



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Rediseño de ortoprótesis  
de mano**

**TESINA**

Que para obtener el título de  
**Ingeniero Mecánico**

**P R E S E N T A**

Juan Carlos Ibarra Sánchez

**DIRECTOR DE TESINA**

Dr. Jesús Manuel Dorador González



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2026



**PROTESTA UNIVERSITARIA DE INTEGRIDAD Y  
HONESTIDAD ACADÉMICA Y PROFESIONAL**  
(Titulación con trabajo escrito)



De conformidad con lo dispuesto en los artículos 87, fracción V, del Estatuto General, 68, primer párrafo, del Reglamento General de Estudios Universitarios y 26, fracción I, y 35 del Reglamento General de Exámenes, me comprometo en todo tiempo a honrar a la institución y a cumplir con los principios establecidos en el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, especialmente con los de integridad y honestidad académica.

De acuerdo con lo anterior, manifiesto que el trabajo escrito titulado REDISEÑO DE ORTOPROTESIS DE MANO que presenté para obtener el título de INGENIERO MECÁNICO es original, de mi autoría y lo realicé con el rigor metodológico exigido por mi Entidad Académica, citando las fuentes de ideas, textos, imágenes, gráficos u otro tipo de obras empleadas para su desarrollo.

En consecuencia, acepto que la falta de cumplimiento de las disposiciones reglamentarias y normativas de la Universidad, en particular las ya referidas en el Código de Ética, llevará a la nulidad de los actos de carácter académico administrativo del proceso de titulación.

---

JUAN CARLOS IBARRA SANCHEZ  
Número de cuenta: 303849119

2026

# AGRADECIMIENTOS

*A mi mamá, Ofelia Sánchez Rosas, por su amor, paciencia y apoyo para enfrentar las dificultades de la vida sin bajar la guardia.*

*A mi papá, José Guadalupe Ibarra Rodríguez, por su cariño y disciplina para trabajar sin rendirme hasta lograr el objetivo.*

*A mi hermano, Miguel Alberto Ibarra Sánchez, por ser mi amigo y cómplice, por ser directo conmigo y sin rodeos para dar lo mejor de mí.*

*A Paula Lara Flores, por su cariño, su paciencia, por presionarme para no rendirme y por su apoyo para ver más soluciones a los problemas que se me presenten.*

*Al Dr. Jesús Manuel Dorador González por su apoyo, amabilidad, paciencia y asesoría para desarrollar este proyecto.*

*A la Universidad Nacional Autónoma de México por darme la oportunidad y las herramientas necesarias para desempeñarme como ingeniero a favor de la sociedad y comprometido con el cuidado del medio ambiente.*

# ÍNDICE

RESUMEN.....	1
INTRODUCCIÓN .....	2
OBJETIVO GENERAL.....	2
OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	2
ANTECEDENTES .....	2
JUSTIFICACIÓN DEL REDISEÑO.....	3
ALCANCE.....	3
1. MARCO TEÓRICO .....	5
1.1. Ortoprótesis.....	5
1.2. Avances en prótesis de mano .....	6
1.2.1. Prótesis mecánicas.....	6
1.2.2. Prótesis híbridas.....	7
1.3. Anatomía de la mano.....	8
1.3.1. Huesos .....	8
1.3.2. Piel.....	9
1.3.3. Músculos.....	10
1.3.4. Tendones.....	12
1.3.5. Nervios .....	13
1.3.6. Articulaciones.....	16
1.3.7. Poleas .....	17
1.3.8. Movimientos de los dedos .....	17
2. DISEÑO CONCEPTUAL Y CONFIGURACIÓN .....	21
2.1. Identificación de las necesidades .....	21
2.2. Especificaciones objetivo .....	23
2.3. Funciones y conceptos de solución .....	26
2.3.1. Cubierta del mecanismo.....	26
2.3.2. Bloqueo de la cubierta.....	26
2.3.3. Sujeción del objeto con el acoplador.....	27
2.3.4. Sujeción del acoplador con el dedo .....	27
2.4. Configuración.....	28
3. DISEÑO A DETALLE.....	32
3.1. Diseño de piezas (CAD).....	32
3.1.1. Corredera.....	33

3.1.2.	Base .....	33
3.1.3.	Acoplador.....	34
3.1.4.	Tapa .....	35
3.1.5.	Polea cable.....	35
3.2.	Análisis de posiciones .....	36
4.	PROTOTIPO: MANUFACTURA, ESTUDIOS Y RESULTADOS.....	39
4.1.	Métodos de manufactura del prototipo .....	39
4.1.1.	Fotopolimerización .....	39
4.1.2.	Fusión de lecho de polvo .....	40
4.1.3.	Inyección por aglutinante (Binder jetting) .....	41
4.1.4.	Inyección de material (Material jetting) .....	42
4.1.5.	Laminación de hojas.....	43
4.1.6.	Extrusión de material .....	44
4.1.7.	Deposición directa de energía (DED) .....	45
4.2.	Materiales para manufactura aditiva .....	46
4.2.1.	Polímeros termoplásticos.....	46
4.2.2.	Metales.....	47
4.2.3.	Cerámicos .....	47
4.3.	Sistemas auxiliares .....	48
4.4.	Manufactura del prototipo .....	49
4.5.	Estudios y resultados.....	52
4.5.1.	Corredera.....	55
4.5.2.	Base .....	61
4.5.3.	Acoplador.....	69
4.5.4.	Tapa .....	75
4.5.5.	Polea cable.....	76
5.	CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO.....	77
	ANEXO – PLANOS DE LOS COMPONENTES.....	79
	REFERENCIAS .....	85
	Bibliografía y páginas web .....	85
	Imágenes.....	89

# RESUMEN

En este trabajo se realizó un rediseño de una ortoprótesis de mano, partiendo de los prototipos alfa y beta, creada en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México. Se observaron áreas de oportunidad para rediseñar elementos e implementar nuevas propuestas de solución para algunos subsistemas y así darle una mejor apariencia y funcionamiento a la ortoprótesis. El proceso de rediseño constó de tres fases: la primera fue la revisión de planos previos y generación de nuevos para modelar las piezas en un software de diseño; la segunda fue la fabricación de un prototipo con ABS mediante el uso de manufactura aditiva; y la tercera fue la simulación del modelo informático a cargas para conocer los desplazamientos causados y los esfuerzos a los cuales estaban sometidas las piezas. Los resultados muestran que se corrigieron los inconvenientes presentes en los prototipos anteriores, mejorando su apariencia y funcionalidad, sin embargo hay nuevamente oportunidades para trabajo a futuro debido a que hay alternativas de solución que no se habían contemplado hasta muy avanzado el proyecto.

**Palabras clave:** ortoprótesis; prototipo alfa; prototipo beta; rediseño; manufactura aditiva.

# INTRODUCCIÓN

En el 2012 se diseñó una ortoprótesis de mano “prototipo alfa” (Torres Martínez, 2012), cuyo diseño se encuentra bajo la patente número 343771, la cual permite que personas que tienen inmovilidad de una mano debido a lesión del plexo braquial, puedan sujetar objetos. En este apartado se expone la problemática de trabajo que consta en el rediseño de ortoprótesis de mano antes mencionada, así como las limitaciones que habría que corregir y las soluciones que deberían implementarse para justificar el nuevo diseño.

## OBJETIVO GENERAL

Rediseñar la ortoprótesis de mano (patente número 343771), porque el diseño anterior sólo sirvió para justificar el mecanismo y se encontró un área de oportunidad en su diseño para poder visualizarla como un producto terminado en términos de apariencia, ya que el funcionamiento ha sido fundado con anterioridad.

## OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Realizar cambios a la ortoprótesis de mano y documentarlos por medio del uso de imágenes y planos.
2. Simular la respuesta de los componentes del rediseño al someterse a cargas de operación.
3. Fabricación de un prototipo mediante manufactura aditiva.

## ANTECEDENTES

Al revisar los prototipos previos de la ortoprótesis de mano, se observaron los siguientes problemas. El punto 6 se menciona en el trabajo previo de la ortoprótesis (Torres Martínez, 2012) como parte del trabajo a futuro.

1. La cubierta del prototipo alfa no proporciona una protección completa del mecanismo debido a una apertura que tiene en la parte posterior por donde pasa el cable de transmisión.



2. El cable de transmisión queda desalineado y puede interferir en el funcionamiento del dispositivo.
3. Se tiene que retirar la base del prototipo alfa para poder acceder al interior del mecanismo.
4. El diseño del prototipo alfa no facilita su mantenimiento con una sola mano.
5. La sujeción de los objetos está limitada al agarre proporcionado por la superficie de los dedos.
6. El acoplador no cuenta con un sistema de fijación adecuado al dedo.

## **JUSTIFICACIÓN DEL REDISEÑO**

1. Es necesario minimizar el espacio abierto en la parte posterior de la cubierta, limitará la entrada de objetos de tamaño considerable que puedan obstruir y limitar el funcionamiento del mecanismo.
2. Para evitar que el cable de transmisión roce y desgaste la parte posterior de la cubierta (de otro modo esto reduciría su vida útil y daría mal aspecto al estar maltratada) se canalizará hacia afuera del mecanismo.
3. Es necesario que la cubierta se pueda retirar fácilmente, para realizar el cambio de las ligas y la limpieza del dispositivo así como para poder colocarlo en cualquiera de las dos manos.
4. El diseño de la cubierta debe contener el menor número de piezas posibles para evitar dañar o extraviar alguno de sus componentes al realizar mantenimiento del dispositivo, sobre todo con una sola mano.
5. Para mejorar la fijación al dedo se realizará una modificación al acoplador para tener una sujeción que evite que los dedos se deslicen respecto a éste.
6. Para permitir un mejor agarre de los objetos se trabajará un acabado superficial en el acoplador que evitará que los dedos se resbalen.

## **ALCANCE**

El rediseño partirá de los prototipos beta y alfa de la ortoprótesis en talla mediana cuyo mecanismo es normalmente cerrado (NC), para lo cual se realizarán los cambios que se mencionan a continuación.

Se diseñarán una cubierta de una sola pieza que permita un mejor aislamiento del mecanismo y una polea que mantenga alineado el cable de transmisión.

Se realizarán cambios en la corredera para colocar el cable de transmisión sin necesidad de un tornillo y para reducir concentradores de esfuerzos.

El acoplador se modificará para tener un soporte para el dedo y tendrá un acabado superficial para mejorar la sujeción de los objetos. Se hará una ranura para una cinta que fijará los dedos índice y medio al acoplador. Se realizarán ranuras hexagonales en la base y en el acoplador para tuercas que no se moverán al insertar un tornillo y permitirán su manejo con una sola mano.

Los diseños conceptuales de los elementos antes mencionados serán modelados en 3D, después se estudiarán mediante el análisis por elementos finitos y finalmente serán fabricados mediante manufactura aditiva usando polímero ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno).

# 1. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se van a definir los conceptos que describen lo que es una ortoprótesis, así como su diferencia con otros dispositivos y su clasificación en cuanto a la función que desempeñan.

Finalmente se abordarán conceptos de anatomía para tener una visión general de las características principales de la mano, en cuanto a su composición y sus movimientos.

## 1.1. Ortoprótesis

Para poder entender lo que es una ortoprótesis hay que definir dos conceptos: órtesis y prótesis. Una órtesis es un dispositivo que sirve de apoyo para corregir problemas funcionales o estructurales del cuerpo. Dependiendo de su función, una órtesis puede ser estabilizadora, funcional, correctora o protectora (Figura 1.1). Una prótesis es un reemplazo artificial, ya sea total o parcial, de una parte del cuerpo debido a una amputación o por agenesia<sup>1</sup>. Este tipo de dispositivos pueden sustituir la función del miembro faltante, o bien, sólo tener una función estética (Ortopedia Ceorma S. L., 2017) (Figura 1.2). Partiendo de los conceptos anteriores se puede definir una ortoprótesis como un dispositivo que mejora la función de la extremidad afectada, sustituyéndola o complementándola parcialmente (Baños Bernad, 2014).



**Figura 1.1 Tipos de órtesis: a) estabilizadora (Goural, s.f.), b) funcional (Orliman, s.f.), c) correctora (Wolak, 2013), y d) protectora (Farmasana, s.f.).**

<sup>1</sup> Ausencia parcial o completa de un órgano o de un tejido del organismo. En el proceso de formación del organismo el tejido afectado no se desarrolla de forma normal (Periódico de salud, s.f.).

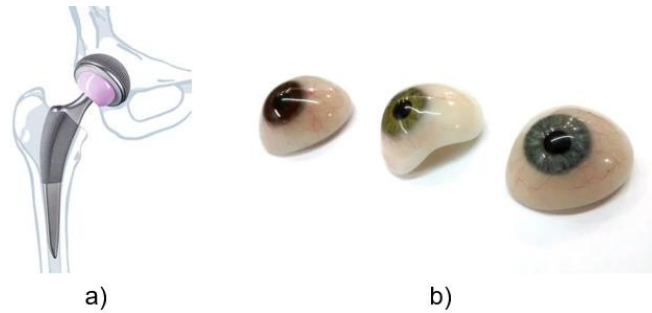


Figura 1.2. Tipos de prótesis: a) funcional (López, 2017), y b) estética (Contalent, 2017).

## 1.2. Avances en prótesis de mano

Actualmente existen dos tipos principales de prótesis de mano: mecánicas e híbridas.

### 1.2.1. Prótesis mecánicas

Son las más utilizadas actualmente en nuestro país debido a sus grandes ventajas en relación durabilidad y precio. Estos sistemas pueden ser reparados fácilmente y dan mayor servicio al usuario (Interbionic, 2024). Existen dos tipos de prótesis mecánicas de acuerdo a la forma de activación: de apertura y de cierre a voluntad.

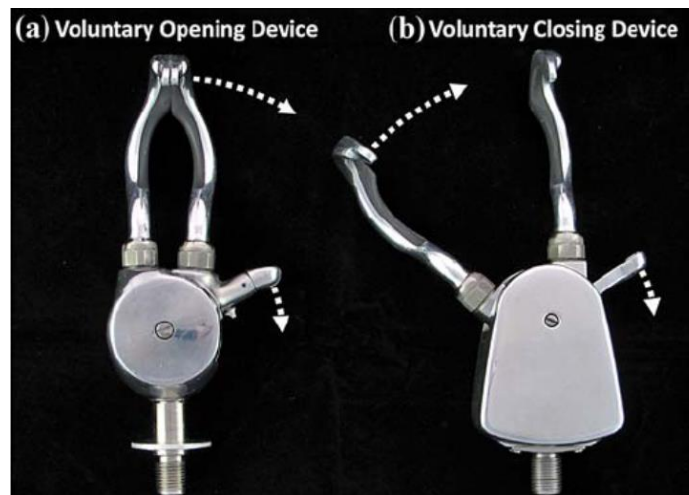


Figura 1.3 Prótesis de apertura voluntaria (VO) vs cierre voluntario (VC). El cable de las prótesis accionadas por el cuerpo tira del brazo de palanca lateral en dirección proximal<sup>2</sup>. Según el dispositivo, este movimiento puede abrir el dedo [a] modo VO], o empujar el dedo para cerrarlo [b] modo VC] (Berning, Cohick, Johnson, Miller, & Sensinger, 2014).

<sup>2</sup> Más cerca del centro (tronco del cuerpo) o del punto de unión con el cuerpo (Medline Plus, 2025).

### 1.2.2. Prótesis híbridas

Se llaman así por la combinación de componentes mecánicos y mioeléctricos<sup>3</sup>, que al recibir las señales musculares, permiten que el paciente sea capaz de rotar la mano protésica (Figura 1.4), además de abrirla y cerrarla en tiempos de reacción más cortos (Interbionic, 2024).



Figura 1.4 Prótesis híbrida de mano (Ortopedia Verástegui, 2025).

Adicionalmente, existe un procedimiento médico llamado Reinervación Muscular Dirigida (TMR por sus siglas en inglés) (Figura 1.5), que redirige los nervios involucrados en los movimientos de la mano, la muñeca o el codo, hacia los músculos adyacentes, amplificando notablemente las señales nerviosas para que los usuarios puedan experimentar una especie de "control mental" sobre su prótesis mioeléctrica (Arm Dynamics, 2024).

---

<sup>3</sup> Que utiliza la electricidad generada por los músculos.

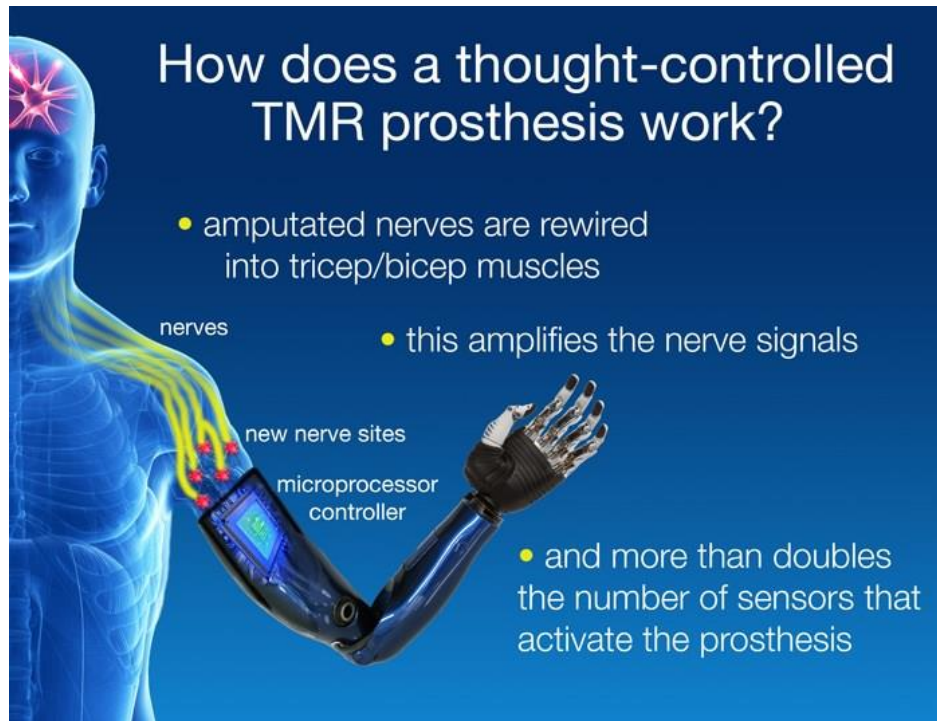


Figura 1.5 Reinervación Muscular Dirigida (TMR por sus siglas en inglés) (Ortho Axis, 2025).

