedos y el acomodo de los actuadores.

En la siguiente figura, se muestran los siguientes componentes:

1. Mecanismo de transmisión
2. Estructura de soporte
3. Actuadores

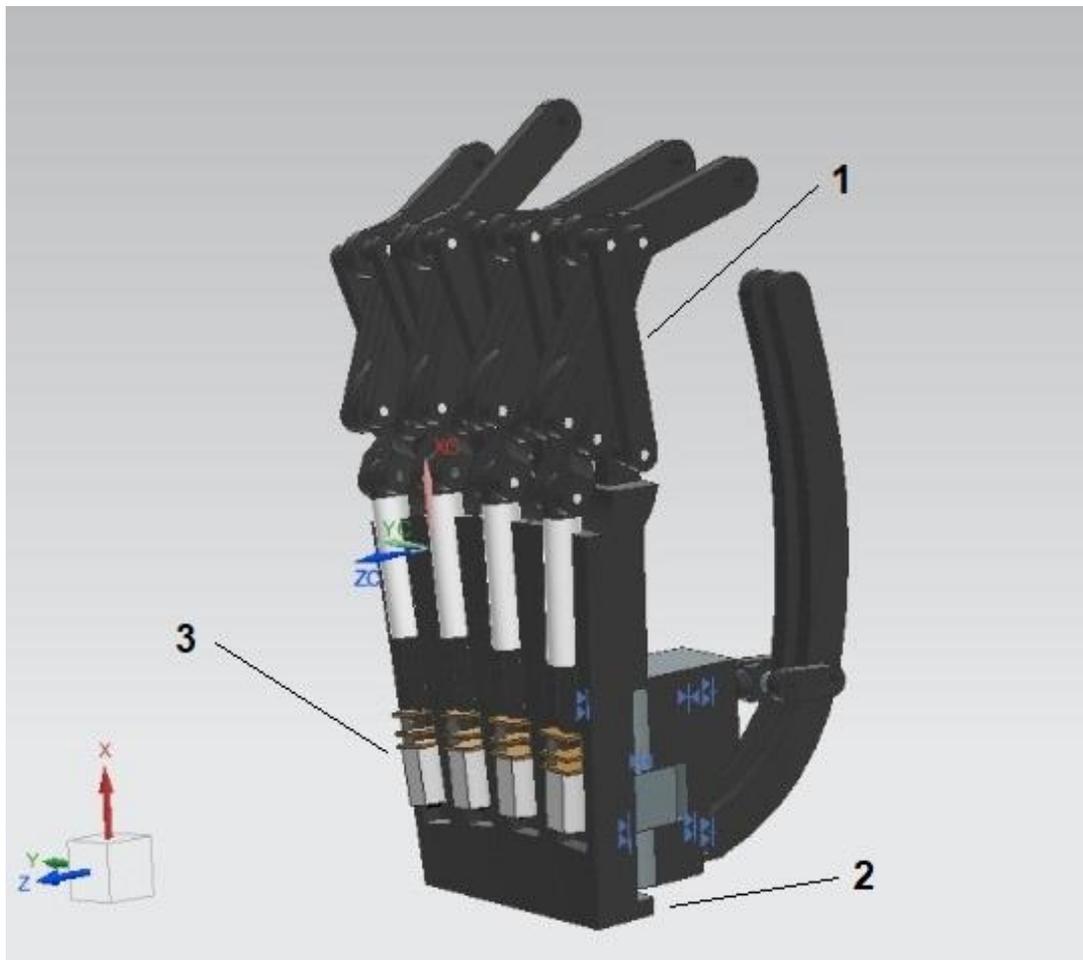


Imagen 50. Configuración del prototipo.

Capítulo 4

Diseño de detalle.

4.1 Diseño de la mano

Como ya se mencionó en el capítulo anterior, el prototipo está diseñado para realizar agarres de precisión y podrá sujetar objetos de hasta 600 g como máximo.

El prototipo contará con 5 dedos, pero para facilitar el diseño de los dedos, las falanges medial y distal serán consideradas como una sola pieza.

Cada dedo contará con un actuador, por ello se moverán de manera independiente, realizando únicamente los movimientos de flexión y extensión, con un rango máximo de 90° de la falange proximal.

El pulgar será considerado como una sola barra, pero podrá ajustarse en dos posiciones, permitiendo en la primera posición, agarre cilíndrico, de pinza, trípode y de gancho. En la segunda posición podrá realizar un agarre lateral, debido a que el pulgar podrá realizar un movimiento de pronación de 90°.

Por otro lado, la muñeca de desconexión rápida (imagen 51), utilizada en este proyecto, no permitirá movimientos de flexo-extensión y prono-supinación, debido a que solamente cumple la función de ensamblarse al socket, manteniendo una posición fija.



Imagen 51. Muñeca de desconexión rápida

Medidas antropométricas de la mano:

Antes de comenzar con el diseño del prototipo, es necesario conocer las medidas antropométricas de la mano en México, por ello se consultó el estudio de *ergonomía de miembro superior* [49], realizado en la UNAM. En este estudio, se proporcionan las siguientes medidas:

Parámetro	Longitud [cm]
14 – Espesor de la mano	3.57
19 – Longitud total de la mano	20.5
20 – Longitud palmar	10.61
21 – Longitud de los dedos	9.5
22 – Ancho de los dedos	8.7
23 – Ancho palmar	9.5
24 – Longitud falange proximal meñique	4
25 – Longitud falange proximal anular	4.9
26 – Longitud falange proximal medio	5.2
27 – Longitud falange proximal índice	4.7
28 – Longitud falange proximal pulgar	2.4
29 – Longitud falange medial meñique	2
30 – Longitud falange medial anular	2.5
31 – Longitud falange medial medio	2.6
32 – Longitud falange medial índice	2.4
33 – Longitud falange distal meñique	2
34 – Longitud falange distal anular	2.4
35 – Longitud falange distal medio	2.6
36 – Longitud falange distal índice	2.3
37 – Longitud falange distal pulgar	3.1

Tabla 2. Medidas antropométricas de la mano

Tabla tomada de Santiago, A & Valenzuela, I. 2005. [49]

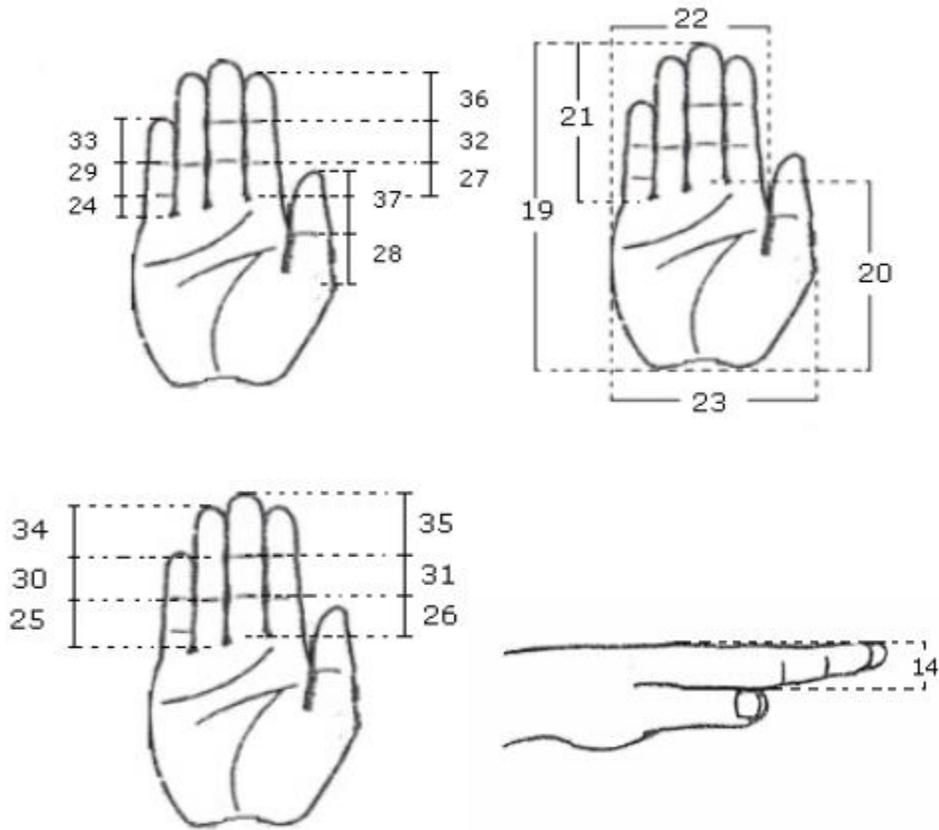


Imagen 52. Medidas antropométricas de la mano
Imágenes tomadas de Santiago, A & Valenzuela, I. 2005. [49]

Medidas del prototipo:

Para diseñar el prototipo, se establecieron las siguientes medidas:

Parámetro	Longitud [cm]
Longitud total de la mano	22
Ancho de muñeca	5.68
Longitud palmar	11
Ancho palmar	13
Espesor de la mano	4
Ancho de los dedos	9.1
Longitud de falange proximal (Aplica para los cuatro dedos mediales)	5.6
Longitud de falange distal índice	4.9
Longitud de falange distal medio	5.4
Longitud de falange distal anular	5
Longitud de falange distal meñique	4.7
Longitud del pulgar	11.5

Tabla 3. Medidas del prototipo

4.2 Diseño de los dedos.

Actualmente, las prótesis que se encuentran en el mercado, utilizan diferentes elementos de transmisión para mover los dedos, ejemplo de ello son; hilos, cables, trenes de engranes, barras, etc.

Uno de los aspectos más importantes a considerar en el diseño de los dedos, es evitar el uso de motores en las articulaciones, por ello se han desarrollado diferentes mecanismos para replicar el movimiento natural de los dedos. El mecanismo desarrollado por la *Universidad de Toronto* y la fundación *Bloorview MacMillan (TBM)*, permite articular tres falanges (proximal, medial y distal), dando movimiento a las falanges de igual manera como se mueve un dedo.

Como se mencionó en el capítulo anterior, se utilizará un mecanismo compuesto por eslabones para dar movimiento a las falanges, teniendo en cuenta que la falange medial y distal, serán conformadas por un solo elemento. Debido a esto, el mecanismo de Toronto no podría ser una solución a este problema, por ello se propuso el mecanismo que se muestra en la imagen 53.

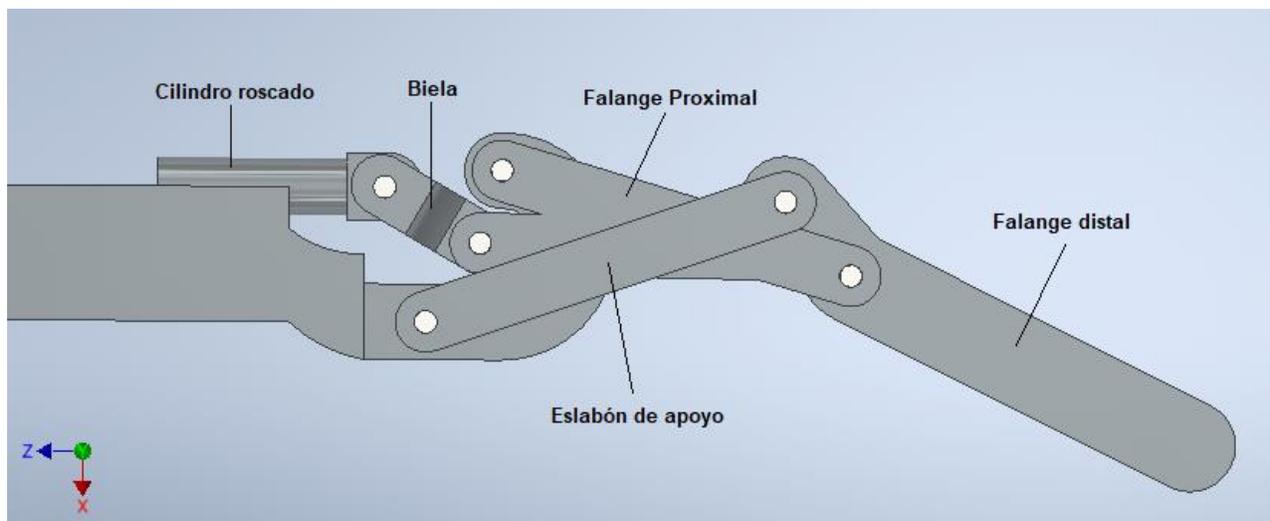


Imagen 53. Mecanismo de falanges

4.2.1 Análisis de trayectoria

Para realizar el análisis de trayectoria de un mecanismo, pueden utilizarse dos tipos de síntesis según lo establece Norton [45].

La primera de ellas es la síntesis dimensional, en donde deben determinarse las longitudes de cada eslabón para generar una trayectoria deseada, pero puede no ser una opción viable a mecanismos con más de cuatro barras.

Por otro lado, la síntesis cualitativa permite obtener de manera más directa la trayectoria de un mecanismo ya sea trazando circunferencias que representen la trayectoria de cada eslabón o bien fabricando modelos de cartón para visualizar de mejor manera el movimiento. Sin embargo, el uso de un CAD facilita esta tarea. Por ello se realizó el ensamble de las falanges haciendo uso del software CAD *Autodesk Inventor Professional 2022*®. Posteriormente se comprobó el movimiento del mecanismo, para verificar que cumpla el movimiento de un dedo facilitando así el análisis de trayectoria y en caso de ser necesario corregir alguna magnitud.

A continuación, se muestran dos imágenes de la trayectoria del mecanismo:

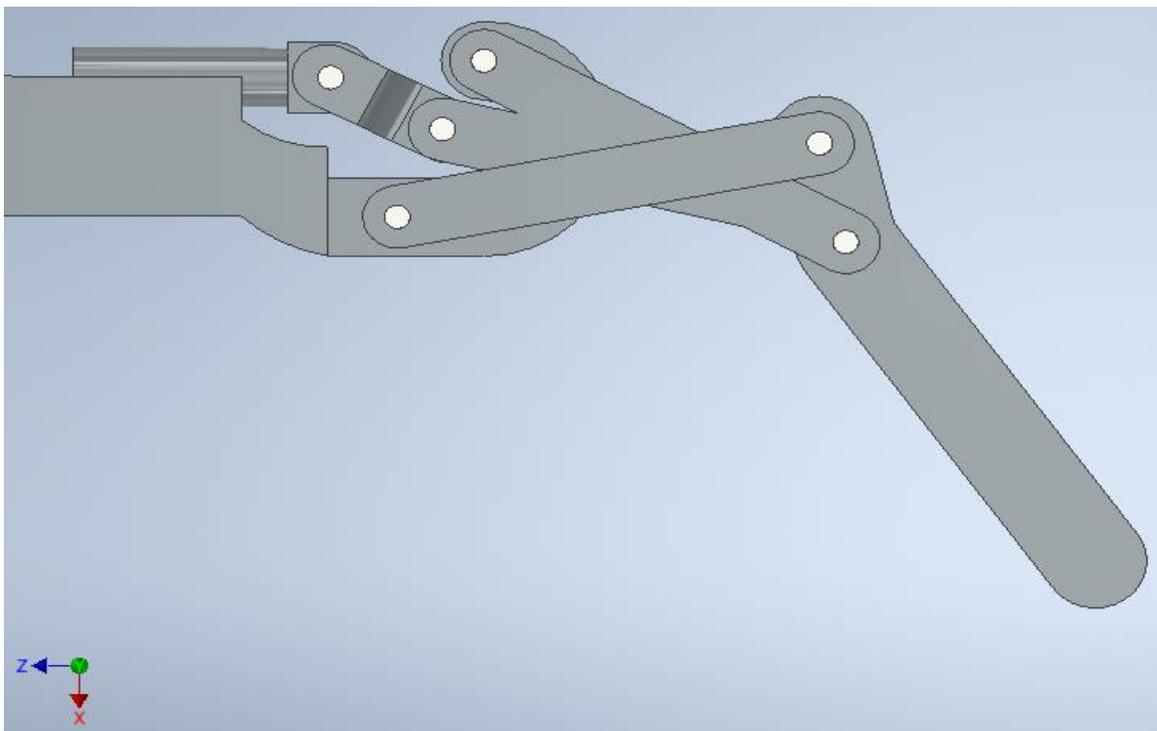


Imagen 54. Trayectoria del mecanismo

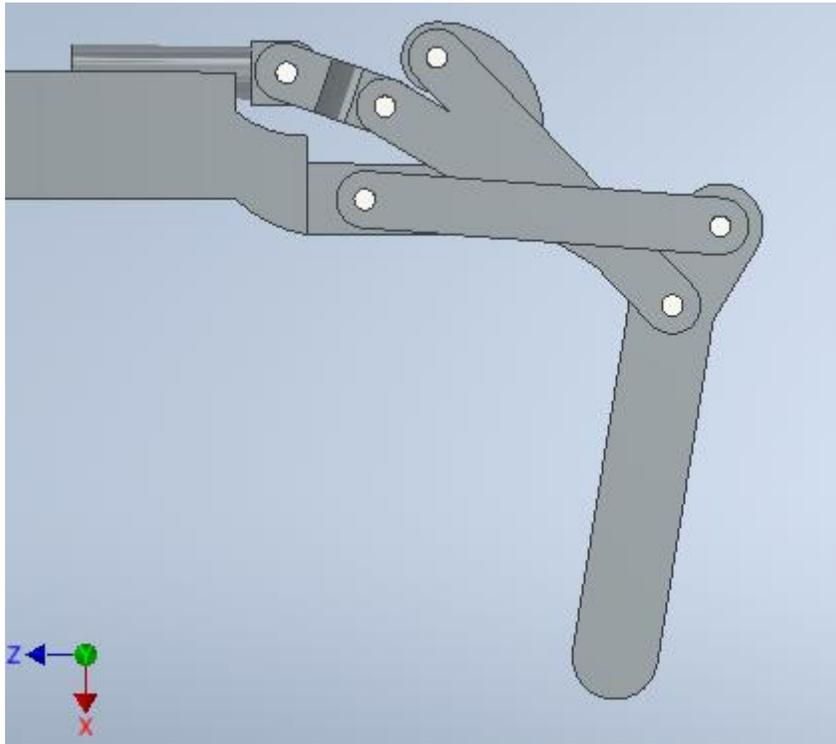


Imagen 55. Avance del mecanismo

Para realizar el análisis cinemático de un mecanismo, se deben calcular la posición, velocidad y aceleración correspondientes, por ello se utilizará el método de análisis por lazo vectorial.

Primero es necesario generar las ecuaciones de lazo; cada eslabón será representado por un vector y cada ecuación será obtenida de un lazo cerrado, es decir donde existan tres o más vectores.

Los elementos que conforman el primer lazo vectorial en el mecanismo son:

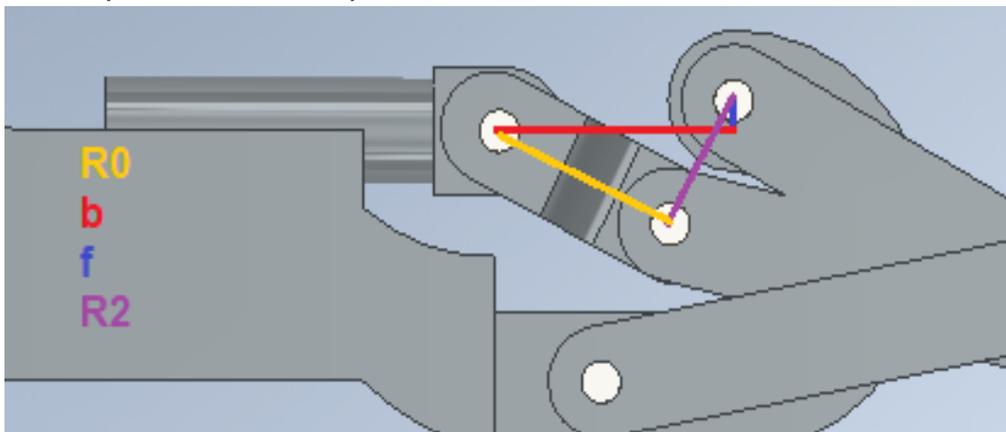


Imagen 56. Elementos del primer lazo vectorial

El primer lazo vectorial es:

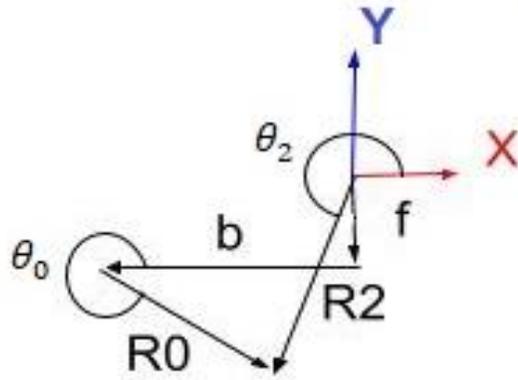


Imagen 57. Primer lazo vectorial

La ecuacion vectorial del primer lazo es:

$$\vec{f} + \vec{b} + \vec{R}_0 - \vec{R}_2 = 0$$

Los elementos que conforman el segundo lazo vectorial son:

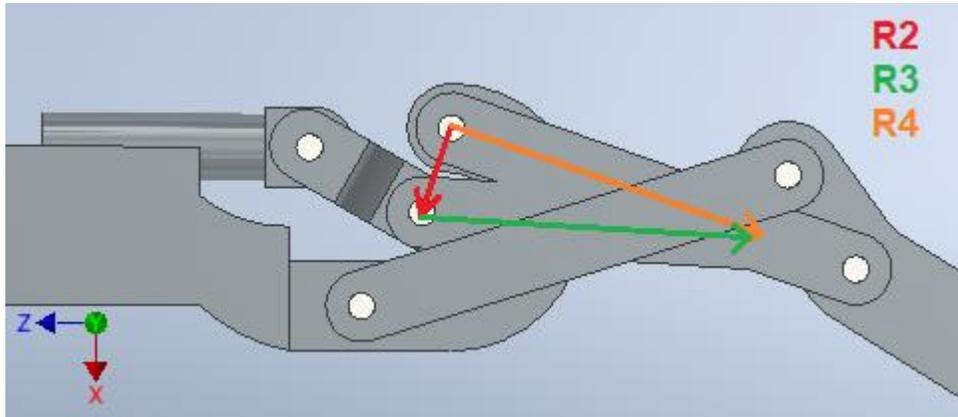


Imagen 58. Elementos del segundo lazo vectorial

El segundo lazo vectorial es:

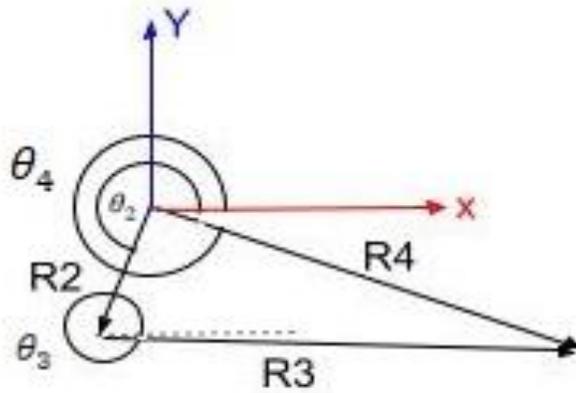


Imagen 59. Segundo lazo vectorial

La ecuación vectorial del segundo lazo es:

$$\vec{R}_2 + \vec{R}_3 - \vec{R}_4 = 0$$

Los elementos que conforman el tercer lazo son:

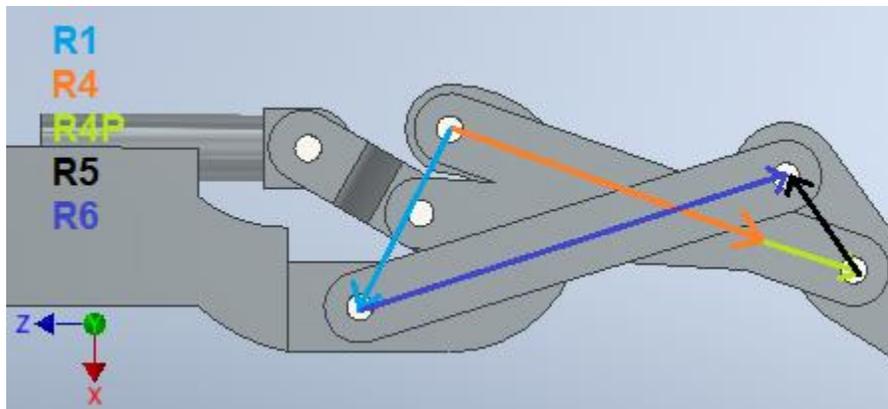


Imagen 60. Elementos del tercer lazo vectorial

El tercer lazo vectorial es:

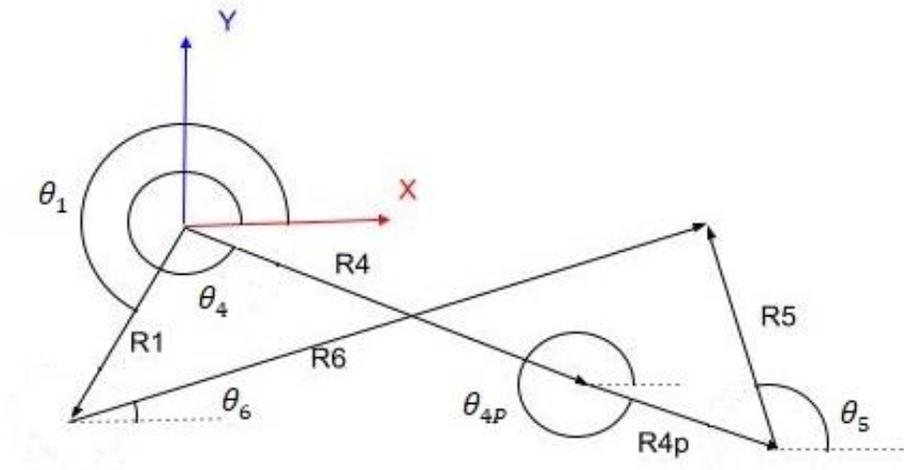


Imagen 61. Tercer lazo vectorial

Planteando la ecuación, se obtiene:

$$\vec{R}_1 + \vec{R}_6 - \vec{R}_5 - \vec{R}_{4p} - \vec{R}_4 = 0$$

Finalmente, el cuarto lazo vectorial está representado de la siguiente manera:

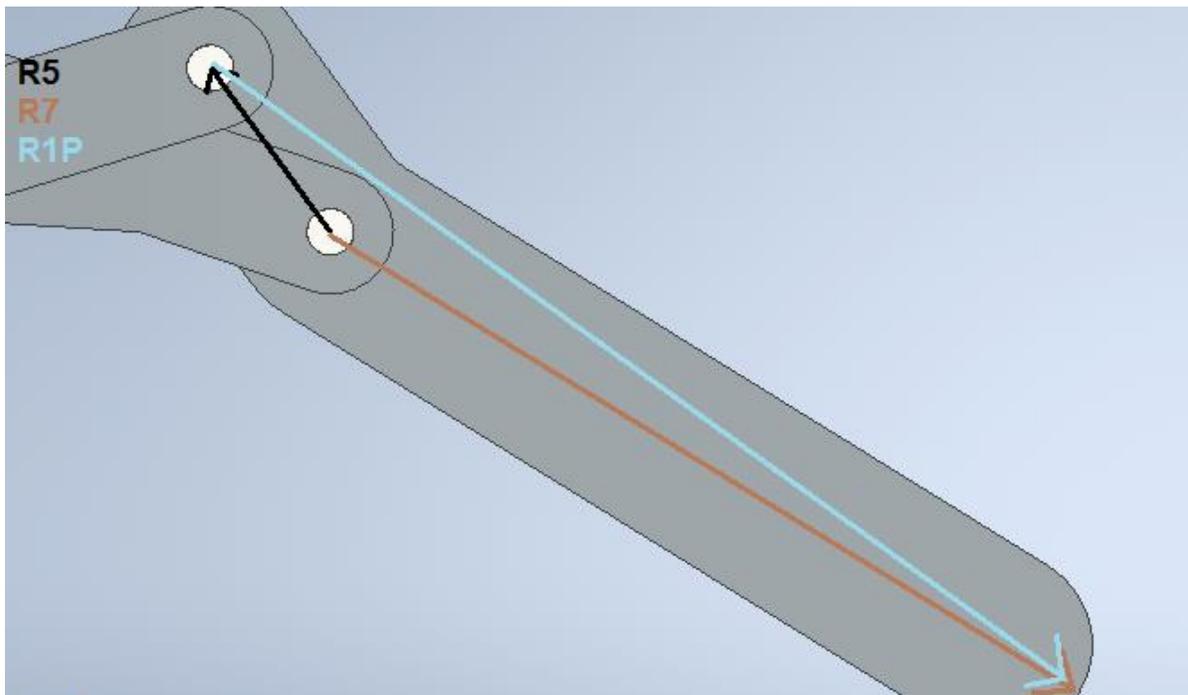


Imagen 62. Elementos del cuarto lazo vectorial

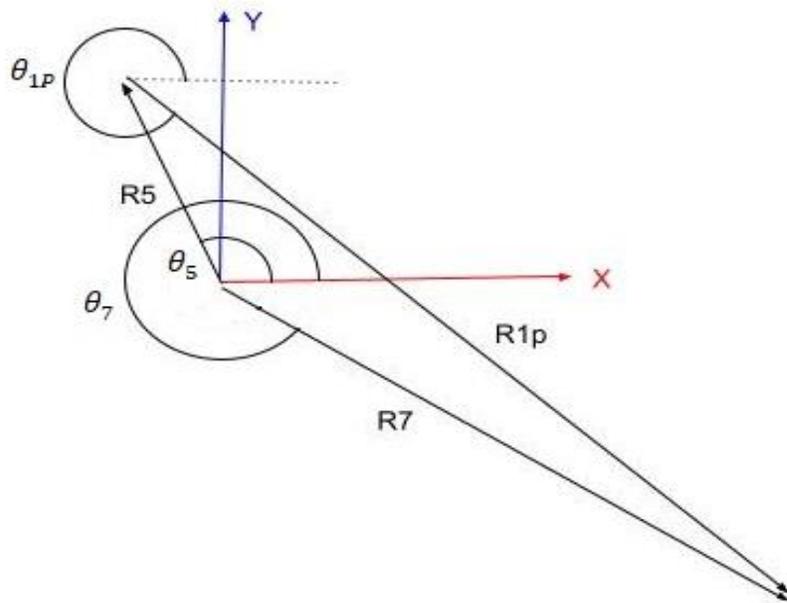


Imagen 63. Cuarto lazo vectorial

La ecuación del cuarto lazo vectorial es:

$$\vec{R}_5 + \vec{R}_{1p} - \vec{R}_7 = 0$$

Para realizar el análisis de posición se utilizó el software *Wolfram Mathematica*®, teniendo como dato de entrada el ángulo θ_2 , teniendo en cuenta que las magnitudes de los vectores no cambiarán, por ello las incógnitas en cada lazo, son los ángulos de cada barra con respecto al nodo de unión.