### 1.3. Anatomía de la mano

La anatomía de la mano es compleja, intrincada y fascinante. Un total de 27 huesos constituyen el esqueleto básico de la mano y la muñeca. La mano está inervada por tres nervios: mediano, cubital y radial; cada uno de los cuales tiene componentes sensoriales y motores. Los músculos de la mano están divididos en grupos extrínsecos e intrínsecos (Wilhelmi, 2016).

#### 1.3.1. Huesos

Los 27 huesos que conforman el esqueleto básico de la mano y la muñeca se agrupan en carpianos, metacarpianos y falanges.

La muñeca es la articulación más compleja del cuerpo y está formada por ocho huesos del carpo agrupados en dos filas con un movimiento muy restringido entre ellos.

La palma de la mano contiene cinco huesos metacarpianos, y cada uno se caracteriza por tener una base, un eje, un cuello y una cabeza.

La mano tiene 14 falanges. Cada dedo consta de tres falanges (proximal, medial y distal)<sup>4</sup>, a excepción del pulgar, que sólo tiene dos (Wilhelmi, 2016) (Figura 1.6).

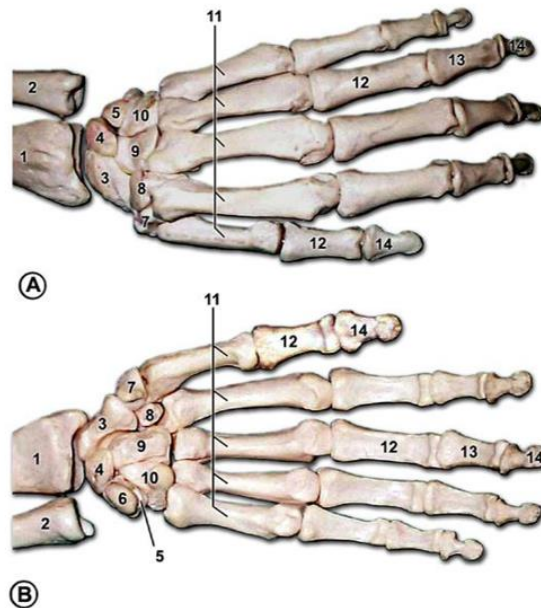


Figura 1.6. Huesos de la mano izquierda. A es la vista dorsal, y B es la vista palmar. 1 es el radio, 2 es el cúbito, 3 es el escafoides, 4 es el semilunar, 5 es el piramidal, 6 es el pisciforme, 7 es el trapecio, 8 es el trapezoide, 9 es el hueso grande, 10 es el hueso ganchoso, 11 son los huesos metacarpianos, 12 son las falanges proximales, 13 son las falanges medias, y 14 son las falanges distales (Wilhelmi, 2016).

### 1.3.2. Piel

La piel que cubre el dorso de la mano es delgada y flexible. Está unida a los huesos de la mano sólo por el tejido areolar laxo<sup>5</sup>, por donde pasan vasos linfáticos y venas. Por esta razón el dorso de la mano es más susceptible a presentar edemas<sup>6</sup>.

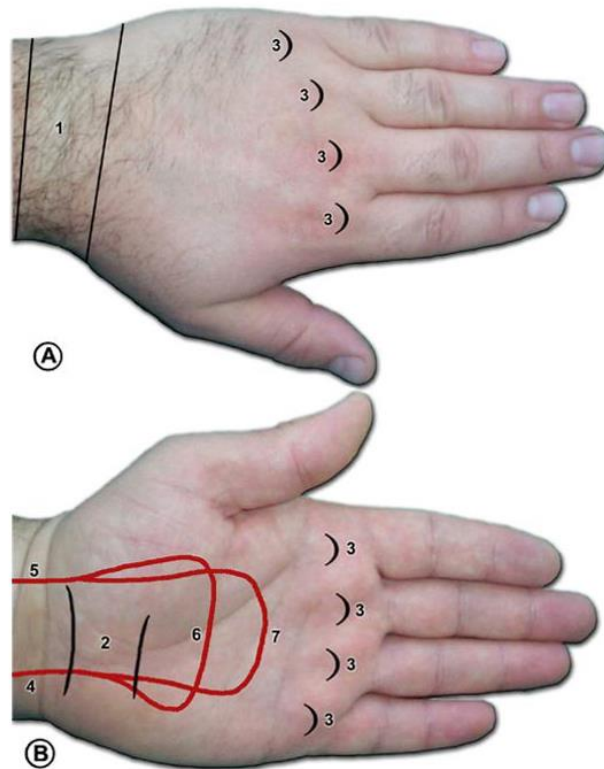
La piel de la palma de la mano es gruesa, sin vellosidades y menos flexible que la piel de la superficie dorsal. Debido a que está fuertemente unida a la fascia subyacente por numerosas fibras verticales, la piel tiene una mejor estabilidad para una función de agarre adecuada.

<sup>4</sup> Proximal: más cercano al tronco/origen. Medial: más cercano al plano medio. Distal: más alejado del tronco/origen (Dykes & Watson, 2010).

<sup>5</sup> Es un tejido en donde se observan innumerables espacios intercelulares, que se encuentran ocupados normalmente por pequeñas cantidades de sustancia fundamental amorfa, sin que haya predominio absoluto de ninguno de sus componentes (células, fibras o sustancia fundamental amorfa). Este tejido se localiza principalmente debajo de los epitelios, alrededor de los vasos sanguíneos, nervios periféricos y glándulas exocrinas, como sostén. También se encuentra entre los músculos y en la hipodermis (Telmeds, s.f.).

<sup>6</sup> Hinchazón causada por la acumulación de líquido en los tejidos del cuerpo (MedlinePlus, 2018).

A diferencia de la piel dorsal, la piel palmar tiene su suministro sanguíneo a través de numerosas ramas pequeñas y verticales de los vasos digitales comunes. Finalmente, para un correcto funcionamiento de la mano, la piel de la superficie palmar cuenta con una alta concentración de órganos nerviosos sensoriales que permiten tener mayor información sobre lo que se está sosteniendo con la mano, como temperatura, dureza, si presenta bordes o puntas afiladas, etc. (Wilhelmi, 2016) (Figura 1.7).



**Figura 1.7. Anatomía superficial de la mano izquierda. A es el dorso, y B es la palma. El 1 es la posición del retináculo<sup>7</sup> extensor, 2 es la posición del retináculo flexor, 3 es la posición de la cabeza de los metacarpianos, 4 es la arteria cubital, 5 es la arteria radial, 6 es el nivel del arco palmar profundo, y 7 es el nivel de arco superficial palmar (Wilhelmi, 2016).**

### 1.3.3. Músculos

Los músculos de la mano se dividen en grupos intrínsecos y extrínsecos. Los músculos intrínsecos se encuentran dentro de la mano, mientras que los músculos extrínsecos se ubican proximalmente en el antebrazo y se insertan mediante tendones largos (Wilhelmi, 2016).

<sup>7</sup> Banda gruesa de tejido conjuntivo que sujeta un hueso o dos en una articulación para sujetar tendones, nervios o vasos (Mediciclopedia, 2017).



## Eminencia tenar

Se encuentra entre los huesos del carpo y la base del pulgar, y está conformada por tres músculos: abductor corto del pulgar, flexor corto del pulgar y oponente del pulgar (Figura 1.8). Estos músculos son los encargados de los movimientos finos del pulgar, siendo el de oposición y el de pinza los principales (Dykes & Watson, 2010).

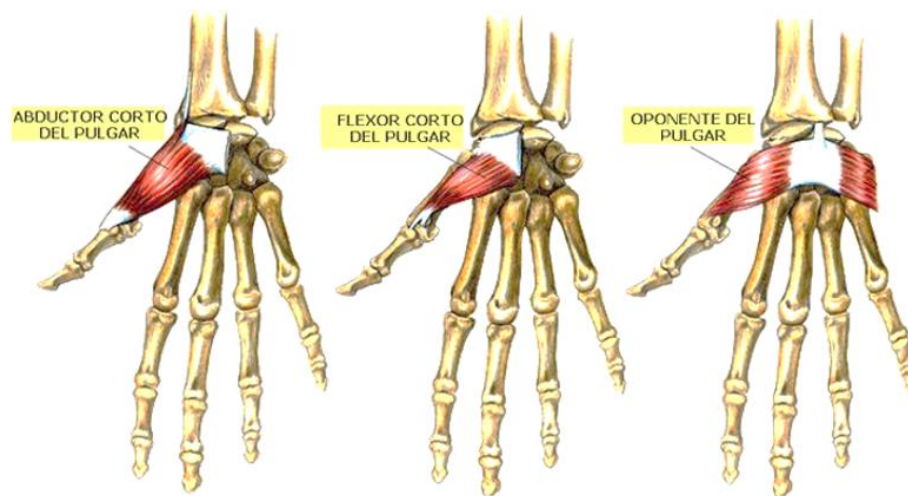


Figura 1.8. Eminencia tenar (Quezada, 2015).

## Eminencia hipotenar

Esta musculatura se localiza entre los huesos del carpo y la base del meñique, y está formada por el abductor del meñique, el flexor del meñique y el oponente del meñique (Dykes & Watson, 2010) (Figura 1.9).

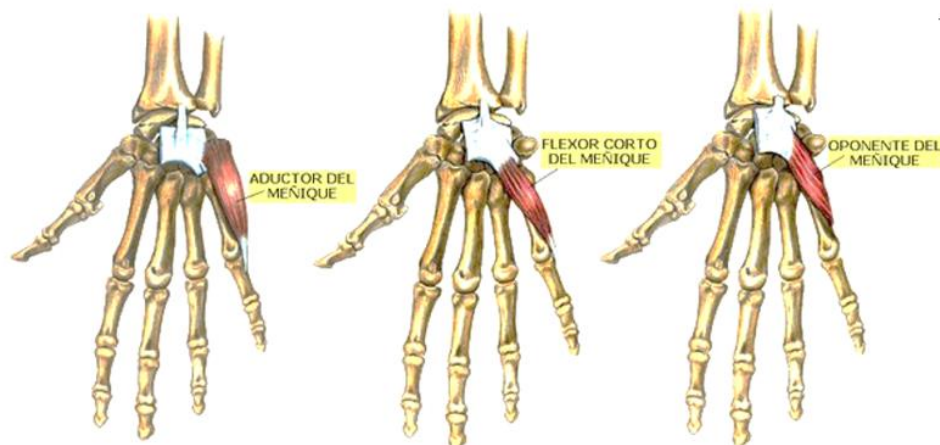


Figura 1.9. Eminencia hipotenar (Quezada, 2015).

## **Otros músculos intrínsecos de la mano**

En esta categoría se encuentran los músculos aductores del pulgar, cuatro lumbricales, el palmar corto y cuatro interóseos dorsales y palmares (Figura 1.10).

Cuando se contraen los interóseos dorsales y palmares a la vez, se anulan entre sí sus acciones propias, la abducción y la aducción, respectivamente. En su lugar, cuando todos los músculos interóseos y lumbricales contraen juntos sus inserciones en las expansiones dorsales de los dedos, se flexionan las articulaciones metacarpofalángicas (MCF) y ayudan al extensor de los dedos a extender las articulaciones interfalángicas (IF) (Dykes & Watson, 2010).

### **1.3.4. Tendones**

#### **Tendones de los flexores largos de la mano**

Son cuatro los tendones flexores largos que llegan a la mano: flexor cubital del carpo, flexor radial del carpo, flexores superficial y profundo de los dedos y flexor largo del pulgar.

Los tendones de los músculos están rodeados por vainas sinoviales cuando atraviesan el túnel carpiano por debajo del retináculo de los músculos flexores y en su entrada a los dedos (Dykes & Watson, 2010).

#### **Tendones de los flexores largos de los dedos**

El tendón del flexor superficial de los dedos se bifurca antes de insertarse en la falange media, mientras que el del flexor profundo de los dedos pasa entre estas bandeletas para insertarse en la falange distal.

Las vainas fibrosas de los flexores unen los tendones a los dedos, y son potentes y densas sobre las falanges, y débiles y laxas sobre las articulaciones IF, para permitir el movimiento (Dykes & Watson, 2010).

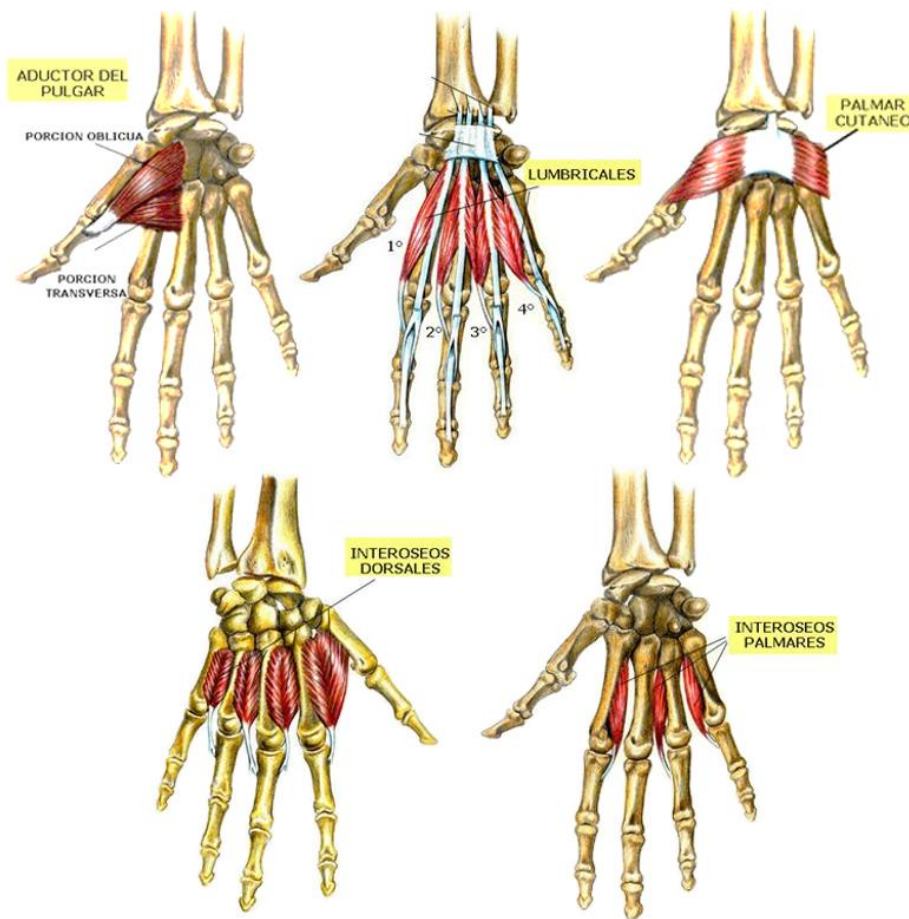


Figura 1.10. Músculos intrínsecos de la mano (Quezada, 2015).

### 1.3.5. Nervios

Como se mencionó anteriormente, la mano está inervada por tres nervios: mediano, cubital y radial. Cada uno tiene componentes sensoriales y motores (Figura 1.11).

Un elemento esencial para el correcto funcionamiento de las extremidades superiores es el plexo braquial. El plexo braquial es un conjunto de nervios que se localiza en la base del cuello y está constituido por los ramos anteriores de los nervios espinales de la C5 a la C8 y la T1. Como se observa ver en la Figura 1.12, el plexo está dividido en 5 raíces, 3 troncos, 6 divisiones y 3 fascículos (Dykes & Watson, 2010).

Las tres terminaciones nerviosas del plexo braquial son los nervios mediano, cubital y radial, los cuales se describirán en los apartados siguientes.

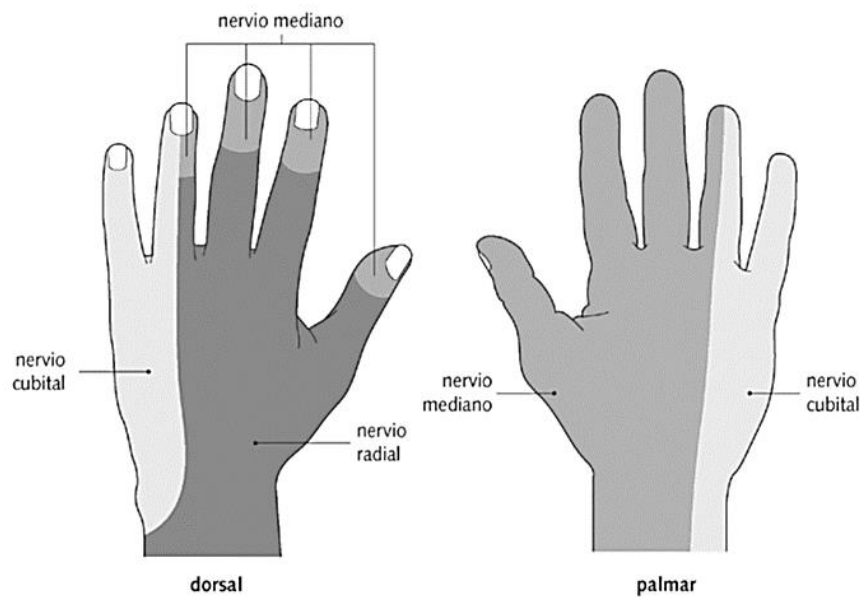


Figura 1.11 Inervación cutánea de la mano (Dykes & Watson, 2010).

La base del presente trabajo, así como del anterior (Torres Martínez, 2012), surge de la problemática de un paciente con inmovilidad en una mano debido a una lesión en el plexo braquial. Las lesiones en el plexo braquial pueden ser causadas por accidentes automovilísticos, heridas por armas tanto blancas como de fuego, así como durante el parto (Torres Martínez, 2012). Según el lugar donde ocurre la lesión existen tres tipos de parálisis:

1. Parálisis de Erb Duchenne: en las raíces C5 y C6.
2. Parálisis de Déjerine Klumpke: en las raíces C8 y T1.
3. Parálisis de Remack: en la raíz C7.

### **Nervio mediano**

El nervio mediano (Dykes & Watson, 2010) emerge del túnel carpiano para entrar en la palma. Los ramos del nervio en esta región incluyen:

- Ramo recurrente para los músculos de la eminencia tenar.
- Nervios digitales palmares que proporcionan inervación sensitiva a los tres y medio dedos laterales e inervación motora al primer y segundo lumbricales.

## Nervio cubital

El nervio cubital (Dykes & Watson, 2010) entra en la mano junto a la arteria cubital, y ambos son superficiales al retináculo de los músculos flexores. El nervio se divide en dos ramos: superficial y profundo.

El ramo superficial inerva el palmar corto y da unos nervios digitales palmares para un dedo y medio mediales (incluida la piel del dorso de la falange distal).