El vector unitario se escribió de la siguiente manera:

$$U[\theta] = \{\cos[\theta], \sin[\theta], 0\}$$

Posterior a esto, cada vector " R_n ", será la magnitud correspondiente multiplicada por el vector unitario, en función del ángulo " θ_n ", es decir:

$$\begin{aligned} R_0 &= r_0 * U[\theta_0] \\ R_1 &= r_1 * U[\theta_1] \\ R_{1p} &= r_{1p} * U[\theta_{1p}] \\ R_2 &= r_2 * U[\theta_2] \\ R_3 &= r_3 * U[\theta_3] \\ R_4 &= r_4 * U[\theta_4] \\ R_{4p} &= r_{4p} * U[\theta_{4p}] \end{aligned}$$

$$R_5 = r_5 * U[\theta_5]$$

$$R_6 = r_6 * U[\theta_6]$$

$$R_7 = r_7 * U[\theta_7]$$

Las condiciones iniciales fueron las siguientes:

$$r_1=22.3606 [mm]$$

$$r_{1p}=55.2683 [mm]$$

$$r_2=11 [mm]$$

$$r_3=36.6878 [mm]$$

$$r_4=35 [mm]$$

$$r_{4p}=13 [mm]$$

$$r_5=13 [mm]$$

$$r_6=50 [mm]$$

$$r_7=43 [mm]$$

$$\theta_1=243.4349^\circ$$

$$\theta_f=270^\circ$$

$$\theta_b=180^\circ$$

$$\theta_4 = \theta_{4p}$$

Posteriormente, se introdujeron las tres ecuaciones de los lazos cinemáticos planteadas anteriormente:

$$\vec{f} + \vec{b} + \vec{R}_0 - \vec{R}_2 = 0$$

$$\vec{R}_2 + \vec{R}_3 - \vec{R}_4 = 0$$

$$\vec{R}_1 + \vec{R}_6 - \vec{R}_5 - \vec{R}_{4p} - \vec{R}_4 = 0$$

$$\vec{R}_5 + \vec{R}_{1p} - \vec{R}_7 = 0$$

Una consideración importante en el cálculo de posición es tener un valor aproximado de los ángulos que son incógnitas en su posición inicial, ya que mediante el método *Newton-Rapson* el software hallará los valores exactos de los mismos. Pero esto no presentó mayor complicación, ya que los ángulos pudieron ser medidos en software *Inventor*®, al igual que el segmento *b*, obteniendo los siguientes valores:

$$\theta_0 = 326.06^\circ$$

$$b = 11.66 [mm]$$

$$\theta_3 = 17.4471^\circ$$

$$\theta_4 = 0^\circ$$

$$\theta_5 = 140^\circ$$

$$\theta_6 = 30.5510^\circ$$

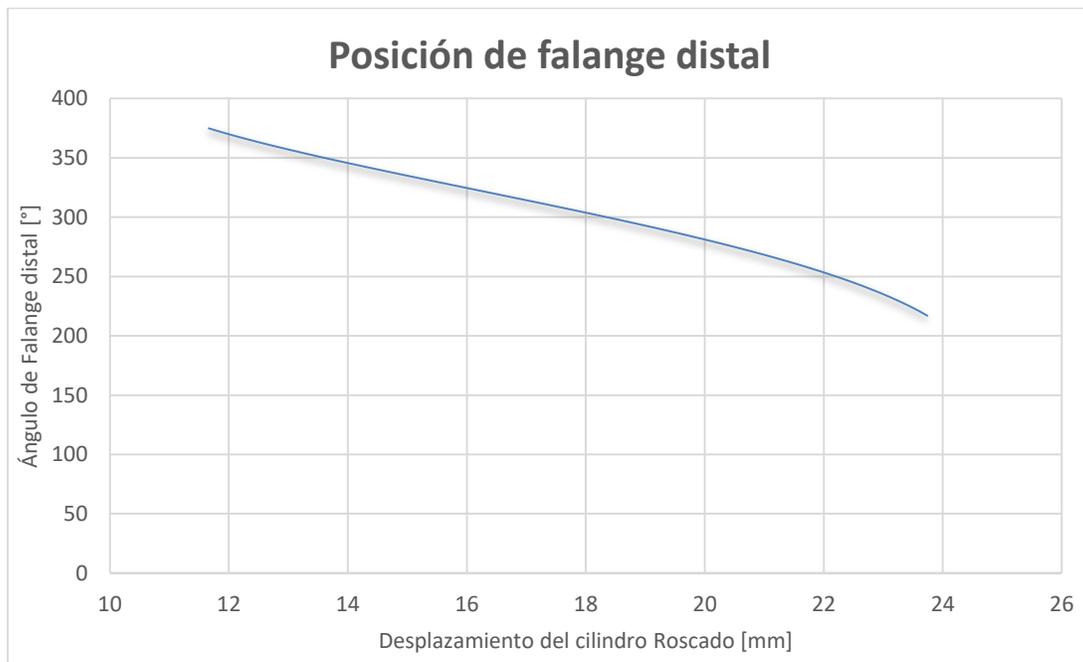
$$\theta_{1p} = 336.9449^\circ$$

$$\theta_7 = 342^\circ$$

Con estas consideraciones iniciales, se calcularon los valores de θ_n , obteniendo así la posición inicial del mecanismo.

Para calcular el resto de las posiciones, se hizo uso de un ciclo “For”, teniendo un rango de movimiento de θ_2 que va desde 270° (Posición inicial), hasta 210° (En este punto, las falanges se encontrarían cerca de la posición de puño).

La grafica de mayor relevancia es θ_2 con respecto a θ_7 , ya que esta gráfica mostrará el movimiento de la falange distal, en base al movimiento del cilindro roscado.



Gráfica 3. Posición de falange distal

4.2.2 Tornillos de potencia.

El funcionamiento de los husillos se basa en el principio de tornillos de potencia, ya que permiten transformar un movimiento de rotación proveniente de un motor o una tuerca, en desplazamiento lineal a través de un tornillo o eje roscado.

Una de las características principales de estos sistemas, es que pueden desarrollar grandes fuerzas, ya que son utilizados principalmente en prensas, gatos mecánicos o bien en los carros de desplazamiento de tornos y fresadoras.



Imagen 64. Husillo
Imagen tomada de Grupo GAES. [50]

El principio de tornillos de potencia permite calcular el par de torsión necesario, para elevar o bajar una carga aplicada a un objeto, que se encuentra unido a un tornillo.

Uno de los aspectos más importantes en el análisis de un tornillo de potencia es el tipo de rosca utilizada, ya que en el mercado existen diferentes tipos de rosca, pero las más utilizadas en tornillos de potencia son:

- Cuadrada: La característica principal de este tipo de roscas es que los filetes son cuadrados. Tienen una gran resistencia al desgaste, brindando un mayor rendimiento y eficiencia al transmitir potencia.

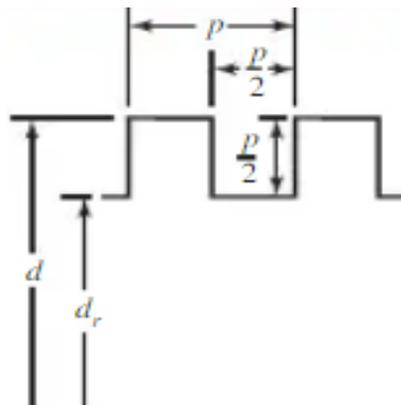


Imagen 65. Rosca cuadrada
Imagen tomada de Budynas, R & Nisbett, J. (2008). [51]

- ACME: Suelen ser las roscas más utilizadas en tornillos de potencia, ya que están normalizadas. Una de las características más importantes de estas roscas, es el filete en forma trapezoidal.

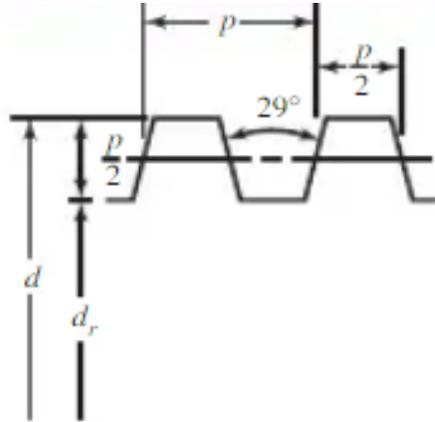


Imagen 66. Rosca ACME

Imagen tomada de Budynas, R & Nisbett, J. (2008). [51]

- Diente de sierra: Son utilizados para transmitir en un solo sentido, fuerzas de gran magnitud, ya que el filete es un trapecio rectangular.

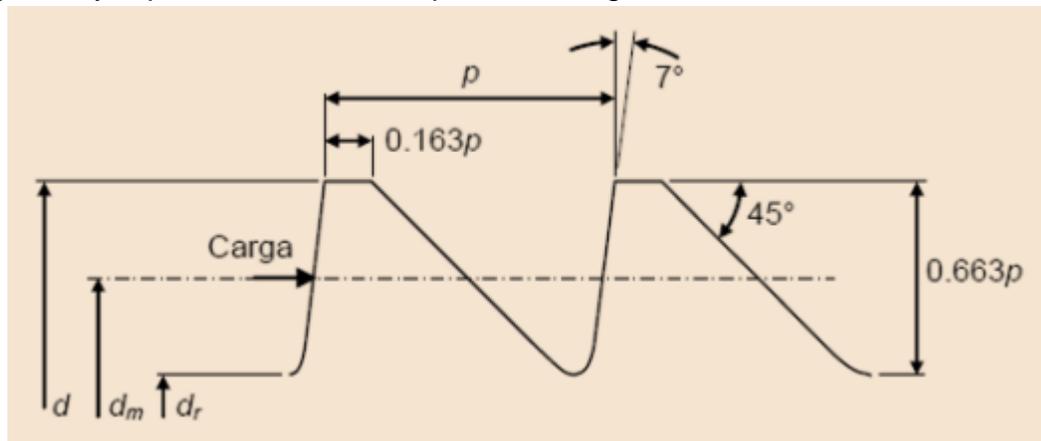


Imagen 67. Rosca diente de sierra

Imagen tomada de Castillo, F. 2018. [52]

- Whitworth: Son roscas utilizadas en el sistema inglés, caracterizadas principalmente por la forma triangular del filete y un ángulo del filete de 55°.

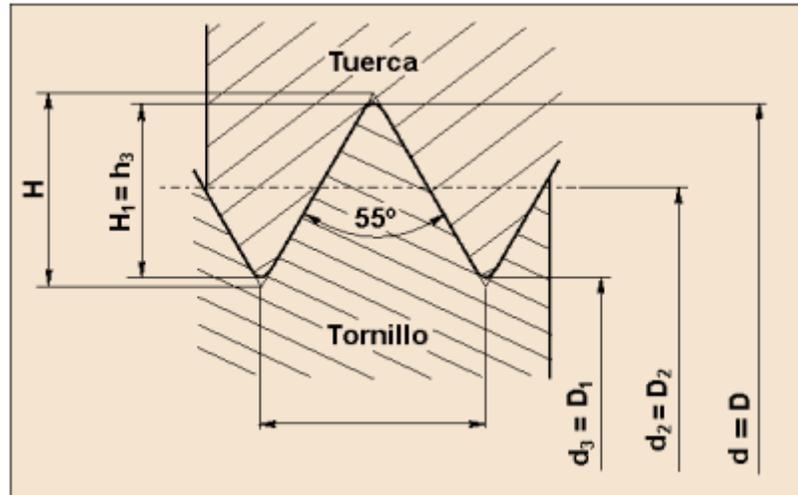


Imagen 68. Rosca whitworth
Imagen tomada de Castillo, F. 2018. [52]

En el libro *Diseño en ingeniería mecánica* [51], los autores *Budynas & Nisbett*, realizaron el análisis de fuerzas de un tornillo de potencia de la siguiente manera; Dibujaron un plano inclinado, que representa una revolución del tornillo y el ángulo de inclinación es el ángulo del filete, que puede variar dependiendo de la rosca utilizada.

Posteriormente los autores dibujaron un cuerpo que está en contacto con el plano inclinado, para posteriormente, dibujar un diagrama de cuerpo libre de la siguiente manera:

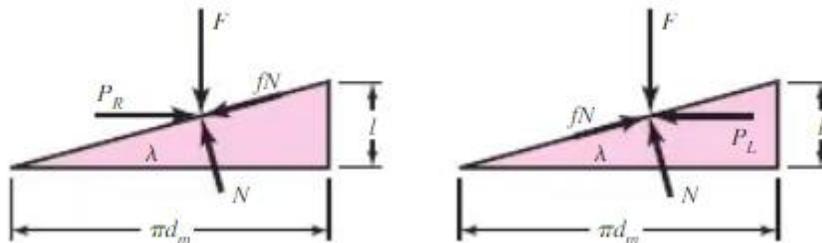


Imagen 69. Diagrama de cuerpo libre del tornillo
Imagen tomada de Budynas, R & Nisbett, J. (2008). [51]

En el diagrama de cuerpo libre de la izquierda, se presentan las condiciones para elevar una carga, mientras que, en el diagrama de la derecha, para bajar una carga.

Se desarrolla la sumatoria de fuerzas correspondiente a cada sistema, obteniendo las siguientes ecuaciones:

Para elevar la carga:

$$T = \frac{F d_m}{2} \left(\frac{l + \pi f d_m}{\pi d_m - f l} \right)$$

Para bajar la carga:

$$T = \frac{Fd_m}{2} \left(\frac{\pi f d_m - l}{\pi d_m + fl} \right)$$

T: Par de torsión

F: Carga

d_m: Diámetro medio

l: Paso del tornillo

f: Coeficiente de fricción

Para dar movimiento a los dedos, se aplicará el principio de tornillos de potencia mencionado anteriormente, por ello teniendo en cuenta que los actuadores seleccionados serán micro motorreductores de la marca *Pololu* [24], se propuso el siguiente arreglo:

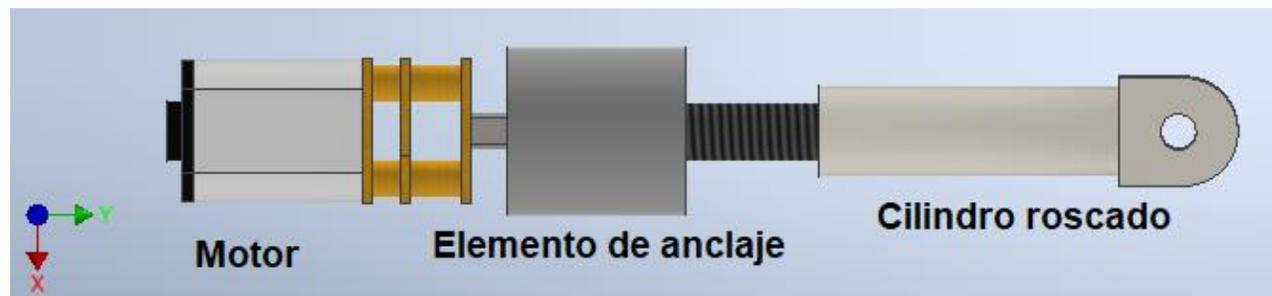


Imagen 70. Configuración para transmisión de movimiento

El motor gira y hace rotar el elemento de anclaje; En este elemento se unen el eje del motor y la cabeza del perno, transmitiendo el par y velocidad del motor.

De esta manera, el cilindro roscado se desplazará a lo largo del tornillo, dependiendo el sentido de giro del motor. Es decir, funcionara de igual manera que un actuador lineal.

Las especificaciones del perno utilizado para este proyecto son:

- Diámetro: 3/16"
- Longitud: 1"
- Paso: 1.058 [mm]
- Tipo: Alta resistencia, grado 8
- Rosca: Withworth

4.3 Diseño de la palma

Un aspecto importante para considerar en el diseño de las prótesis de miembro superior es la separación entre falanges, ya que, si se traza un eje por el centro de cada falange, convergerán en algún punto de la muñeca. Esto lo confirma *Kapandji* [8], en su libro *Fisiología articular*, estableciendo lo siguiente: “Cuando se **cierra el puño** con las

*articulaciones interfalángicas distales extendidas, los ejes de las dos últimas falanges de los cuatro últimos dedos y el eje del pulgar, exceptuando su última falange, convergen en un punto situado en **la parte inferior del conducto del pulso.***”

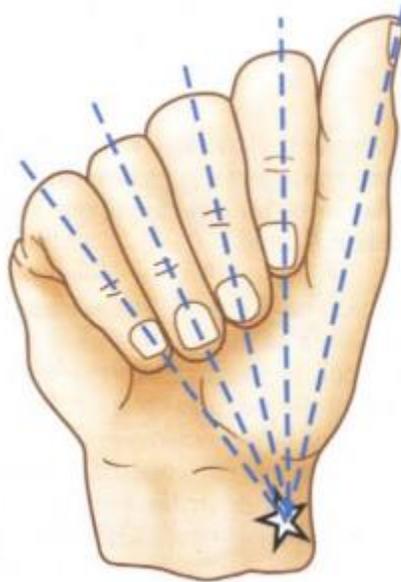


Imagen 71

Imagen tomada de Kapandji, 2006 [8]

Teniendo en cuenta este aspecto fisiológico, se trazaron ejes de forma transversal (De la misma forma que en la imagen 71), en las falanges del usuario al que corresponden las medidas del prototipo, para hallar el punto en donde convergen los ejes trazados, en base a ello, el ángulo de separación entre los ejes fue de aproximadamente 4° .

En el punto de interés, se estableció el sistema de referencia para comenzar el primer boceto en Inventor, teniendo en cuenta, la distancia del punto de convergencia y el inicio de la palma, dando un ángulo de 4° entre cada falange.

Después de trazar los ejes y teniendo en cuenta las medidas de la palma establecidas anteriormente, se realizó un primer boceto de la palma, correspondiente a la mano derecha, teniendo en cuenta una separación de 4° , obteniendo el siguiente resultado:

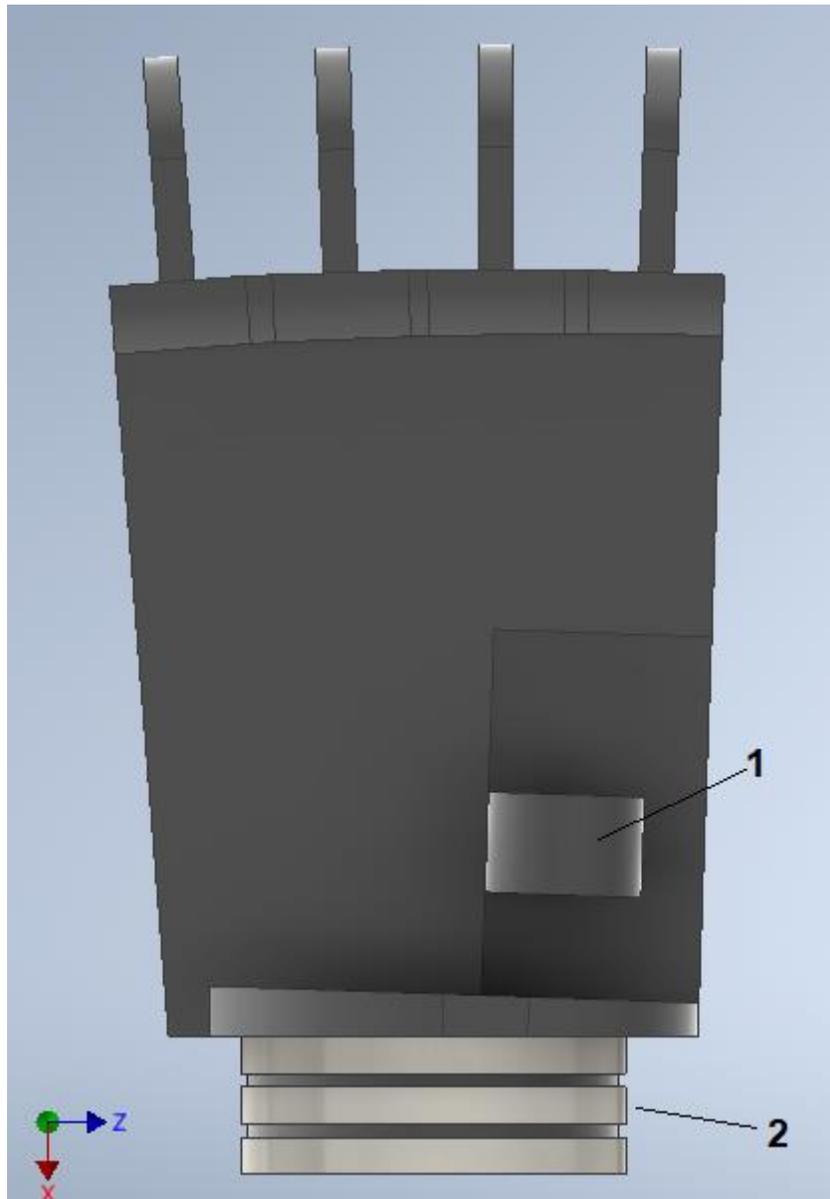


Imagen 72. Palma del prototipo.

En la imagen 72, se enumeran dos partes de la palma, que cumplirán funciones diferentes. La parte 1, permitirá el ensamble del pulgar con la palma utilizando un perno, de esta forma el pulgar podrá rotar.

Por otro lado, la parte 2, únicamente cumple la función de cubrir la muñeca de desconexión rápida, para dar una mejor apariencia al prototipo.

Teniendo en cuenta la configuración para transmitir el movimiento de los motores, se tomaron en cuenta los siguientes aspectos:

- El motor y elemento de anclaje deben estar en una posición fija.
- El perno únicamente debe girar, pero no puede desplazarse de forma lineal.
- El cilindro roscado se desplaza de forma lineal dependiendo del sentido de giro del perno.

Por ello en la palma, se optó por hacer cavidades a las medidas de cada elemento, para que, de esta manera, los componentes del sistema de actuadores permanezcan fijos y solamente permitan movimiento de rotación.

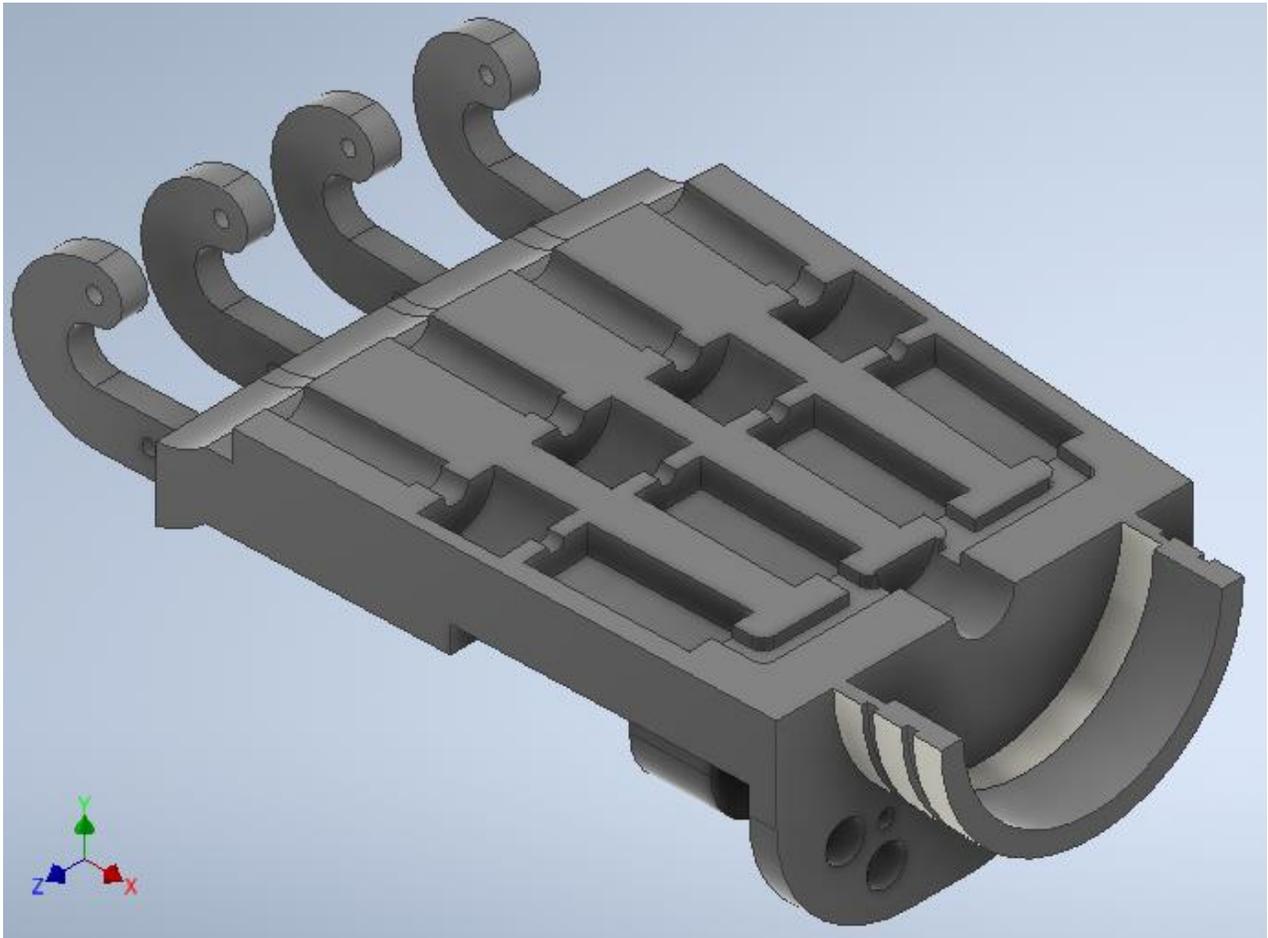


Imagen 73. Cavidades de la palma.

4.4 Diseño del pulgar

En el diseño del pulgar, se retomaron las especificaciones de diseño desarrolladas en el capítulo anterior, es decir, el pulgar será de dos posiciones. Para cambiar de posición se pensó en un sistema de bloqueo manual, utilizando un resorte de compresión.

Para dar movimiento al pulgar, se decidió utilizar la misma configuración de los otros dedos, es decir utilizar el principio de tornillos de potencia, con la excepción de que el

motor del pulgar cuenta con un eje roscado M4, por ello únicamente se debe incluir el cilindro roscado para flexionar y extender el dedo.

El dedo pulgar humano se conforma por dos falanges, pero en el prototipo se decidió que el pulgar sea únicamente de una sola falange, por ello después de hacer un primer ensamble de las falanges, se buscó una posición en la cual, los dedos índice y medio pudieran simular un agarre trípode.

Primero se diseñó una pieza de soporte que será ensamblada a la palma mediante un perno, para permitir un movimiento de rotación de 90°, con el propósito de que el pulgar pueda tener dos posiciones.

La pieza de soporte mantendrá fijo el motor, para que el funcionamiento del mecanismo pueda ser correcto.

Para dar forma a la falange del pulgar, se ensambló la pieza de soporte al igual que el cilindro roscado, en base a ello, se trazó un boceto para completar el agarre trípode, ya que los dedos índice y medio estaban en esa posición.

En las siguientes figuras, se muestran las dos posiciones del pulgar:



Imagen 74. Primera posición del pulgar



Imagen 75. Segunda posición del pulgar

4.5 Análisis de fuerzas

El prototipo será capaz de sujetar una botella de agua de 600 ml, por ello se dibujó una botella y se simuló un agarre, con el propósito de encontrar el ángulo θ_2 , para comenzar los análisis de fuerzas y encontrar el par de torsión necesario para esas condiciones.

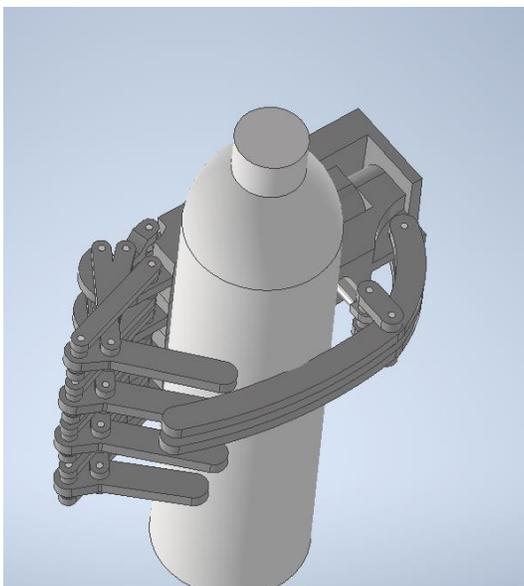


Imagen 76. Prototipo sosteniendo una botella

El ángulo de entrada θ_2 se midió en Inventor y fue aproximadamente 146° . Pero en el sistema de referencia propuesto en los lazos vectoriales, el ángulo θ_2 es de 214° . Posteriormente se tomó la posición 214 calculada por Mathematica. En base a los resultados obtenidos por Mathematica se realizó el análisis de fuerzas, teniendo como condición que cada falange debe ejercer una fuerza de 3 [N] para lograr sostener la botella.

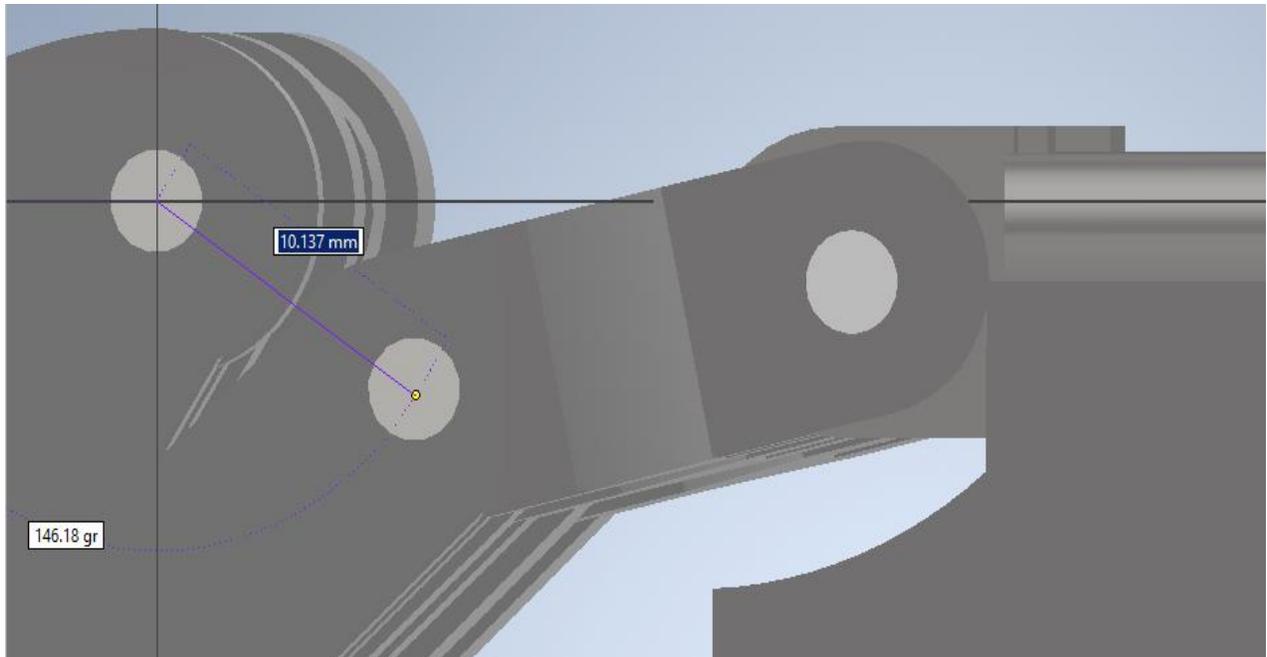


Imagen 78. Ángulo θ_2 medido en Inventor.

```
Global`SolPos
SolPos[210] = {ϑ3 → -0.742693, ϑ4 → -1.0472, b → 23.7435, ϑ0 → 6.05738, ϑ5 → 0.260429, ϑ6 → -0.373032, ϑ1p → 3.69778, ϑ7 → 3.78601}
SolPos[211] = {ϑ3 → -0.72524, ϑ4 → -1.02975, b → 23.607, ϑ0 → 6.04573, ϑ5 → 0.327007, ϑ6 → -0.346248, ϑ1p → 3.76436, ϑ7 → 3.85259}
SolPos[212] = {ϑ3 → -0.707786, ϑ4 → -1.0123, b → 23.4661, ϑ0 → 6.03416, ϑ5 → 0.39109, ϑ6 → -0.320478, ϑ1p → 3.82844, ϑ7 → 3.91667}
SolPos[213] = {ϑ3 → -0.690333, ϑ4 → -0.994845, b → 23.3207, ϑ0 → 6.02269, ϑ5 → 0.453015, ϑ6 → -0.29562, ϑ1p → 3.89036, ϑ7 → 3.9786}
SolPos[214] = {ϑ3 → -0.67288, ϑ4 → -0.977391, b → 23.1711, ϑ0 → 6.01132, ϑ5 → 0.513046, ϑ6 → -0.271591, ϑ1p → 3.9504, ϑ7 → 4.03863}
SolPos[215] = {ϑ3 → -0.655427, ϑ4 → -0.959938, b → 23.0173, ϑ0 → 6.00004, ϑ5 → 0.571399, ϑ6 → -0.248325, ϑ1p → 4.00875, ϑ7 → 4.09698}
SolPos[216] = {ϑ3 → -0.637973, ϑ4 → -0.942485, b → 22.8594, ϑ0 → 5.98886, ϑ5 → 0.628249, ϑ6 → -0.225765, ϑ1p → 4.0656, ϑ7 → 4.15383}
```

Imagen 79. Posiciones calculadas en Mathematica.

Análisis en falange distal

Se colocó el mecanismo en la posición establecida y se dibujó el DCL de la falange distal, para realizar el análisis de fuerzas correspondiente.