El ramo profundo acompaña a la rama profunda de la arteria cubital e inerva la musculatura hipotenar, los dos lumbricales mediales, los músculos interóseos y el aductor del pulgar.

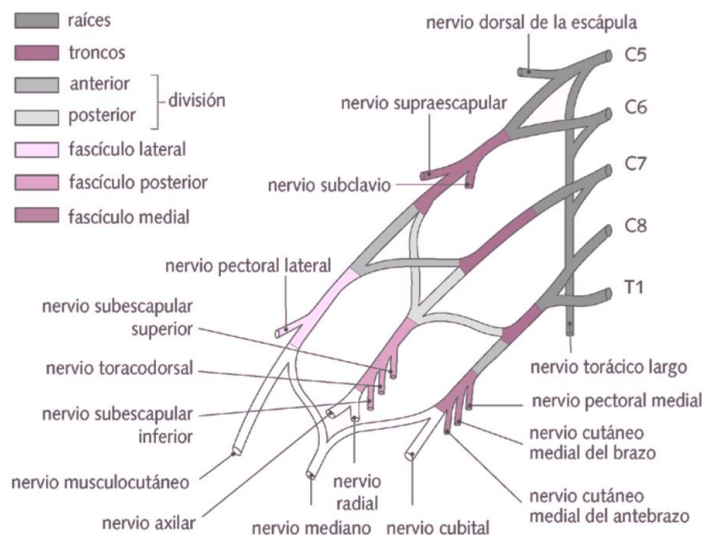


Figura 1.12. Constitución del plexo braquial (Dykes & Watson, 2010).

## Nervio radial

El nervio radial (Dykes & Watson, 2010) entra en el antebrazo profundo al músculo braquiorradial. Inmediatamente se divide en un ramo superficial y otro profundo. El ramo profundo rodea lateralmente el radio entre los vientres del supinador para incorporarse al compartimento extensor como nervio interóseo posterior. El ramo superficial continúa descendiendo por el antebrazo profundo al braquiorradial y acompaña a la arteria radial. Ambos alcanzan el dorso de la mano. El nervio radial inerva los tres y medio dedos

laterales dorsalmente, excepto los lechos ungueales, que están inervados por el nervio mediano.

### 1.3.6. Articulaciones

La articulación de la muñeca es compleja y multiarticulada que permite un amplio rango de movimientos en flexión, extensión, circunducción<sup>8</sup>, desviación radial y desviación cubital<sup>9</sup>. La articulación radiocubital distal permite la pronación y supinación de la mano conforme el radio y el cúbito giran entre sí. La articulación radiocarpiana incluye los huesos del carpo proximales y el radio distal. La fila proximal de carpos se articula con el radio y el cúbito para proporcionar extensión, flexión, desviación cubital y desviación radial. Esta articulación se apoya en un conjunto extrínseco de ligamentos palmar fuertes que surgen del radio y el cúbito. Dorsalmente, está soportado por el ligamento intercarpiano (IC) dorsal entre el escafoides y el piramidal y por el ligamento radiocarpiano dorsal.

En las articulaciones IC, el movimiento entre los huesos del carpo está muy limitado. Estas articulaciones están respaldadas por fuertes ligamentos intrínsecos, siendo el ligamento escafosemilunar y el ligamento lunopiramidal, los dos más importantes. La interrupción de cualquiera de los dos puede provocar inestabilidad de la muñeca. Los cuatro huesos del carpo distal se articulan con los metacarpianos en las articulaciones carpometacarpianas (CMC). La segunda y tercera articulaciones CMC no tienen movimiento relativo entre sí, mientras que la primera articulación CMC es la más móvil. En las articulaciones MCF, el movimiento lateral está limitado por los ligamentos colaterales. Esta disposición y la forma de la cabeza metacarpiana permiten que los ligamentos estén apretados cuando la articulación se flexiona y se afloja cuando se extiende (es decir, efecto de leva). La placa volar es parte de la cápsula articular que se adhiere sólo a la falange proximal, lo que permite la hiperextensión. La placa volar es el sitio de inserción de los ligamentos intermetacarpianos (IMC). Estos ligamentos restringen la separación de las cabezas metacarpianas.

---

<sup>8</sup> Circunducción: movimiento circular que combina flexión, extensión, abducción y aducción, de modo que el desplazamiento describe una figura cónica. El extremo distal de la extremidad se mueve en un círculo mientras que el extremo proximal permanece fijo en su base (BioDic, s.f.).

<sup>9</sup> Desviaciones radial y cubital: Movimientos laterales de la mano hacia el pulgar y hacia el meñique, respectivamente (Marina, 2017).

En las articulaciones IF, la extensión está limitada por la placa volar, que se adhiere a las falanges en cada lado de la articulación. El movimiento radial y cubital está restringido por ligamentos colaterales, que permanecen apretados a través de todo su rango de movimiento (Wilhelmi, 2016).

### 1.3.7. Poleas

El sistema de poleas es fundamental para la flexión del dedo. Cada uno de los dedos contiene cinco poleas anulares y cuatro poleas cruzadas, mientras que el pulgar tiene dos poleas anulares y una polea oblicua. En el dedo, las poleas anulares segunda y cuarta (A2, A4) son poleas críticas. La polea oblicua es la polea crítica en el pulgar.

La deficiencia del sistema de poleas (en especial en las críticas) debido a una lesión, resulta en la necesidad de un mayor recorrido del tendón para poder doblar el dedo (Wilhelmi, 2016) (Figura 1.13).

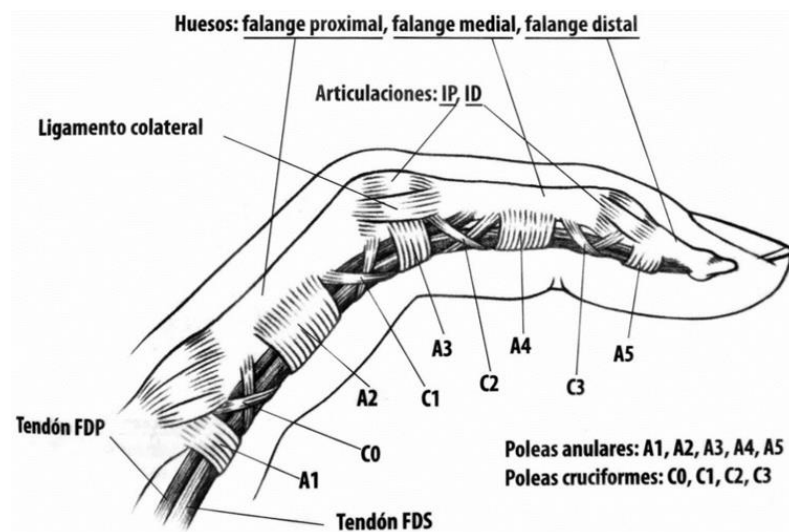


Figura 1.13. Anatomía del dedo. Donde IP es la articulación interfalángica proximal, ID es la articulación interfalángica distal, FDP es flexor profundo del dedo, y FDS es flexor superficial del dedo (Paterna, 2012).

### 1.3.8. Movimientos de los dedos

La mano tiene numerosos movimientos en los cuales intervienen las articulaciones MCF e IF.

El movimiento de las articulaciones de los dedos de la mano, excepto el pulgar, se realiza fundamentalmente en el plano de flexión-extensión. La abducción y la aducción son limitadas, y se producen tan sólo en las articulaciones MCF (Godínez Morado, 2013).

### **Flexión-extensión MCF**

El arco total de movimiento es de 120° a 135° y está dividido en 90° para la flexión y de 30° a 45° para la extensión (Figura 1.14a).

### **Flexión-extensión IF proximal**

Un arco de movimiento total de 100° asociado únicamente para la flexión, normalmente esta articulación no tiene extensión (Figura 1.14b).

### **Flexión-extensión IF distal**

Un arco de movimiento total de 90° a 100° dividido en 90° para la extensión, y de 0° a 10° para la extensión (Figura 1.14c).

### **Abducción-aducción de los dedos**

Es el movimiento en el cual los dedos se juntan y se separan entre sí, siendo en la abducción una separación de 20° entre cada dedo mientras que en la aducción se juntan (Figura 1.14d).

### **Flexión-extensión total del pulgar**

En este movimiento la punta del pulgar describe un arco desde la base del meñique hasta formar una L respecto al dedo índice (Figura 1.15a).

### **Flexión-extensión MCF del pulgar**

Describe un arco de 50° en flexión, mientras que en extensión no se presenta arco alguno (Figura 1.15b).



## Flexión-extensión IF del pulgar

Consta de un arco total de movimiento de  $90^\circ$  a  $110^\circ$ , el cual se divide en  $90^\circ$  para la flexión y de  $0^\circ$  a  $20^\circ$  para la extensión (Figura 1.15c).

## Abducción-aducción palmar del pulgar

Consiste en un arco de movimiento de  $70^\circ$  en flexión únicamente (Figura 1.15d).

## Oposición

Este movimiento consiste en tocar la punta del meñique con el pulgar si ambos están flexionados (Figura 1.15e).

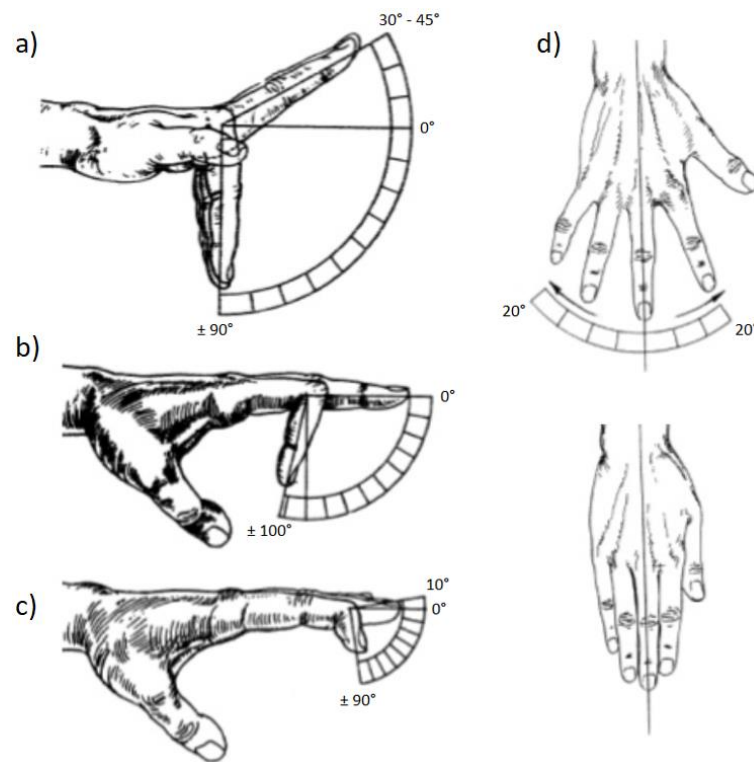
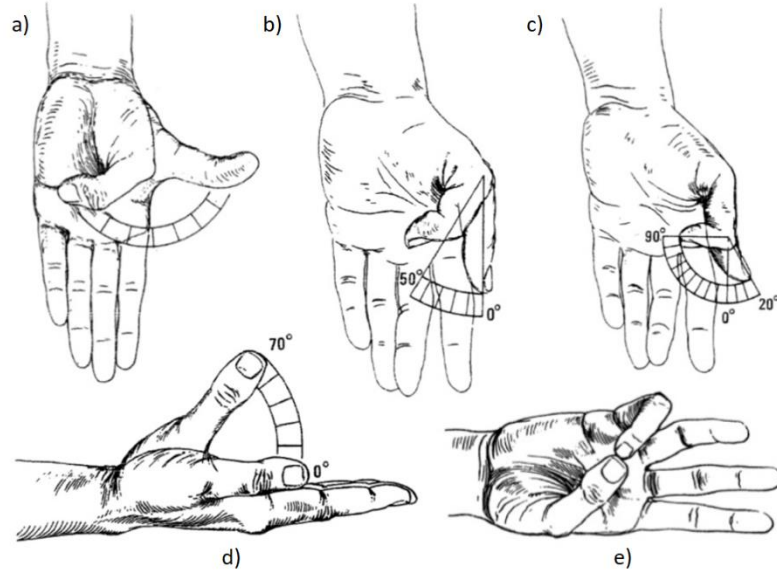


Figura 1.14. Movimientos de los dedos ( $1^\circ$ ,  $2^\circ$ ,  $3^\circ$  y  $4^\circ$ ). El a) es flexión-extensión MCF, b) es flexión-extensión IF proximal, c) es flexión-extensión IF distal, d) es abducción (arriba) y aducción (abajo) (Godínez Morado, 2013).



**Figura 1.15. Movimientos del pulgar. El a) es la flexión-extensión total, b) es la flexión-extensión MCF, c) es la flexión-extensión IF, d) es la abducción-aducción, y e) es la oposición (Godínez Morado, 2013).**

## **2. DISEÑO CONCEPTUAL Y CONFIGURACIÓN**

En este capítulo se muestran los requisitos solicitados por el paciente con parálisis en su mano, los cuales servirán de punto de partida para el desarrollo del rediseño de la ortoprótesis; seguido de la explicación de los conceptos de solución que ayudaron a solucionar las especificaciones determinadas anteriormente.

### **2.1. Identificación de las necesidades**

Antes de iniciar cualquier proyecto de diseño, es fundamental la identificación de una necesidad, o bien de una oportunidad de negocio, inexplorada, mal explorada o que pueda solucionar un problema de manera más eficiente y con mayor competitividad.

Los criterios principales que se deben considerar para ofrecer un producto o un servicio son los siguientes (Torres Martínez, 2012):

#### **1. Conocer los tipos de necesidades**

Una primera aproximación es clasificar las necesidades en cuanto al nivel de prioridad que representan. Una herramienta útil para este caso es la jerarquía de necesidades de Maslow (Mora Cantellano, 2017), la cual agrupa las necesidades en básicas y fisiológicas; de seguridad, de pertenencia, de reconocimiento, y de autorrealización (Figura 2.1).

#### **2. Identificar el valor de la necesidad**

Dependiendo del mercado al que vaya dirigido, una empresa debe determinar el de valor de un producto o servicio, cuidando de que se encuentre en un rango de precios que el potencial cliente estaría dispuesto a pagar para cubrir una necesidad identificada.

### 3. Identificar el bien o servicio adecuado para cubrir la necesidad

Habiendo realizado lo anterior, se procede al desarrollo en sí del producto o servicio que sea capaz de satisfacer la necesidad de manera que el uso, la calidad y el precio de lo que se le está ofreciendo al consumidor sean de su agrado.



Figura 2.1. Jerarquía de necesidades de Maslow (Mora Cantellano, 2017).

Con base en lo anterior, y para encontrar las especificaciones necesarias para la ortoprótesis diseñada por Torres Martínez, fue necesario entrevistar tanto al paciente como a su terapeuta para obtener las necesidades que ambos consideraron importantes. Las respuestas que se obtuvieron son las siguientes (Torres Martínez, 2012):

1. Que use su propia mano
2. Práctico y funcional, con un fácil manejo
3. Fácil mantenimiento
4. Que tome y mantenga sujetos los objetos
5. Que mantenga la presión
6. Sí es importante que no sea pesado ni tan feo
7. Lo más cercano a su anatomía, que no salga de la mano ni que se le vea fuera del cuerpo
8. Que mantenga una presión constante y regulada
9. Que sea fácil de instalar (que emplee una sola mano)
10. Que no se atore con la ropa

11. Rehabilitar mi brazo (si esto fuera posible)
12. Evitar que se siga deteriorando mi brazo
13. Que corrija la postura de mi mano
14. Poder integrar mi mano a mi vida cotidiana: en casa, escuela, trabajo y transporte
15. Que estuviera lo más adherido a mi cuerpo
16. Que me permitiera seguir usando la ropa con mangas
17. Que se integre de manera natural a la mano
18. Creo que podría trabajar con tres centímetros como máximo
19. Que no fuese muy lento para que no se desespere
20. Que no presente mayor dificultad su uso

Para fines del presente trabajo, los puntos considerados para el rediseño de la ortoprótesis fueron: 2, 3, 4, 6, 7, 9, 10, 16, 17, 18 y 20, con los cuales se construyó la **Tabla 2.1**, en la cual se pueden observar algunas especificaciones propuestas para solucionar las necesidades mencionadas anteriormente; con lo que se puede mostrar que varios requerimientos de interés comparten una categoría por lo cual fueron agrupados, los cuales fueron de utilidad para determinar las especificaciones (**Tabla 2.1**).

## **2.2. Especificaciones objetivo**

Una vez obtenidos los requerimientos del cliente, es necesario determinar las formas, o especificaciones, para que el producto final sea del agrado del cliente y resuelva las necesidades iniciales. Para lograr lo anterior se emplea la herramienta QFD (Despliegue de la Función de Calidad por sus siglas en inglés), con la cual se pueden calcular matemáticamente las características indispensables al diseñar un producto, así como cuáles pueden ser prescindibles ya que sólo aumentan el costo final sin ser de relevancia para el cliente; de igual manera, es posible tener un panorama general de cómo se comporta el producto frente a la competencia, lo cual muestra las áreas de oportunidad para mejorar (Jimeno Bernal, 2012).

Dentro del análisis con QFD (Figura 2.2) se le dio un valor a cada requerimiento del usuario en función de la importancia que cada una representaba. Posteriormente cada requerimiento (los “qués”) se relacionaron con las especificaciones funcionales (los “cómos”), y con base en esto, cada una de estas últimas tuvo un valor según su importancia. Finalmente, las especificaciones se ordenaron de manera descendente según su importancia (**Tabla 2.2**), las

cuales dieron la pauta para las especificaciones preliminares para la primera iteración del rediseño.

Una vez realizado el análisis de los requerimientos, así como su relación con las especificaciones propuestas mediante el método QFD, se obtuvieron los siguientes resultados mostrados en la. Posteriormente, las especificaciones fueron ordenadas según su importancia (de mayor a menor) como se puede ver en la Tabla 2.2.