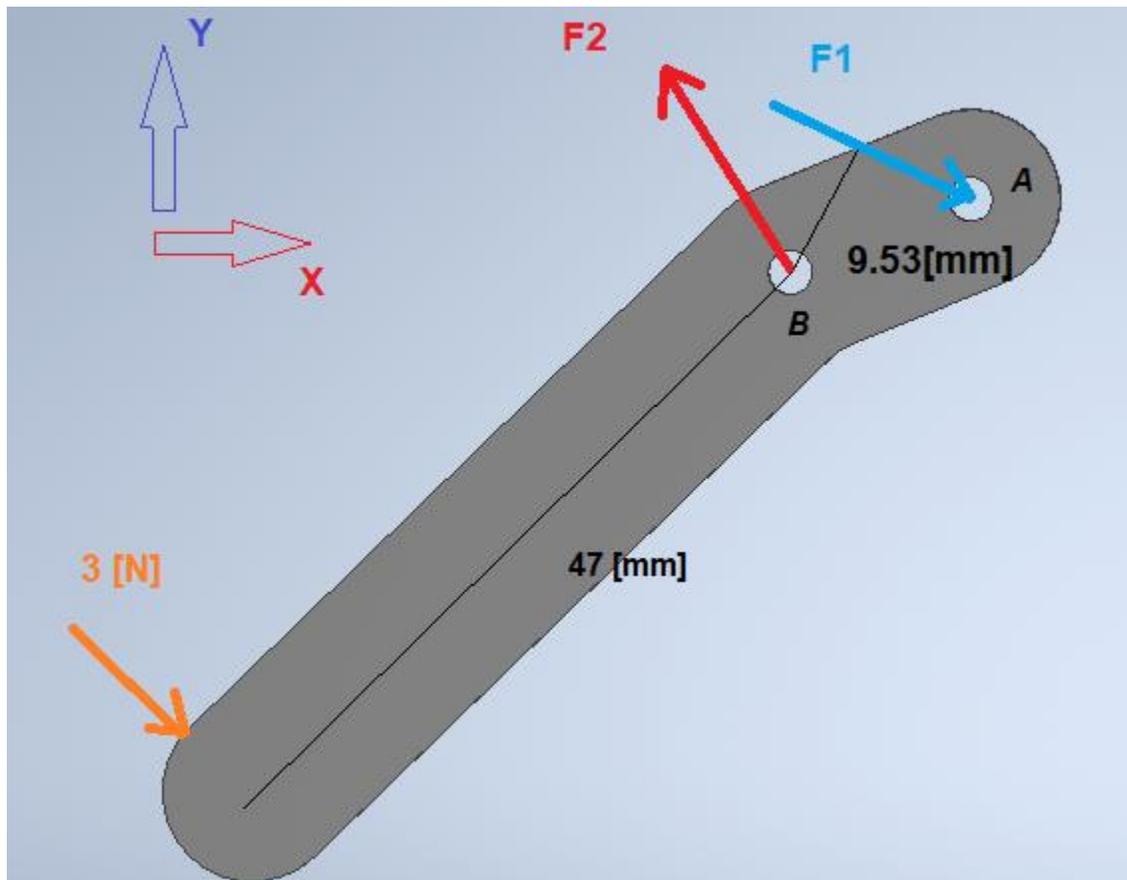


Imagen 80. DCL falange distal

Realizando sumatoria de fuerzas con respecto al punto B:

$$\begin{aligned}\sum M_B &= 0 \\ -F1(0.00953[m]) + 3[N](0.047[m]) &= 0 \\ F1 &= \frac{3[N](0.047[m])}{0.00953[m]} \\ F1 &= 14.7953[N]\end{aligned}$$

Para descomponer las fuerzas, se obtuvieron los ángulos en base al sistema de referencia mostrado en la imagen 80. La fuerza de 3 [N], es perpendicular a la superficie de la falange distal, mientras que la fuerza *F1*, está inmersa en el eje medio del eslabón de apoyo. Por ello estos ángulos fueron medidos en inventor.

Descomponiendo la fuerza $F1$:

$$\text{Sen}\theta = \frac{CO}{h}$$

$$CO = \text{Sen}\theta h$$

$$F1_Y = \text{Sen}(15.56^\circ)(14.7953[N])$$

$$F1_Y = 3.9687[N]$$

$$\text{Cos}\theta = \frac{Ca}{h}$$

$$Ca = \text{Cos}\theta h$$

$$F1_X = \text{Cos}(15.56^\circ)(14.7953[N])$$

$$F1_X = 14.2530[N]$$

Descomponiendo la fuerza de 3 [N]:

$$\text{Sen}\theta = \frac{CO}{h}$$

$$CO = \text{Sen}\theta h$$

$$F3_Y = \text{Sen}(38.60^\circ)(3[N])$$

$$F3_Y = 1.8716[N]$$

$$\text{Cos}\theta = \frac{Ca}{h}$$

$$Ca = \text{Cos}\theta h$$

$$F3_X = \text{Cos}(38.60^\circ)(3[N])$$

$$F3_X = 2.3445[N]$$

Realizando sumatoria de fuerzas:

$$+\rightarrow \sum F_X = 0$$

$$F1_X - F2_X + F3_X$$

$$F2_X = 2.3445[N] + 14.2530[N]$$

$$F2_X = 16.5975[N]$$

$$+\uparrow \sum F_Y = 0$$

$$F1_Y - F2_Y + F3_Y = 0$$

$$F2_Y = 1.8716[N] + 3.9687[N]$$

$$F2_Y = 5.8403[N]$$

Obteniendo magnitud de $F2$:

$$|F2| = \sqrt{(16.5975[N])^2 + (5.8403[N])^2}$$

$$|F2| = 17.5953[N]$$

Obteniendo Ángulo de F_2 con respecto al eje X:

$$\begin{aligned} \text{Sen}\theta &= \frac{Co}{h} \\ \theta &= \cos^{-1}\left(\frac{5.8403[N]}{17.5953[N]}\right) \\ \theta &= 19.3555^\circ \end{aligned}$$

Análisis en falange proximal

Para realizar el análisis en la falange proximal, se sabe lo siguiente:

El perno que une a las falanges proximal a la falange distal se encuentra sometido a un esfuerzo cortante doble, por ello la fuerza en cada falange proximal será la mitad de F_2 , calculada anteriormente.

Por otro lado, el nodo debe estar en equilibrio, por ello se aplicó la tercera ley de newton, que establece el equilibrio de fuerzas, ya que será contrarrestada por otra en sentido opuesto.

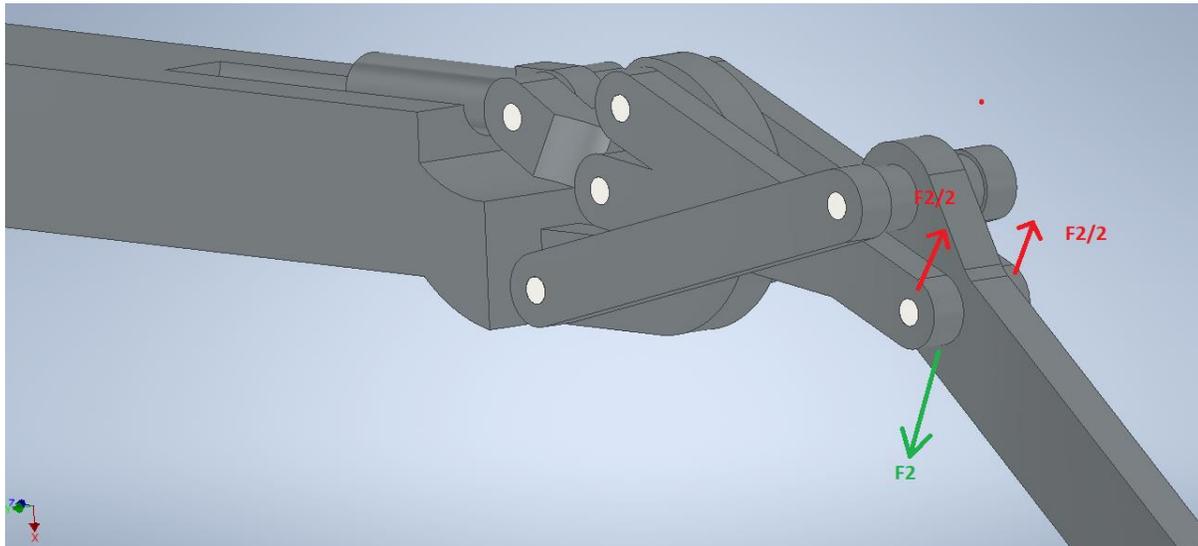


Imagen 81. Esfuerzos en perno

Para realizar el analisis de la falange proximal se establecio que $f_2 = \frac{1}{2}F_2$

Por otro lado, el punto E , permanece fijo, ya que en este punto, se halla el perno que une la falange proximal con la estructura de soporte.

Finalmente f_2 se trazo en sentido opuesto a F_2 .

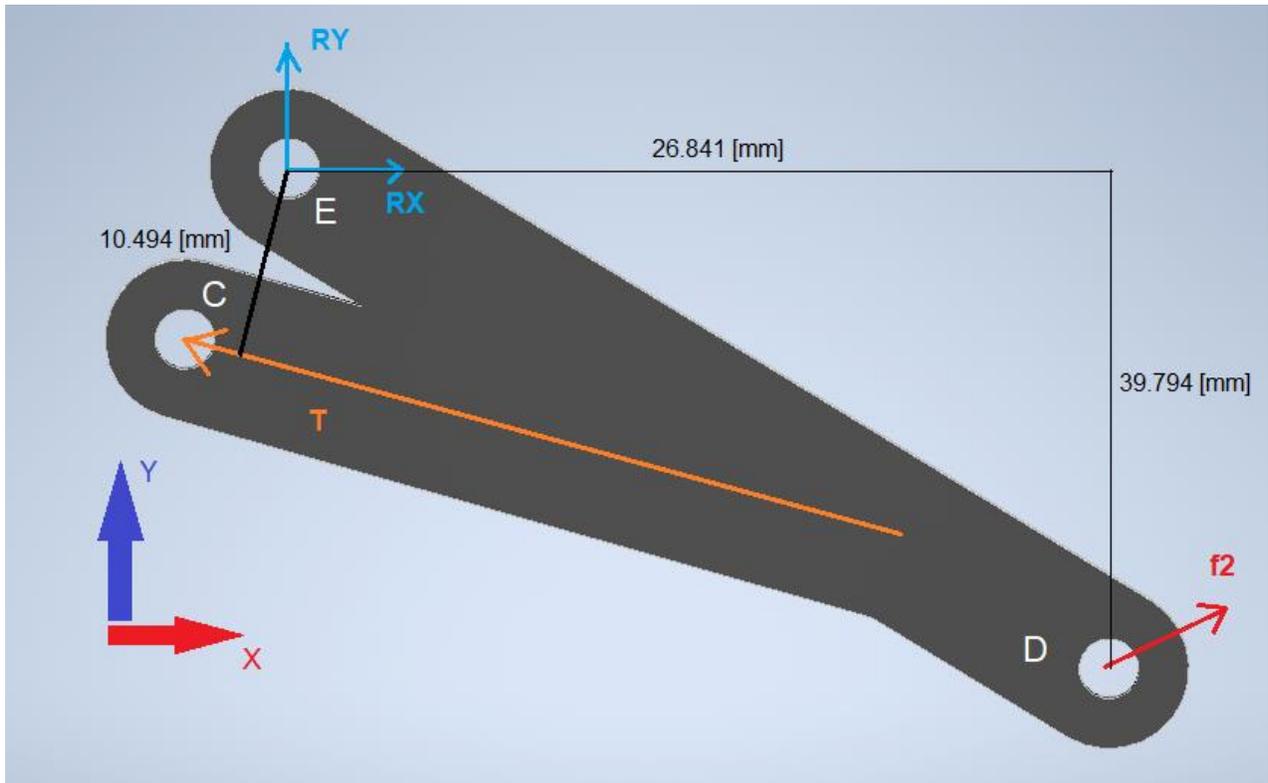


Imagen 82. DCL de falange proximal

Descomposición de fuerza f_2 :

$$\text{Sen}\theta = \frac{CO}{h}$$

$$CO = \text{Sen}\theta h$$

$$f_{2Y} = \text{Sen}(19.3855^\circ)(8.79765[N])$$

$$f_{2Y} = 2.9201[N]$$

$$\text{Cos}\theta = \frac{Ca}{h}$$

$$Ca = \text{Cos}\theta h$$

$$f_{2X} = \text{Cos}(19.3855^\circ)(8.79765[N])$$

$$f_{2X} = 8.2988[N]$$

Sumatoria de momentos con respecto al punto E:

$$\sum M_E = 0$$

$$f_{2X}(0.039794[m]) - f_{2Y}(0.026841[m]) - T(0.010494[m]) = 0$$

$$T = \frac{(8.2988[N])(0.039794[m]) - (2.9201[N])(0.026841[m])}{0.010494[m]}$$

$$T = 24.0007[N]$$

Descomponiendo T:

$$\text{Sen}\theta = \frac{CO}{h}$$

$$CO = \text{Sen}\theta h$$

$$T_Y = \text{Sen}(38.55^\circ)(24[N])$$

$$T_Y = 14.9567[N]$$

$$\text{Cos}\theta = \frac{Ca}{h}$$

$$Ca = \text{Cos}\theta h$$

$$T_X = \text{Cos}(38.55^\circ)(24[N])$$

$$T_X = 18.7695[N]$$

Sumatoria de fuerzas para hallar las reacciones en el perno:

$$+\rightarrow \sum F_X = 0$$

$$R_6 - T_X + f2_X = 0$$

$$R_6 = 18.7695[N] - 8.2988[N]$$

$$R_6 = 10.4707[N]$$

$$+\uparrow \sum F_Y = 0$$

$$R_5 + T_Y - f2_Y = 0$$

$$R_5 = -14.9557[N] + 2.9201[N]$$

$$R_5 = -12.0366[N]$$

El signo negativo en R_5 , indica que el sentido es opuesto.

Análisis de biela

El mecanismo está conformado por dos falanges proximal que están unidas a la biela mediante un perno. Por ello el perno está sometido a esfuerzo cortante doble, siendo la fuerza en la biela, el doble de la falange proximal, es decir: $P = 2T$

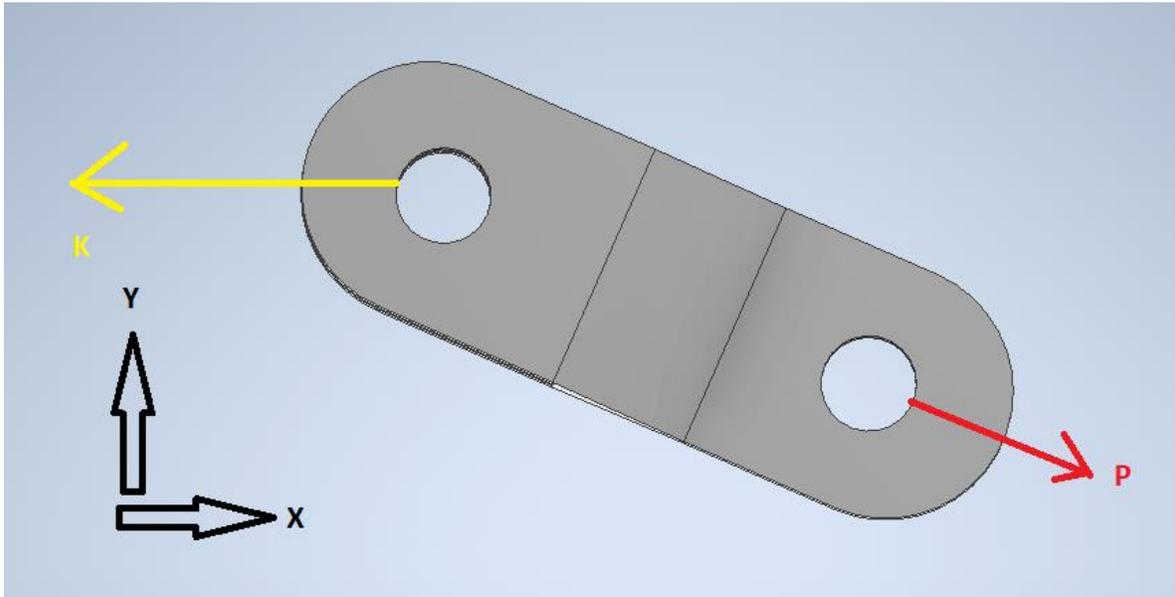


Imagen 83. DCL Biela

El ángulo formado de P con respecto al eje X, es 38.55° , por ello se puede descomponer en sus componentes, para realizar sumatoria de fuerzas.

$$\begin{aligned} \text{Sen}\theta &= \frac{CO}{h} \\ CO &= \text{Sen}\theta h \\ P_Y &= \text{Sen}(38.55^\circ)(48[N]) \\ P_Y &= 29.9134[N] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Cos}\theta &= \frac{Ca}{h} \\ Ca &= \text{Cos}\theta h \\ P_X &= \text{Cos}(38.55^\circ)(48[N]) \\ P_X &= 37.5391[N] \end{aligned}$$

Realizando sumatoria de fuerzas en X:

$$\begin{aligned} +\rightarrow \sum F_X &= 0 \\ -K + P_X &= 0 \\ K &= 37.5391[N] \end{aligned}$$

Par de torsión necesario en el tornillo

Utilizando la ecuación de tornillos de potencia

$$T = \frac{F d_m}{2} \left(\frac{l + \pi f d_m}{\pi d_m - f l} \right)$$

Para conocer el diámetro medio del tornillo, se recurrió al uso de tablas normalizadas. Se buscó en tablas de rosca Withworth, teniendo en diámetro de 3/16".

$$d_m = 4.08 \text{ [mm]}$$

$$l = 1.058 \text{ [mm]}$$

Para estimar el valor del coeficiente de fricción f , se auxilió de la siguiente tabla realizada por López, A. (2018). [53]. En donde se dan algunos valores de coeficiente de fricción en tornillos de potencia utilizando algunos materiales.

Tornillos de Potencia

Coeficientes de fricción para pares roscados:

Material del tornillo	Material de la Tuerca			
	Acero	Bronce	Latón	Fundición de Hierro
Acero, seco	0.15 - 0.25	0.15 - 0.23	0.15 - 0.19	0.15 - 0.25
Acero, aceite para máquina	0.11 - 0.17	0.10 - 0.16	0.10 - 0.15	0.11 - 0.17
Bronce	0.08 - 0.12	0.04 - 0.06		0.06 - 0.09

Coeficientes de fricción de collarín de empuje:

Combinación	Operando	Arrancando
Acero suave sobre fundición de hierro	0.12	0.17
Acero duro sobre fundición de hierro	0.09	0.15
Acero suave sobre bronce	0.08	0.10
Acero duro sobre bronce	0.06	0.08

Imagen 84. Coeficientes de fricción en tornillos

Imagen tomada de López, A. (2018). [53]

Tomando en cuenta los datos presentados en la tabla, se lubricará el perno con aceite para máquina, para evitar desgaste en la rosca y que el par requerido disminuya en lo más posible. Por ello se tomará el valor de 0.11, ya que el cilindro roscado y el perno son de acero.

Sustituyendo valores en la ecuación de tornillos de potencia:

$$T = \frac{(37.5391[N])(0.00408[m])}{2} \left(\frac{0.001058[m] + \pi(0.11)(0.00408[m])}{\pi(0.00408[m]) - (0.11)(0.001058[m])} \right)$$

$$T = 0.0148[Nm]$$

Para garantizar un buen funcionamiento y que el motor pueda dañarse, se eligió el *micromotorreductor Metal HPCB 298:1*, de la marca *Pololu [24]*, mostrado en la sección 3.3 (revisar selección de conceptos).

El fabricante ofrece la ficha del motor con las siguientes especificaciones a 6v:

- Velocidad: 110 RPM
- Corriente sin carga: 100mA
- Corriente Máxima: 1500 mA
- Toque Máximo: 3.4 Kg-cm
- Relación de engranes 298:1

Análisis del pulgar

Las barras que conectan el cilindro roscado con la falange quedan en una posición paralela al eje transversal del cilindro roscado, por ello se reduce la complejidad del análisis, al tener 3 incógnitas, dos son reacciones en el pasador del punto H y una es la fuerza F_p .

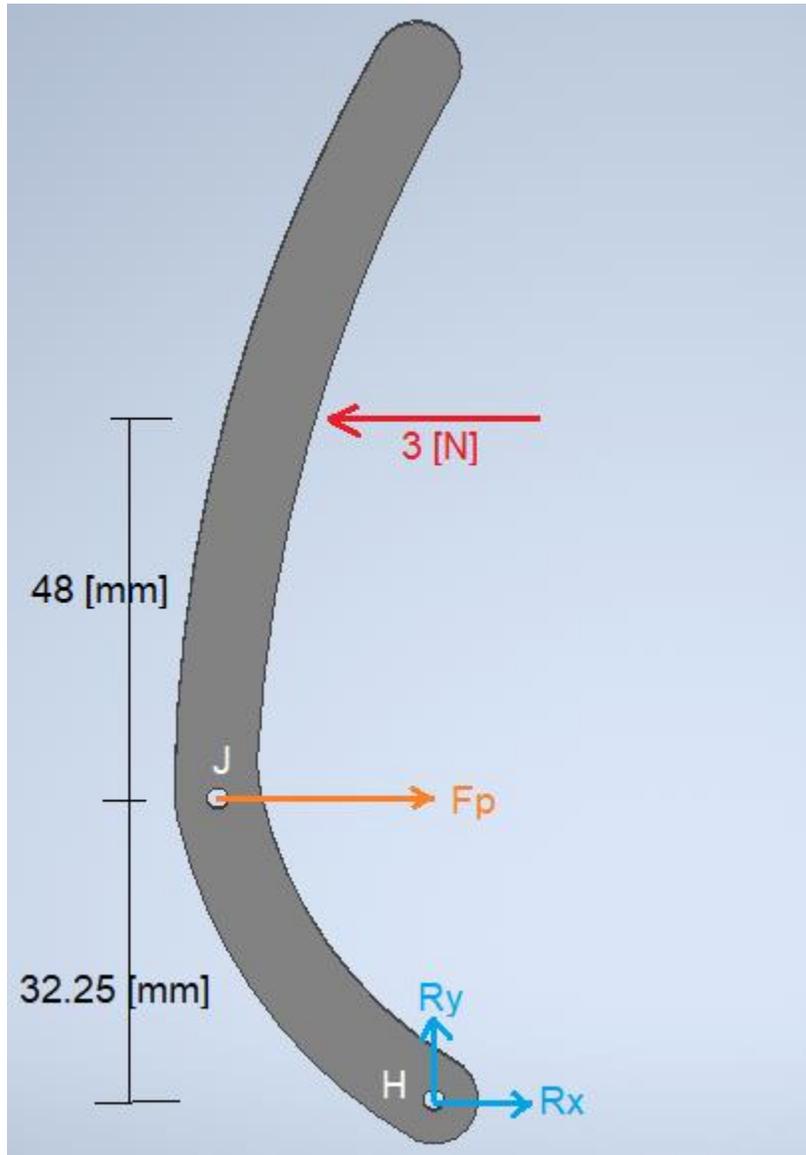


Imagen 85. DCL Pulgar

Realizando sumatoria de momentos respecto al punto H

$$\sum M_H = 0$$

$$(3[N])(0.08025[m]) - 2F_p(0.032250[m]) = 0$$

$$F_p = \left(\frac{1}{2}\right) \frac{(3[N])(0.08025[m])}{0.032250[m]}$$

$$F_p = 3.73255[N]$$

El perno que une a las barras del pulgar con el cilindro roscado está sometido a esfuerzo cortante doble, por ello la fuerza M requerida será el doble de la fuerza F_p .

$$M = 7.4651[N]$$

El motor utilizado para dar movimiento al pulgar es un motorreductor desarrollado por la marca TOPINCN, cuenta con un eje roscado M4, que se ilustra en la siguiente imagen:



Imagen 86. Motorreductor con eje roscado
Imagen tomada de Topincn. [54]

Sabiendo que la rosca es M4, se recurrió a uso de tablas para obtener los datos a ingresar en la ecuación de tornillos de potencia.

l : 0.5 [mm]

d_m : 3.675 [mm]

Aplicando ecuación de tornillos de potencia:

$$T = \frac{F d_m}{2} \left(\frac{l + \pi f d_m}{\pi d_m - f l} \right)$$

$$T = \frac{(7.4651[N])(0.003675[m])}{2} \left(\frac{0.0005[m] + \pi(0.11)(0.003675[m])}{\pi(0.003675[m]) - (0.11)(0.0005[m])} \right)$$

$$T = 0.0021 [Nm]$$

El motorreductor seleccionado para el pulgar es de la marca *Topinca* [54]; Tiene un par de torsión de 1.6 [Kgcm] a 400 rpm.

4.6 Análisis de velocidad y aceleración del mecanismo

Velocidad:

Las especificaciones que brinda el fabricante del motor seleccionado, es una velocidad angular de 110 rpm. Además, se conoce el paso del tornillo, que es 1.058 [mm].

Al multiplicar la velocidad angular del motor por el paso del tornillo, se obtiene la velocidad de avance del cilindro roscado.

$$v = (110 [rpm])(1.058 [mm])$$

$$v = 116.38 \left[\frac{mm}{min} \right]$$

$$v = 116.38 \left[\frac{mm}{min} \right] \left(\frac{1min}{60s} \right)$$

$$v = 1.9396 \left[\frac{mm}{s} \right]$$

El cilindro roscado tiene un desplazamiento lineal, por ello el vector velocidad es:

$$\vec{V}_B = \left| 1.9396 \left[\frac{mm}{s} \right] \right| * (\text{Cos}[270^\circ] + \text{Sen}[270^\circ])$$

Para continuar con el análisis de velocidad, se toman en cuenta las cadenas cinemáticas realizadas anteriormente, por ello, las ecuaciones de velocidad son las siguientes:

$$\overrightarrow{Vel_1} = \overrightarrow{V_2} + \overrightarrow{V_3} - \overrightarrow{V_4}$$

$$\overrightarrow{Vel_{1p}} = \overrightarrow{V_F} + \overrightarrow{V_B} + \overrightarrow{V_0} - \overrightarrow{V_2}$$

$$\overrightarrow{Vel_2} = \overrightarrow{V_1} + \overrightarrow{V_6} - \overrightarrow{V_5} - \overrightarrow{V_{4p}} - \overrightarrow{V_4}$$

$$\overrightarrow{Vel_3} = \overrightarrow{V_5} + \overrightarrow{V_{1p}} - \overrightarrow{V_7}$$

Siguiendo el método de análisis de Norton [45], los vectores de velocidad para los eslabones quedan definidos de la siguiente manera:

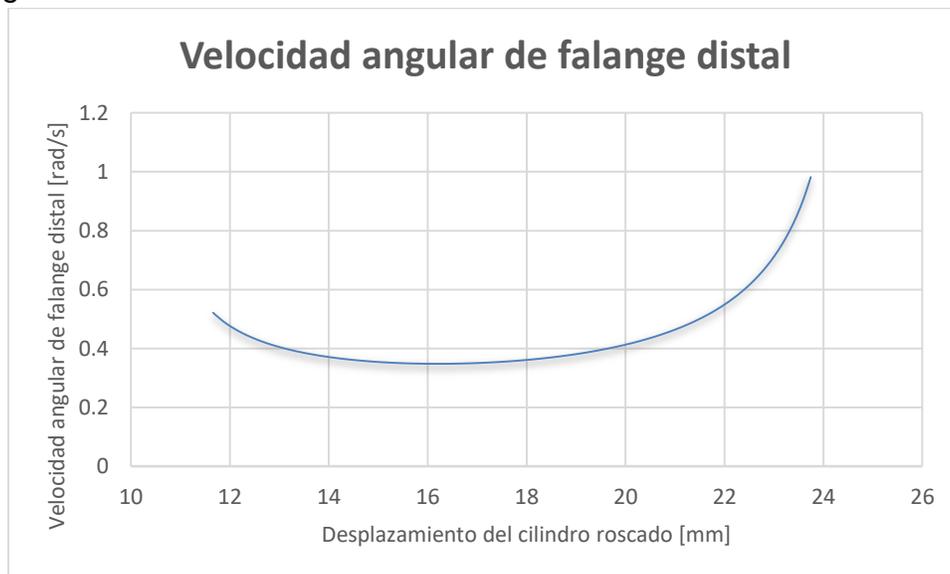
$$\overrightarrow{V_n} = \overrightarrow{w_n} \times (r_n (\cos \theta_n, \sin \theta_n))$$

Los ángulos θ_n , ya fueron calculados en la trayectoria, por ello el sistema de ecuaciones se reduce y las variables son las velocidades angulares w_n .

Para dar solución a la velocidad, se utilizó un ciclo "For", tomando el rango de movimiento de θ_2 ($270^\circ - 210^\circ$), de esta manera el programa tomara los valores θ_n correspondientes a cada eslabón a lo largo de la trayectoria, dando así, solución de velocidad a cada posición del mecanismo.

La única variable de entrada conocida es la velocidad del cilindro roscado, que previamente ya fue expresada como vector.

La siguiente grafica que relaciona el desplazamiento del cilindro roscado con la velocidad de la falange distal:



Gráfica 4. Velocidad de falange distal

Aceleración:

Calculando aceleración del cilindro roscado:

$$a = \frac{v_f^2 - v_i^2}{2d}$$

El cilindro roscado parte del reposo, por ello; $v_i = 0$.

Se estima que la distancia recorrida por el cilindro roscado sea aproximadamente 10 [mm].

$$a = \frac{\left(1.9396 \left[\frac{mm}{s}\right]\right)^2}{2(10[mm])}$$

$$a = 0.1881 \left[\frac{mm}{s^2}\right]$$

El vector aceleración del cilindro roscado es:

$$\vec{a}_B = \left|0.1881 \left[\frac{mm}{s^2}\right]\right| * (\text{Cos}[270^\circ] + \text{Sen}[270^\circ])$$

Las ecuaciones de aceleración son:

$$\vec{Acel}_1 = \vec{A}_2 + \vec{A}_3 - \vec{A}_4$$

$$\vec{Acel}_{1p} = \vec{A}_F + \vec{A}_B + \vec{A}_0 - \vec{A}_2$$

$$\vec{Acel}_2 = \vec{A}_1 + \vec{A}_6 - \vec{A}_5 - \vec{A}_{4p} - \vec{A}_4$$

$$\vec{Acel}_3 = \vec{A}_5 + \vec{A}_{1p} - \vec{A}_7$$

Los vectores de aceleración para los eslabones son:

$$\vec{A}_n = \vec{a}_n \times \vec{R}_n - \omega_n^2 * \vec{R}_n$$

Para dar solución a la aceleración del mecanismo, se utilizó un ciclo "For", con el rango de movimiento de $\theta_2(270^\circ - 210^\circ)$, tomando en cuenta las soluciones de posición y velocidad calculadas previamente, para así hallar \vec{A}_n en cada posición del rango de movimiento.

A continuación, se muestra la gráfica que relaciona el desplazamiento del cilindro roscado con la aceleración angular de la falange distal.



Grafica 5. Aceleración angular de falange distal

4.7 Prototipo final

Para terminar el primer ensamble, se dibujó una cubierta para cubrir el sistema de actuadores, esta pieza tiene cavidades al igual que la palma, para de esta manera, mantener fijos los motores y cumplir el sistema de transmisión mencionado en el punto 4.2.2.

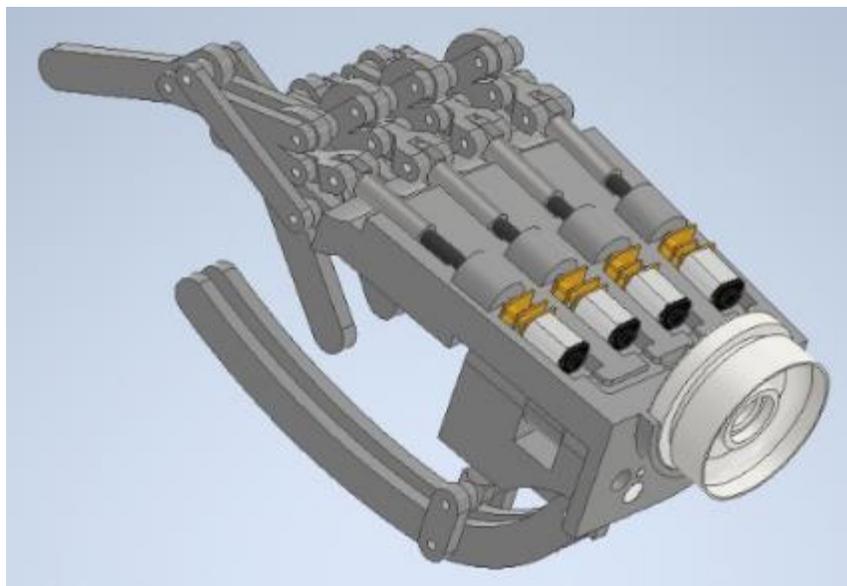


Imagen 87. Primer ensamble sin cubierta



Imagen 88. Primer ensamble con cubierta

En el primer ensamble se comprobó la movilidad de los dedos mediante uso del software CAD Autodesk Inventor *Professional 2022*®, pero en cada dedo del prototipo, la falange distal es una barra, por ello se decidió aumentar el volumen a las falanges (sin afectar la movilidad del mecanismo) y agregar detalles estéticos, para dar una apariencia robótica.

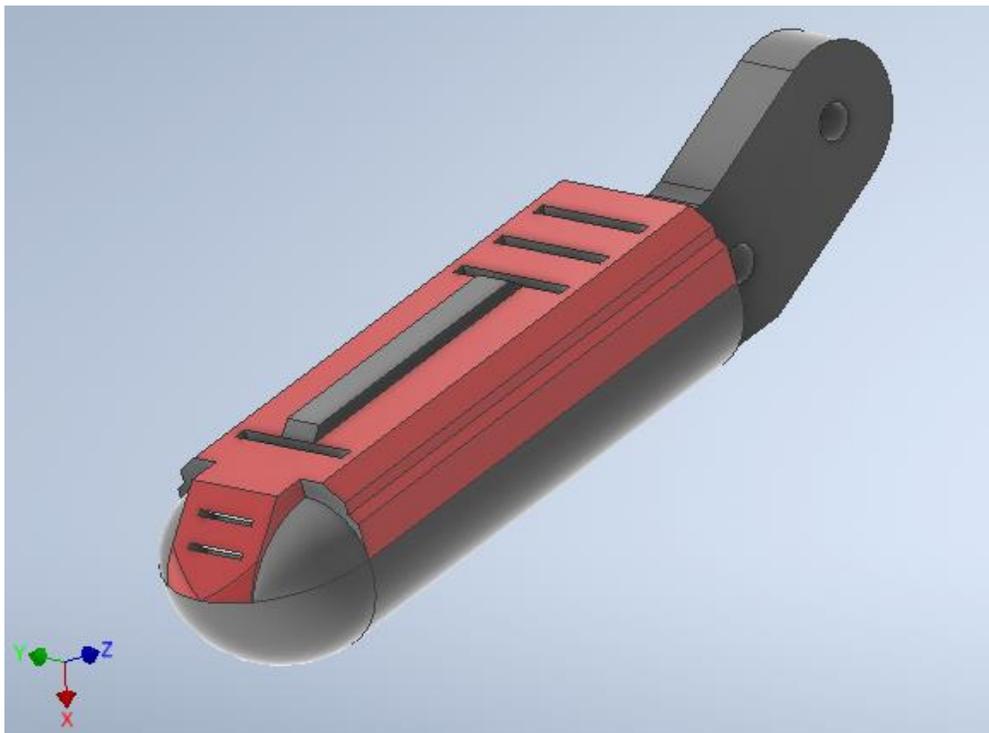


Imagen 89. Falange distal final

Adicionalmente, se agregaron detalles estéticos a la cubierta, que se muestran a continuación:

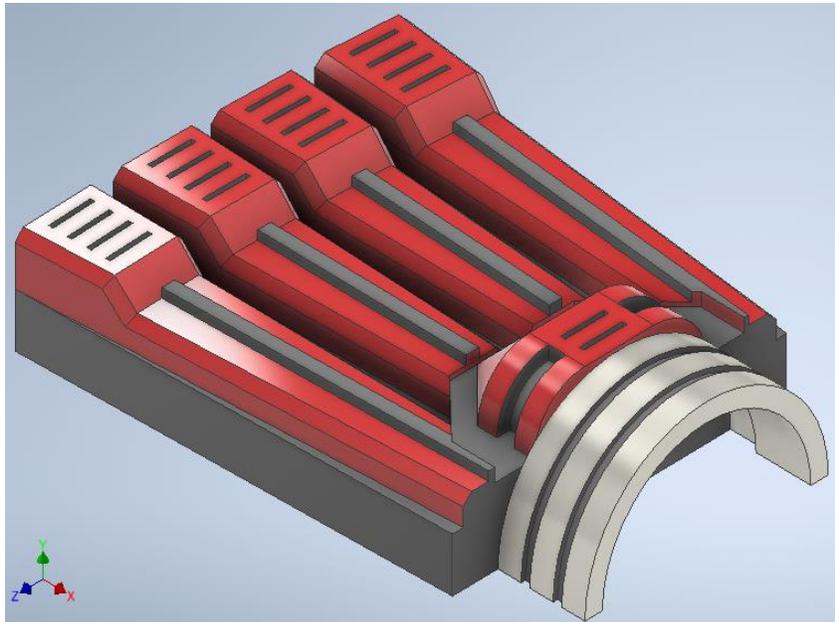


Imagen 90. Cubierta final

Después de realizar los cambios estéticos al prototipo, se comprobó su movilidad obteniendo el siguiente resultado:



Imagen 91. Prototipo final



Imagen 92. Prototipo final

4.7.1 Ensayo de tracción

Antes de comenzar a fabricar el prototipo, es necesario realizar un análisis FEM, mediante el uso un software, para ver las zonas que están sometidas a mayor deformación y si fuera necesario, cambiar la geometría, espesor, etc.

En el campo de la manufactura aditiva, la resistencia de las piezas fabricadas depende totalmente de los parámetros utilizados para su fabricación, por ejemplo; número de líneas, grosor de paredes, altura de capas, densidad de relleno, temperatura de impresión, patrón de relleno, velocidad de impresión, etc.

Al tratarse de un prototipo, el objetivo de realizar los ensayos de tracción, no es caracterizar el material, únicamente es para saber en qué posición sería más conveniente manufacturar el prototipo.

Por ello, se realizaron algunos ensayos de tracción a probetas fabricadas mediante manufactura aditiva, utilizando la norma ASTM-D638.

Esta norma estandarizada, permite conocer las propiedades mecánicas de un polímero sometido a un ensayo de tracción, mediante el uso de una máquina de ensayos universales.

Para realizar el ensayo, se debe seleccionar el tipo de probeta a utilizar y fabricarla con las medidas que se muestran a continuación:

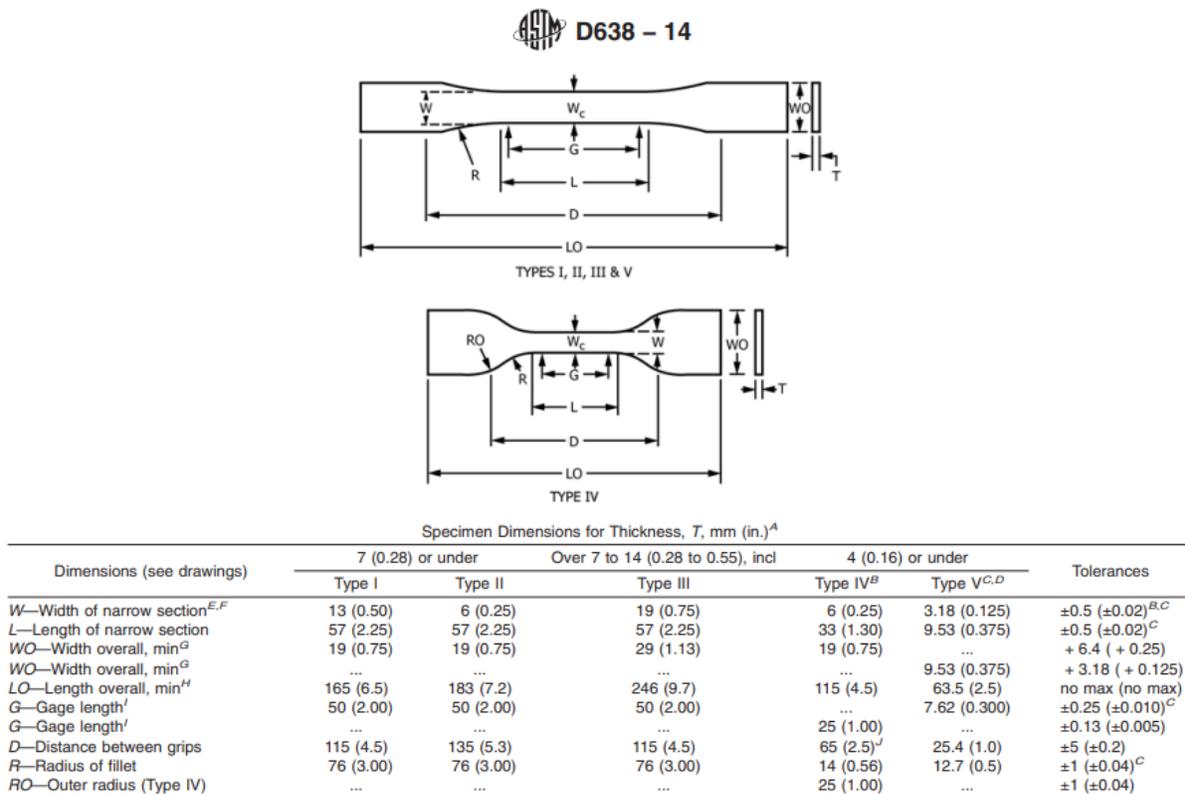


Imagen 93. Probetas ASTM-D638.

Imagen capturada de ASTM International, 2017. [55]

Se seleccionó la probeta tipo 1 y se dibujó en *Inventor*.

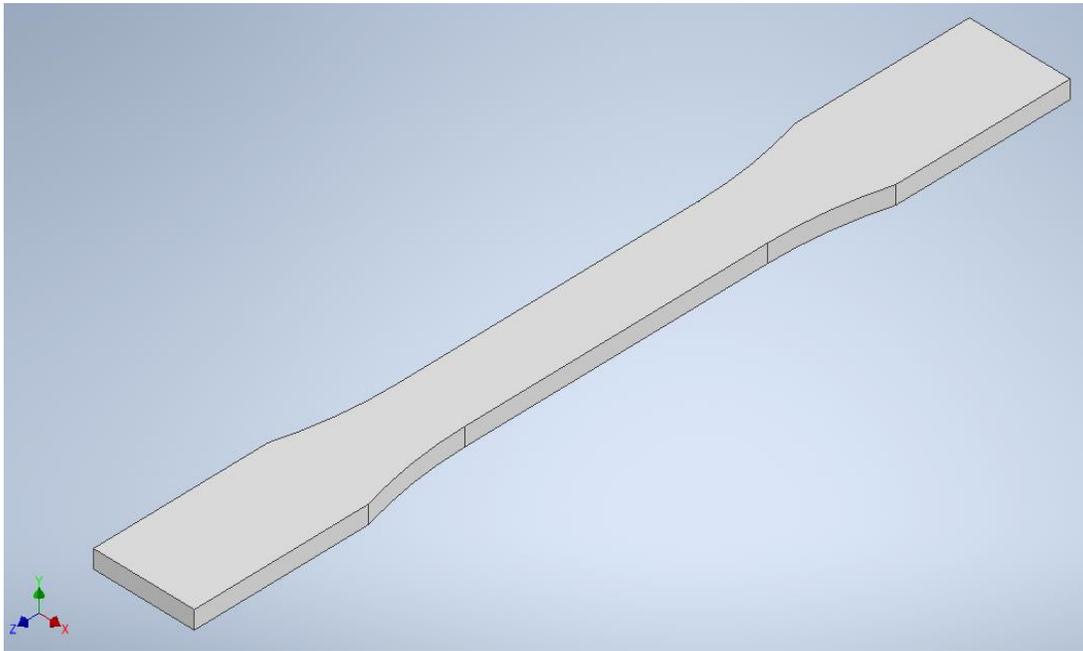


Imagen 94. Probeta para ensayos de tracción.

Después de terminar la pieza, se exporto en archivo STL, para posteriormente mediante el uso del software *Ultimaker Cura 4.10.0*®, establecer los parámetros previos para su fabricación.

Se decidió utilizar dos patrones de impresión diferentes establecidos por *Cura*, que son “Cúbico Bitruncado” y “Giroide”.

Para el primer patrón de impresión (cúbico bitruncado), se fabricaron dos probetas, en diferente posición cada una, con los siguientes parámetros:

- *Altura de capa: 0.12 [mm]*
- *Grosor de pared: 1.1 [mm]*
- *Recuento de líneas de pared: 3*
- *Grosor superior/inferior: 0.84 [mm]*
- *Capas superiores: 3*
- *Capas inferiores: 3*
- *Densidad de relleno: 77%*
- *Patrón de relleno: Cúbico Bitruncado*
- *Temperatura de impresión: 220°C*
- *Temperatura de la placa de impresión: 60°C*
- *Velocidad de impresión: 50 $\left[\frac{mm}{s}\right]$*

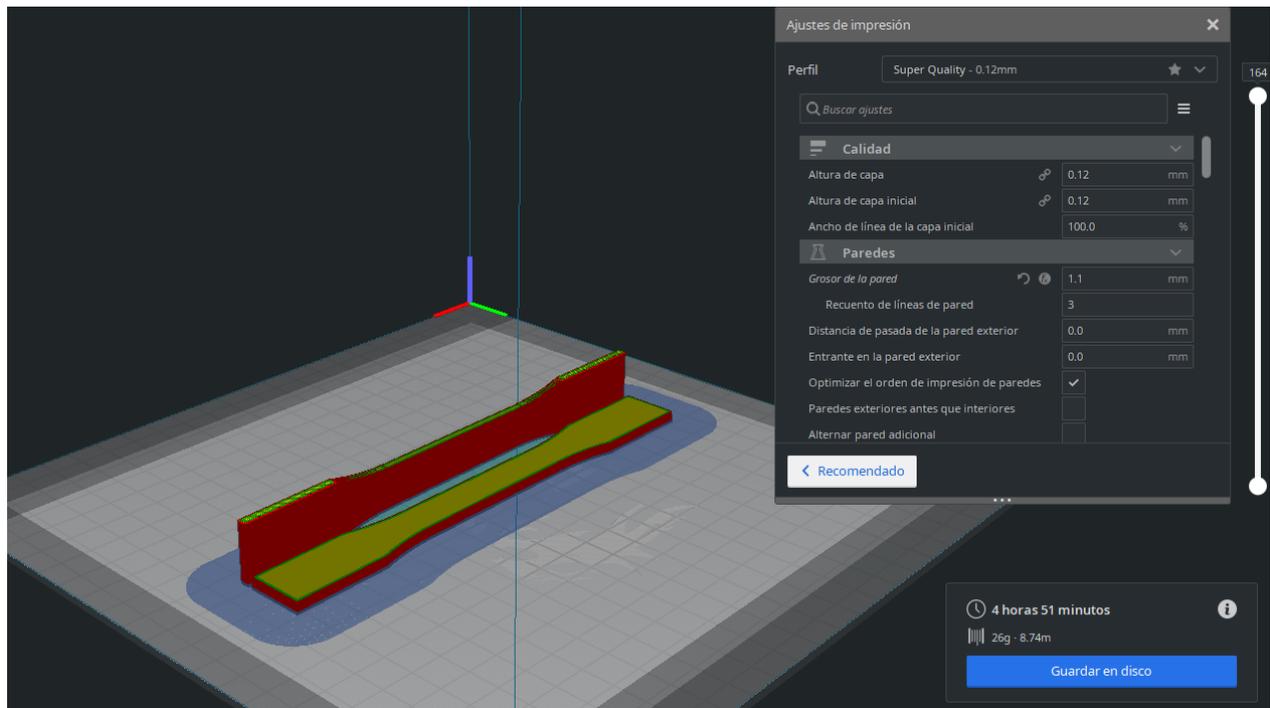


Imagen 95. Probetas cúbico bitruncado.

Para el segundo patrón de impresión (giroide), se establecieron los siguientes parámetros:

- *Altura de capa: 0.12 [mm]*
- *Grosor de pared: 1.1 [mm]*
- *Recuento de líneas de pared: 3*
- *Grosor superior/inferior: 0.84 [mm]*
- *Capas superiores: 3*
- *Capas inferiores: 3*
- *Densidad de relleno: 77%*
- *Patrón de relleno: Giroide*
- *Temperatura de impresión: 220°C*
- *Temperatura de la placa de impresión: 60°C*
- *Velocidad de impresión: 50 $\left[\frac{mm}{s}\right]$*

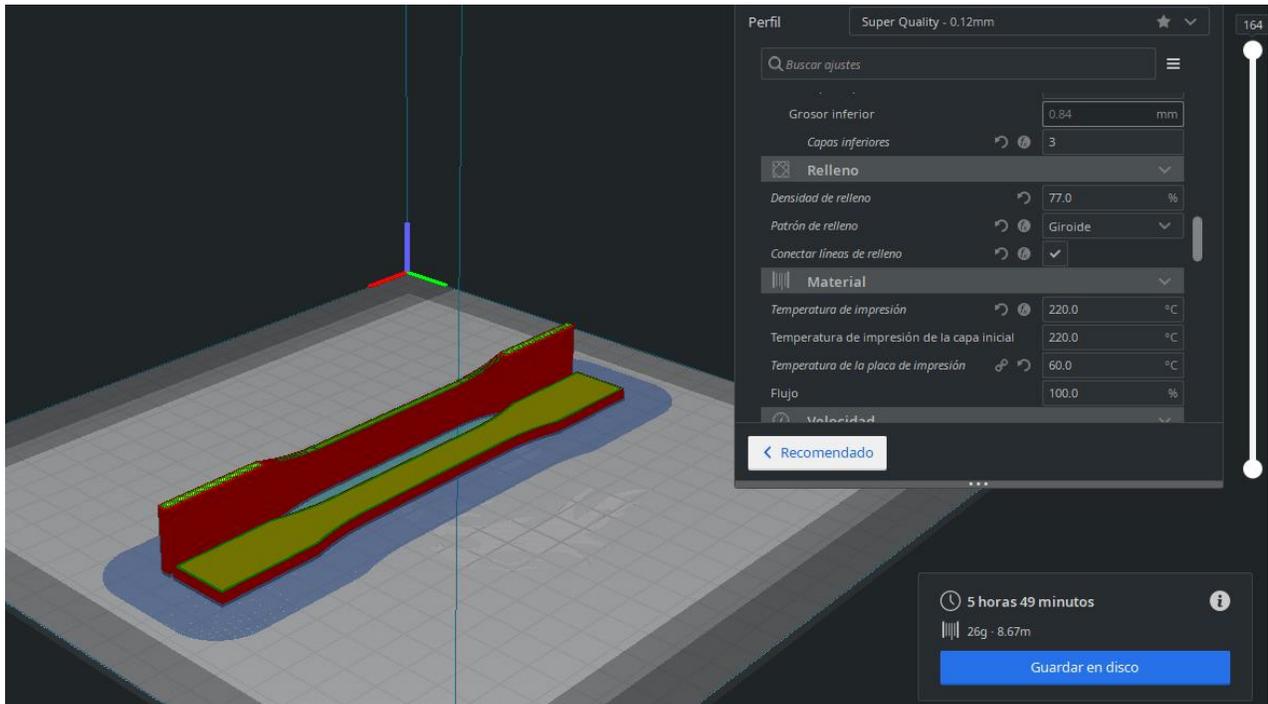


Imagen 96. Probetas Giroide

El filamento PLA seleccionado para este proyecto fue de la marca *SUNLU*®, con un diámetro de 1.75 mm en color negro.



Imagen 97. Filamento PLA - SUNLU
Imagen tomada de SUNLU. [56]

Posteriormente las probetas fueron fabricadas una máquina de modelado por deposición fundida de la marca *Creality*®, modelo *Ender 3*.

Primero se fabricaron las probetas con patrón de impresión Cubico bitruncado y posteriormente Giroide.



Imagen 98. Impresión de probetas.

Antes de comenzar el ensayo se debe seleccionar la velocidad de avance de acuerdo con el tipo de probeta seleccionada, por ello, la norma proporciona la siguiente tabla:

TABLE 1 Designations for Speed of Testing^A

Classification ^B	Specimen Type	Speed of Testing, mm/min (in./min)	Nominal Strain ^C Rate at Start of Test, mm/mm·min (in./in.·min)
Rigid and Semirigid	I, II, III rods and tubes	5 (0.2) ± 25 %	0.1
		50 (2) ± 10 %	1
		500 (20) ± 10 %	10
	IV	5 (0.2) ± 25 %	0.15
		50 (2) ± 10 %	1.5
		500 (20) ± 10 %	15
Nonrigid	V	1 (0.05) ± 25 %	0.1
		10 (0.5) ± 25 %	1
		100 (5) ± 25 %	10
	III	50 (2) ± 10 %	1
		500 (20) ± 10 %	10
		500 (20) ± 10 %	15

Tabla 4. Velocidad de ensayo
Tabla tomada de ASTM International, 2017. [55]

Para realizar los ensayos correspondientes, se seleccionó una velocidad de $50 \left[\frac{mm}{min} \right]$
Antes de comenzar el ensayo, se calibró el extensómetro, ya que la norma recomienda su uso.



Imagen 99. Calibración del extensómetro.

Posteriormente, se colocó la probeta en las mordazas de la máquina y también se colocó el extensómetro.



Imagen 100. Ensayo de tensión

Después, reducir el valor de la carga a un valor aproximado de 0 [kN], se comenzó el ensayo, hasta llegar a la ruptura de las probetas.



Imagen 101. Fractura de probetas

Posterior a la ruptura de la primera probeta se repitió el procedimiento anterior para las tres probetas restantes.

Los resultados obtenidos en los ensayos de tracción, fueron los siguientes:

Cúbico Bitruncado:

Posición	Desplazamiento en el pico [mm]	Carga en el pico [Kn]	Esfuerzo en el pico [MPa]	Desplazamiento de fractura [mm]	Carga de fractura [Kn]	Esfuerzo de fractura [MPa]	Módulo de Young [MPa]	Energía absorbida antes de fractura [J]
Horizontal	1.421	1.747	39.782	2.313	0.995	22.646	2776.282	3.226
Vertical	1.679	2.544	57.912	1.679	2.544	57.912	3515.195	2.989

Tabla 5. Resultados de ensayo de tracción - Cubico Bitruncado

Giroide:

Posición	Desplazamiento en el pico [mm]	Carga en el pico [Kn]	Esfuerzo en el pico [MPa]	Desplazamiento de fractura [mm]	Carga de fractura [Kn]	Esfuerzo de fractura [MPa]	Módulo de Young [MPa]	Energía absorbida antes de fractura [J]
Horizontal	0.935	1.759	40.039	0.935	1.759	40.039	3427.280	0.310
Vertical	1.735	2.479	56.447	1.735	2.479	56.447	3393.751	0.673

Tabla 6. Resultados de ensayo de tracción - Giroide

4.7.2 Análisis FEM

Para determinar el comportamiento del prototipo, se realizó un análisis de elementos finitos utilizando el módulo de *Análisis de Tensión* de Inventor. Este módulo, permite de manera rápida y sencilla realizar un mallado al ensamble correspondiente.

También las cargas, materiales y elementos fijos se pueden asignar de manera sencilla.

Las cargas aplicadas en el análisis fueron las calculadas en el punto 4.5, es decir, las condiciones en las cuales, el prototipo estaría sosteniendo una botella de agua de 500 ml.

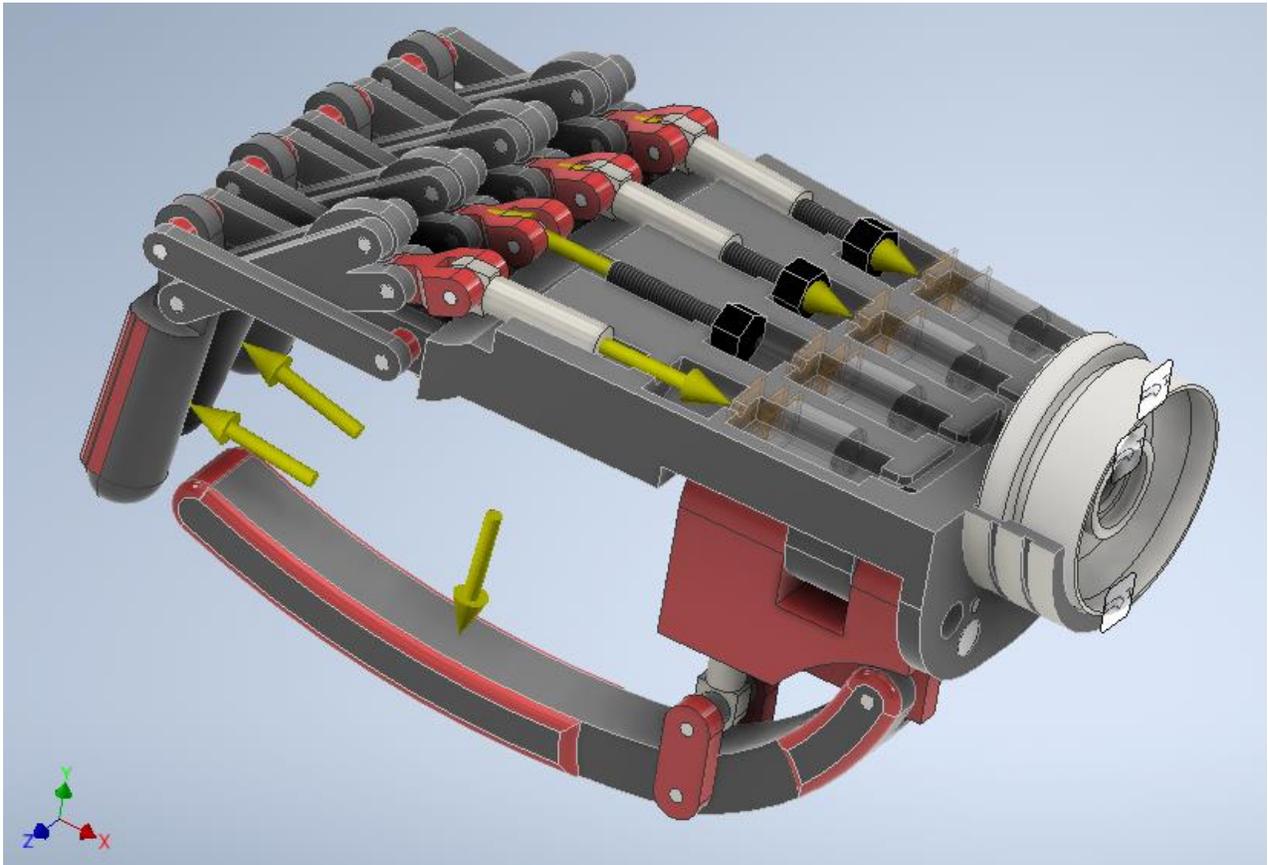


Imagen 102. Distribución de fuerzas.

En la imagen, se muestran las aplicadas en el ensamble. Para visualizar las cargas, se ocultó la cubierta.

En las falanges se aplica una fuerza de 3 [N], mientras que, en los cilindros roscados, de los cuatro dedos medios, se aplica una carga de 37.54 [N].

Por otro lado, en el cilindro roscado del dedo pulgar, se aplica una carga de 7.5 [N].

Tomando en cuenta la tercera ley de Newton, el tornillo está sometido a una carga de igual magnitud a la aplicada en el cilindro roscado, pero en sentido opuesto.

Con el propósito de mostrar en la imagen 102, las cargas aplicadas en el prototipo, se ocultó el tornillo del dedo índice y el cilindro roscado del dedo medio.

Finalmente se asumió que el prototipo está unido a un socket, por ello la muñeca de desconexión rápida permanece fija.

Después de aplicar las cargas, se prosiguió a realizar el mallado del ensamble. Un aspecto importante que se consideró es que *Inventor* únicamente genera elementos tetraédricos en el mallado de piezas.

Las propiedades de la malla son las siguientes:

- Tipo de malla: 3D
- Tamaño medio de elemento: 0.1
- Tamaño mínimo de elemento: 0.2
- Número de elementos: 246989
- Numero de nodos: 406400

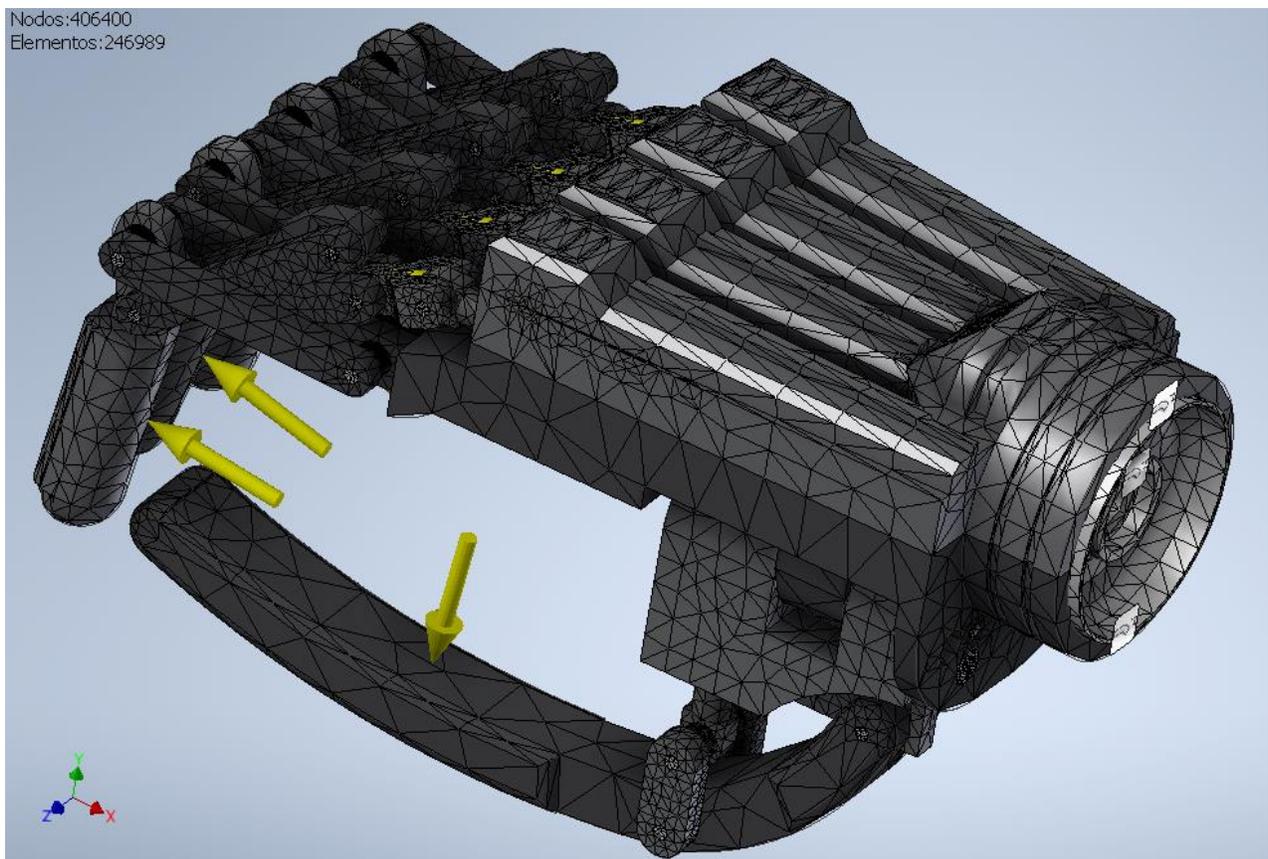


Imagen 103. Mallado del prototipo.

Los resultados obtenidos en el análisis fueron los siguientes:

El esfuerzo máximo tiene un valor de 759 [MPa] y se encuentra en el perno del dedo índice que une a la falange distal con los eslabones de apoyo.

El modulo a esfuerzo cortante del acero inoxidable es de 85.977 [GPa], por ello no existe riesgo de fractura en los pernos.

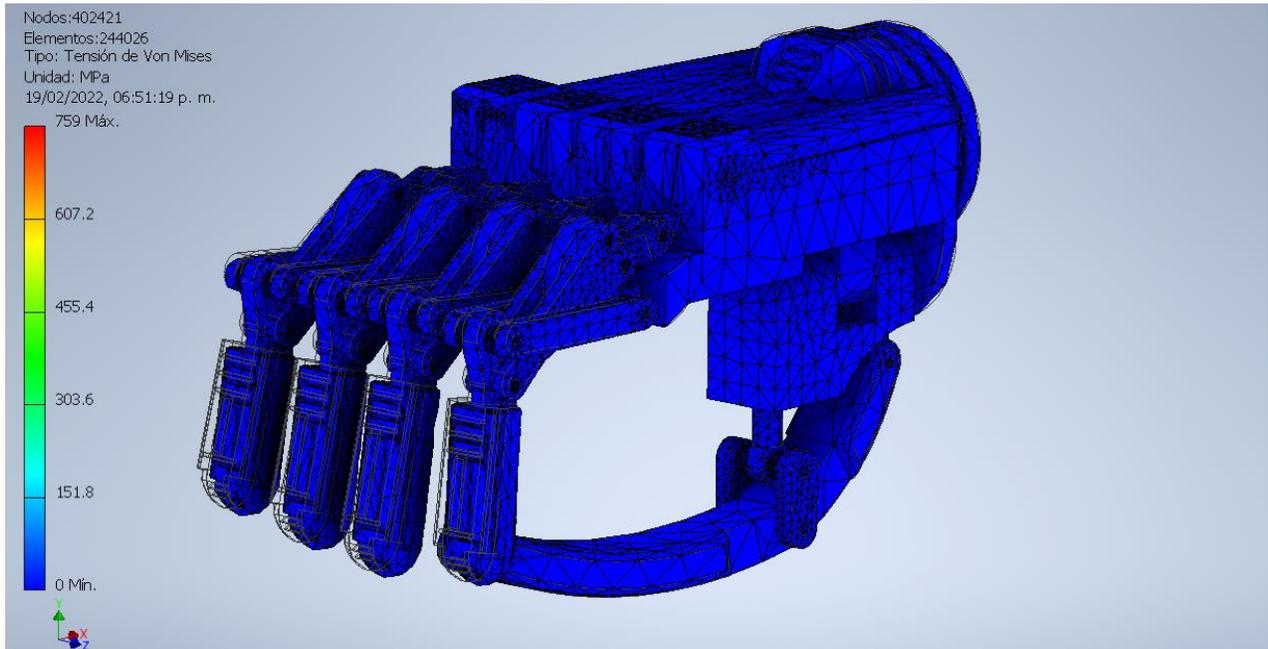


Imagen 104. Análisis de elementos finitos

Para visualizar la distribución de esfuerzos en los pernos, en la imagen 105 se ocultaron todas las partes que conforman el dedo índice, dejando visible únicamente los pernos.