**Tabla 2.1. Agrupación e identificación de las necesidades.**

#	Clasificación de necesidades	Necesidades	Especificaciones posibles	Medidas
1	Es práctico y funcional	Se maneja fácilmente Su uso no representa más dificultades Es portátil	Número de piezas Articulaciones movilizadas Tiempo para vestirse	Número Número [s]
2	Sirve para asir varios objetos	El dispositivo mantiene sujetos los objetos	Acabado superficial del acoplador	[%]
3	Ocupa poco espacio	El dispositivo es pequeño No ocupa demasiado espacio Tres centímetros, máximo desde la mano	Razón $\frac{Vol_{mano} + Vol_{dispositivo}}{Vol_{mano}} \geq 1$	[%]
4	Su forma es afín a la mano	Tiene tamaño cercano a la anatomía de la mano Es lo más adherido al cuerpo	Distancia del dorso de la mano Razón $\frac{Vol_{mano} + Vol_{dispositivo}}{Vol_{mano}} \geq 1$	[cm] [%]
5	Es ligero	El dispositivo es ligero	Peso del dispositivo	[g]
6	Puede portar prendas sobre él	Permite deslizar las mangas de la ropa sobre él Puede ser ocultado por la ropa y sigue funcionando	Distancia del dorso de la mano Número de bordes afilados	[cm] Número
7	Es agradable a la vista	Es agradable a la vista	Transmisibilidad de los materiales	[%]
8	Es económico	El aparato es económico	Costo de los materiales Costo de fabricación	MXN MXN
9	Fácil mantenimiento	Es fácil darle mantenimiento Se puede limpiar con facilidad El dispositivo tiene refacciones económicas	Número de elementos comerciales Herramientas para mantenimiento	Número Número

Tabla 2.2. Jerarquía de las especificaciones después del QFD.

Especificación	Importancia
Razón volumétrica	235.6
Distancia del dorso de la mano	223.3
Número de piezas y partes	205.5
Número de bordes agudos	175.3
Número de componentes comerciales	141.1
Número de herramientas para mantenimiento	141.1
Peso del dispositivo	127.4
Transmitancia óptica de los materiales	121.9
Acabado superficial del acoplador	98.6
Costo de fabricación	86.3
Costo de materiales	86.3
Tiempo de colocación	74.0

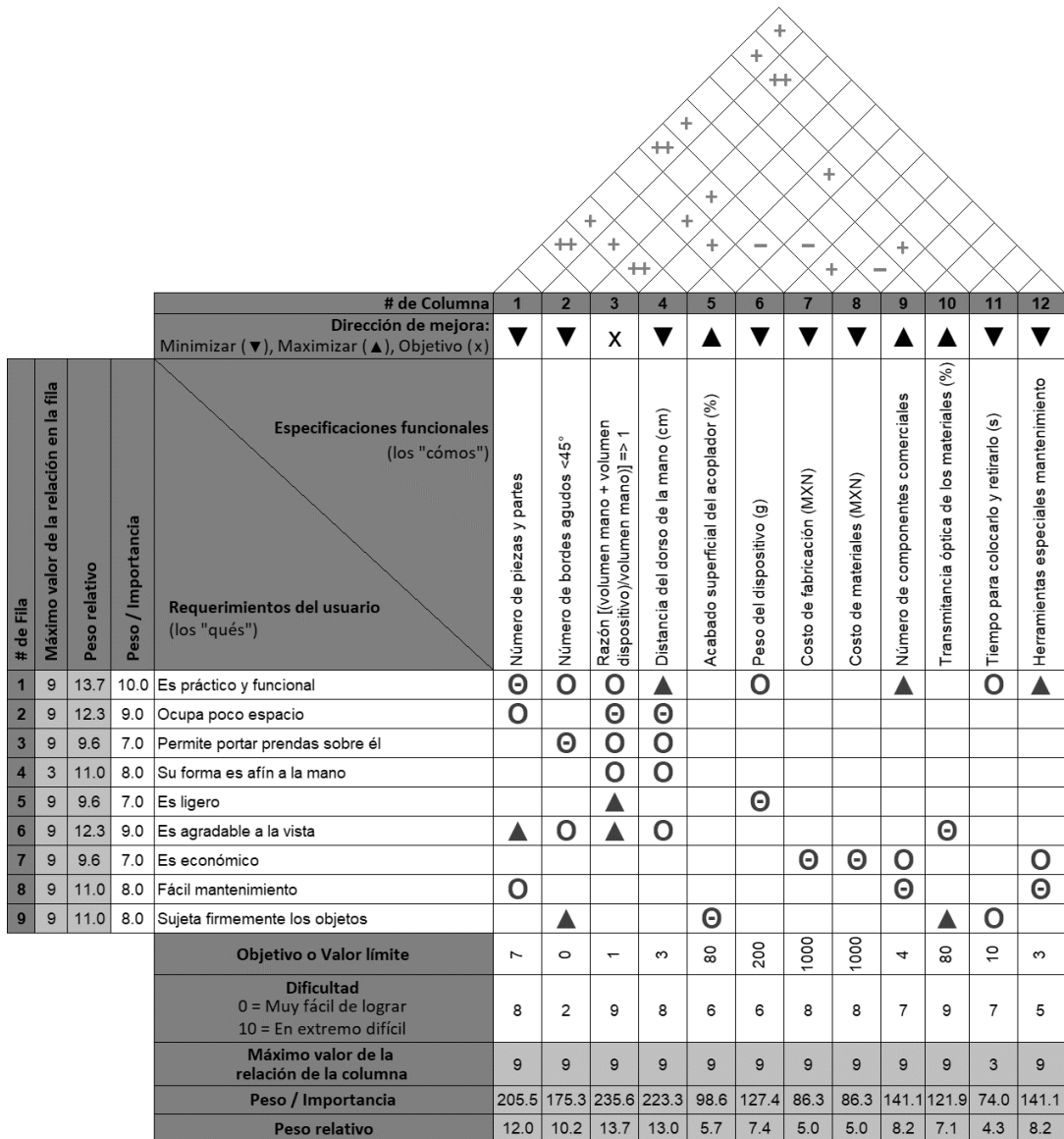


Figura 2.2. QFD de los requerimientos y especificaciones del rediseño de la ortoprótesis de mano.

## 2.3. Funciones y conceptos de solución

Una vez que se han definido los requerimientos del cliente y establecidas las especificaciones objetivo, es necesario recopilar ideas preliminares a partir de las cuales se pueden asimilar los conceptos de solución. La importancia de reunir la mayor cantidad de ideas posibles es que se puede ir desde modificaciones de ideas previas hasta algunas completamente nuevas.

### 2.3.1. Cubierta del mecanismo

Esta función, como su nombre lo indica, es la encargada de cubrir la parte del mecanismo de la ortoprótesis. La importancia de esta función es la de aislar el mecanismo del exterior para evitar que llegue suciedad a su interior y para evitar atorarse con la ropa o con algún otro objeto que pudieran afectar el funcionamiento de la ortoprótesis (Figura 2.3).



Figura 2.3. Conceptos de solución para la cubierta del mecanismo: 1) Tapa corrediza sobre rieles (OLX, 2019), 2) Tapa con bisagra (Sarstedt, 2019), y 3) Tapa removible (Avechi, 2018).

### 2.3.2. Bloqueo de la cubierta

Si bien la función anterior ya incluye la implementación de una cubierta protectora del mecanismo, aún hace falta una manera de fijar dicho elemento para evitar una apertura accidental, por lo cual se mencionan los siguientes conceptos para bloquear la carcasa del dispositivo (Figura 2.4).



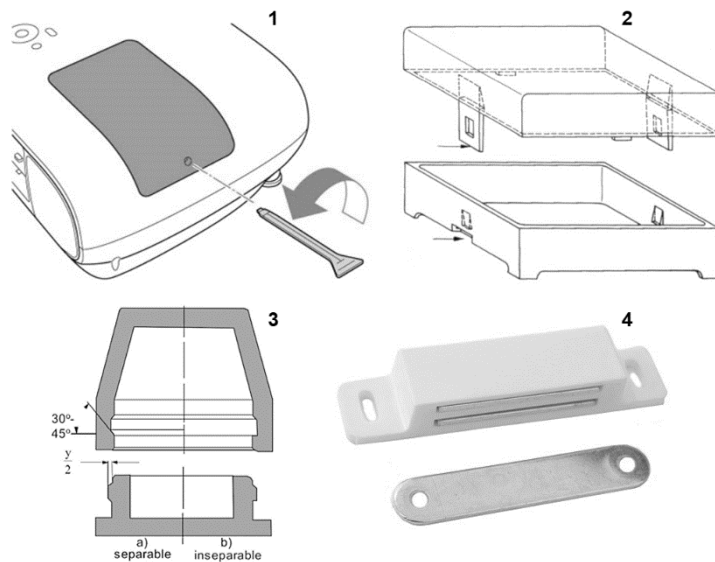


Figura 2.4. Conceptos para bloquear la carcasa: 1) Tornillo (Epson, 2018), 2) Ajuste con pestañas (Bayer Material Science, 2016), 3) Ajuste a presión (Bayer Material Science, 2016), y 4) Imán (Leroy Merlin, 2019).

### 2.3.3. Sujeción del objeto con el acoplador

Una función de gran importancia para el correcto funcionamiento de la ortoprótesis es la sujeción firme de los objetos que se quieren sostener. Para incrementar la sujeción entre dos cuerpos se recurre a modificar los acabados superficiales como se muestra en la Figura 2.5.

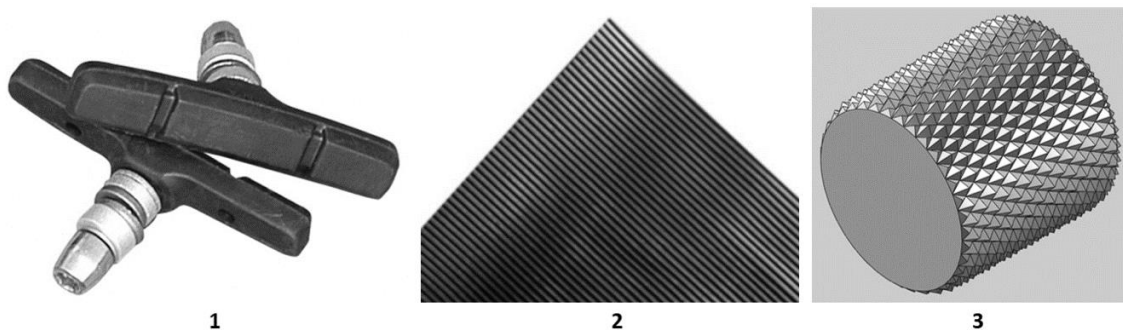


Figura 2.5. Conceptos para sujeción del objeto con el acoplador: 1) Superficie lisa (Bike 24, s.f.), 2) Superficie estriada (Unimat, 2016), y 3) Superficie moleteada (Cienciasfera, s.f.).

### 2.3.4. Sujeción del acoplador con el dedo

Para lograr un mejor agarre del dispositivo (como se mostró previamente) es necesario que dicho elemento esté colocado firmemente en los dedos que servirán para cerrar la pinza de la mano, es decir, dedo índice y medio (Figura 2.6).



Figura 2.6. Conceptos de sujeción del acoplador al dedo: 1) Banda elástica (Absolutanse, 2018), 2) Cinta adhesiva (Ms. Diva, 2016), 3) Cordón (Pic Click, 2018), 4) Cinta con gancho y bucle (China Brands, 2019), 5) Banda con hebilla (Clockura, 2017), 6) Banda con hebilla de clip (Decathlon, 2017), y 7) Cinta con botones (PZ Serigrafía, 2018).

## 2.4. Configuración

De acuerdo con la teoría de combinaciones y permutaciones (Disfruta las matemáticas, 2008) existen 252 permutaciones posibles de acuerdo con la cantidad de conceptos de solución para las funciones principales mencionadas anteriormente, esto es:

$$P = n_1 n_2 n_3 n_4 = (3)(4)(3)(7) = 252$$

Donde  $n_1$ , es la cantidad de conceptos de solución para la función “cubierta del mecanismo”,  $n_2$  para “bloqueo de la cubierta”,  $n_3$  para “sujeción del objeto con el acoplador” y  $n_4$  para “sujeción del acoplador con el dedo.

Si bien es un gran número de permutaciones como para describirlas todas, se hizo una simplificación al eliminar conceptos después de analizarlos. Los conceptos se presentan en las Tablas [2.3 a 2.6].

Tabla 2.3. Ventajas y desventajas de los conceptos de solución para la función "cubierta del mecanismo".

Función	Concepto de solución	Ventajas	Desventajas
Cubierta del mecanismo	Tapa corrediza sobre rieles	No ocupa más espacio a lo alto del dispositivo, ya que el movimiento es sólo a lo largo de su eje	La tapa corrediza tiene un mayor desgaste por fricción
	Tapa con bisagra	La tapa siempre permanece unida al mecanismo	Puede estorbar con la manipulación del mecanismo si no tiene un seguro al estar abierta
	Tapa removible	El mecanismo queda completamente expuesto, lo cual facilita su mantenimiento	La cubierta, al no estar fija al dispositivo, puede caerse o extraviarse

Tabla 2.4. Ventajas y desventajas de los conceptos de solución para la función "bloqueo de la cubierta".

Función	Concepto de solución	Ventajas	Desventajas
Bloqueo de la cubierta	Tornillo	Ajuste muy firme que evita la apertura accidental	Requiere de herramienta adicional
	Ajuste con pestañas	Cierra fácilmente y proporciona un bloqueo firme	Debido al uso constante puede fallar por fatiga
	Ajuste a presión	Puede abrirse y cerrarse con un solo movimiento en cada caso	Puede ser difícil para abrir y cerrar si el ajuste queda muy apretado
	Imán	No tiene piezas móviles entre sí que presenten esfuerzos al funcionar	Puede tener interacciones indeseables con objetos ferromagnéticos externos, si el imán es muy fuerte

Tabla 2.5. Ventajas y desventajas de los conceptos de solución para la función "sujeción del objeto con el acoplador".

Función	Concepto de solución	Ventajas	Desventajas
Sujeción del objeto con el acoplador	Superficie lisa	Mayor facilidad de fabricación	Al mojarse tiene menor adherencia con el objeto a sostener
	Superficie estriada	Mayor adherencia que la superficie lisa	No permite un agarre tan firme si la carga está orientada a lo largo de las estrías
	Superficie moleteada	Mayor adherencia que la superficie estriada	Limpieza complicada

Tabla 2.6. Ventajas y desventajas de los conceptos de solución para la función "sujeción del acoplador con el dedo".

Función	Concepto de solución	Ventajas	Desventajas
Sujeción del acoplador con el dedo	Banda elástica	El hule no tiene deslizamiento sobre la piel Uso con una sola mano	No permite ajustes finos Pierde su elasticidad con el uso
	Cinta adhesiva	No tiene excedente ya que sólo se ocupa lo que se va a necesitar Uso con una sola mano	Tiende a perder la adherencia Puede dejar residuos de pegamento en la superficie de contacto
	Cordón	Se pueden hacer ajustes finos de manera sencilla	Requiere las dos manos para su uso Después de ajustarlo, el excedente se puede atorar con algún otro objeto
	Cinta con gancho y bucle	Después de ajustarlo, el excedente se puede adherir sobre sí misma Uso con una sola mano	Reduce su agarre con el uso y con la suciedad
	Banda con hebilla	Sujeción muy firme	Es difícil ajustarla con una sola mano No permite ajustes finos
	Banda con hebilla de clip	Su ajuste es más sencillo y fino que el de una cinta con hebilla normal Uso con una sola mano	Las pestañas de la hebilla pueden fallar por fatiga.
	Cinta con botones	Uso con una sola mano	No permite ajustes finos

Para cada función se eligió una sola opción, la cual cumplía de mejor manera la acción requerida. Para la cubierta del mecanismo se eligió la tapa con bisagra debido a que siempre queda unida al resto del mecanismo; para el bloqueo de la cubierta se optó por el ajuste a presión porque; para la sujeción del objeto con el acoplador, fue la superficie moleteada; finalmente, para la sujeción del acoplador con el dedo se usó la opción de ajuste mediante cinta con gancho y bucle.

Al elegir una propuesta para cada función, sólo quedó una configuración, demostrada de la siguiente manera:

$$P = n_1 n_2 n_3 n_4 = (3 - 2)(4 - 3)(3 - 2)(7 - 6) = 1$$

La cual quedó de la siguiente manera (Tabla 2.7).

Tabla 2.7. Configuración final.

Función	Concepto de solución
<b>Cubierta del mecanismo</b>	Tapa con bisagra
<b>Bloqueo de la cubierta</b>	Ajuste a presión
<b>Sujeción del objeto con el acoplador</b>	Superficie moleteada
<b>Sujeción del acoplador con el dedo</b>	Cinta con gancho y bucle

El diseño de detalle de estos conceptos se presenta en el *Capítulo 3: Diseño a detalle*.

### 3. DISEÑO A DETALLE

En este capítulo se describirán las piezas que componen al dispositivo en cuanto a las decisiones de diseño que se consideraron, las cuales no fueron mencionadas en el capítulo anterior. Además se mostrarán las posiciones relativas posibles entre los diferentes elementos del sistema.

#### 3.1. Diseño de piezas (CAD)

De acuerdo con el diseño anterior de la ortoprótesis de mano, ésta cuenta con cinco subsistemas (Torres Martínez, 2012), los cuales son:

- Mecanismo del dedo (NC)
- Soporte del antebrazo (SA)
- Soporte del pulgar opuesto (SO)
- Soporte al pecho (SP)
- Sistema de transmisión (TC).

Todos estos subsistemas, excepto el mecanismo del dedo, son auxiliares porque no llevan a cabo la función realizada por el mecanismo del dedo, sino que sólo sirven de apoyo; además hay, para estos subsistemas, soluciones existentes en el mercado por lo que no son objeto de estudio en el presente trabajo.

Para el rediseño de los componentes del mecanismo se empleó el programa de diseño mecánico SolidWorks® del cual se cuenta con una licencia en la ENES Juriquilla (UNAM). Cabe mencionar que para el rediseño de los componentes del mecanismo del dedo se consideró el mecanismo NC<sup>10</sup> y las dimensiones de la talla mediana (Torres Martínez, 2012). La primera consideración se hizo porque el mecanismo NC era el único que contaba con un prototipo sobre el cual hacer el rediseño y la segunda fue para tener dimensiones estandarizadas que pudieran ser útiles para un rango más amplio de usuarios.

---

<sup>10</sup> Normalmente cerrado.

### 3.1.1. Corredera

La corredera (Figura 3.1) incluye un ahorcador para el cable de transmisión que es idéntico al tipo de cables que se usan para los frenos y cambios de velocidades de las bicicletas (Figura 3.2), esto permite la que cabeza cilíndrica del cable (~2 mm) quede acoplada sin tener la necesidad de un fijador adicional. Los diámetros para los pernos son de 3 mm y 2 mm para la parte posterior (parte más ancha) y anterior respectivamente (ver Anexo, plano 1/6).