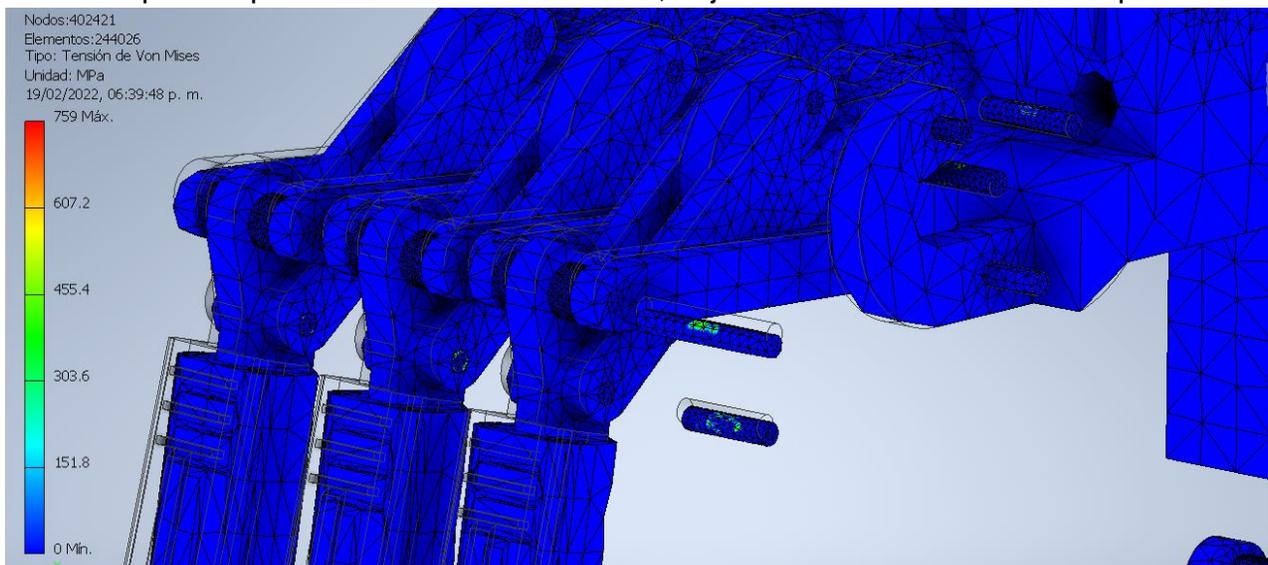


Imagen 105. Distribución de esfuerzos en pernos

De igual manera a continuación se muestra la distribución de esfuerzos en el pulgar.

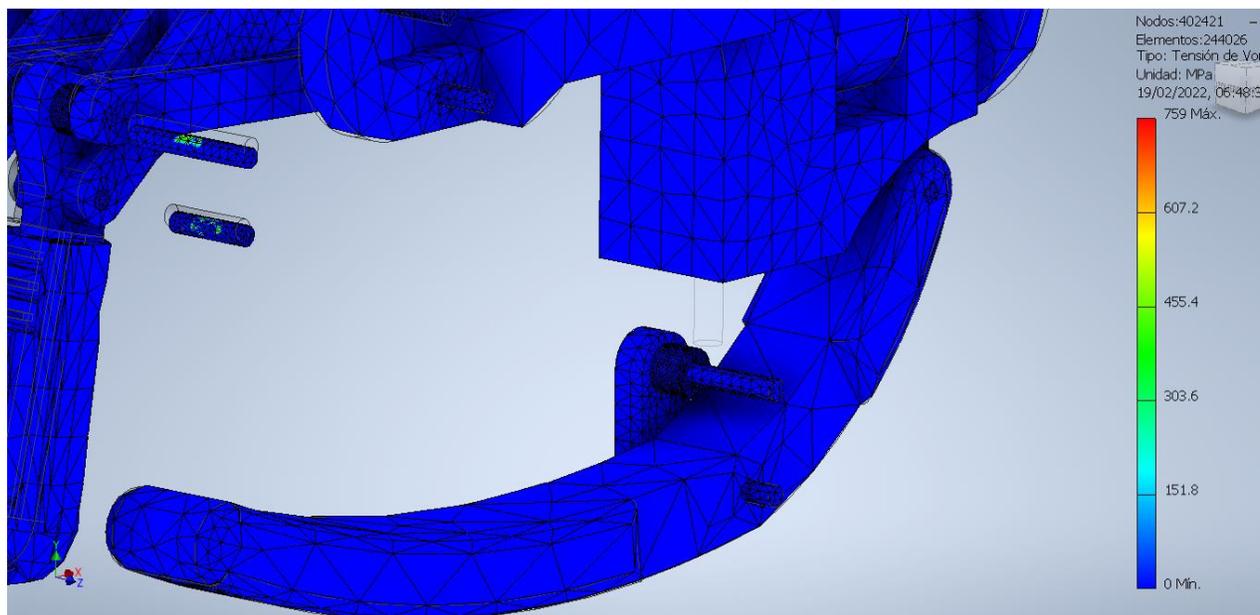


Imagen 106. Análisis de pulgar.

Capítulo 5.
Fabricación del prototipo pruebas y resultados.

5.1 Fabricación de piezas.

Como se mencionó en el capítulo 4, para la fabricación del prototipo se utilizó una máquina de modelado por deposición fundida, de la marca *Creality*®, modelo *Ender 3*.

También se utilizó un filamento PLA 1.75 mm de la marca *SUNLU*®, en color negro.

Las piezas fueron diseñadas mediante el software *CAD Autodesk Inventor Professional 2022*®.

Previo a su fabricación, las piezas fueron exportadas en archivo STL y utilizando el software *Ultimaker Cura 4.10.0*®, se modificaron los parámetros de impresión, para así generar el “Código G” que son instrucciones que la máquina debe seguir para fabricar las piezas.

Los cilindros roscados fueron fabricados en acero 1045, por ello se maquinaron utilizando un torno convencional horizontal,

Primero se fabricaron todas las falanges, con los parámetros de impresión de las probetas utilizadas para el ensayo de tracción. Utilizando un patrón de impresión cúbico bitruncado.

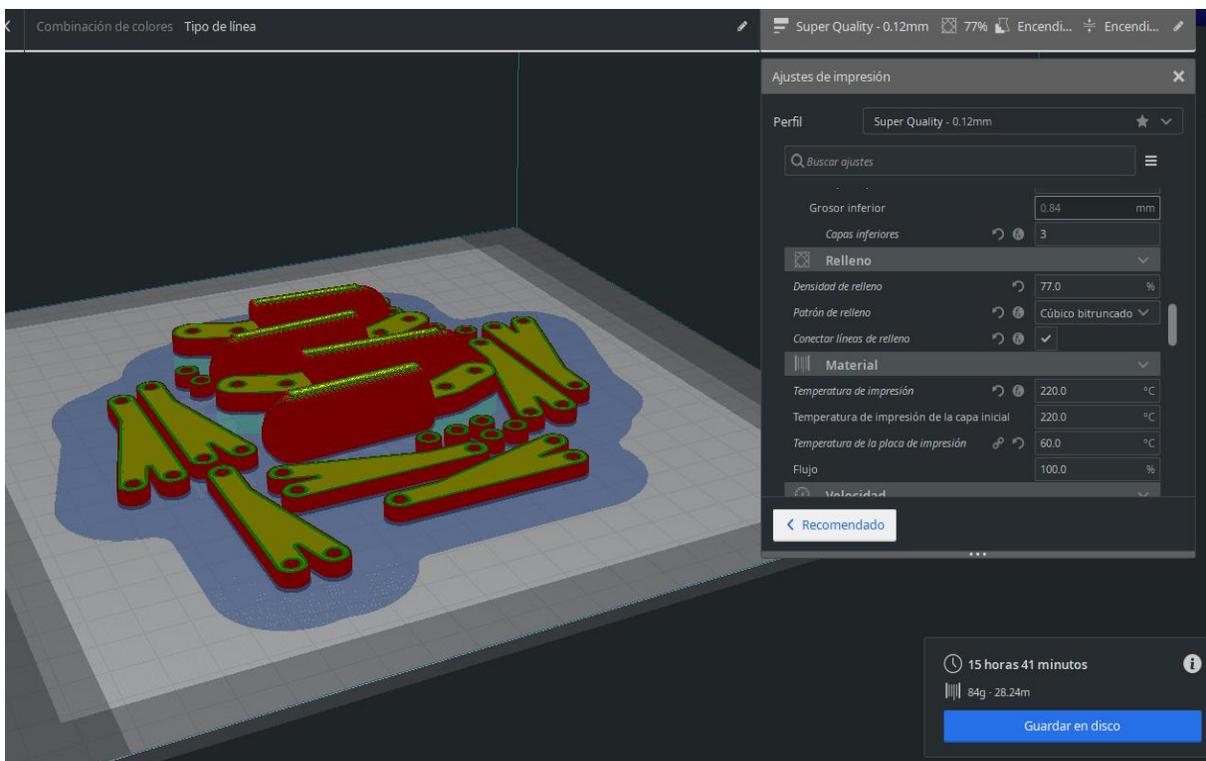


Imagen 107. Preparación de falanges

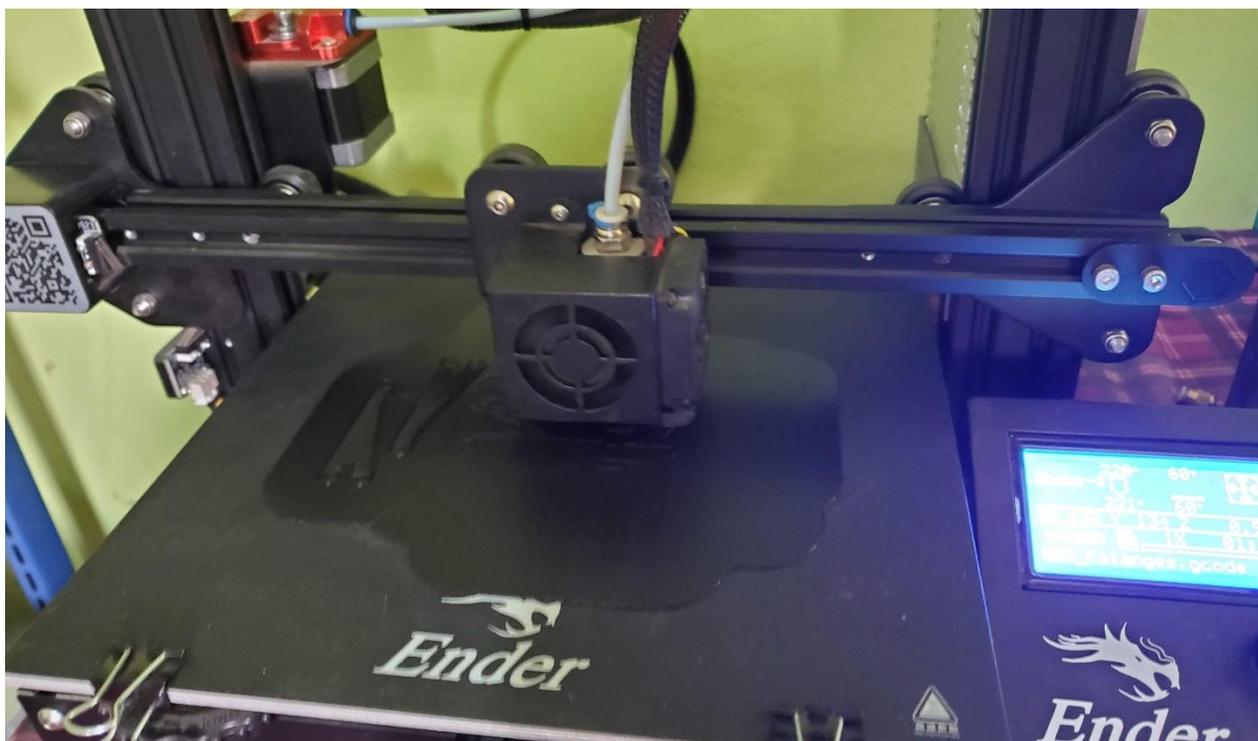


Imagen 108. Impresión de falanges.

Posteriormente se fabricaron las bielas, eslabones de apoyo y espaciadores.

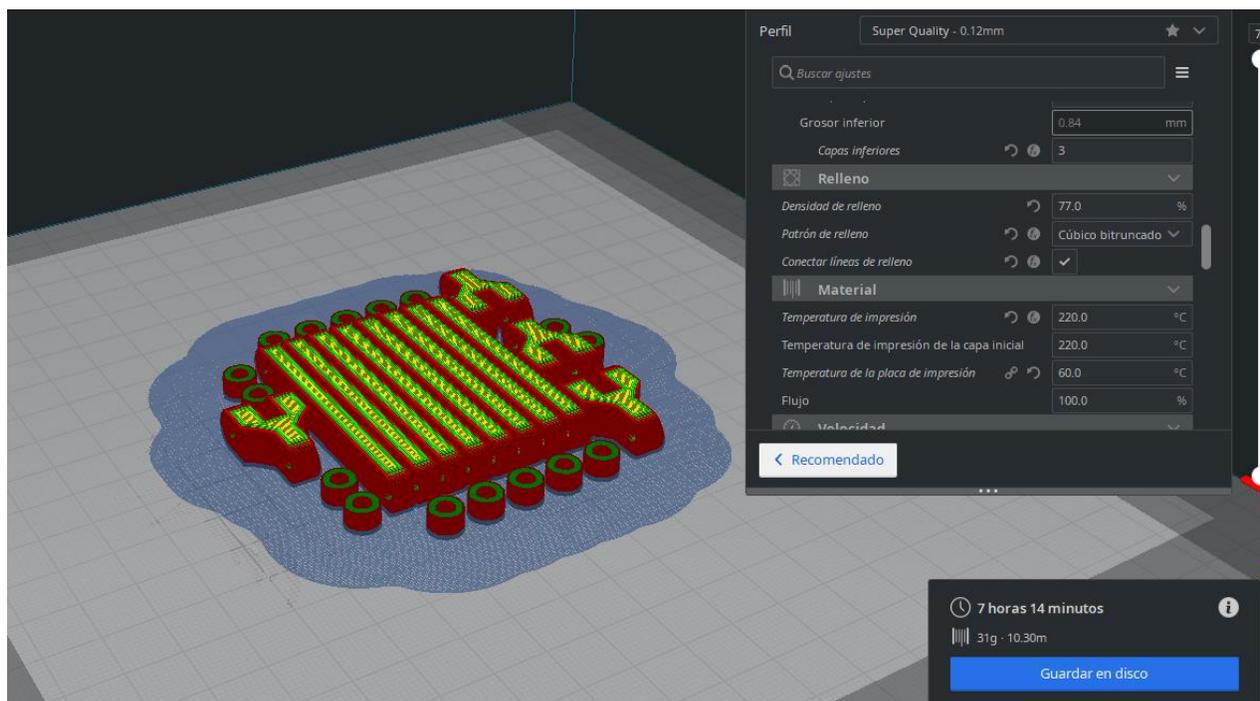


Imagen 109. Segmentación de bielas

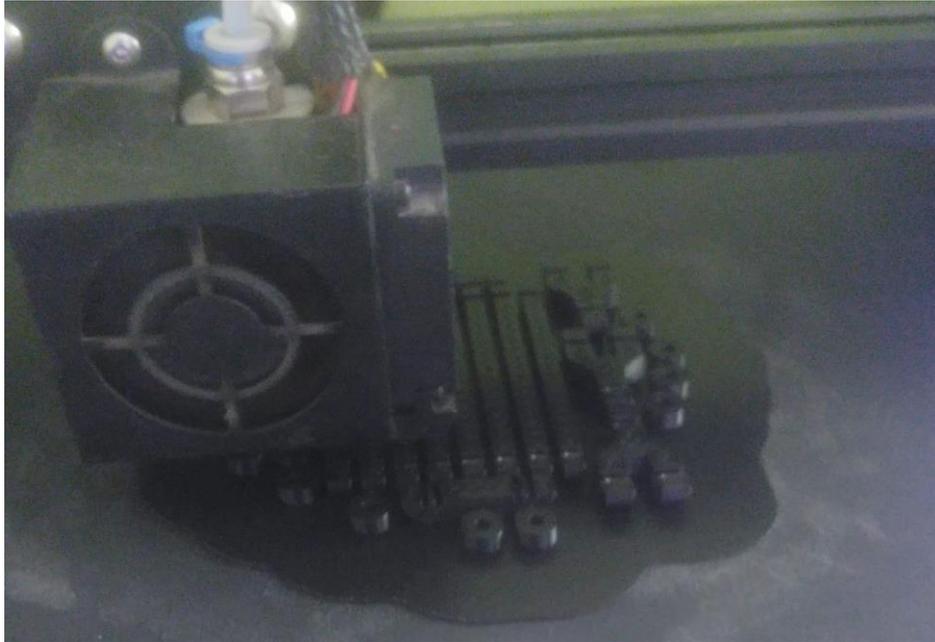


Imagen 110. Impresión de bielas eslabones y espaciadores

Después se fabricaron las partes que conforman el pulgar y la muñeca de desconexión rápida.

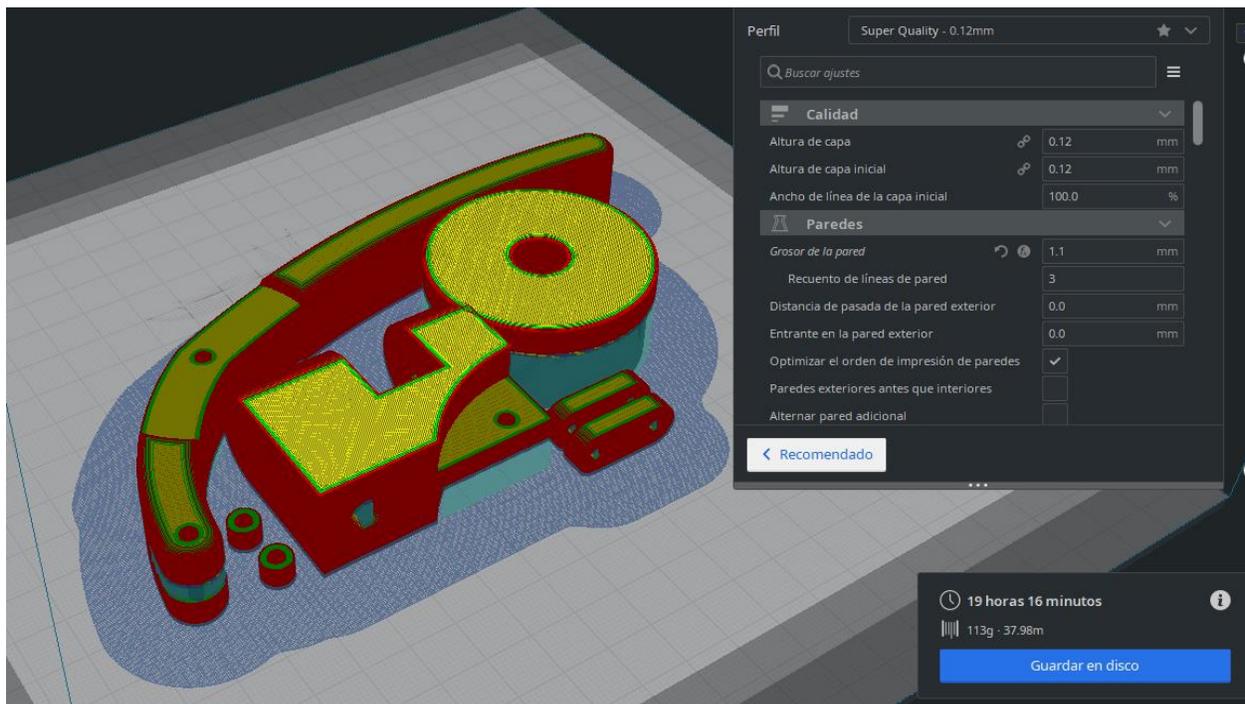


Imagen 111. Segmentación del pulgar

Finalmente se fabricó la estructura de soporte (palma) y la cubierta.

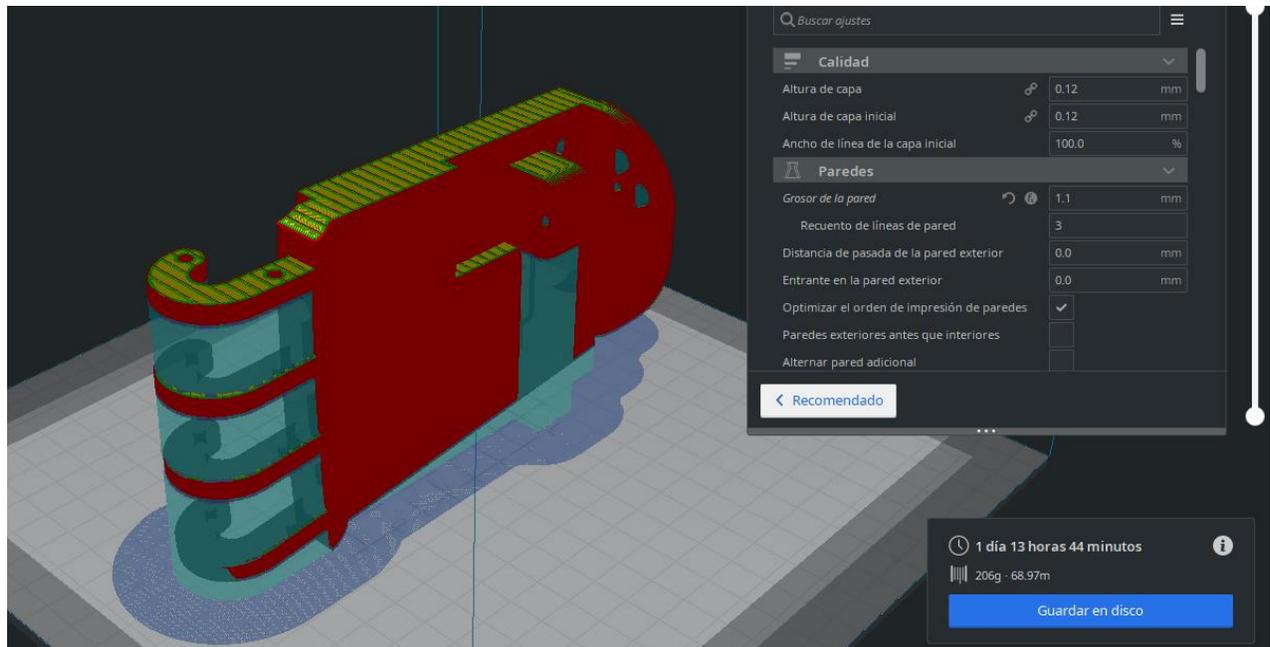


Imagen 112. Segmentación de palma

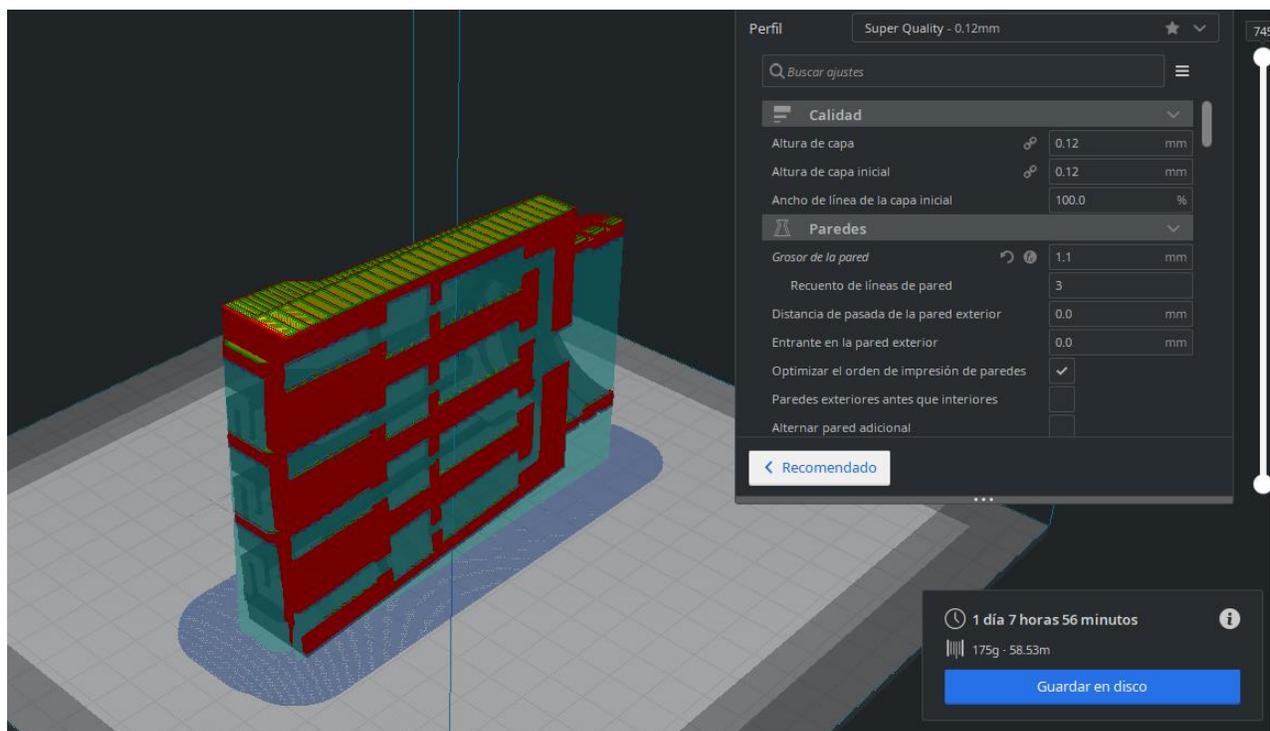


Imagen 113. Segmentación de cubierta.

5.2 Ensamble final del prototipo

Después de fabricar todas las piezas, se ensamblaron los dedos a la estructura de soporte, utilizando pernos de 1/8" de acero inoxidable.

Posteriormente se ensamblaron las bielas y cilindros roscados a cada dedo.

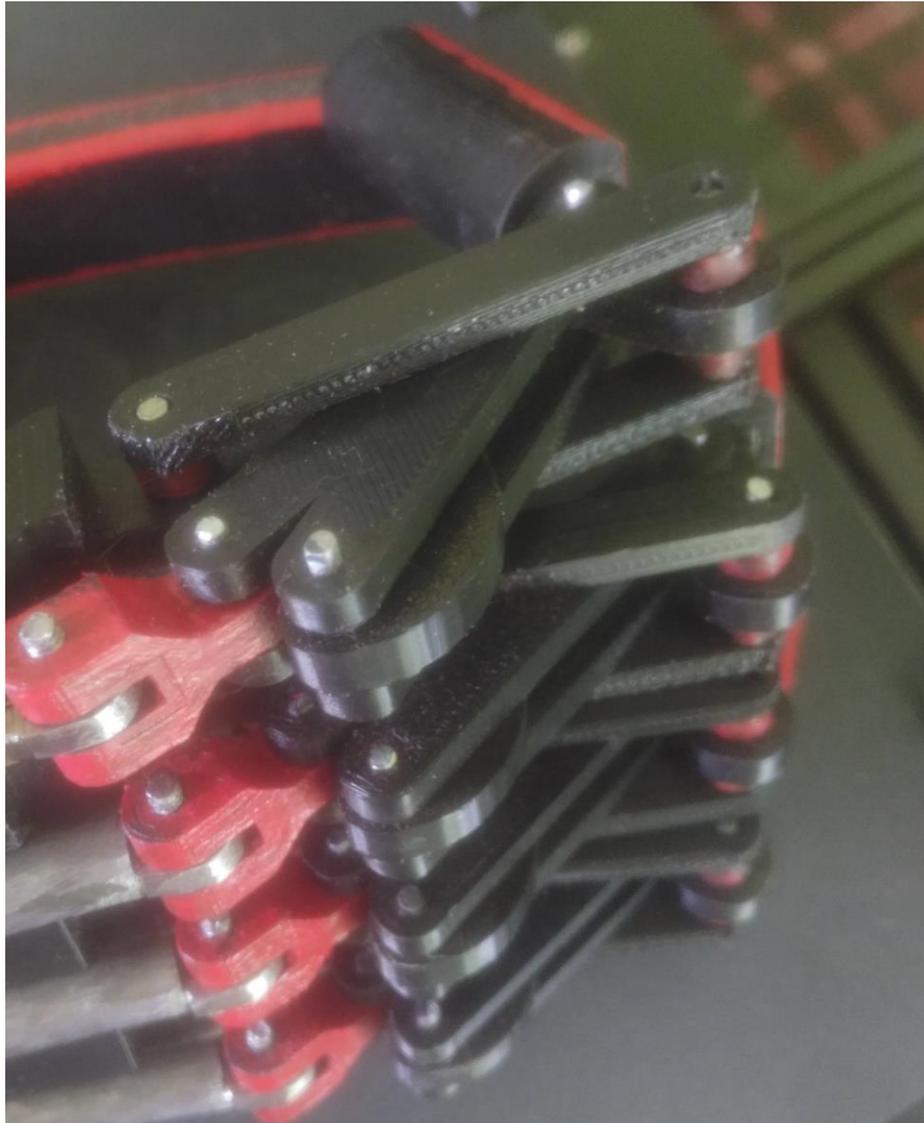


Imagen 114. Ensamble de falanges

Una vez colocados los dedos, se colocaron los tornillos, motores y la muñeca de desconexión rápida, agregando un poco de aceite para maquina en la cuerda de los tornillos y en las cavidades de la palma.