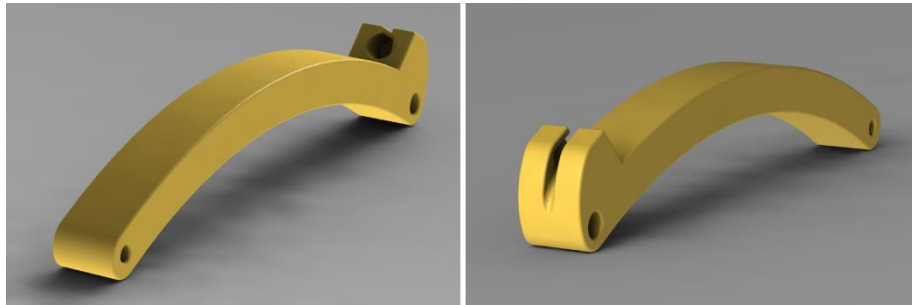


Figura 3.1. Corredera - renderizado final (elaboración propia).



Figura 3.2. Cable de transmisión (Bicicletas Restore-It!, s.f.).

### 3.1.2. Base

La base (Figura 3.3) sigue el factor de forma del prototipo alfa (González Ortiz, 2015) pero ahora está separada de la carcasa, permitiendo un mejor acceso al mecanismo para hacer ajustes sin retirar todo el dispositivo del guante. Se eliminó el uso de un perno para sujetar el elemento elástico a la base y se sustituyó por un par de cilindros en la parte frontal de la base en ambos lados de ésta. En la parte frontal hay dos protuberancias que sirven para ajustar la tapa a presión. En la placa horizontal hay perforaciones de 1.8 mm de diámetro en cada esquina que sirven de anclaje al guante. Debajo de la superficie

curva por donde se desplaza la corredera hay un hueco que atraviesa toda la pieza y su función es disminuir la cantidad de material (ver Anexo, plano 2/6).

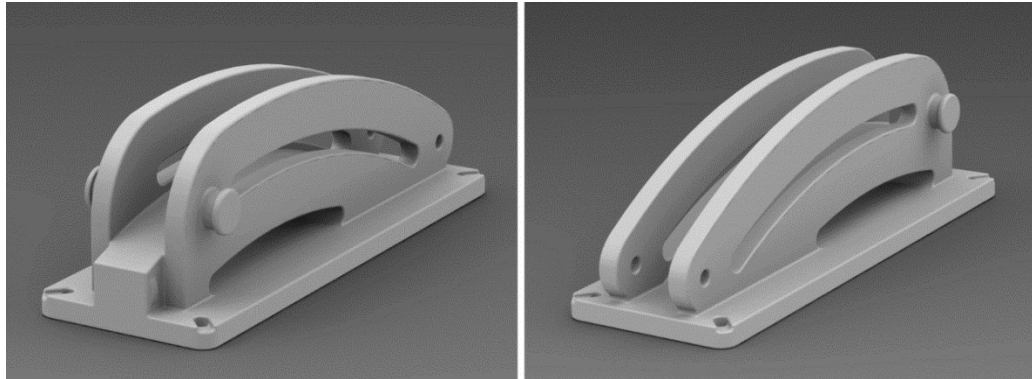


Figura 3.3. Base - renderizado final (elaboración propia).

### 3.1.3. Acoplador

Para el acoplador (Figura 3.4) se cambió el perfil plano por uno con forma de letra J para servir de soporte a los dedos para evitar que éstos se deslicen de manera paralela al accionar el mecanismo mediante el cable de transmisión. Se agregó un acabado superficial al acoplador (moleteado) para que la sujeción de los objetos no se realice con las yemas de los dedos. Para sujetar los dedos al acoplador se agregó una ranura para colocar una cinta con gancho y bucle. La región del acoplador que se une a la corredera cuenta con una perforación de 2 mm de diámetro, así como una ranura hexagonal para colocar una tuerca hexagonal, lo que permitirá su colocación con una mano (ver Anexo, plano 3/6).

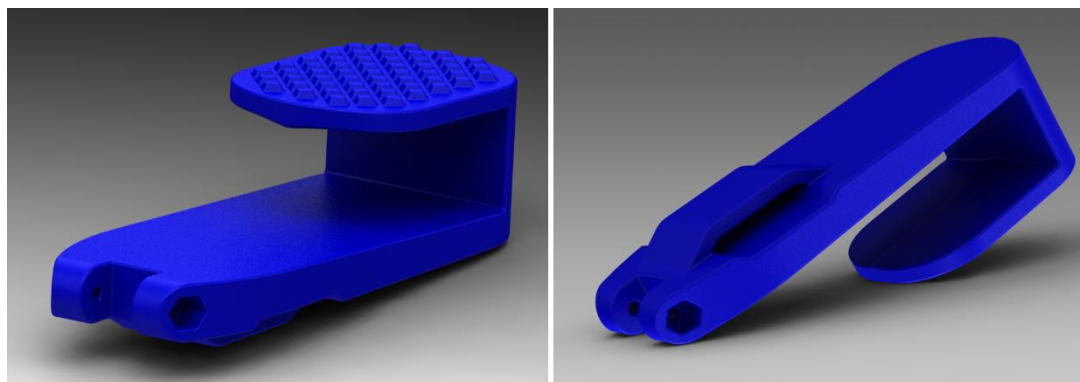


Figura 3.4. Acoplador - renderizado final (elaboración propia).



### 3.1.4. Tapa

La tapa (Figura 3.5) tiene en la parte posterior una perforación de 2 mm de diámetro para la bisagra y una ranura hexagonal similar a la del acoplador. También, la tapa cuenta con un espacio abierto para que ésta pueda levantarse sin ser obstruida por el cable de transmisión y permita un fácil acceso al interior del mecanismo. Además, en la parte frontal tiene dos ranuras que se acoplan a las protuberancias de la base para poder cerrar a presión. La tapa tiene un espesor de pared de 3 mm (ver Anexo, plano 4/6).

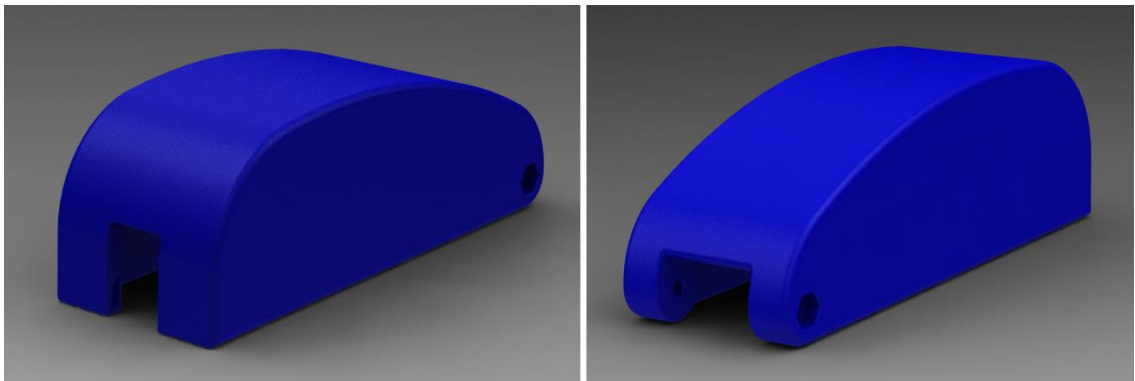


Figura 3.5. Tapa - renderizado final (elaboración propia).

### 3.1.5. Polea cable

La polea (Figura 3.6) se creó para colocarse en el perno de la bisagra de la tapa y servir de guía para el cable de transmisión lo cual evita que éste roce la tapa y la desgaste por fricción, además sirve de retén para objetos de tamaño considerable que pudieran entrar en el mecanismo. Para el diseño de esta pieza se siguió la teoría de canales y poleas (Norma Estándar Operacional), para asegurar el correcto deslizamiento del cable de transmisión, teniendo así un diámetro interno de 2 mm y uno externo de 8.8 mm, mientras que el radio del canal es de 0.7 mm con un ángulo de 60° (ver Anexo, plano 5/6).

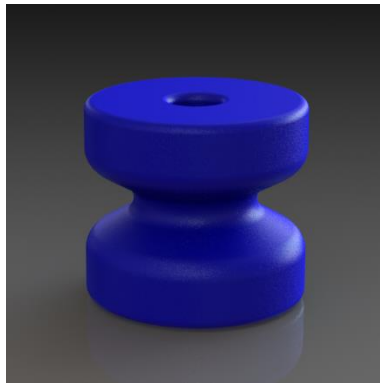


Figura 3.6. Polea del cable - renderizado final (elaboración propia).

### 3.2. Análisis de posiciones

Una vez modeladas las piezas en la computadora, se realizó un ensamble con todas ellas (Figura 3.8 y Figura 3.9), así como una vista explosiva de la ortoprótesis de mano (Figura 3.7).

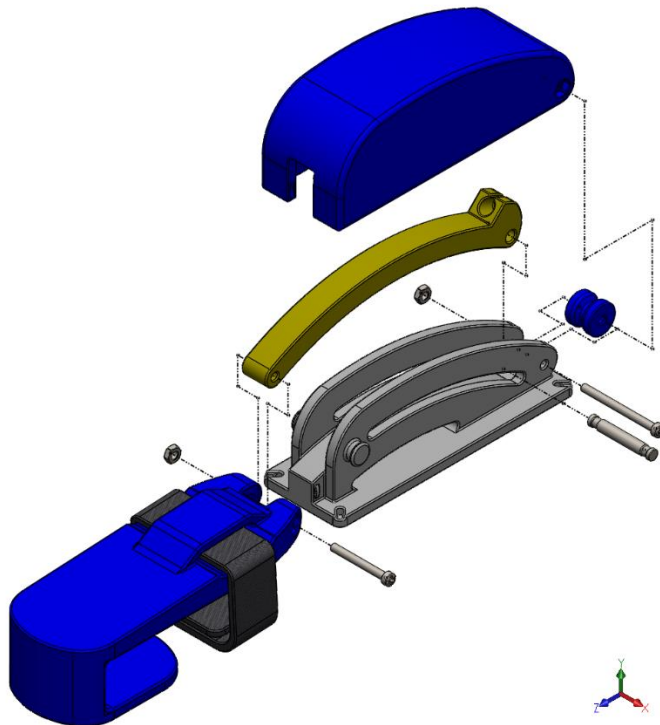
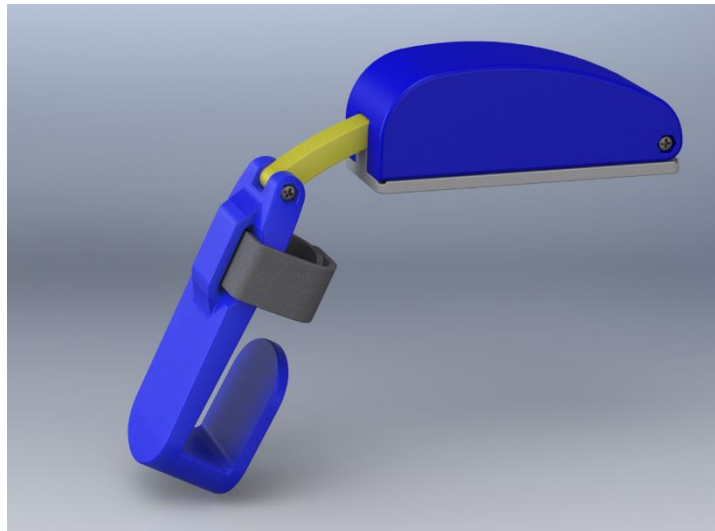
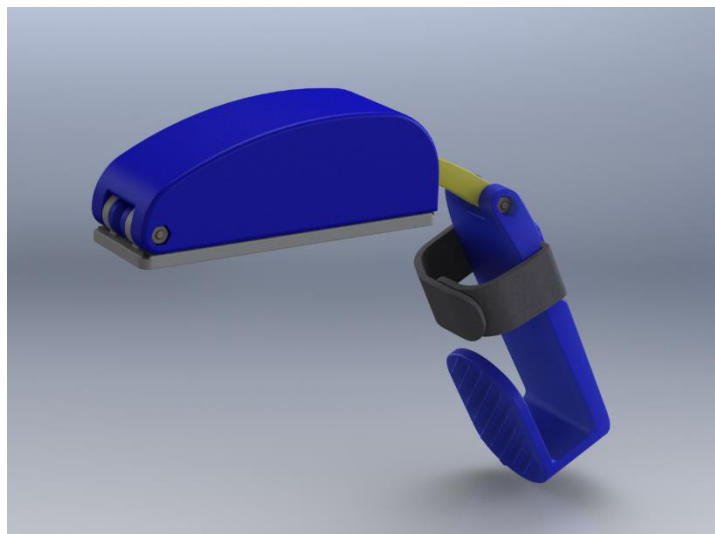


Figura 3.7. Vista explosiva del ensamble (ver Anexo, plano 6/6; elaboración propia).



**Figura 3.8 Vista lateral izquierda del ensamble (elaboración propia).**



**Figura 3.9 Vista lateral derecha del ensamble (elaboración propia).**

Los movimientos de las piezas se describen mediante arcos, por lo que todos los desplazamientos están en grados, quedando de la siguiente manera:

Entre el acoplador y la corredera se forma un ángulo que va desde  $75^\circ$  hasta  $255^\circ$ , es decir, tiene un rango de  $180^\circ$  (Figura 3.10).

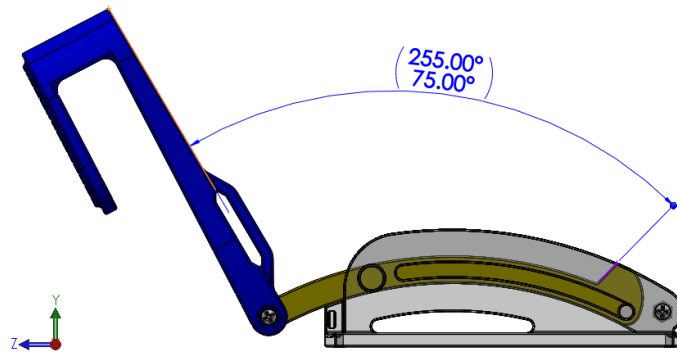


Figura 3.10. Rango angular entre el acoplador y la corredera (elaboración propia).

La tapa, por su unión con la base, tiene un rango de movimiento de 0° a 93° (Figura 3.11).

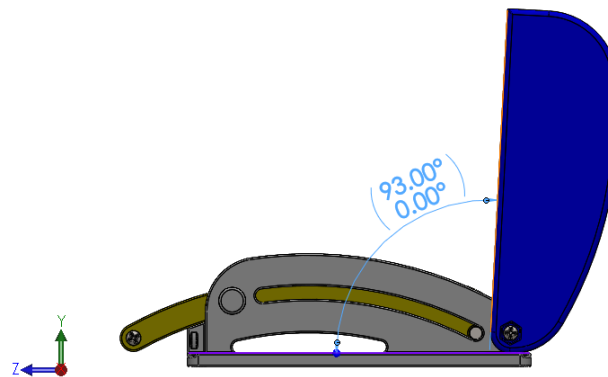


Figura 3.11. Rango angular entre la base y la tapa (elaboración propia).

La corredera al desplazarse sobre la base describe un rango angular que va desde 99.7° hasta 134.5°, dando un total de 34.8° (Figura 3.12), que está limitado por el recorrido que hace el perno de la corredera dentro de la ranura de la base.

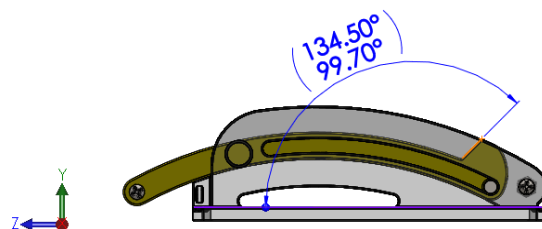


Figura 3.12. Rango angular entre la base y la corredera (elaboración propia).

## 4. PROTOTIPO: MANUFACTURA, ESTUDIOS Y RESULTADOS

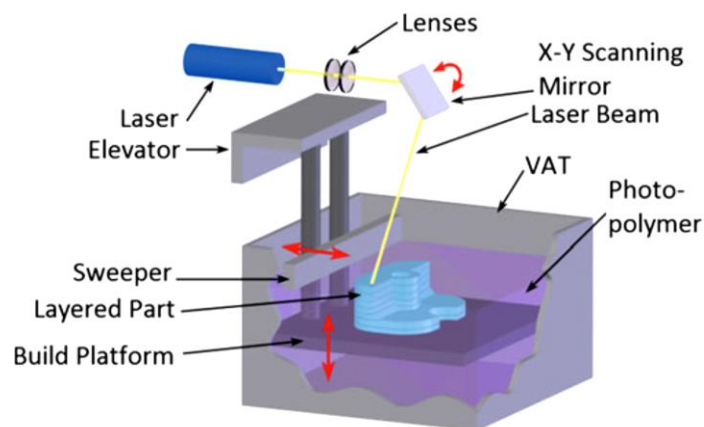
En este capítulo se explicarán los diferentes métodos que existen para la fabricación de prototipos así como los distintos materiales que se emplean para ello. Posteriormente se describirá el prototipo de la ortoprótesis de mano, tanto los sistemas principales como un breve análisis de los sistemas auxiliares que lo conforman.

### 4.1. Métodos de manufactura del prototipo

Para la fabricación de prototipos es muy común escuchar el concepto de impresión 3D, el cual es asociado con la impresión mediante la extrusión de polímeros, pero éste es sólo uno de varios procesos agrupados en lo que se denomina Manufactura Aditiva (AM, por sus siglas en inglés). Este tipo de manufactura ha sido estandarizado por la ASTM e ISO, y dividido en siete categorías (Plastic Technologies México, 2016).

#### 4.1.1. Fotopolimerización

En este proceso se llena un depósito con una resina líquida la cual se polimeriza mediante la incidencia selectiva a la luz, ya sea con un láser o con un proyector, dando como resultado una solidificación de la resina expuesta (Figura 4.1).



Copyright 2008 CustomPartNet:

Figura 4.1. Fotopolimerización (Esteve, Olivier, Hu, & Baumers, Micro-additive Manufacturing Technology, 2017).

Las ventajas de este proceso son:

- Gran precisión y complejidad geométricas
- Acabado superficial liso
- Adaptabilidad para piezas grandes

Otros nombres para la Fotopolimerización son:

- SLA: Sistema de estereolitografía
- DLP: Procesamiento digital por luz
- 3SP: Escaneo, giro y fotocurado selectivo
- CLIP: Interfaz de producción líquida continua

#### 4.1.2. Fusión de lecho de polvo

Este proceso emplea una fuente térmica (láser o rayo de electrones) para fundir de manera selectiva partículas de material en polvo, que se encuentra formando una delgada capa. Posteriormente un rodillo pasará sobre la capa anterior para agregar otra, así sucesivamente hasta terminar la pieza. El polvo del material no fundido hace la función de molde para dar soporte a la pieza aún en fabricación (Figura 4.2).

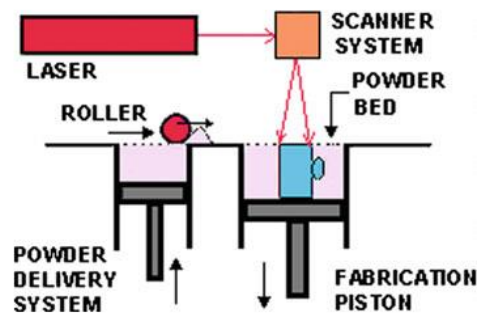


Figura 4.2. Fusión de lecho de polvo (Esteve, Olivier, Hu, & Baemers, Micro-additive Manufacturing Technology, 2017).

Las ventajas de este proceso son:

- Gran complejidad geométrica
- El polvo residual hace la función de soporte de la pieza
- Amplio rango de materiales (plásticos, metales, polvos cerámicos y arena)

Otros nombres para la Fusión de lecho de polvo son:

- SLS: Sinterización selectiva por láser
- DMLS: Sinterización directa de metal por láser
- EBM: Fusión por rayo de electrones
- SHS: Sinterización selectiva por calor
- MJF: Multi Jet Fusion

#### 4.1.3. Inyección por aglutinante (Binder jetting)

La manufactura con este método se logra al aplicar aglutinante líquido de manera focalizada sobre una delgada capa de material en polvo. La plataforma de trabajo desciende y con la ayuda de un rodillo se agrega otra capa del material en polvo para continuar el proceso (Figura 4.3).

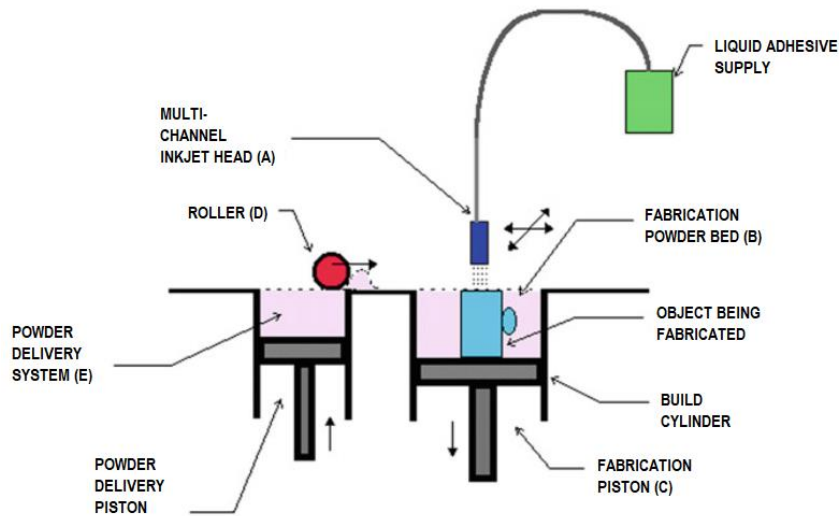


Figura 4.3. Inyección por aglutinante (Binder jetting) (Esteve, Olivier, Hu, & Baumers, Micro-additive Manufacturing Technology, 2017).

Las ventajas de este proceso son:

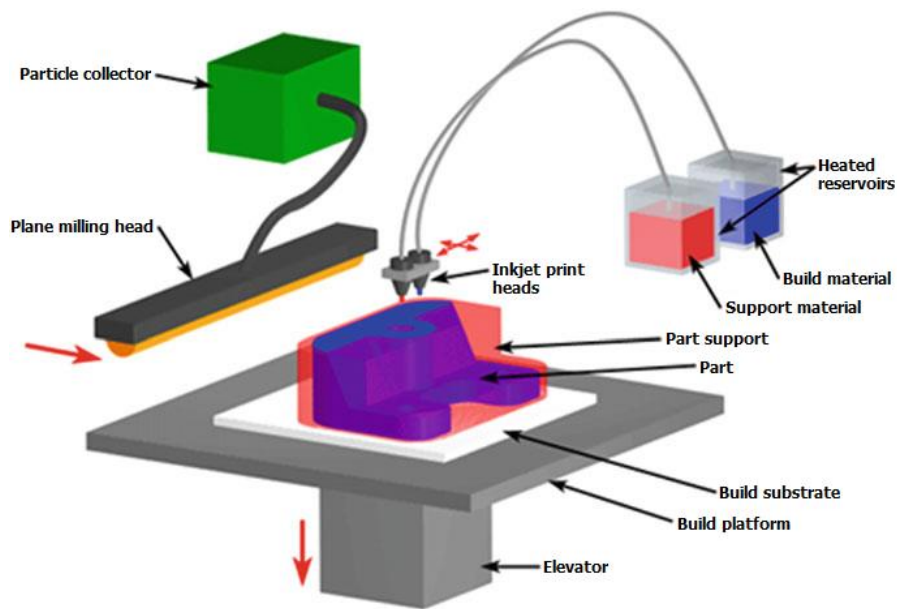
- Permite impresión a color
- Alta productividad
- No emplea una fuente de calor durante el proceso
- Amplio rango de materiales (plásticos en polvo, metales, materiales cerámicos, vidrio y arena)

Otros nombres para la Inyección por aglutinante son:

- 3DP: Impresión 3D
- ExOne
- Voxeljet

#### 4.1.4. Inyección de material (Material jetting)

Similar a la impresión tradicional en 2D, este proceso “inyecta” gotas de un material fotosensible que se solidifican al exponerse a luz UV, construyendo la pieza capa por capa (Figura 4.4).



Copyright © 2008 CustomPartNet

Figura 4.4. Inyección de material (Material jetting) (Esteve, Olivier, Hu, & Baumers, Micro-additive Manufacturing Technology, 2017).

Las ventajas de este proceso son:

- Alto nivel de precisión
- Permite piezas a todo color
- Acabado superficial liso
- Múltiples materiales en una sola pieza (fotopolímeros, polímeros y ceras)



Otros nombres para la Inyección de material son:

- Polyjet
- SCP: Impresión de curvatura suave
- MJM: Multi-Jet Modelling Projet

#### 4.1.5. Laminación de hojas

Esta técnica de fabricación consiste en la colocación de finas láminas de material (papel, plástico e incluso metal) que posteriormente son recortadas mediante una fresadora o un láser de CO<sub>2</sub> para darle la forma final a la pieza (Figura 4.5).

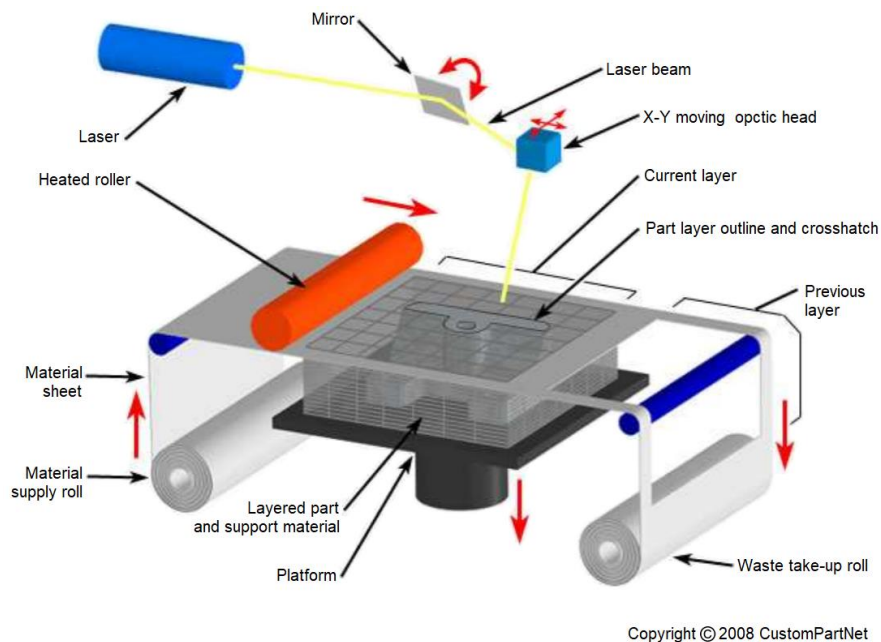


Figura 4.5. Laminación de hojas (Zocca, 2011).

Las ventajas de este proceso son:

- Altas tasas por volumen
- Costos relativamente bajos (no metales)
- Permite combinaciones de papel metálico, incluyendo componentes embebidos
- Variedad de materiales (papel, láminas de plástico, láminas y cintas de metal)

Otros nombres para la Laminación de hojas son:

- LOM: Laminated Object Manufacture
- SDL: Laminación por deposición selectiva
- UAM: Manufactura aditiva ultrasónica

#### 4.1.6. Extrusión de material

En este proceso el material es un termoplástico el cual tiene la forma de un filamento que es introducido en una boquilla que tiene una temperatura superior al punto de fusión del material. La pieza es construida con finos hilos del material fundido que solidifican inmediatamente después de salir de la boquilla (Figura 4.6).

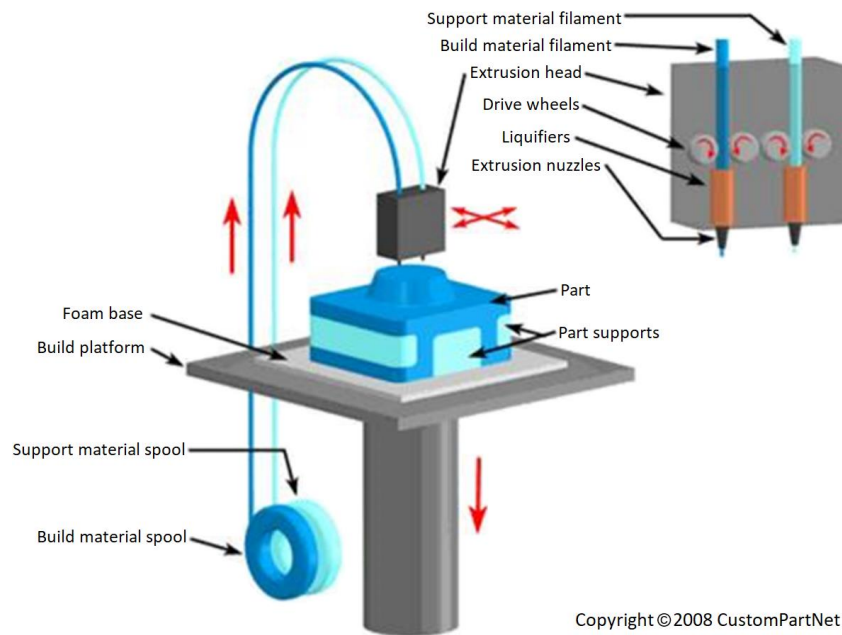


Figura 4.6. Extrusión de material (Esteve, Olivier, Hu, & Baumers, Micro-additive Manufacturing Technology, 2017).

Las ventajas de este proceso son:

- Poco costoso
- Permite múltiples colores
- Puede ser usado en ambiente de oficina
- Las piezas tienen buenas propiedades estructurales

Otros nombres para la Extrusión de material son:

- FFF: Fabricación por filamento fundido
- FDM: Modelado por deposición fundida

#### 4.1.7. Deposición directa de energía (DED)

Polvo o alambre es alimentado en una superficie donde se adhiere mediante una fuente de energía, como láser o haz de electrones. Es, en esencia, una forma de soldadura.

Esta técnica envía un flujo altamente concentrado de polvo de metal (se puede emplear también un fino alambre de metal) a través de una boquilla, que es fundido sobre la superficie de la pieza al instante gracias a un láser. Debido a que es similar al proceso de soldadura, este método se puede emplear para reparar piezas rotas (Figura 4.7).

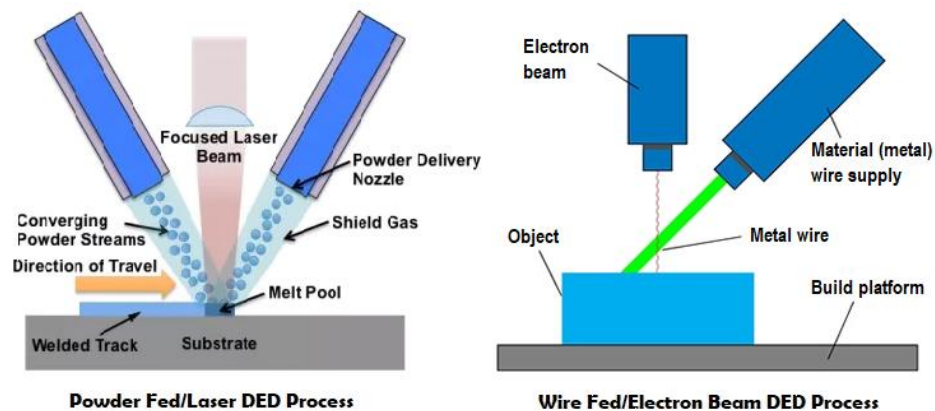


Figura 4.7. Deposición directa de energía (DED) (Benedyk, 2018).

Las ventajas de este proceso son:

- Sin limitaciones de dirección o ejes
- Efectivo para reparaciones o adiciones
- Alto nivel de precisión
- Múltiples materiales en una única pieza (polvo o alambre metálico, con cerámicos)
- Tasas de deposición más altas en un único punto

Otros nombres para la Deposición directa de energía son:

- LMD: Deposición de metal por láser
- LENS: Laser Engineered Net Shaping
- DMD: Deposición Directa de Metal

## 4.2. Materiales para manufactura aditiva

En cuanto a los materiales empleados para la manufactura aditiva 3D, existe una extensa gama de ellos que han evolucionado desde la creación de este método de fabricación.

### 4.2.1. Polímeros termoplásticos

Las piezas fabricadas con polímeros termoplásticos están sujetas a fuertes tolerancias, duras pruebas y entornos hostiles como en el prototipado HVAC<sup>11</sup> y en autos de carrera, además poseen propiedades especializadas como resistencia, disipación electroestática, translucidez, biocompatibilidad, resistencia UV y combustibilidad V0<sup>12</sup> (Figura 4.8).



Figura 4.8 Polímero termoplástico (Sculpteo, 2019).

- ABS (acrilonitrilo butadieno estireno)
- PLA (ácido poliláctico)
- Nylon (poliamida)
- PC (policarbonato)

---

<sup>11</sup> HVAC: Heating, Ventilating and Air Conditioned (S&P Sistemas de ventilación, 2017).

<sup>12</sup> Combustibilidad V0: El fuego se extingue en 10 segundos sin goteo (Aislamiento y Estanqueidad Erica, 2018).

### 4.2.2. Metales

Los metales se procesan en forma de polvo para poder ser sinterizados en las impresoras 3D (Figura 4.9).

Muchos metales tienen un punto de fusión superior a 500°C, por lo que la impresora debe soportar tales temperaturas, lo cual se traduce en equipos caros y potencialmente peligrosos si son operados de manera inadecuada. Además, debido a su fabricación, los polvos metálicos suelen tener costos muy elevados.



Figura 4.9 Metal (Martínez Roa, 2015).

- Aluminio
- Cobalto
- Acero inoxidable
- Oro
- Plata
- Titanio

### 4.2.3. Cerámicos

Los cerámicos (3DCeram, 2019) son materiales con propiedades características como alta resistencia, alta estabilidad dimensional (bajo coeficiente de expansión térmica), baja densidad, alta resistencia a la abrasión y la corrosión, excepcional estabilidad química.

Los materiales cerámicos empleados en la industria se formatean a temperatura ambiente y obtienen sus propiedades durante el proceso de sinterizado (Figura 4.10).

Gracias a sus propiedades distintivas (inoxidables, aislantes y resistentes al calor y al desgaste), las cerámicas técnicas también se utilizan en aplicaciones biomédicas, mercado de lujo, entre otras más.



Figura 4.10 Cerámico (Impresión Tresde, 2019).

- Zirconia ( $ZrO_2$ )
- Alúmina ( $Al_2O_3$ )
- Hidroxiapatita (HAP)
- Zirconia endurecida con alúmina (ATZ)
- Nitruro de silicio ( $Si_3N_4$ )
- Zirconia 8Y
- Óxido de silicio ( $SiO_2$ )

### 4.3. Sistemas auxiliares

Los sistemas auxiliares mencionados en la sección 3.1 fueron fabricados a mano, partiendo de una férula de yeso para obtener la forma del antebrazo, la muñeca y la mano (sin los dedos). A continuación se usó la férula como base para hacer una copia en una lámina de polipropileno, la cual fue ajustada a las dimensiones requeridas. Después, la pieza de PP fue insertada en un guante fabricado con neopreno para proporcionar al usuario un ajuste más confortable. Una vez colocada la estructura de PP dentro del guante, se le hicieron unas perforaciones para hacer el anclaje del mecanismo y demás componentes. Finalmente, el soporte al pecho fue manufacturado a mano en neopreno y loneta de algodón siguiendo la forma y dimensiones del usuario (Torres Martínez, 2012).

#### 4.4. Manufactura del prototipo

El prototipo fue fabricado mediante manufactura aditiva en polímero ABS blanco usando la impresora 3D da Vinci 1.0 AiO de XYZprinting (Figura 4.11). Para iniciar el proceso, las piezas diseñadas fueron exportadas en formato STL (abreviación en inglés de “estereolitografía”), aunque la impresora también tiene la capacidad de escanear objetos en resolución de grado industrial. Sus propiedades de impresión se muestran en la Tabla 4.1.



Figura 4.11 Impresora da Vinci 1.0 AiO (Gatto, 2017).

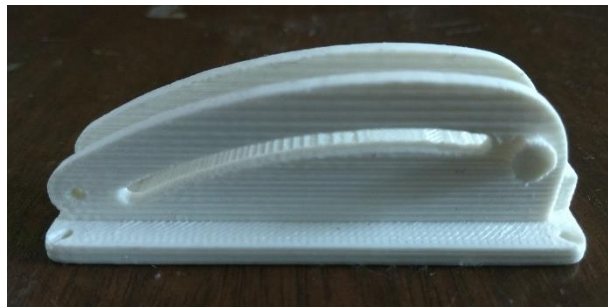
Tabla 4.1 Propiedades de impresión de impresora 3D da Vinci 1.0 AiO (XYZPrinting, 2018).