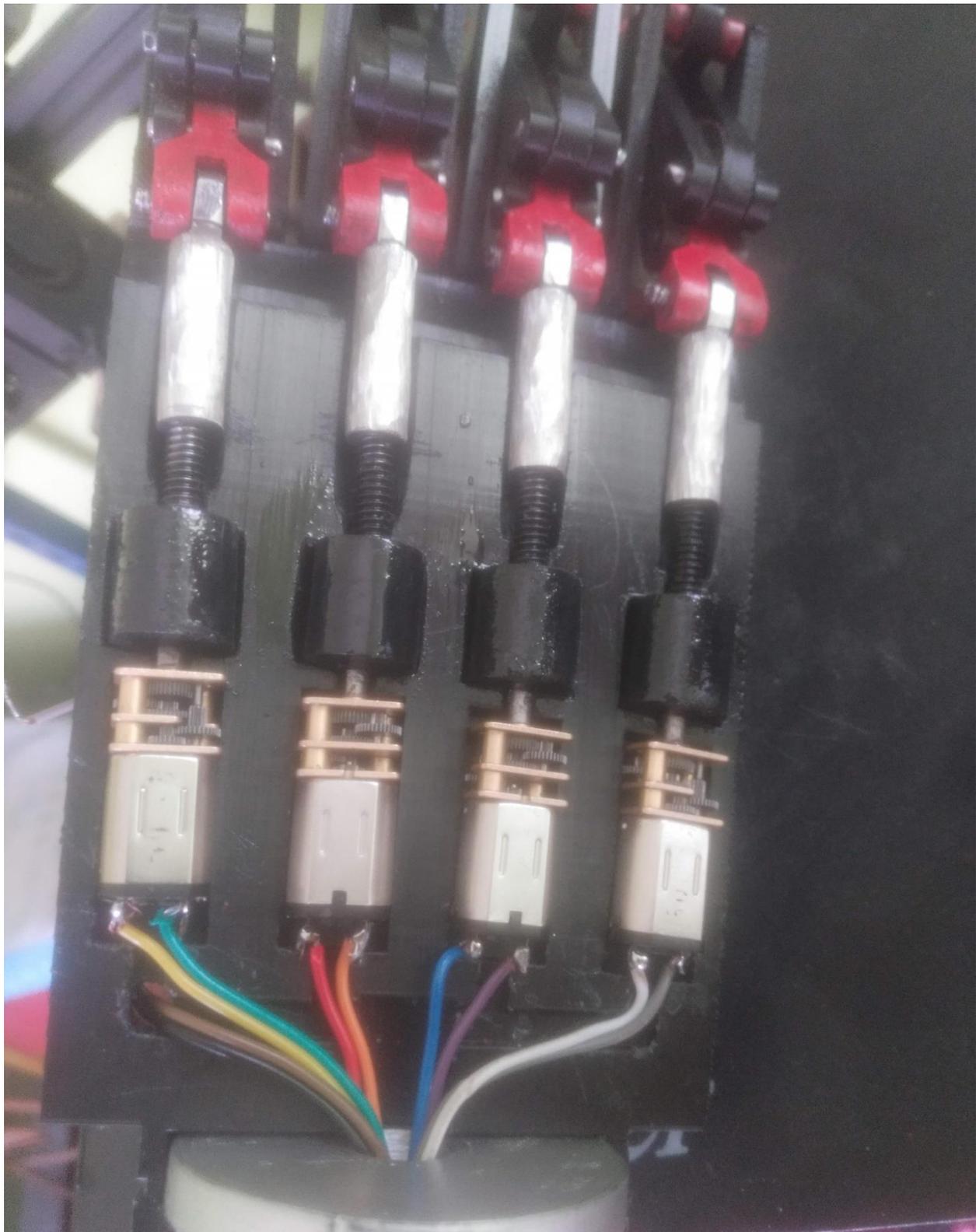


Imagen 115. Colocación de motores

Después de verificar que todas las piezas estuvieran ensambladas, se cortaron 4 láminas de metal, para sujetar la cubierta a la palma.

Cabe destacar que el prototipo tiene un peso de 600 g, por lo que se encuentra en el límite establecido en las especificaciones de diseño.



Imagen 116. Prototipo terminado.

5.3 Pruebas de sujeción.

Después de verificar que todos los elementos que conforman el prototipo estuvieran instalados correctamente, se conectaron los motores a una fuente de alimentación de 9v, con el objetivo de probar el correcto funcionamiento de los dedos, es decir los movimientos de flexión y extensión.

Agarre palmar

La primera prueba de sujeción realizada fue un agarre palmar, sujetando una botella de agua de 600 ml.

Posteriormente se decidió probar este agarre con diferentes objetos, que son mostrados a continuación:

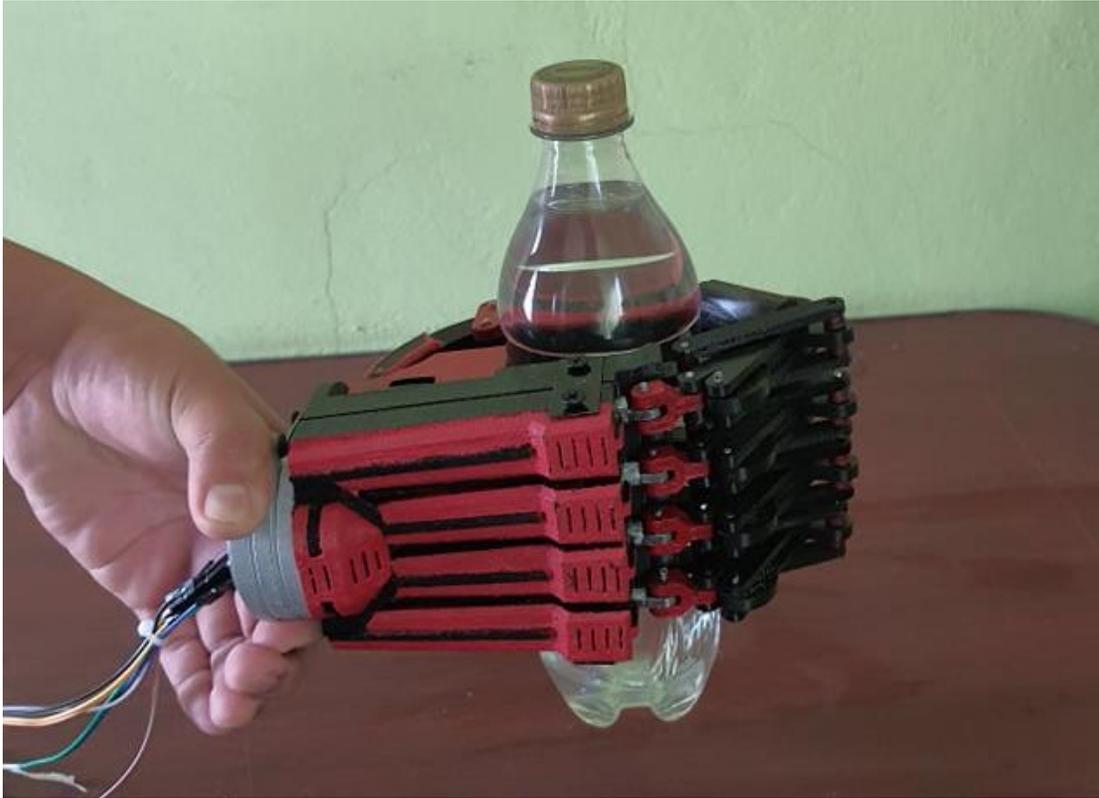


Imagen 117, Sujeción de botella de agua



Imagen 118. Sujeción de vaso

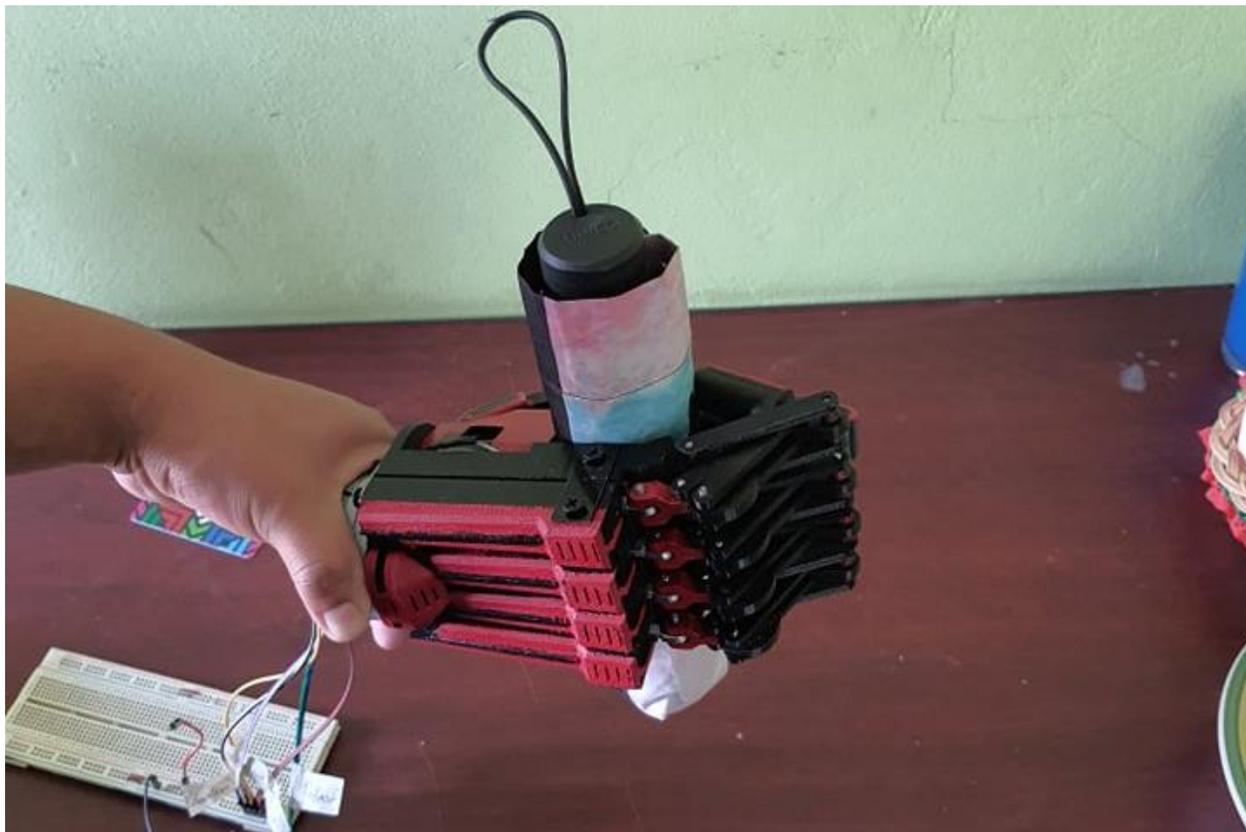


Imagen 119. Sujeción de sombrilla

Agarre de gancho

El segundo tipo de sujeción que puede realizar el prototipo es agarre de gancho, por ello se decidió probar este agarre con una mochila, que en su interior contenía un peso aproximado de 1 kg.

Después de superar esta prueba con éxito, se prosiguió a sujetar una canasta que contenía algunas golosinas.



Imagen 120. Sujeción de mochila



Imagen 121. Sujeción de canasta

Agarre trípode

El tercer agarre que puede realizar el prototipo es un agarre trípode, donde se sujeta un objeto con los dedos índice, medio y pulgar. El movimiento del prototipo fue el esperado al realizar este tipo de agarre y no presentó dificultades para sujetar un plumón.



Imagen 122. Agarre trípode.

Palma extendida

Como se mencionó en el capítulo 4, el pulgar es de dos posiciones, es decir se puede realizar un movimiento de abducción de forma manual.

Después de mover el pulgar a la segunda posición, los dedos se extendieron en su totalidad, para tener la posición de palma extendida como se muestra a continuación:



Imagen 123. Palma extendida

Una vez en dicha posición, se colocó un plato de porcelana, para probar las capacidades que el prototipo puede ofrecer.



Imagen 124. Prototipo sosteniendo un plato

5.4 Comparación con otras manos protésicas

Una de las manos protésicas más avanzadas hoy en día es el modelo Bebionic (imagen 29) desarrollada por Ottobock, la cual usa inteligencia artificial para dar movilidad a la prótesis.

Recientemente la empresa mexicana P4H Bionics©, desarrolló la siguiente mano protésica, que ofrece nuevas prestaciones en comparación con otros de sus modelos desarrollados anteriormente, la cual incluye un nuevo mecanismo de accionamiento para los dedos, usando engranes helicoidales.

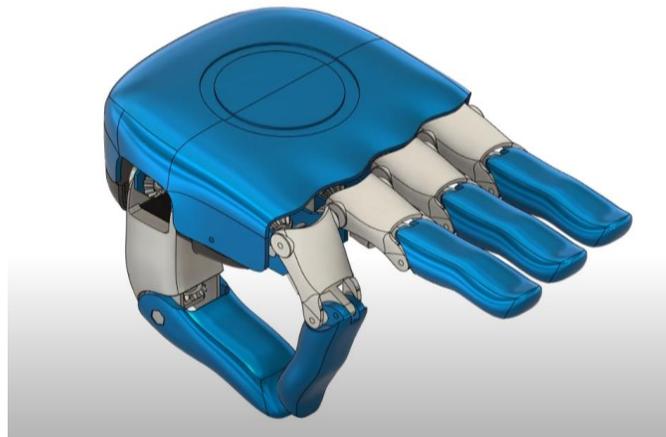


Imagen 125. Mano P4H Bionics
Imagen tomada de P4H Bionics. [19]

Con los resultados obtenidos del prototipo desarrollado en este proyecto, a continuación, se muestra una comparación de funcionalidad de 3 productos.

Parámetro	Bebionic	P4H Bionics	Prototipo
Número de actuadores	5	6	5
Tipos de agarre	8	5	4
Carga máxima	5 Kg	250 g	1 Kg
Fuerza en falanges	12.94 N	1.6 N	4 N
Fuente de energía eléctrica	Batería	Batería	Fuente de poder

Debido a los alcances del proyecto desarrollado en esta tesis, no podría llevarse a cabo una comparativa más compleja, ya que, al tratarse de un prototipo, aún no podría ser utilizado por un paciente.

Conclusiones

El mecanismo propuesto para el diseño de este prototipo cumplió satisfactoriamente el movimiento esperado en cada falange, ya que no se presentaron atascos durante la trayectoria. Por ello en las pruebas de agarre realizadas, el desempeño del prototipo fue mejor al esperado, ya que pudo soportar una carga de aproximadamente 1 kg en agarre de gancho, debido a que el *principio de tornillos de potencia*, establece que el sistema permanece “bloqueado”, hasta que se aplique un par de torsión en el tornillo. Esto favoreció de manera significativa al prototipo, ya que las falanges quedan fijas hasta que el motor vuelva a ser accionado. Otro factor importante en el bloqueo de las falanges, son los micro motorreductores utilizados, ya que resulta complicado girar de forma manual el eje del motor, esto por el tren de engranes que incluye el motor. Teniendo en cuenta estos dos aspectos, se garantiza una buena sujeción de objetos.

Una ventaja significativa al utilizar motorreductores, en comparación con servomotores, es el tamaño, ya que los servomotores, suelen ser más robustos, a medida que aumenta el par de torsión que pueden ofrecer.

Por otro lado, el consumo de corriente de estos actuadores es un factor importante a considerar, ya que el fabricante asegura que a una carga de 6v, cada motor consume 1600 [mA], por ello sería conveniente mandar a fabricar motores que consuman menos corriente y que cumplan con el par de torsión requerido en este proyecto, asimismo que contengan un eje de salida con rosca ACME, ya que según los autores *Budynas & Nisbett [51]*, este tipo de rosca, presenta una mayor eficiencia de transmisión.

Se recomienda fabricar las falanges y parte de la estructura de soporte en aluminio, ya que puede ofrecer una mejor resistencia mecánica. Si la estructura de soporte fuera optimizada, podría reducirse el tamaño, grosor y peso de la mano.

Por otro lado, sería conveniente utilizar una interfaz para controlar los motores, así como el uso de encoders en los mismos.

El pulgar no ofrece un sistema de bloqueo para las dos posiciones, por ello sería conveniente agregar un sistema de bloqueo con un tren de engranes o bien agregar un motor para realizar el movimiento de abducción.

A pesar de que en este proyecto se realizó únicamente el prototipo de una mano protésica, el sistema de transmisión y mecanismo de las falanges podría ser implementado para la fabricación de una prótesis transradial completamente funcional.

Recomendaciones

Como primer punto, se recomienda el considerar un diseño para fabricar los actuadores, ya que, en las cavidades de la palma, existe fricción en el elemento que une al tornillo con el eje del motor

Se recomienda fabricar las falanges del prototipo en aluminio, ya que ofrece una mejor resistencia y con ello la capacidad de carga de la mano sería mayor.

Se recomienda rediseñar el cilindro roscado del pulgar, ya que podría flexionarse y extenderse aún más, pero el rango de movimiento está limitado a la longitud del eje del motor.

Es necesario usar un microcontrolador y el integrado L298n, que puede controlar dos motores de corriente continua. Adicionalmente podrían incluirse sensores mioeléctricos, para que los motores sean accionados en base a las contracciones generadas por el músculo.

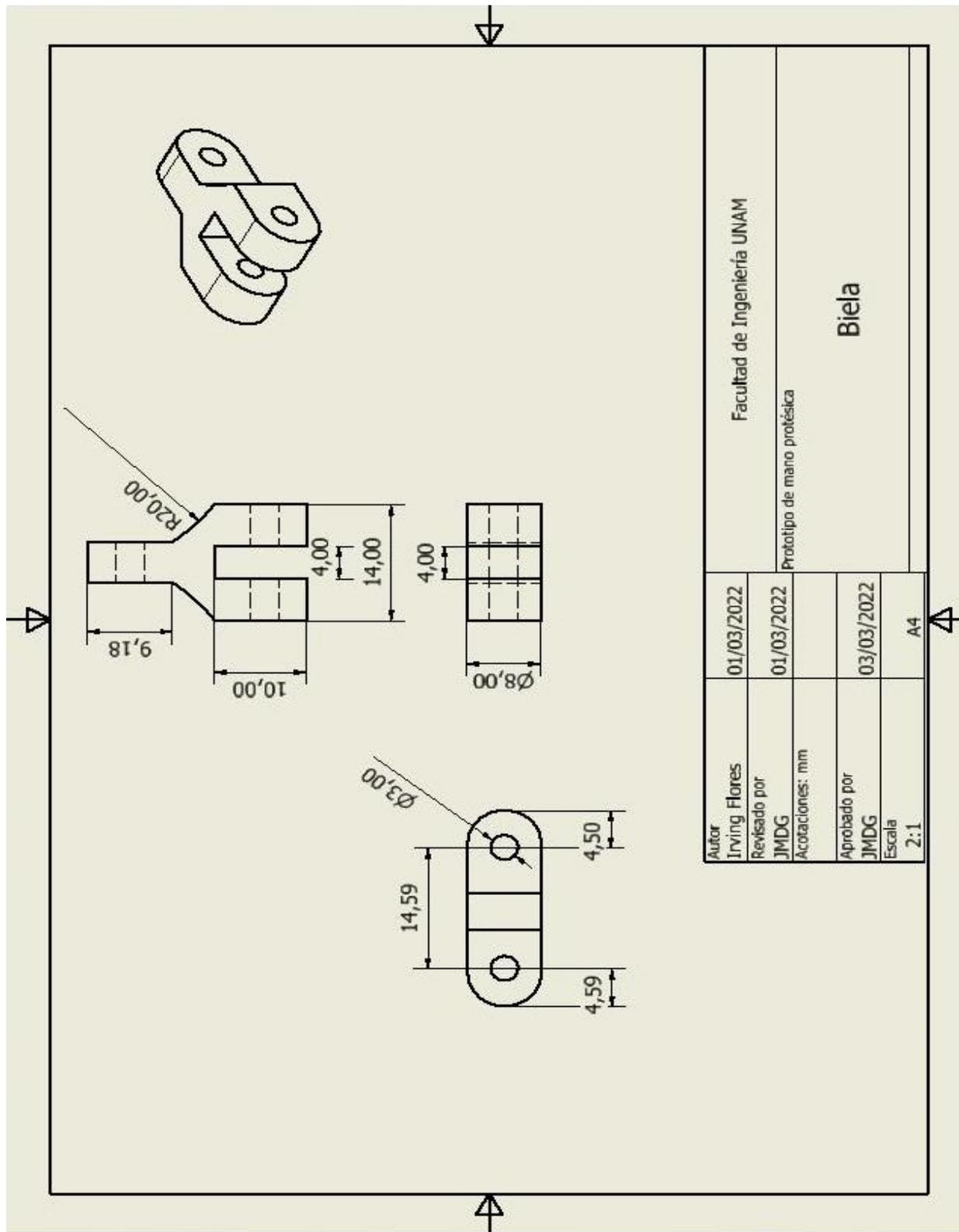
Trabajo a futuro

La muñeca de desconexión rápida utilizada en este proyecto solamente permitiría sujetar el prototipo al socket, pero un inconveniente presentado son los cables de alimentación hacia los motores. Por ello se sugiere:

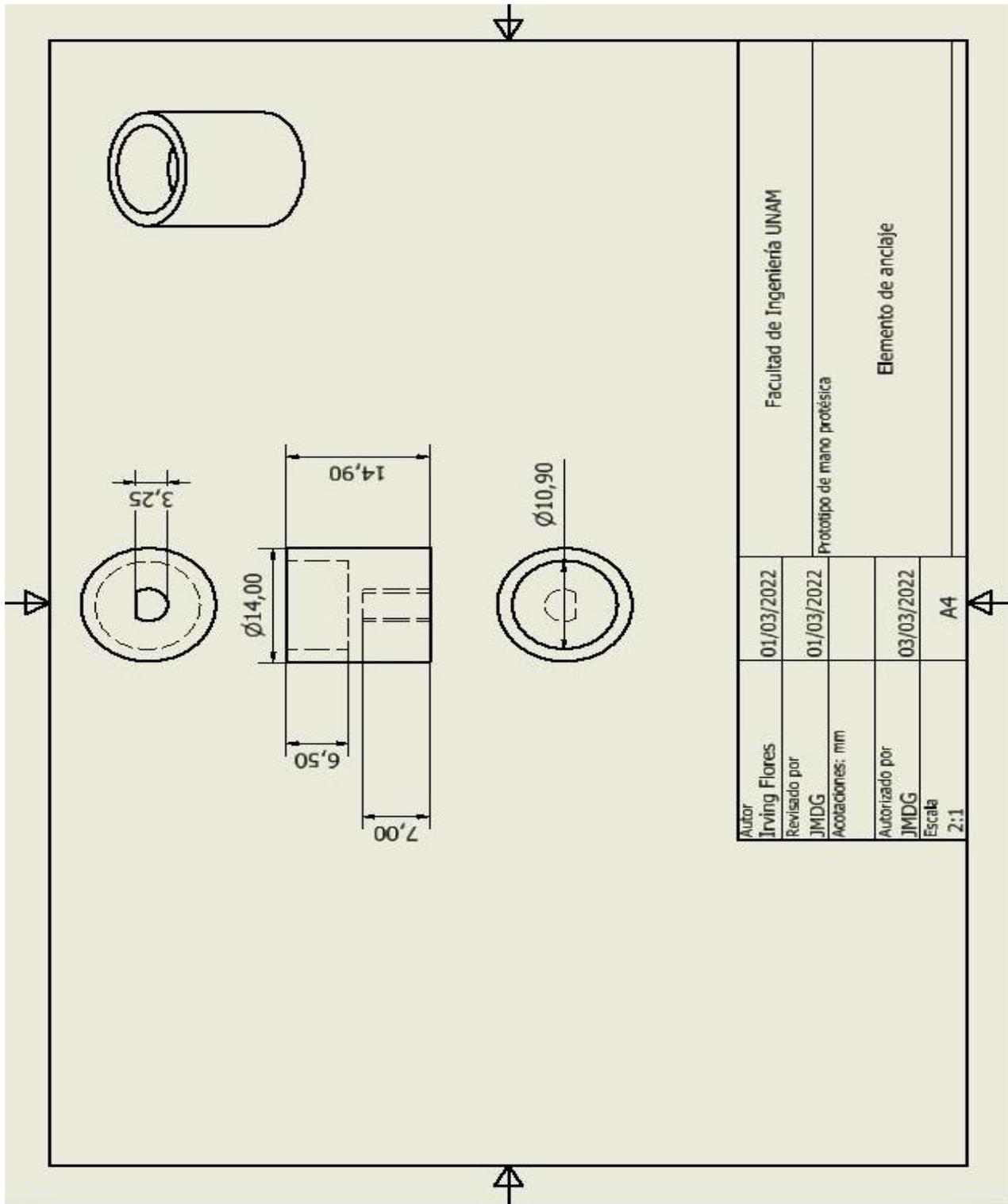
- Optimizar la estructura de soporte.
- Fabricar las falanges en aluminio e incluir carcasas fabricadas en fibra de carbono.
- Mandar a fabricar los motores que cumplan el par de torsión requerido y que contengan un eje de salida con rosca ACME.
- Diseñar una tarjeta que, usando un microcontrolador, pueda recibir señales mioeléctricas y en base a ello, accionar los motores.
- Mandar a fabricar una batería en base al consumo de energía en el sistema.
- Incluir una muñeca de desconexión rápida desarrollada por Maxon®, ya que, se podría utilizar la interfaz que utilizan las manos comerciales (Bebionic, Tasca, Nexus, I-limb), para captar las señales mioeléctricas provenientes del muñón.

Al cumplir estos objetivos, se pretende que un paciente con amputación transradial o desarticulación de codo, pueda probar el funcionamiento de la mano desarrollada.

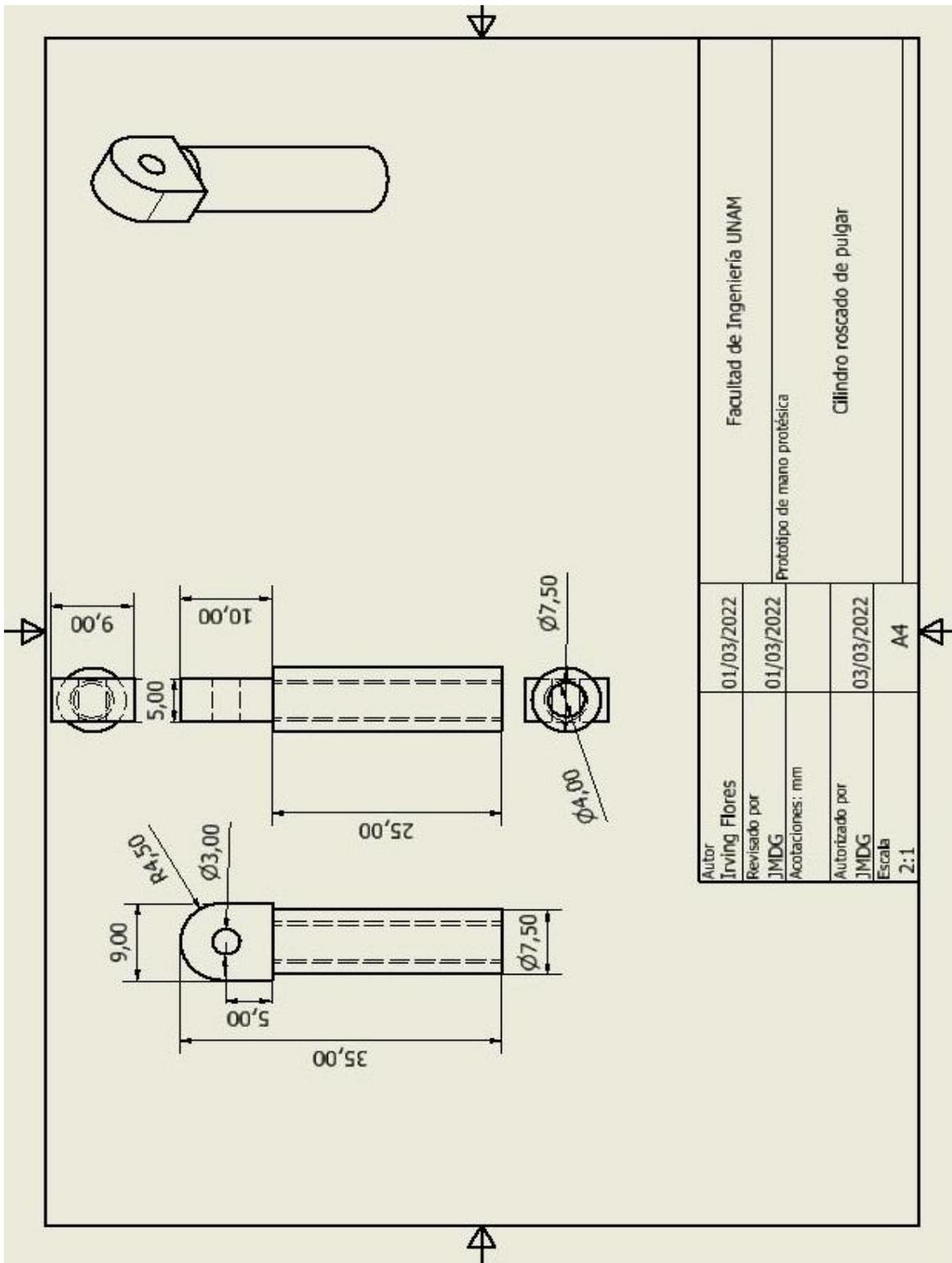
Apendice A
Planos del prototipo

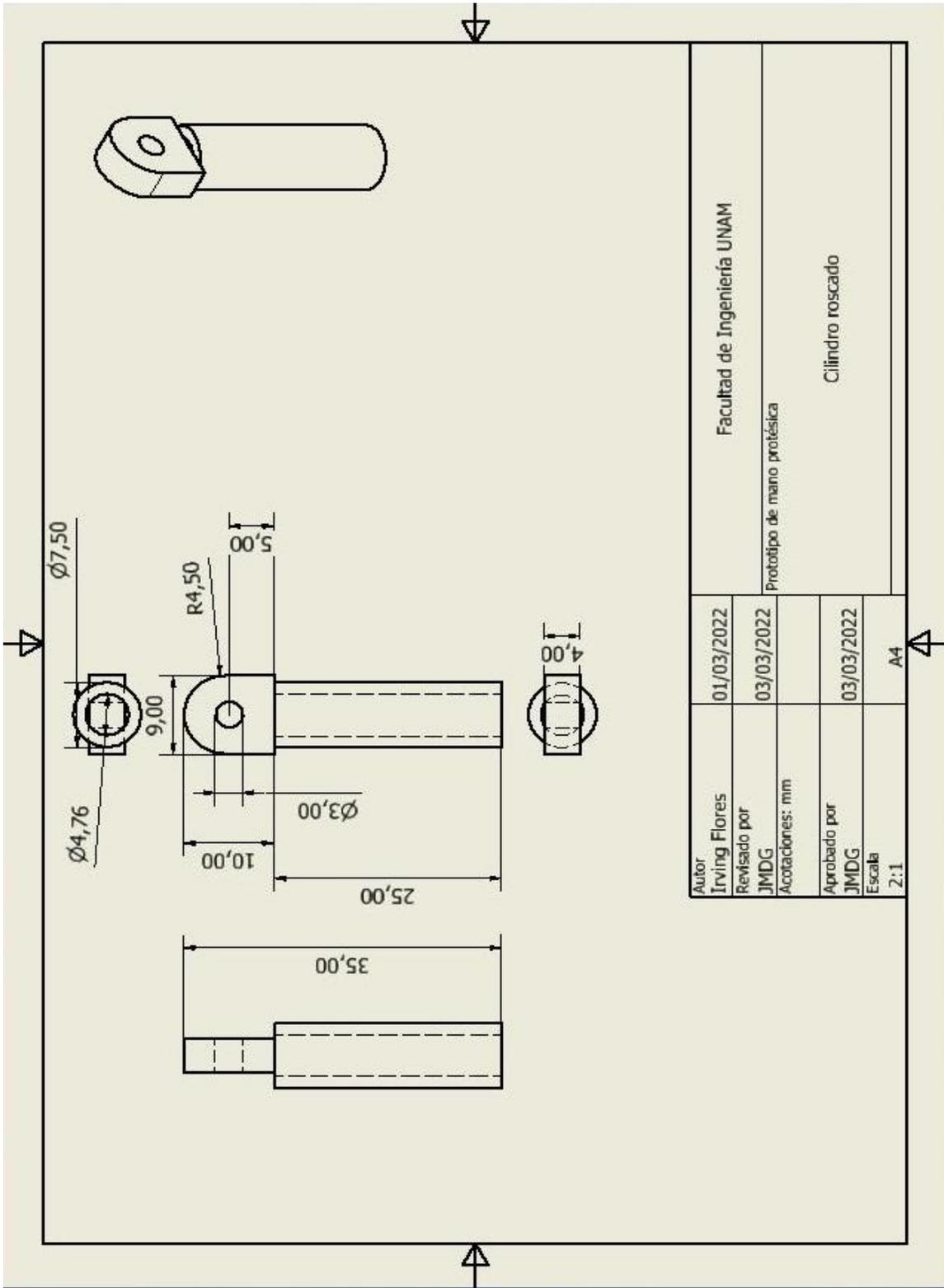


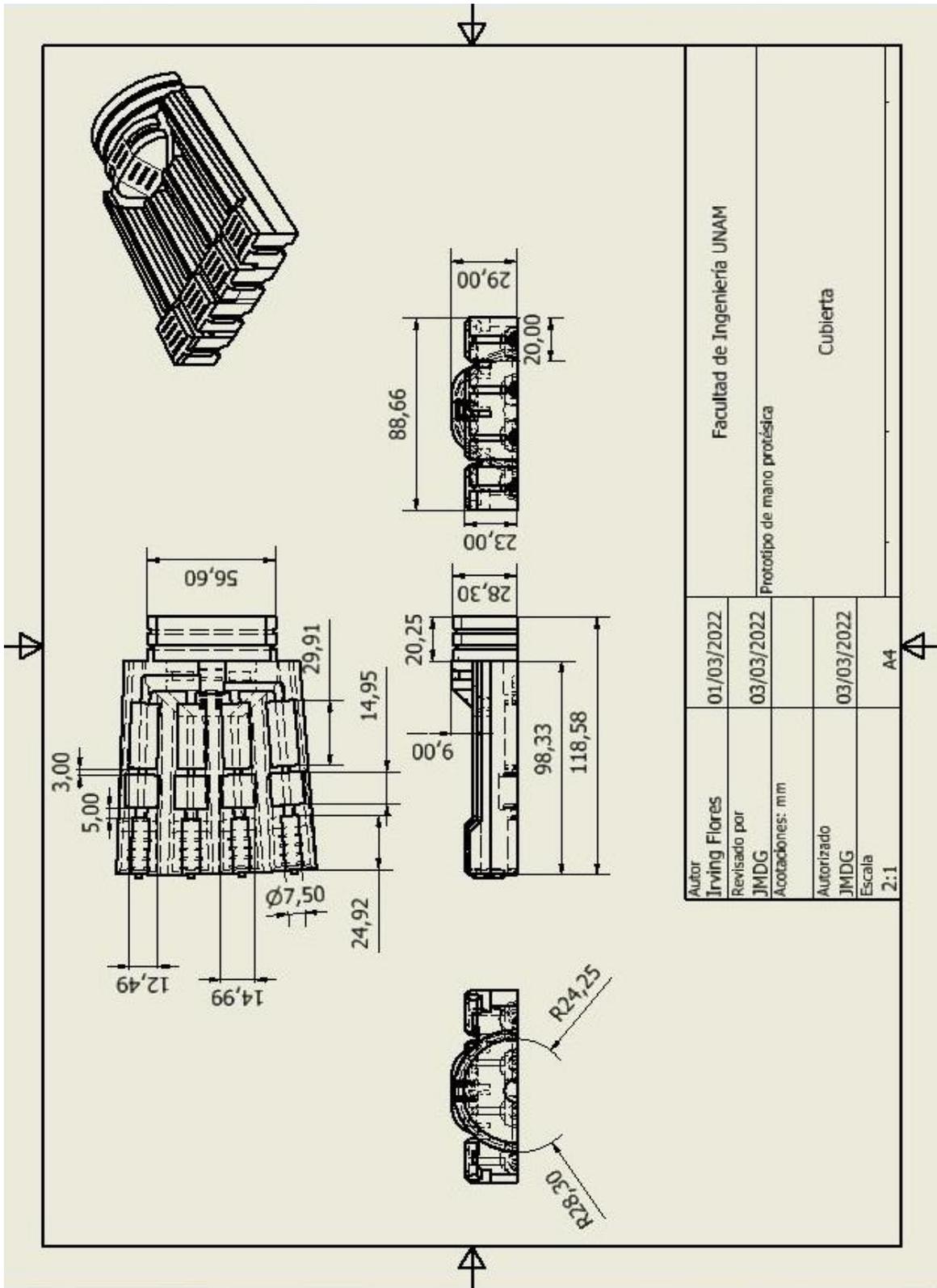
Facultad de Ingeniería UNAM	
Prototipo de mano protésica	
Biela	
Autor	01/03/2022
Irving Flores	
Revisado por	01/03/2022
JMDG	
Acreditaciones: mm	
Aprobado por	03/03/2022
JMDG	
Escala	A4
2:1	