Concepto	Descripción
Tecnología de impresión	FFF (Fabricación por Filamento Fundido)
Volumen máximo de construcción (WxDxH)	7.9" x 7.9" x 7.5" (200 x 200 x 190 mm)
Resolución de capa	100 – 400 $\mu$ m
Precisión de posicionamiento XY	X/Y 12.5 $\mu$ m (0.0125 mm)
Precisión de posicionamiento Z	Z 0.4 $\mu$ m (0.0004 mm)
Software de impresión	XYZware
Formatos de archivo soportados	.stl, .3mf, XYZ Format (.3w), .nkg (.stl)
Máxima velocidad de movimiento	Máx. 120 mm/s
Compatibilidad de material	PLA / ABS / Flexible / PLA duro
Diámetro del filamento	1.75 mm
Diámetro de la boquilla	0.4 mm
Número de boquillas	1
Temperatura de la boquilla	Máx. 240°C / 464°F

Las piezas impresas se muestran de la Figura 4.12 a la Figura 4.16.



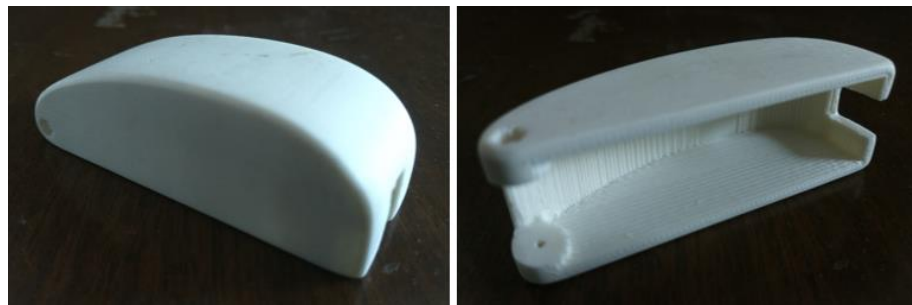
**Figura 4.12 Corredera (elaboración propia).**



**Figura 4.13 Base (elaboración propia).**



**Figura 4.14 Acoplador - vistas superior (izquierda) e inferior (derecha) (elaboración propia).**



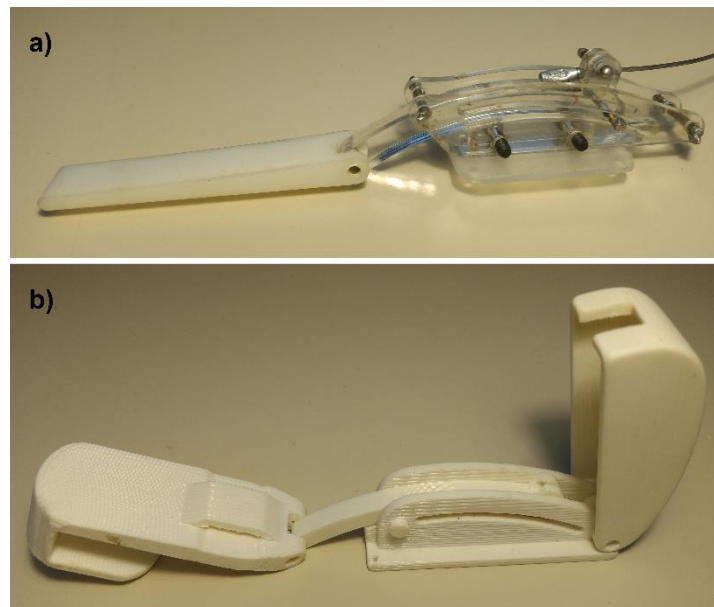
**Figura 4.15 Tapa - vista exterior e interior (elaboración propia).**





**Figura 4.16** Polea cable comparada con una moneda de 1 MXN cuyo diámetro es de 21 mm (elaboración propia).

La comparación entre el prototipo alfa y el rediseño propuesto se muestra en la Figura 4.17, donde se observa que el diseño anterior está fabricado con acrílico tanto transparente como opaco.



**Figura 4.17** Comparativa entre diseños de la ortoprótesis de mano: a) Prototipo alfa y b) Rediseño del prototipo alfa (elaboración propia).

En la Figura 4.18 se muestra cómo luciría el rediseño de la ortoprótesis en el guante que anteriormente tenía colocado el prototipo alfa.



Figura 4.18 Resideño montado en el guante (elaboración propia).

#### 4.5. Estudios y resultados

Para saber cómo se comportarán los componentes de un mecanismo al estar sometidos a diferentes tipos de sollicitaciones mecánicas (Corrales Espinoza, 2013), se requiere el uso de máquinas especiales para dichos ensayos (Figura 4.19). Sin embargo, estas máquinas suelen tener precios altos y requieren un espacio suficiente para su instalación, sobre todo para equipos que tienen cargas de operación muy altas (~600 kN), y esto puede limitar su adquisición para algunos usuarios. Por lo anterior, una solución más accesible y rápida para tener una noción de cómo va a responder un material o componente es mediante una simulación hecha en un programa de diseño mecánico (para el análisis se empleó SolidWorks®). Otra de las ventajas de las simulaciones mediante computadora es que se pueden someter virtualmente las piezas en ambientes que serían peligrosos para los humanos, como en climas extremos, en lugares tóxicos, en el fondo de los océanos o en el espacio exterior.

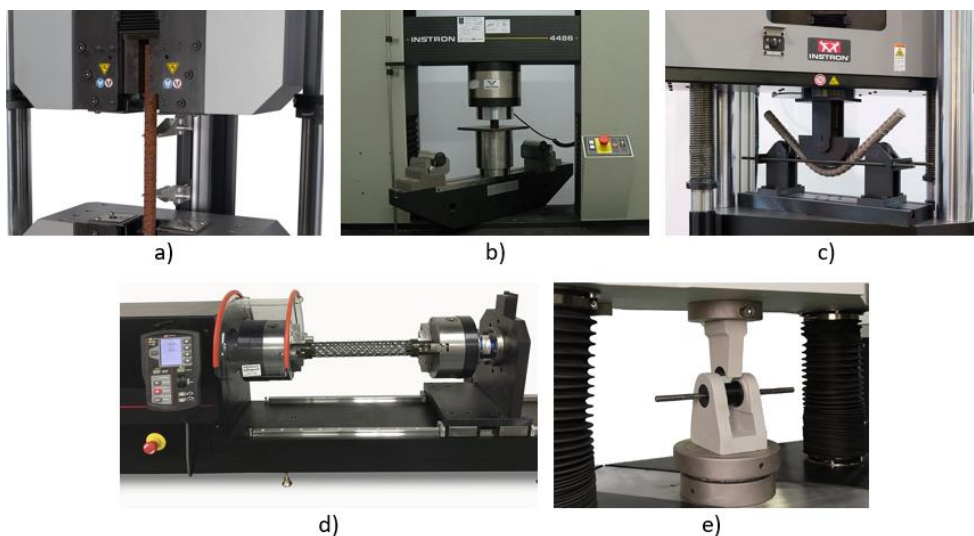


Figura 4.19. Pruebas mecánicas: a) tracción (Instron, s.f.), b) compresión (E-Ducativa CATEDU, s.f.), c) flexión (Instron, s.f.), d) torsión (Direct Industry, 2019), y e) cizalla (Ibertest, s.f.).

Dicha simulación se conoce como *Método de elementos finitos* (FEM, por sus siglas en inglés) (Mirlisenna, 2016) y consiste en la división una geometría compleja en otras figuras o “elementos” más simples como triángulos o cuadrados. La cantidad de elementos está determinada por su tamaño, es decir, son finitos, de ahí el nombre del método. Los elementos finitos se conectan unos con otros mediante puntos llamados “nodos”, y al conjunto de elementos y nodos se le conoce como “malla” (Figura 4.20).

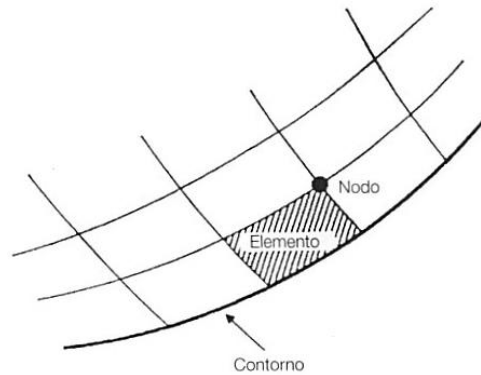


Figura 4.20. Componentes de una malla (Sánchez, Gordillo, & Martínez, 1997).

La transición de una pieza con una superficie continua a un polígono de  $n$  número de lados hace que la solución a las ecuaciones que rigen su comportamiento físico sea aproximada. La precisión de este método depende de la cantidad de elementos y nodos, esto es, mientras menor sea el tamaño de los elementos (y por ende mayor cantidad de nodos) más precisos serán los resultados del análisis (Figura 4.21).

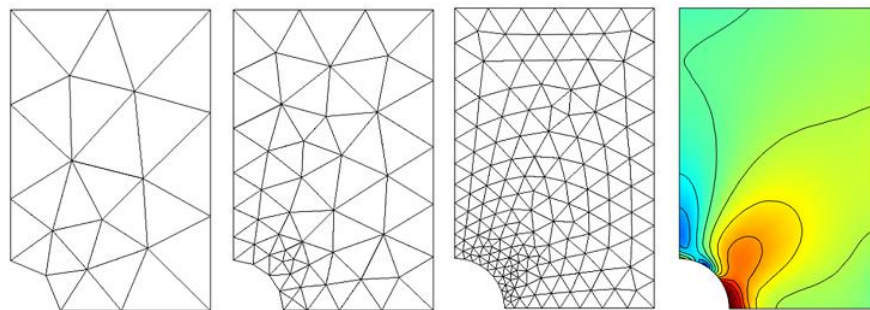


Figura 4.21. Diferentes calidades de malla, y campo de esfuerzos (Frei, 2013).

De la teoría de *Mecánica del medio continuo* existen varias suposiciones que se pueden hacer en la descripción del comportamiento de un material elástico para poder simplificar su análisis, las cuales se muestran a continuación:

1. *Sólido elástico, homogéneo, lineal y anisotrópico* con 21 constantes elásticas linealmente independientes.
2. *Sólido elástico, homogéneo, lineal y monotrópico* con 13 constantes elásticas linealmente independientes (sólido elástico monoclinico que contiene solamente un plano de reflexión y un eje de simetría).
3. *Sólido elástico, homogéneo, lineal y ortotrópico* con 9 constantes elásticas linealmente independientes (medio continuo que cuenta con dos planos de reflexión y dos ejes de simetría).
4. *Sólido elástico, homogéneo, lineal y transversalmente isotrópico* con 5 constantes elásticas linealmente independientes (medio continuo al que se le pueden asociar un número infinito de planos de reflexión formados al rotar sobre el eje de simetría).
5. *Sólido elástico, homogéneo, lineal e isotrópico* con 2 constantes elásticas linealmente independientes.

Como se puede observar, un sólido elástico, homogéneo, lineal e isotrópico tiene un alto nivel de idealización, que es opuesto al concepto de un sólido cristalino que es anisotrópico por definición; sin embargo se usa esta suposición debido a que los sólidos son generalmente policristalinos y la orientación al azar de sus cristales permite que se pueda considerar un comportamiento isotrópico, es decir que las propiedades del material no cambian con la dirección en la que son analizadas (Ortiz Prado, Ortiz Valera, & Ruiz Cervantes, 2014).

El material empleado para el análisis por FEM de todas las piezas fue plástico ABS cuyas propiedades mecánicas se muestran a continuación (Color Plus, 2025):

- a) **Tensión de rotura:** 40 MPa
- b) **Alargamiento por rotura:** 30%
- c) **Resistencia a la flexión:** 68 MPa
- d) **Módulo de elasticidad:** 1,180 MPa
- e) **Resistencia al impacto IZOD:** 30 kJ/m<sup>2</sup>
- f) **Temperatura de distorsión:** 80°C a 0.45 MPa
- g) **Densidad:** 1,040 kg/m<sup>3</sup>

## 4.5.1. Corredera

### 1. Descripción

La corredera es el eslabón entre el acoplador y el cable de transmisión, y está sometido a la tensión proporcionada por éste último para abrir la pinza de la mano. A su desplazamiento se oponen varias fuerzas: la que ejercen los elementos elásticos montados desde la base hasta el perno de la corredera, la fricción entre la corredera y la base, y la fuerza de reacción presente al jalar el acoplador cuando está sujeto a los dedos.

### 2. Consideraciones

Se presenta de un análisis independiente para cada pieza para mostrar las cargas que se les aplican, sin considerar su relación con los demás componentes, esto para poder validar las trayectorias que se logran con el rediseño de la ortoprótesis.

### 3. Información del modelo

- a) **Masa:**  $4.41549 \times 10^{-3}$  kg
- b) **Volumen:**  $4.24566 \times 10^{-6}$  m<sup>3</sup>
- c) **Peso:**  $43.2718 \times 10^{-3}$  N

### 4. Sujeciones y cargas

- a) **Prueba 1:** Esta prueba consistió en simular el efecto que tiene el perno que une el acoplador con la corredera, considerando ésta última como fija (en la parte inferior delimitada por la base, y en la parte superior por la tapa) para determinar sólo la reacción que tendría en orificio donde va dicho perno.

- **Sujeciones**

- **Entidades:** 2 caras
- **Tipo:** Geometría fija

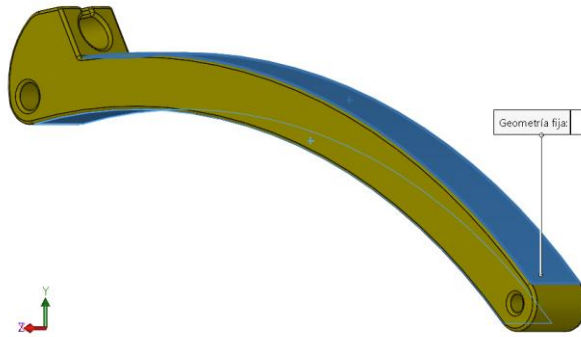


Figura 4.22 Corredera (prueba 1): Sujeciones (elaboración propia).

- **Cargas**

- **Entidades:** 1 cara, 1 plano
- **Referencia:** Plano 5 (pasa por el centro del agujero del perno que une el acoplador y cuya normal es tangente a la curvatura de la corredera)
- **Tipo:** Aplicar fuerza
- **Valor:** 50 N (normal plano 5)

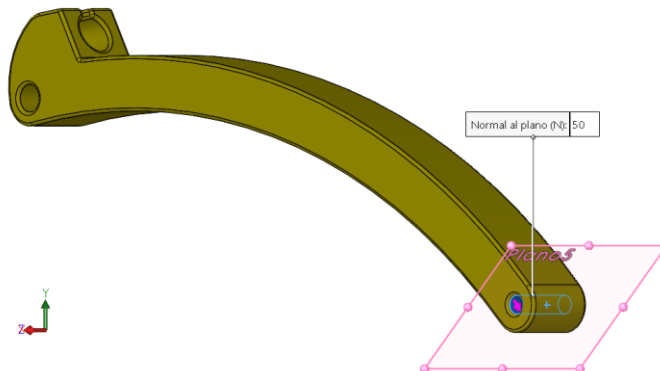


Figura 4.23 Corredera (prueba 1): Cargas (elaboración propia).

**b) Prueba 2:** Esta prueba consistió en mostrar la reacción que tendría la parte posterior de la corredera al simular la acción del cable de transmisión al tirar de él. Se consideró como fijo el resto de la corredera (delimitada en la parte inferior por la base, y en la parte superior por la tapa, como se muestra en la Figura 4.22).

- **Sujeciones:** Las sujeciones para esta prueba fueron las mismas para la prueba 1, debido a que se están analizando las cargas aplicadas a la corredera en la misma posición, sólo en ambos extremos, como se muestra en la Figura 4.22.
- **Cargas**
  - **Entidades:** 1 cara, 1 plano
  - **Referencia:** Plano (mostrado en azul en Figura 4.24, y cuya normal es tangencial a la curvatura de la corredera)
  - **Tipo:** Aplicar fuerza
  - **Valor:** 50 N (normal al plano mostrado en azul)

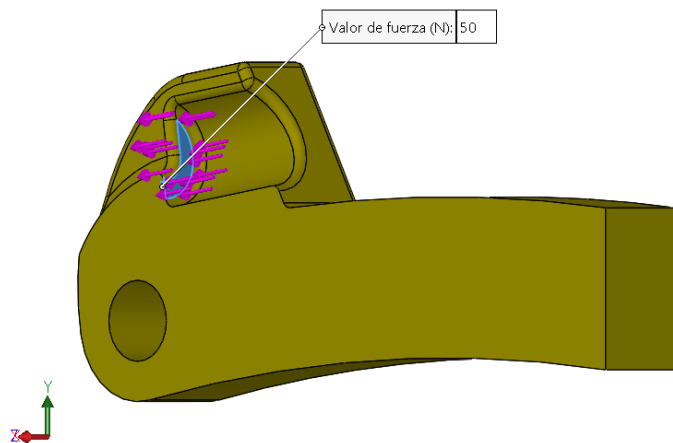


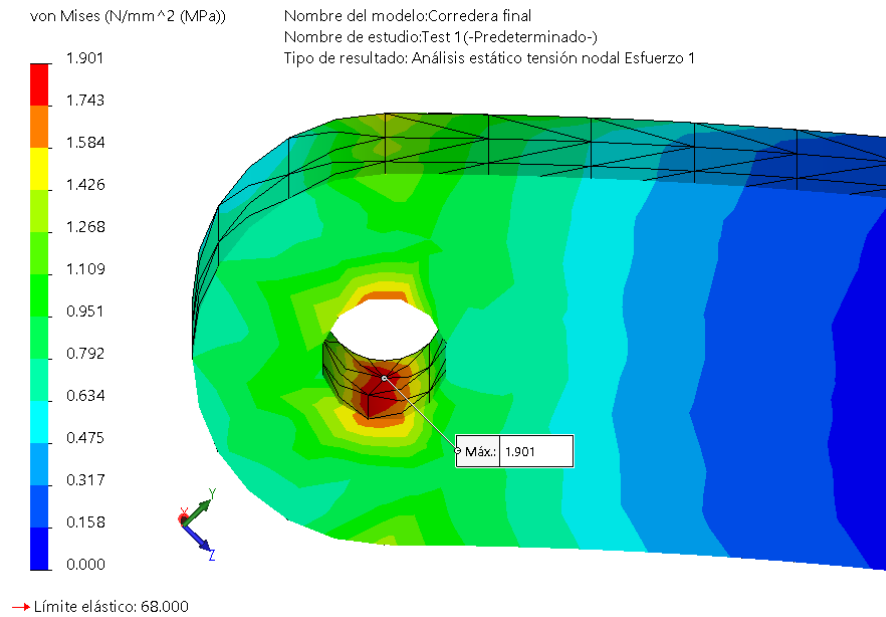
Figura 4.24 Corredera (prueba 2): Cargas (corte de sección paralelo al plano YZ) (elaboración propia).