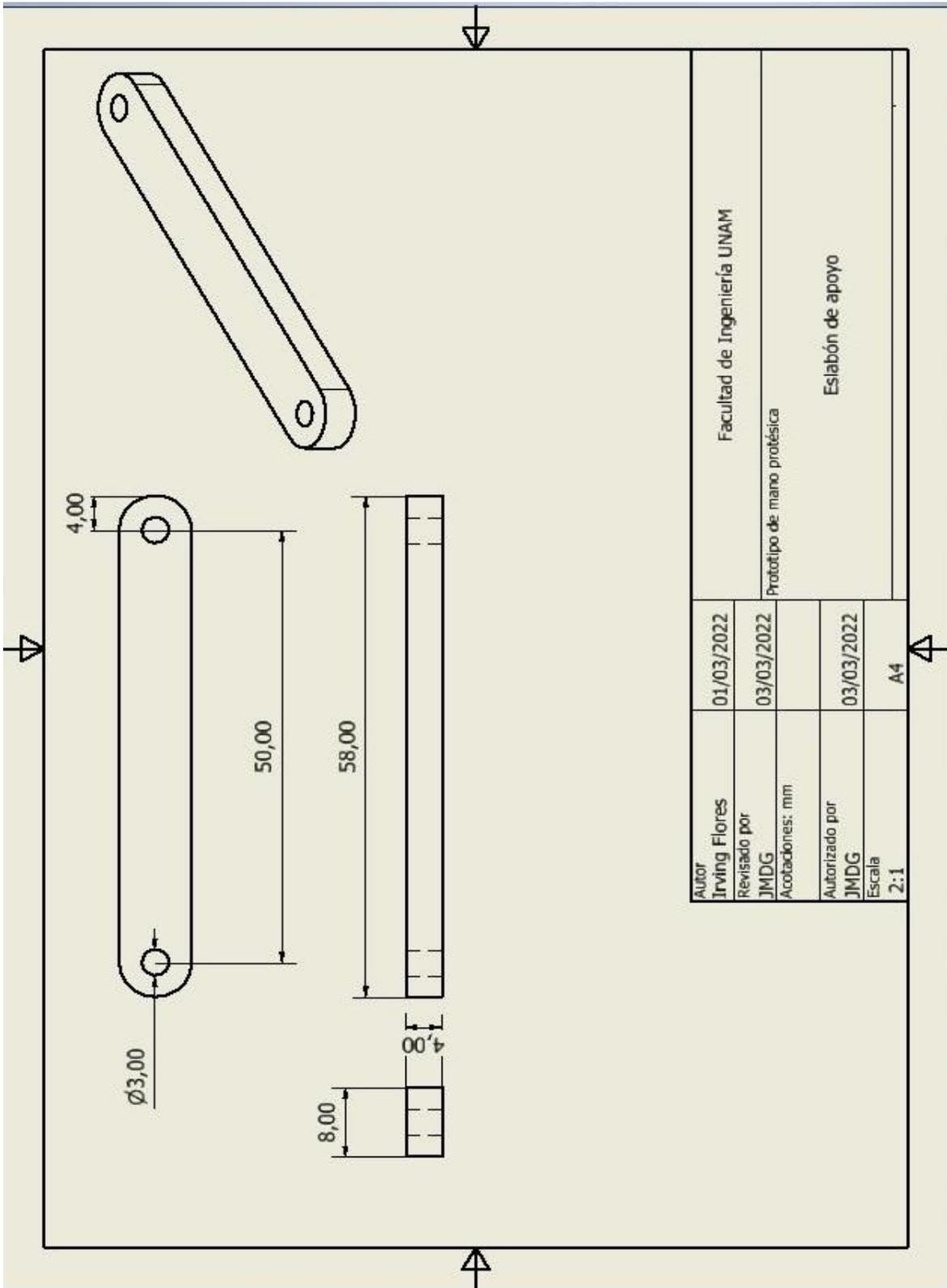


Autor	01/03/2022	Facultad de Ingeniería UNAM
Irving Flores		
Revisado por	01/03/2022	Prototipo de mano protésica
JMDG		
Aclaraciones: mm		Elemento de anclaje
Autorizado por	03/03/2022	
JMDG		
Escala	A4	
2:1		

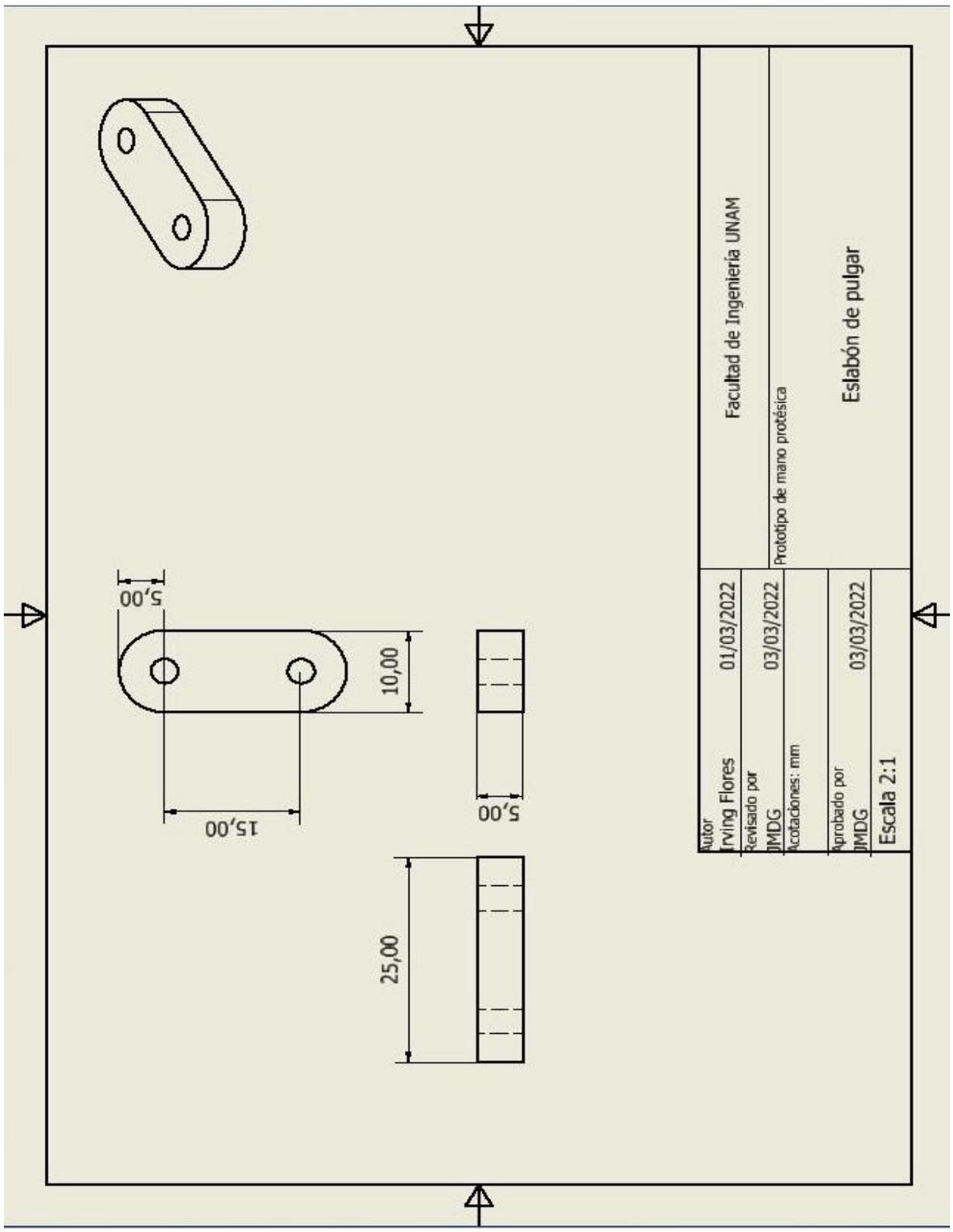




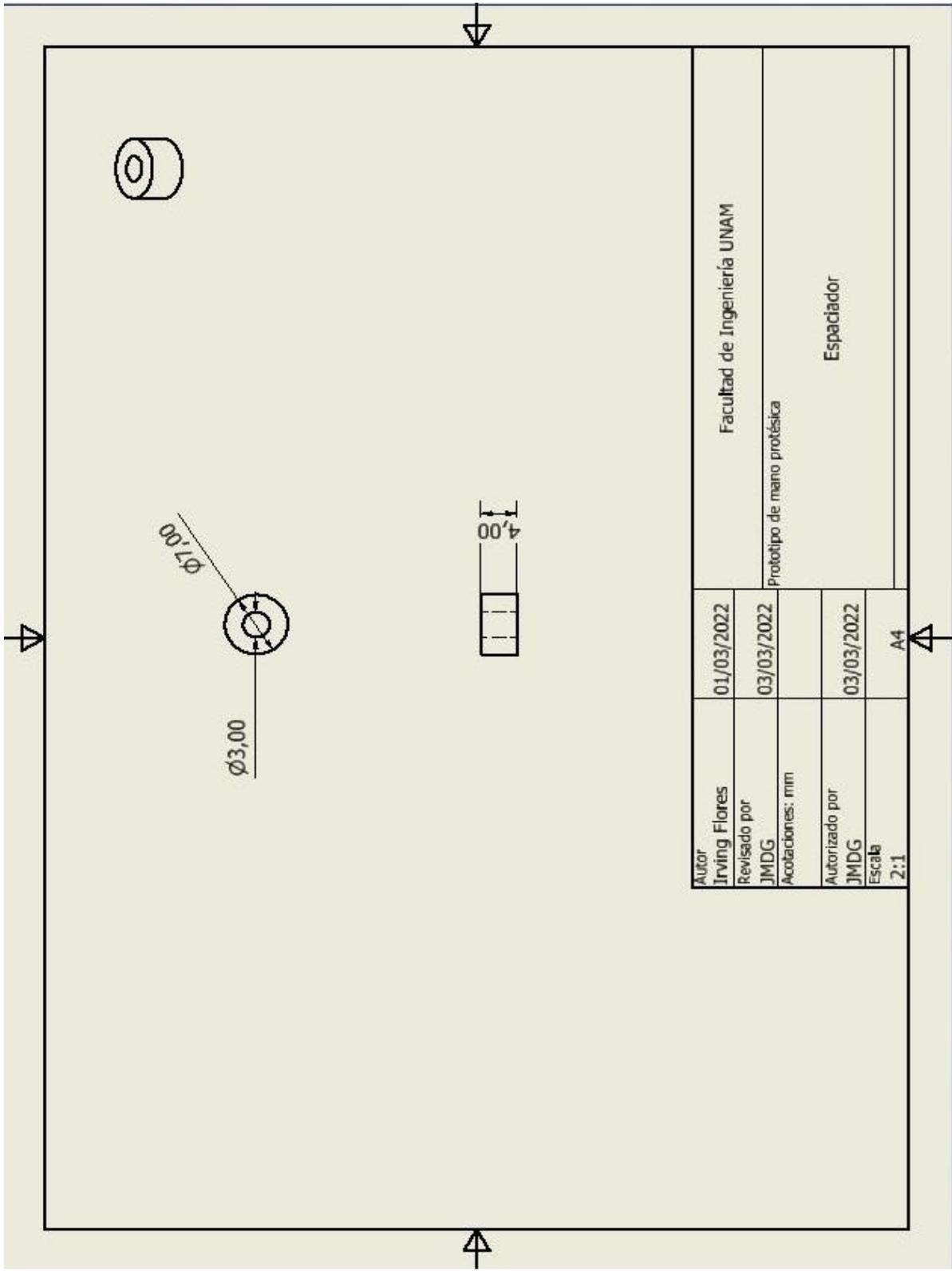


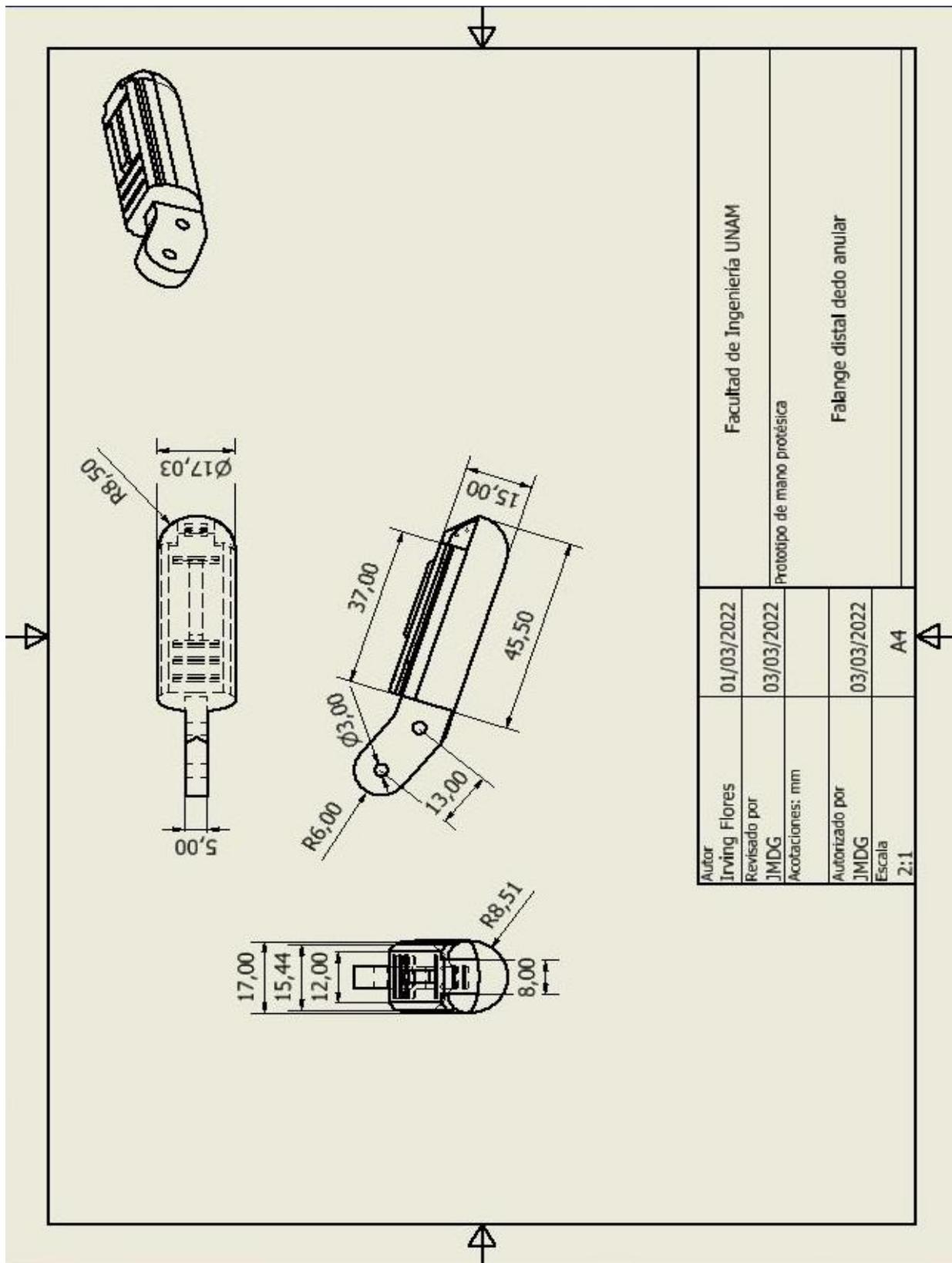


Autor Irving Flores Revisado por JMDG Acreditaciones: mm Autorizado por JMDG Escala 2:1	01/03/2022 03/03/2022 03/03/2022 A4	Facultad de Ingeniería UNAM Prototipo de mano protésica Eslabón de apoyo
---	--	--

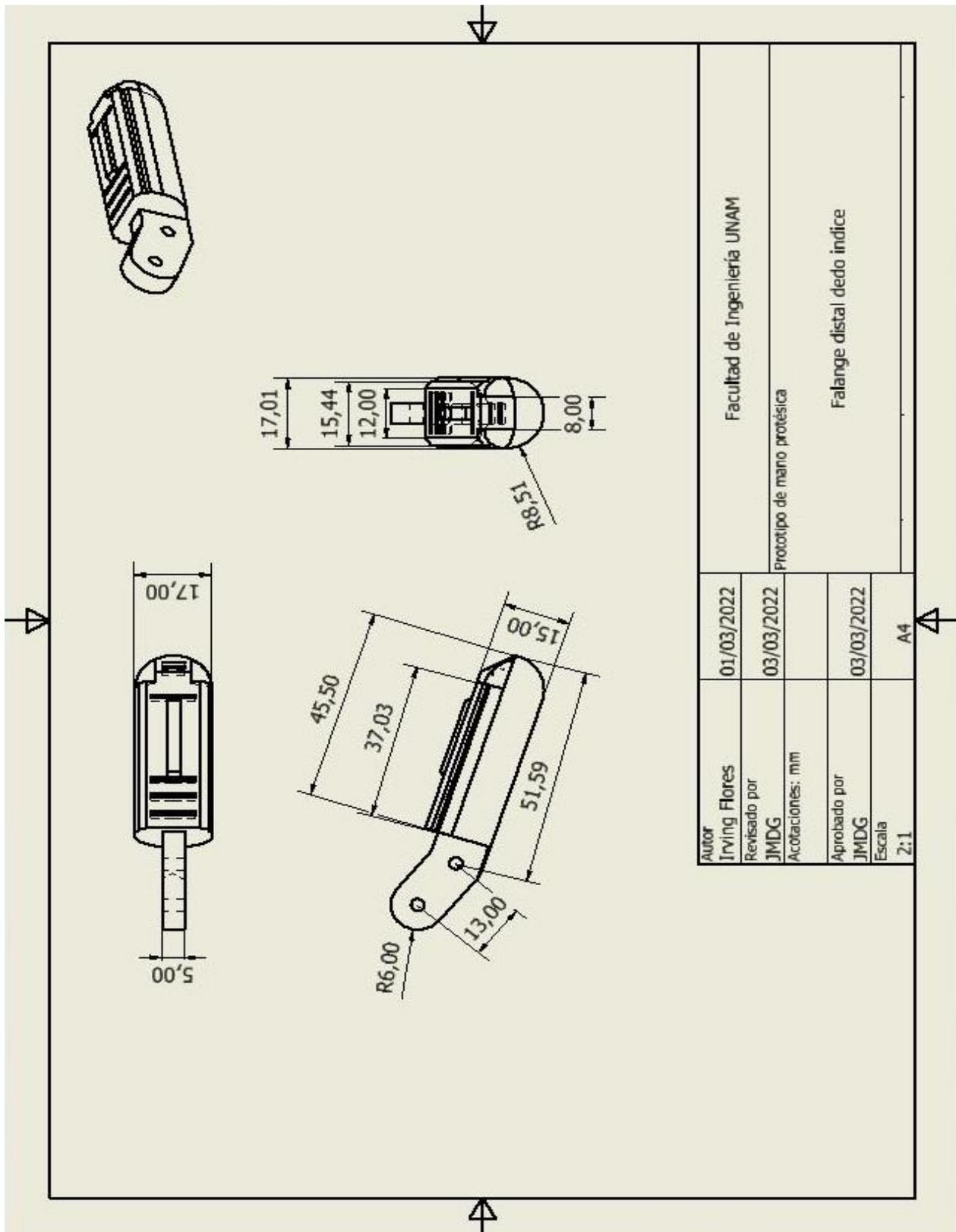


Autor		Facultad de Ingeniería UNAM	
Irving Flores	01/03/2022	Prototipo de mano protésica	
Revisado por		Eslabón de pulgar	
JMDG	03/03/2022		
Anotaciones: mm			
Aprobado por			
JMDG	03/03/2022		
Escala 2:1			

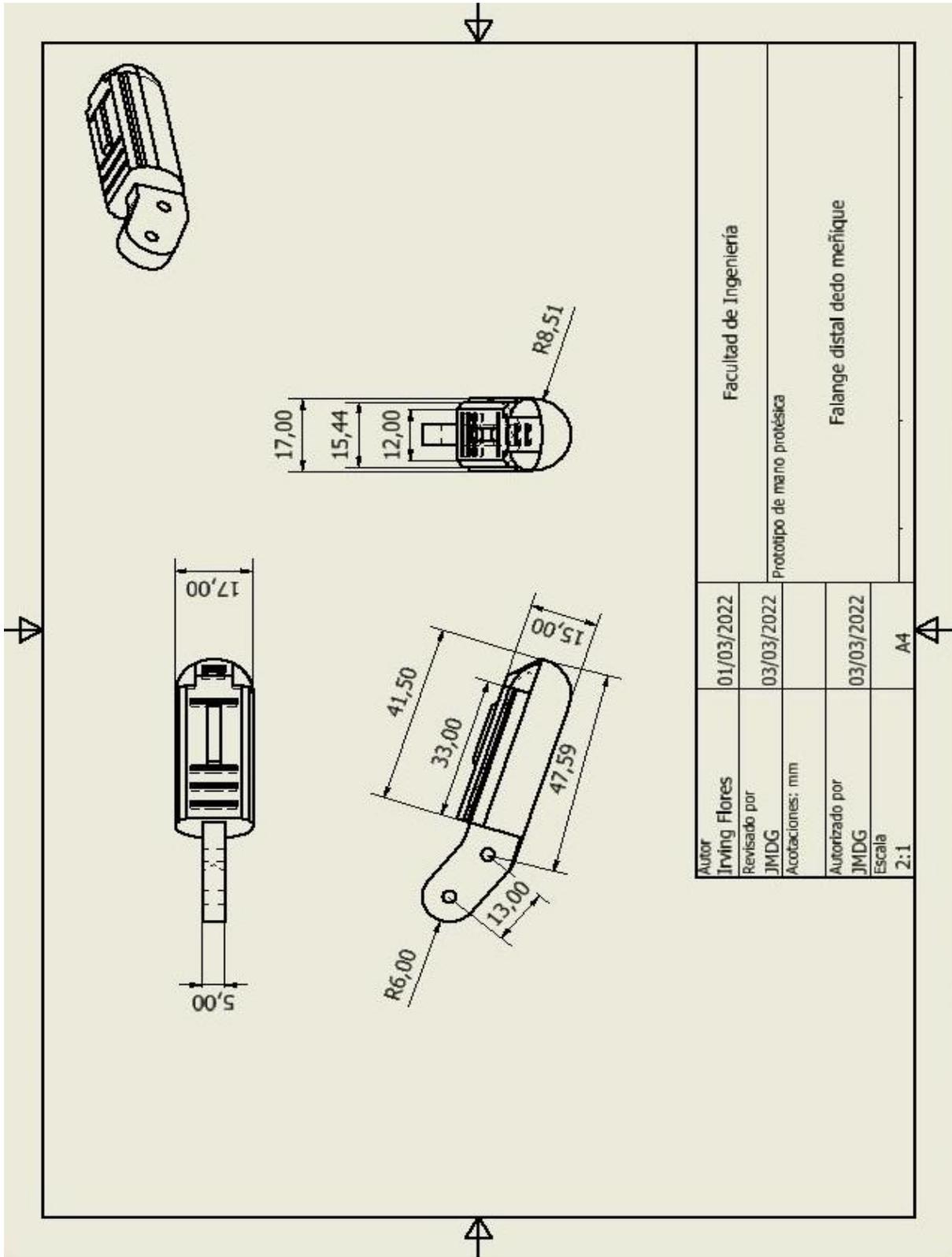




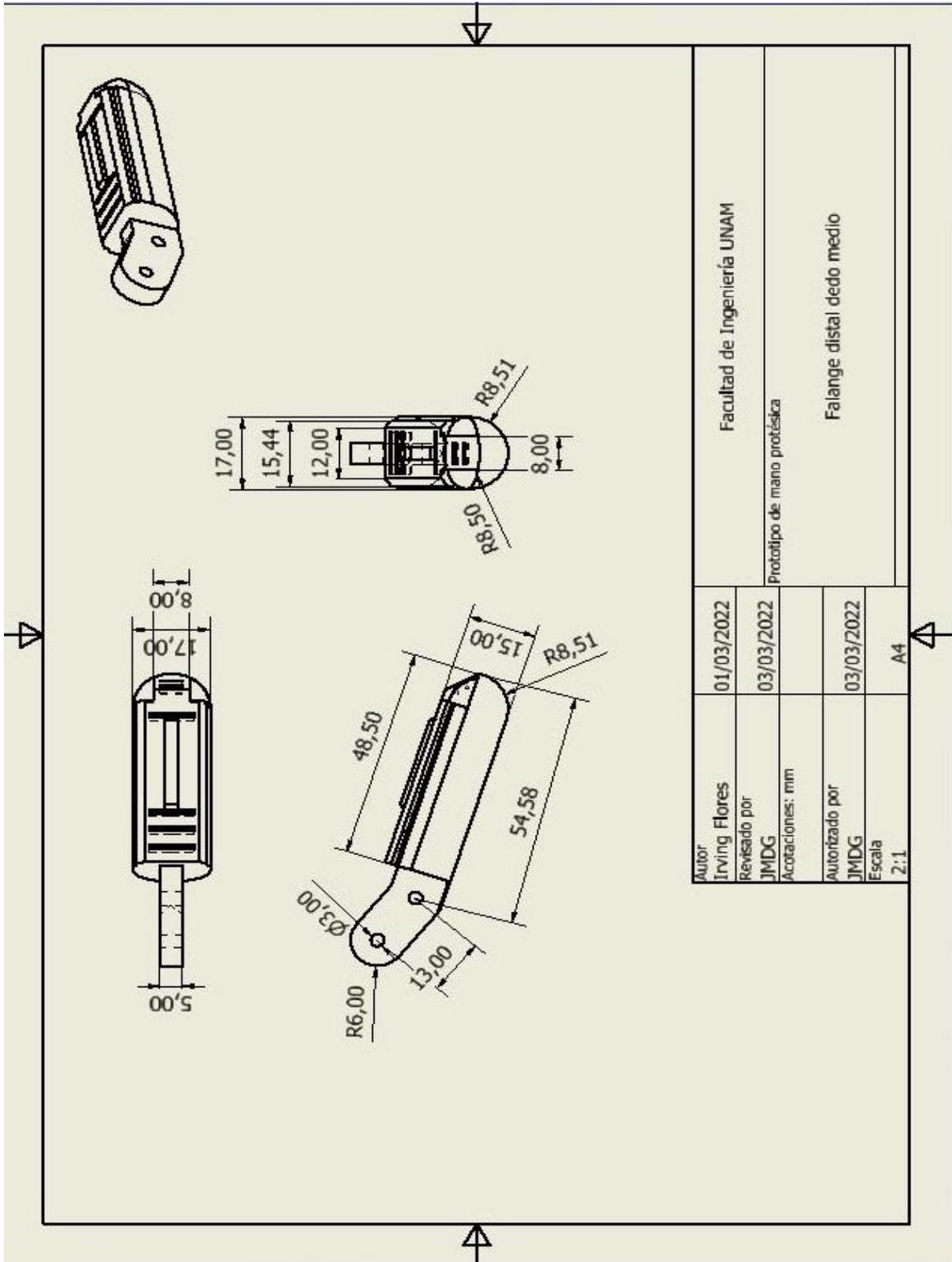
Autor	01/03/2022	Facultad de Ingeniería UNAM
Irving Flores	03/03/2022	Prototipo de mano protésica
Revisado por	03/03/2022	Falange distal dedo anular
JMDG		
Acreditaciones: mm		
Autorizado por	03/03/2022	
JMDG		
Escala	A4	
2:1		



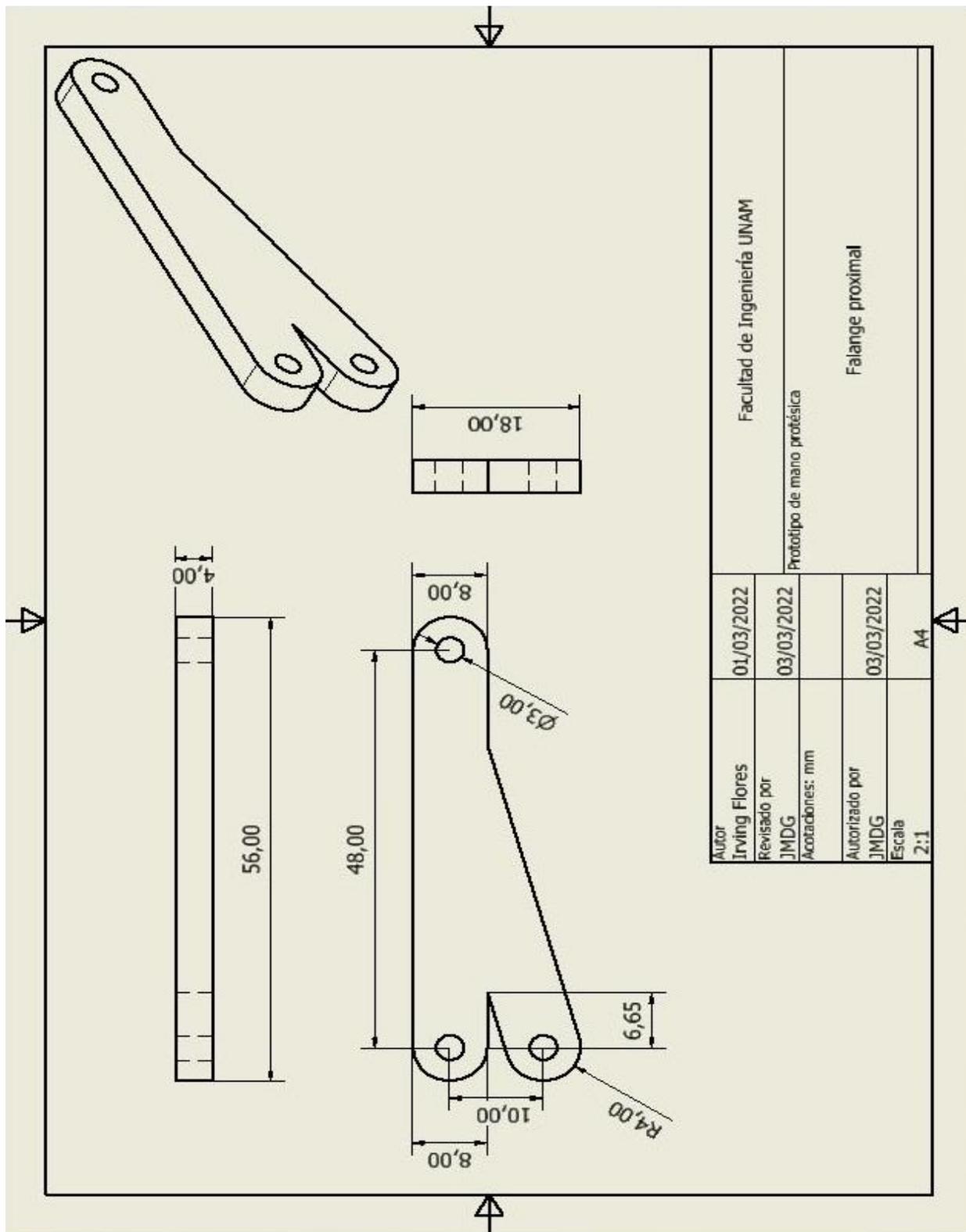
Autor		Facultad de Ingeniería UNAM	
Irving Flores		Prototipo de mano protésica	
Revisado por		Falange distal dedo índice	
JMDG			
Anotaciones: mm			
Aprobado por			
JMDG			
Escala			
2:1		A4	



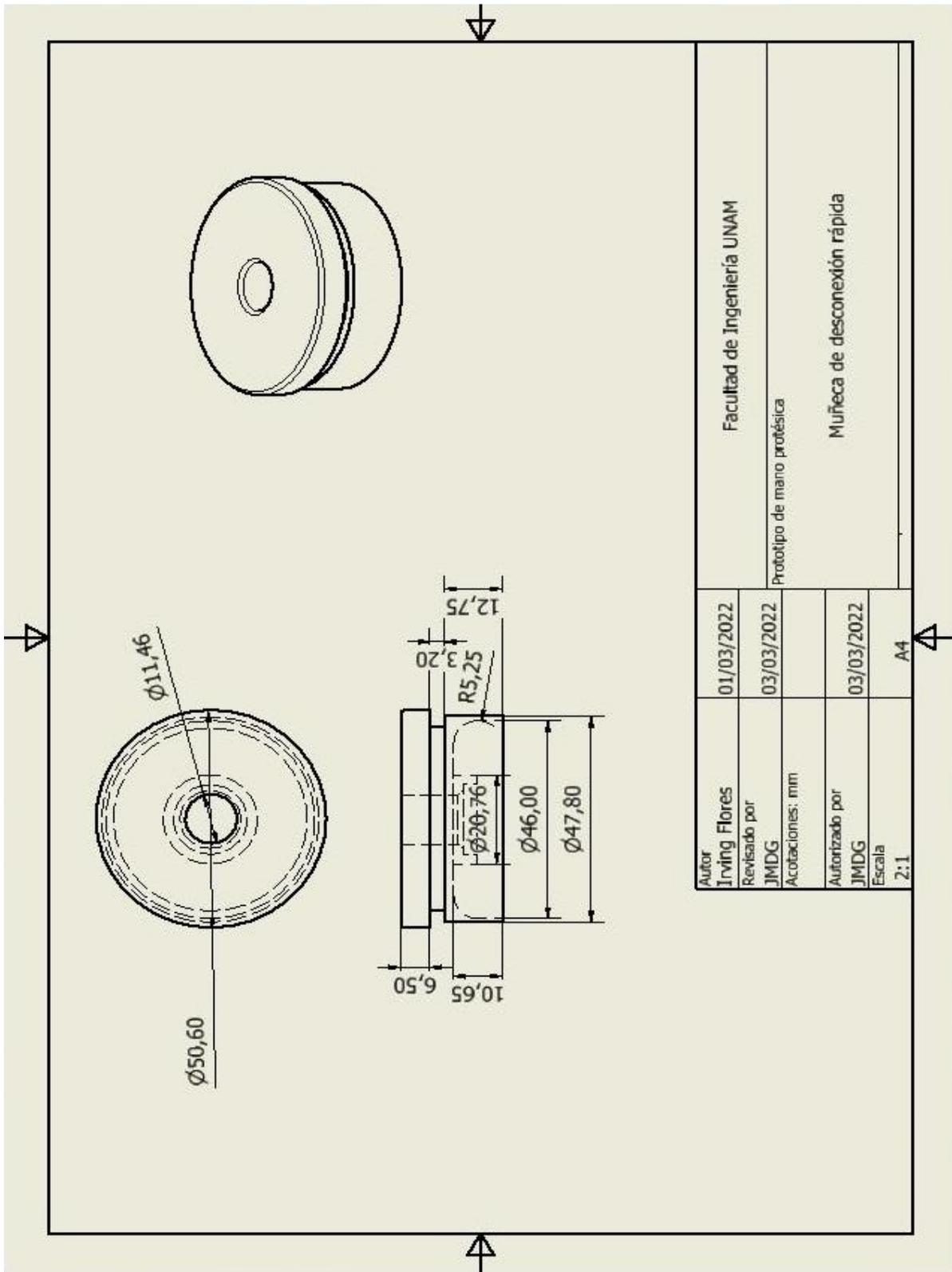
Autor Irving Flores	01/03/2022	Facultad de Ingeniería
Revisado por JMDG	03/03/2022	Prototipo de mano protésica
Acotaciones: mm		Falange distal dedo meñique
Autorizado por JMDG	03/03/2022	
Escala 2:1	A4	



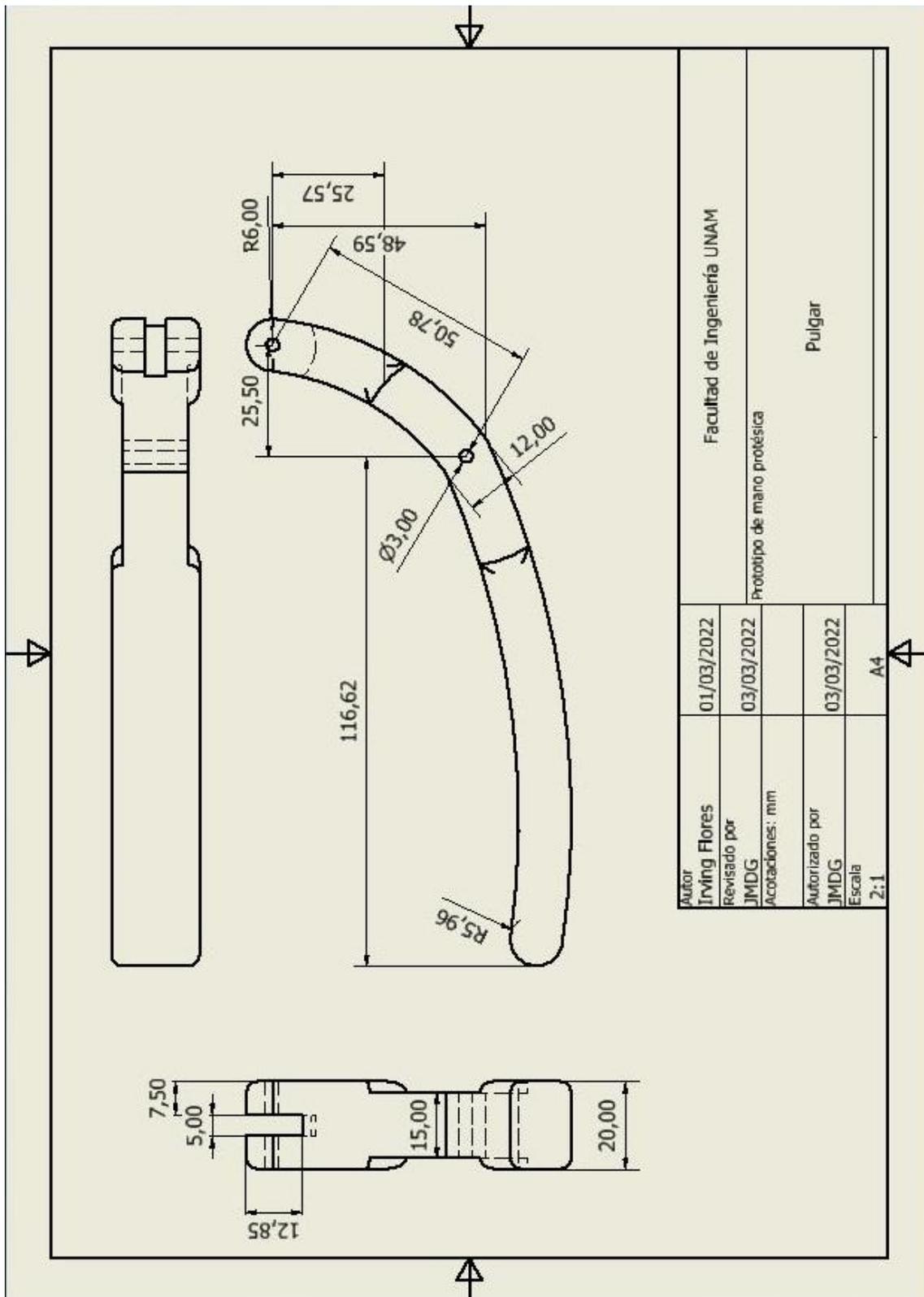
Autor		Facultad de Ingeniería UNAM	
Irving Flores		Prototipo de mano protésica	
Revisado por		Falange distal dedo medio	
JMDG			
Acotaciones: mm			
Autorizado por			
JMDG			
Escala			
2:1			
01/03/2022			
03/03/2022			
03/03/2022			
A4			



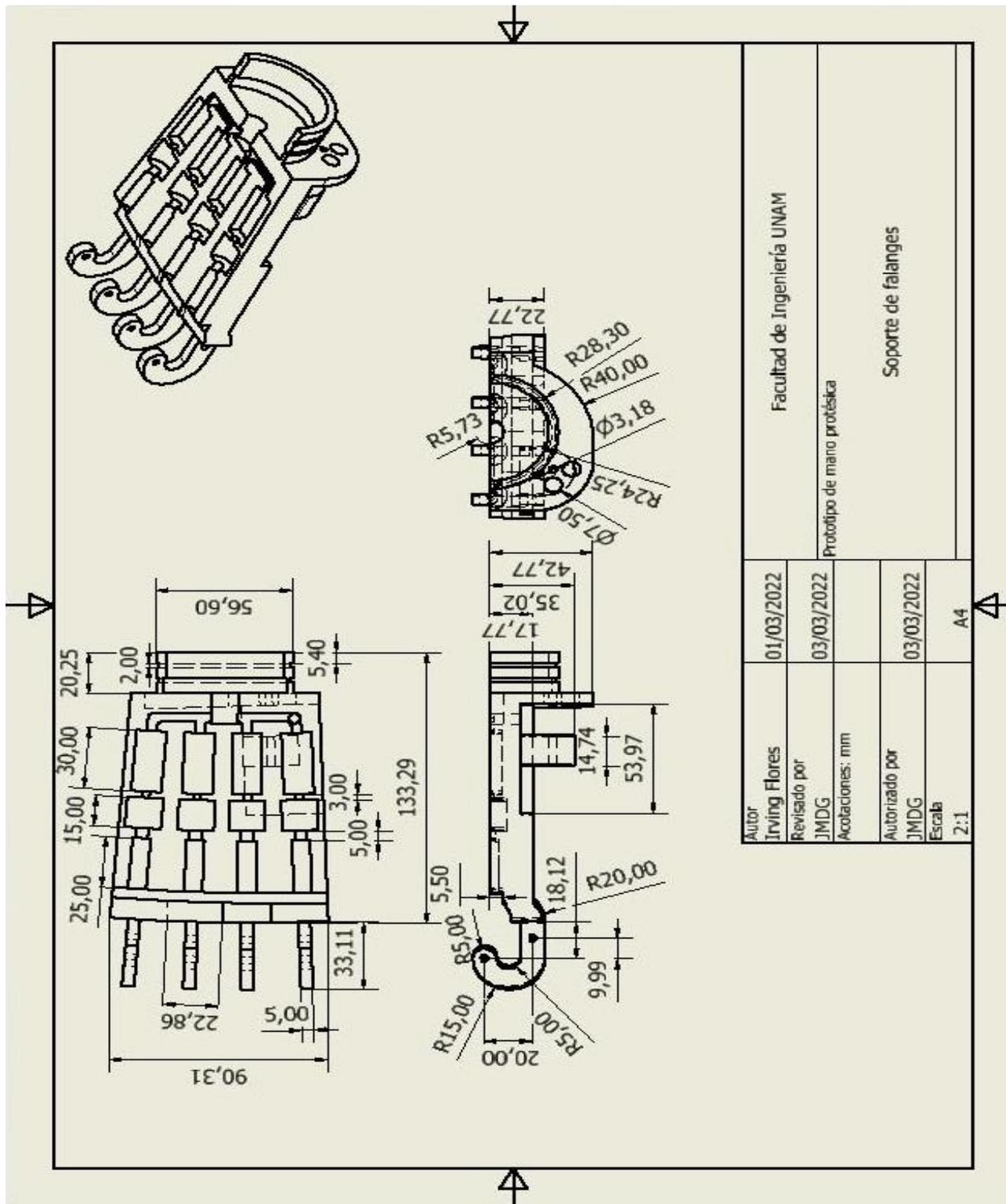
Autor Irving Flores		01/03/2022		Facultad de Ingeniería UNAM	
Revisado por JMDG		03/03/2022		Prototipo de mano protésica	
Acotaciones: mm				Falange proximal	
Autorizado por JMDG		03/03/2022			
Escala 2:1		A4			

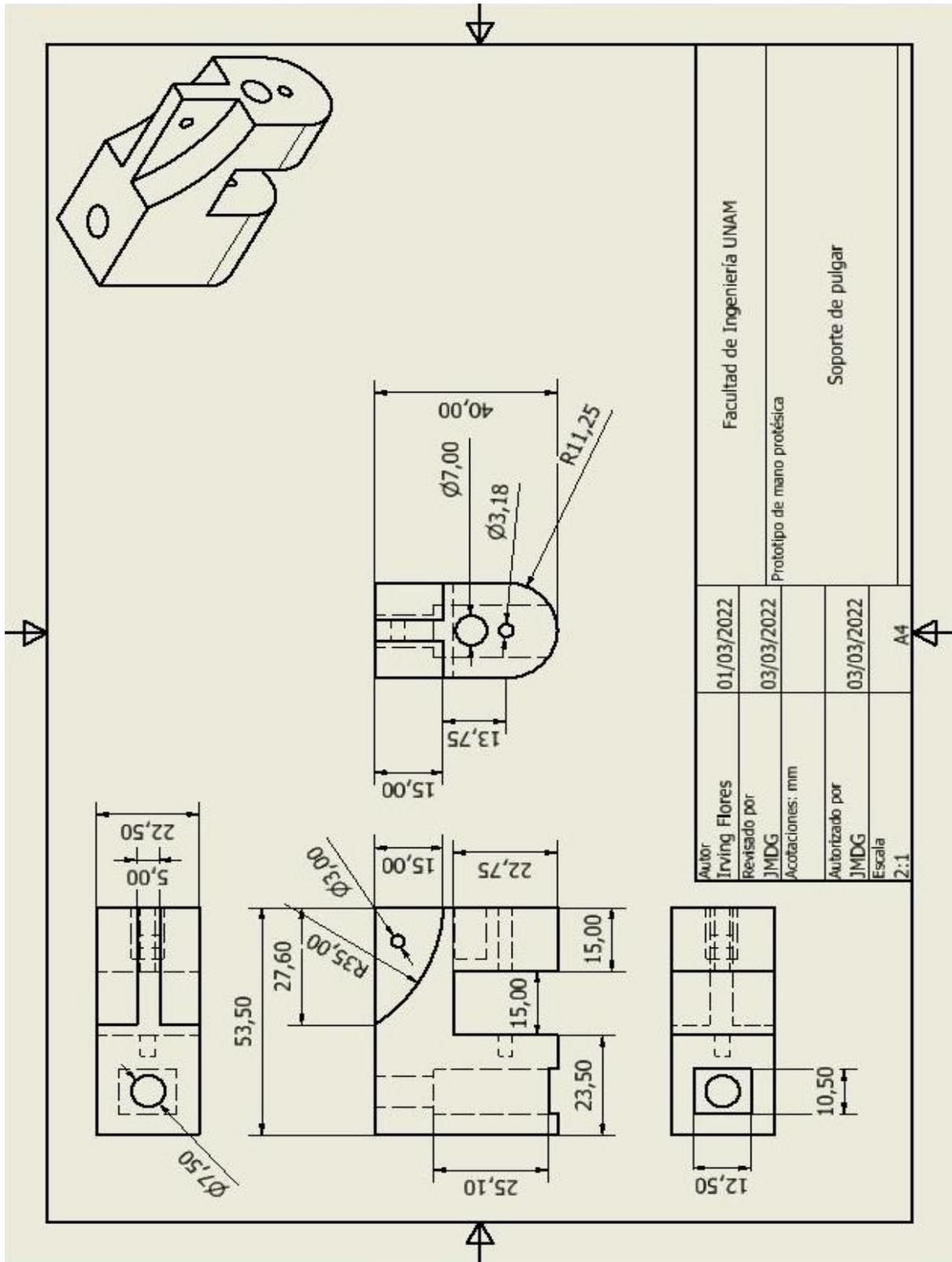


Autor	Irving Flores	01/03/2022	Facultad de Ingeniería UNAM
Revisado por	JMDG	03/03/2022	Prototipo de mano protésica
Acotaciones:	mm		Muñeca de desconexión rápida
Autorizado por	JMDG	03/03/2022	
Escala	2:1	A4	



Autor Irving Flores		01/03/2022		Facultad de Ingeniería UNAM	
Revisado por JMDG		03/03/2022		Prototipo de mano protésica	
Acotaciones: mm				Pulgar	
Autorizado por JMDG		03/03/2022			
Escala 2:1		A4			





Referencias

[1] Moore, K, Dalley, A, & Agur, A. (2010). *Anatomía con orientación clínica*, 6a edición. España: Wolters Kluwer. (pp, 670 – 812).

[2] D'Aguzan. (noviembre 18, 2018). *SÍNDROME DE HOMBRO DOLOROSO, ENFRENTAMIENTO CLÍNICO PARTE 1*. Recuperado el 30 de abril de 2021, de Escuela de medicina. Pontificia Universidad de Chile. Sitio web: <https://medicina.uc.cl/wp-content/uploads/2018/11/Hombro-doloroso-parte-1.pdf>

[3] E. (abril 25, 2017). *¿Cuánto cuidamos nuestros hombros?*, Recuperado el 30 de abril de 2021, de Bienestar&Competición. Sitio web: <https://bienestarycompeticion.com/2017/04/25/cuanto-cuidamos-nuestros-hombros/>

[4] Parada, R. (enero 18, 2021). *Músculos del brazo y antebrazo*. Recuperado el 30 de Abril de 2021, de *Lifeder* Sitio web: <https://www.lifeder.com/musculos-brazo/>

[5] Elisa. (abril 30, 2017). *Ejercicios tras traumatismo del codo*. Recuperado el 7 de mayo de 2021, de Traumatología Hellín. Sitio web: <https://traumatologiahellin.wordpress.com/ejercicios/ejercicios-tras-traumatismo-de-codo/>

[6] L, Magazine. (marzo 25, 2021). *EJERCITANDO LOS MÚSCULOS DE LA MANO*. Recuperado el 7 de mayo de 2021, de LACARNE MAGAZINE Sitio web: <https://lacarnemagazine.com/especial-salud-ejercitando-musculos-de-la-mano/>

[7] Caraballo, A. (marzo 8, 2019). *Cómo se llaman los huesos de las manos y de los pies. Anatomía fácil*. Recuperado el 7 de mayo de 2021, de quonomy. Sitio web: <https://quonomy.com/como-se-llaman-los-huesos-de-las-manos-y-de-los-pies-anatomia-facil>

[8] Kapandji, A. (2006). *Fisiología Articular*, 6a edición, tomo 1. Madrid: Médica Panamericana. (pp, 198 - 340).

[9] Carletti, E. (s.f.). *Actuadores – Manos. Conceptos generales y ejemplos*. Recuperado el 8 de mayo de 2021, de Robots Argentina. Sitio web: http://robots-argentina.com.ar/Actuadores_manos.htm

[10] Fisioterapia. (octubre 2, 2015). *Prensiones en Rehabilitación*. Recuperado el 8 de mayo de 2021, de Fisioterapia ocupacional. Sitio web:

<https://www.fisioterapiayterapiaocupacional.com/2015/10/prensiones-en-rehabilitacion.html>

[11] Mediprax. (s.f.). *Niveles de amputaciones en miembros superiores e inferiores*. Recuperado el 9 de Mayo de 2021, de Mediprax Sitio web: <https://aparatosortopedicos.com/pies-proteticos-de-titanio/niveles-de-amputacion-en-miembro-superior-e-inferior/>

[12] Cuéntame de México. (s.f.). *Discapacidad en México*. Recuperado el 10 de mayo de 2021, de Cuéntame Inegi. Sitio web: <https://www.cuentame.inegi.org.mx/poblacion/discapacidad.aspx?tema=P>

[13] BBC Mundo. (Julio 17, 2017). *Las practicas medicas de Antiguo Egipto que aún se utilizan*. Recuperado el 13 mayo de 2021, de BBC News. Sitio web: <https://www.bbc.com/mundo/noticias-40610780>

[14] Pardo, L. (abril 15, 2019). *Götz von Berlichingen: El hombre de la mano de hierro (1504)*. Recuperado el 14 de mayo de 2021, de NEOTEO. Sitio web: <https://www.neoteo.com/gotz-von-berlichingen-el-hombre-de-la-mano-de-hierro/>

[15] The History Notes. (agosto 21, 2011). *La breve historia de la medicina protésica*. Recuperado el 14 de Mayo de 2021, de The History Notes Sitio web: <https://www.historynotes.info/the-brief-history-of-prosthetic-medicine-84/>

[16] Dianceht. (s.f.). *Prótesis para dedos, manos, brazos y pabellón auricular*. Recuperado el 15 de mayo de 2021, de Dianceht: Prótesis estéticas y funcionales de silicón. Sitio web: <https://www.manosydedos.com/index.html>

[17] García Ferriz Ortopedia. (s.f.). *Prótesis funcionales cinemáticas o de tracción*. Recuperado el 16 de mayo de 2021. de García Ferriz Ortopedia. <https://www.ortopediagarciaferriz.com/es/product/6726211-protesis-funcionales-cinematicas-o-de-traccion>

[18] Didrick Medical. (s.f.). *Modelos X-Finger*. Recuperado el 20 de mayo de 2021, de Didrick Medical Inc. Sitio web: <https://www.x-finger.com/x-finger-models.html>

[19] P4H Bionics. (s.f.). *(Módulo 0) Curso: Prótesis Biomecánicas 3D*. Recuperado el 22 de mayo de 2021, de P4H Bionics Academy. Sitio web: <https://www.p4hbionics.academy/courses/>

[20] El País. (enero 19, 2018). *Impresoras 3D crean prótesis de manos y brazos | Tecnología*. Recuperado el 28 de mayo de 2021, de canal de Youtube El País. Sitio web: https://www.youtube.com/watch?v=Hbd-NwrlVac&ab_channel=EIPa%C3%ADs

[21] ottobock. (s.f.). Mano bebionic. Recuperado el 1 de junio de 2021, de Ottobock ©. Sitio web: <https://www.ottobock.es/protesica/miembro-superior/sistemas-de-brazo-y-mano/bebionic/>

[22] Notimex Especial. (febrero 3, 2018). *Trabajan para producir brazos biónicos a precios accesibles*. Recuperado el 5 de junio de 2021, de Síntesis. Sitio web: <https://sintesis.com.mx/2018/02/03/brazos-bionicos-precios-accesibles/#>

[23] Pugh, S. (1991). *Total Design: Integrated Methods for Successful Product Engineering*. University of Strathclyde: Adisson-Wesley Publishing Company.

[24] Pololu. (s.f.). Pololu– 298:1 Micro Metal Gearmotor HP 6v. Recuperado el 6 de junio de 2021, de Pololu Robotics & Electronics. Sitio web: <https://www.pololu.com/product/994>

[25] Mi patente. (septiembre 14, 2016). *Fibra de carbono, el material versátil y sus aplicaciones de vanguardia*. Recuperado el 6 de junio de 2021, de Mi patente Sitio web: <https://www.mipatente.com/fibra-de-carbono-el-material-versatil-y-sus-aplicaciones-de-vanguardia/>

[26] Barta, C. (octubre 15, 2018). *Fibra de carbono: Información, estructura y propiedades*. Recuperado el 6 de Junio de 2021, de CarboSystem Sitio web: <https://carbosystem.com/fibra-de-carbono-2/>

[27] Pascual Bolufer. (marzo 15, 2007). *La fibra de carbono, un material para el siglo 21*. Recuperado el 9 de junio de 2021, de Canales sectoriales Interempresas Sitio web: <https://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/16574-La-fibra-de-carbono-un-material-para-el-siglo-21.html>

[28] EcuRed. (s.f.). *Fibra de vidrio*. Recuperado el 11 de junio de 2021, de EcuRed. Sitio web: https://www.ecured.cu/Fibra_de_vidrio

[29] Yuridia. (s.f.). *¿Qué es la fibra de vidrio y que podemos hacer con ella?* Recuperado el 13 de junio de 2021, de Plaremesa®. Sitio web: <https://www.plaremesa.net/que-es-la-fibra-de-vidrio/>

[30] Levinson. (s.f.). *[Plásticos de Ingeniería] Nylamid*. Recuperado el 13 de junio de 2021, de Aceros Levinson. Sitio web: https://www.aceroslevinson.com/wp-content/uploads/2012/10/Levinson_Nylamid.pdf

[31] Midsa. (s.f.). *Nylamid*. Recuperado el 15 de junio de 2021, de Midsa®. Sitio web: <http://www.midsa.com.mx/nylamid.php>

[32] Textos científicos. (agosto 12, 2005). *ABS*. Recuperado el 16 de junio de 2021, de Textos científicos. Sitio web: <https://www.textoscientificos.com/polimeros/abs>

[33] Ensinger. (s.f.). *Plásticos TECARAN ABS de Ensinger*. Recuperado el 17 de junio de 2021, de Ensinger®. Sitio web: <https://www.ensingerplastics.com/es-es/semielaborados/plasticos-industriales/abs>

[34] Lucia, C. (junio 6, 2019). *El filamento de ABS en la impresión 3D*. Recuperado el 8 de junio de 2021, de 3D natives. Sitio web: <https://www.3dnatives.com/es/filamento-de-abs-impresion-3d-06062019/#!>

[35] Filament2print. (enero 16, 2019). *¿Qué es el PETG?*. Recuperado e 8 de junio de 2021, de filament2print. Sitio web: https://filament2print.com/es/blog/49_petg.html

[36] Fillamentum. (mayo 20, 2021). *PETG*. Recuperado el 9 de junio de 2021, de Fillamentum addictive polymers®. Sitio web: <https://fillamentum.com/collections/petg-filament/>

[37] Tredpro. (septiembre 9, 2019). *¿Qué es el material PLA?*. Recuperado el 10 de junio de 2021, de tredpro®. Sitio web: <https://tredpro.com/que-es-el-material-pla/>

[38] Rodríguez, I. (marzo 26, 2020). *Cómo controlar Motor DC – Tutorial Arduino*. Recuperado el 20 de junio de 2021. de Piensa 3D Sitio web: <https://piensa3d.com/tutorial-programacion-arduino-motor-control-simple/>

[39] CLR. (s.f.). *¿Qué es un servomotor y cuando se utiliza?* Recuperado el 22 de junio de 2021, de CLR Compañía Levantina de Reductores®. Sitio web: <https://clr.es/blog/es/servomotor-cuando-se-utiliza/>

[40] García, A. (diciembre 2, 2016). *¿Qué es y cómo funciona un servomotor?*. Recuperado el 29 de junio de 2021. de Panamahitek Sitio web: <http://panamahitek.com/que-es-y-como-funciona-un-servomotor/>

[41] TME. (septiembre 8, 2020). *Motor paso a paso – tipos y ejemplos del uso de motores paso a paso*. Recuperado el 2 de julio de 2021, de TME Electronic Components®. Sitio web: <https://www.tme.com/mx/es/news/library-articles/page/41861/Motor-paso-a-paso-tipos-y-ejemplos-del-uso-de-motores-paso-a-paso/>

[42] CLR. (noviembre 15, 2019). *Todo lo que debes saber sobre los motorreductores y sus componentes*. Recuperado el 4 de julio de 2021, de CLR Compañía Levantina de Reductores®. Sitio web: <https://clr.es/blog/es/todo-lo-que-debes-saber-sobre-los-motorreductores-y-sus-componentes/>

[43] Torres, V. (2009). *Desarrollo de un mecanismo de cuatro barras para su uso en la enseñanza* (Tesis de licenciatura). Facultad de Ingeniería UNAM.

[44] MecanESO. (s.f.). *Tren de engranes*. Recuperado el 5 de julio de 2021, de MecanESO. Sitio web: <http://concurso.cnice.mec.es/cnice2006/material107/index.htm>

[45] Norton, R. (2011). *DISEÑO DE MAQUINAS, Un enfoque integrado*. México, Cuarta edición: Pearson Educación. (p.361)

[46] GMB. (s.f.). *Banda de Accesorios – Tipos y Fallas*. Recuperado el 20 de julio de 2021, de GMB Sitio web: <https://gmb.net/es/banda-de-accesorios-tipos-y-fallas/>

[47] Ondarse, D. (julio 15, 2021). *Batería*. Recuperado el 2 de agosto de 2021, de Concepto. Sitio web: <https://concepto.de/bateria/>

[48] Gastellou, E. (julio 16, 2021). *¿Qué es una fuente de poder?*. Recuperado el 7 de octubre de 2021, de AcMax. Sitio web: <https://acmax.mx/que-es-una-fuente-de-poder>

[49] Santiago, A & Valenzuela, I. (2005). *Ergonomía de miembro superior* (Tesis de licenciatura). Facultad de Ingeniería UNAM.

[50] Grupo GAES. (s.f.). *Husillos y tuercas trapezoidales*. Recuperado el 20 de octubre de 2021, de Grupo GAES. Sitio web: <https://grupogaes.com/tienda/movimiento-lineal/husillos/husillos-y-tuercas-trapezoidales/>

[51] Budynas, R & Nisbett, J. (2008). *DISEÑO EN INGENIERÍA MECÁNICA DE SHIGLEY*. Octava edición. México: McGraw-Hill. (pp. 396 – 405).

[52] Castillo, F. (2018). *De roscas y tornillos...* (Laboratorio de tecnología de materiales - Lecturas de ingeniería). Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán UNAM.

[53] López, A. (enero 25, 2018). *Tornillos de potencia y uniones*. Recuperado el 30 de noviembre de 2021, de canal de YouTube de Adriana López Vargas. Sitio web: https://www.youtube.com/watch?v=3CoyyxbQQG4&ab_channel=ADRIANALOPEZVARGAS

[54] Topincn. (s.f.). *Micro Gear Motor High Torque*. Recuperado el 5 de diciembre de 2021, de Amazon. Sitio web: https://www.amazon.com.mx/M4x55mm-Reductor-Tornillo-Reducci%C3%B3n-Engranajes/dp/B07NP88LSX/ref=pdf_rhf_dp_s_ci_mcx_mr_hp_d_3/135-0469563-3166406?pd_rd_w=iV0CS&pf_rd_p=e62133bf-9b7f-4e32-948b-830756e92218&pf_rd_r=DVHKX9CRH595H40TF67Y&pd_rd_r=08beefd0-5545-49d8-b1b2-ce079f55e20d&pd_rd_wg=6XKwv&pd_rd_i=B07NP88LSX&psc=1

[55] ASTM International. (febrero 28, 2017). *ASTM D638-14*. Documento recuperado el 10 de diciembre de 2021, de ASTM International. Sitio web: <https://www.astm.org/d0638-14.html>

[56] SUNLU. (s.f.). 3D Printer Filament. Recuperado el 11 de diciembre de 2021, de SUNLU ©. Sitio web: <https://www.sunlu.com/collections/3d-printer-filament?page=6>