## 5. Resultados del estudio

### a) Prueba 1:

- **Esfuerzos de von Mises**

Como se observa en la Figura 4.25, los esfuerzos resultantes se localizan en las zonas donde las tangentes al orificio para el perno, se encuentran en dirección normal al plano 5 (Figura 4.23).



**Figura 4.25 Corredera (prueba 1): Esfuerzos (corte de sección paralelo al plano YZ) (elaboración propia).**

- **Desplazamientos**

De acuerdo con la Figura 4.26 se puede visualizar que el mayor desplazamiento ocurrirá justo donde el perno jala la corredera, alineado con el centro de la circunferencia del cilindro y en sentido normal al Plano 5 (Figura 4.23).



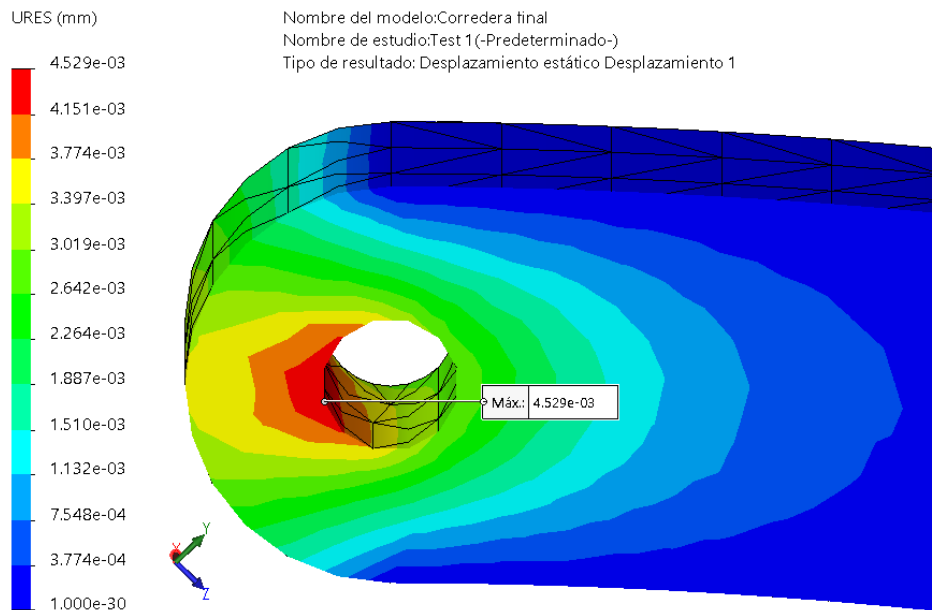


Figura 4.26 Corredera (prueba 1): Desplazamientos (corte de sección paralelo al plano YZ) (elaboración propia).

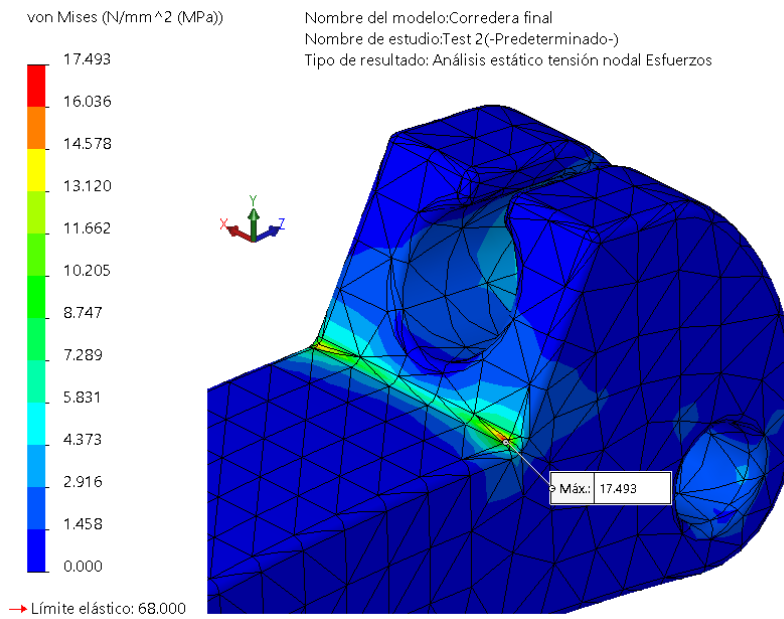
- **Factor de seguridad**

$$FS_{Corredera\ 1} = 36$$

#### b) Prueba 2:

- **Esfuerzos de von Mises**

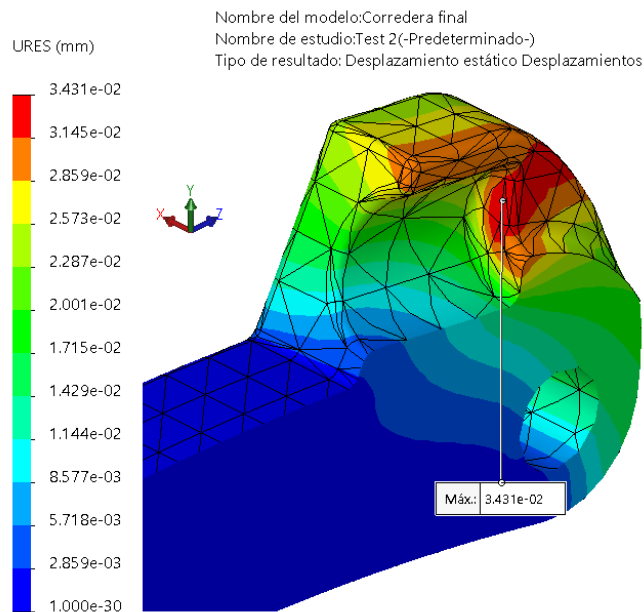
Como resultado de la carga aplicada se puede observar que existe una concentración de esfuerzos en la intersección de la curvatura superior de la corredera y el plano que da acceso a la cabeza del cable de acero; con una tendencia a presentarse más hacia los planos laterales de la corredera, paralelos al plano YZ.



**Figura 4.27 Corredera (prueba 2): Esfuerzos (elaboración propia).**

- **Desplazamientos**

El mayor desplazamiento ocurrirá justamente en la zona donde se apoya la cabeza del cable de acero al moverse en dirección del eje Z, como se puede observar en la Figura 4.28.



**Figura 4.28 Corredera (prueba 2): Desplazamientos (corte de sección paralela al plano YZ) (elaboración propia).**

- **Factor de seguridad**

$$FS_{Corredera 2} = 3.9$$

#### 4.5.2. Base

##### 1. Descripción

La base cuenta con cuatro perforaciones en cada esquina que sirven para la sujeción al guante. Cada perforación cuenta con una sección acanalada hacia la esquina más cercana para que al amarrar la base al guante, la tapa pueda cerrarse sin problema. La base cuenta además con un par de soportes que están sometidos a cargas debido a los elementos elásticos que son estirados por la corredera al jalar el cable de transmisión.

##### 2. Suposiciones

Para simplificar el estudio se consideraron solamente las perforaciones de la parte frontal de la pieza. Las cargas se aplicaron normales al plano XY y no sobre un plano inclinado respecto a éste siguiendo el ángulo que formaría el cable al jalar completamente la corredera. En el análisis de los soportes cilíndricos laterales las placas paralelas se consideraron como objetos rígidos para centrar la atención en la base de los soportes donde hay concentradores de esfuerzos.

##### 3. Información del modelo

- a) **Masa:**  $16.0312 \times 10^{-3}$  kg
- b) **Volumen:**  $15.4146 \times 10^{-3}$  m<sup>3</sup>
- c) **Peso:**  $157.106 \times 10^{-3}$  N

##### 4. Sujeciones y cargas

- a) **Prueba 1:** Esta prueba se realizó para determinar las reacciones que se presentan en los orificios ubicados en cada esquina de la base, los cuales

sirven para el anclaje de la ortoprótesis al guante. Para lograr lo anterior se consideraron fijas ambas caras de la placa inferior de la base paralelas al plano XZ (Figura 4.29). Sólo se consideró una de las cuatro perforaciones porque el diseño de la parte inferior de la base es simétrica en cada esquina. Para el caso de esta prueba, las cargas se aplicaron a 45° respecto al eje X y paralelas al plano XZ (Figura 4.30).

- **Sujeciones**

- **Entidades:** 2 caras
- **Tipo:** Geometría fija

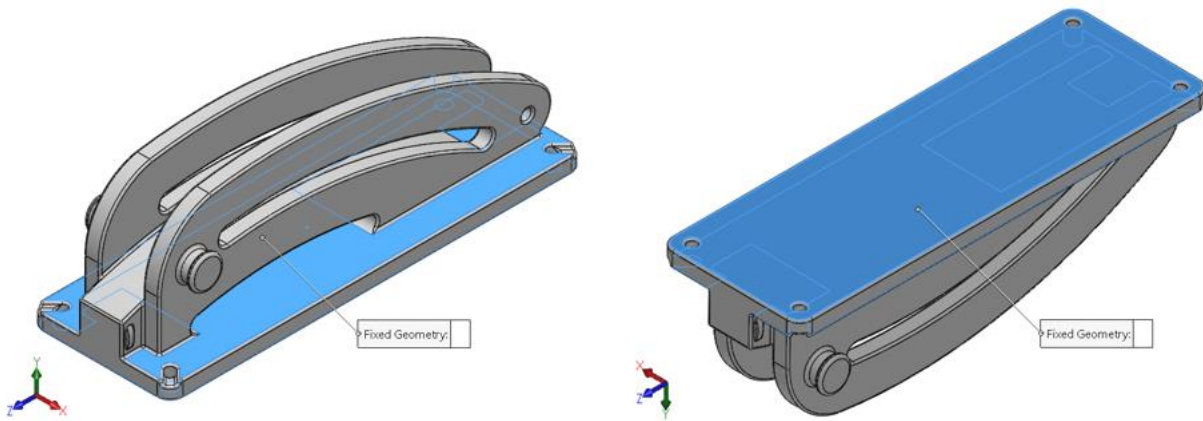


Figura 4.29 Base (prueba 1): Sujeciones (elaboración propia).

- **Cargas**

- **Entidades:** 2 caras
- **Tipo:** Aplicar fuerza
- **Valor:** 50 N (dirección +XZ)

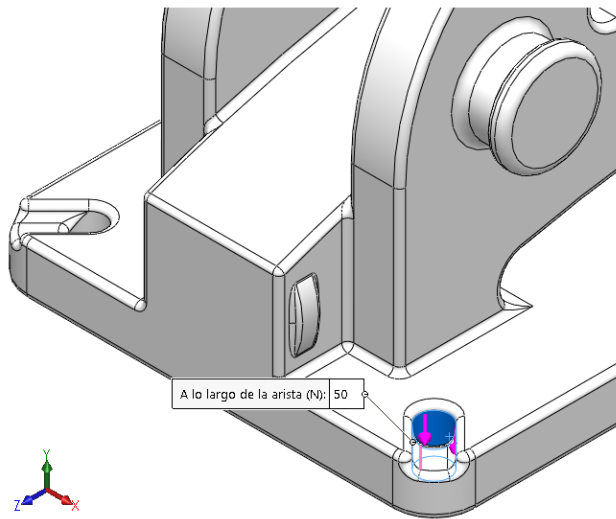


Figura 4.30 Base (prueba 1): Cargas (elaboración propia).

**b) Prueba 2:** En esta prueba se buscó conocer la respuesta de las protuberancias cilíndricas (Figura 4.32) como respuesta a la carga aplicada sobre ellas por la corredera a través de un elemento elástico. Por esta razón se consideraron fijas las caras externas de las placas verticales de la base paralelas al plano YZ (Figura 4.31), para simular el efecto que tendrían al estar la base al tener la cubierta colocada en su lugar. Debido a la naturaleza del desplazamiento de la corredera (segmento de arco) y al ángulo cambiante que presentaría el elemento elástico durante todo el recorrido de la pieza antes mencionada, se consideró, a fines de simplificación, que la carga máxima se va a encontrar en dirección del eje Z, ya que en este eje la fuerza original tendría su mayor componente.

- **Sujeciones**

- **Entidades:** 2 caras
- **Tipo:** Geometría fija

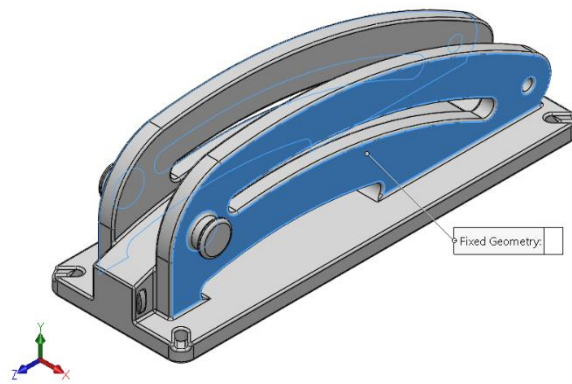


Figura 4.31 Base (prueba 2): Sujeciones (elaboración propia).

- **Cargas**

- **Entidades:** 2 caras
- **Tipo:** Aplicar fuerza normal
- **Valor:** 50 N (dirección -Z)

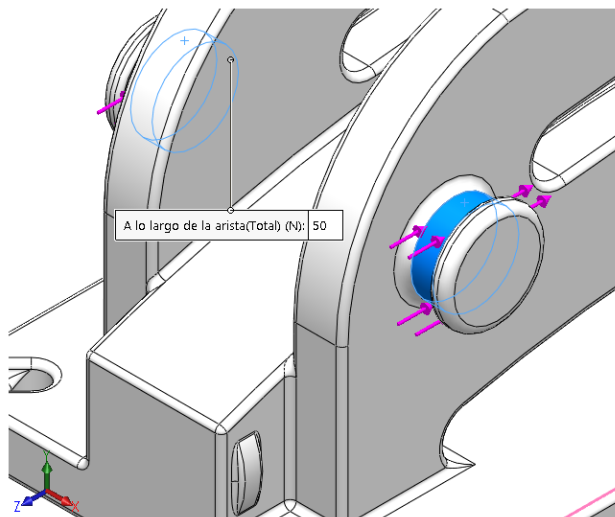


Figura 4.32 Base (prueba 2): Cargas (elaboración propia).

## 5. Resultados del estudio

### a) Prueba 1

- **Esfuerzos de von Mises**

Como se observa en la Figura 4.33, los esfuerzos se concentran en las zonas cuyas tangentes se alinean a 45° respecto al eje X. Este comportamiento es similar al obtenido en la prueba 1 de la corredera (Figura 4.25).

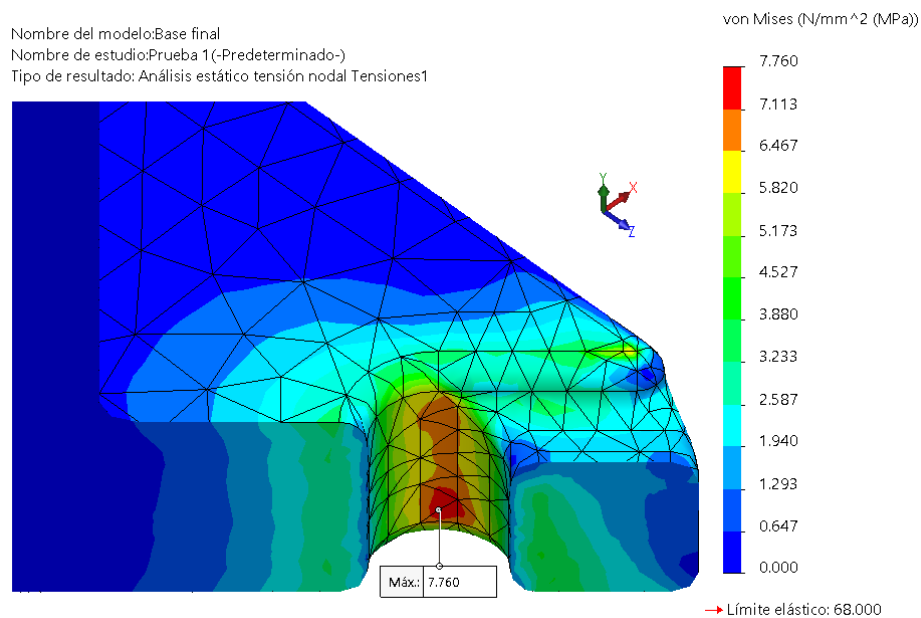


Figura 4.33 Base (prueba 1): Esfuerzos (plano de corte a 45° del eje X y perpendicular al plano XZ) (elaboración propia).

- **Desplazamientos**

De acuerdo con la Figura 4.34 se puede visualizar que la tendencia de los desplazamientos tiene un comportamiento similar a lo que se muestra en la prueba 1 de la corredera (Figura 4.26).

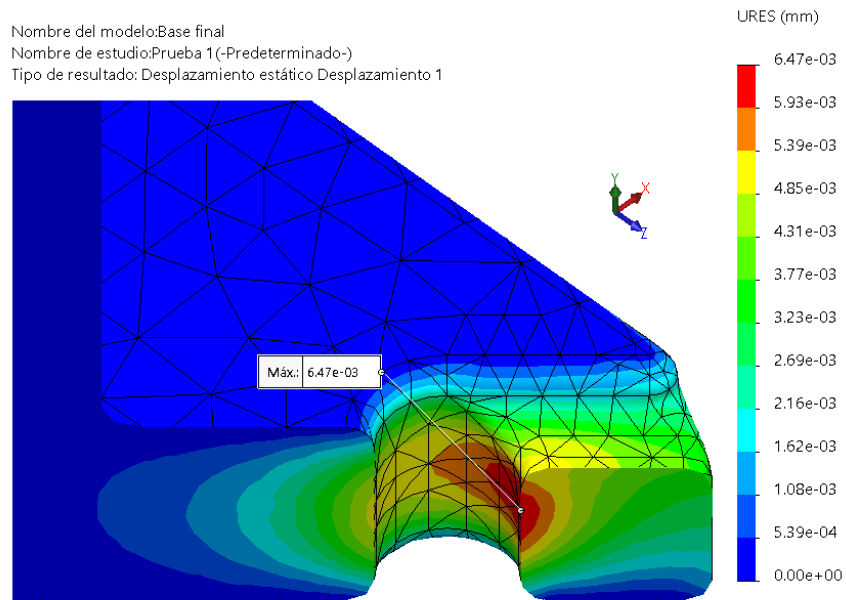


Figura 4.34 Base (prueba 1): Desplazamientos (plano de corte a 45° del eje X y perpendicular al plano XZ) (elaboración propia).

- **Factor de seguridad**

$$FS_{Base\ 1} = 8.8$$

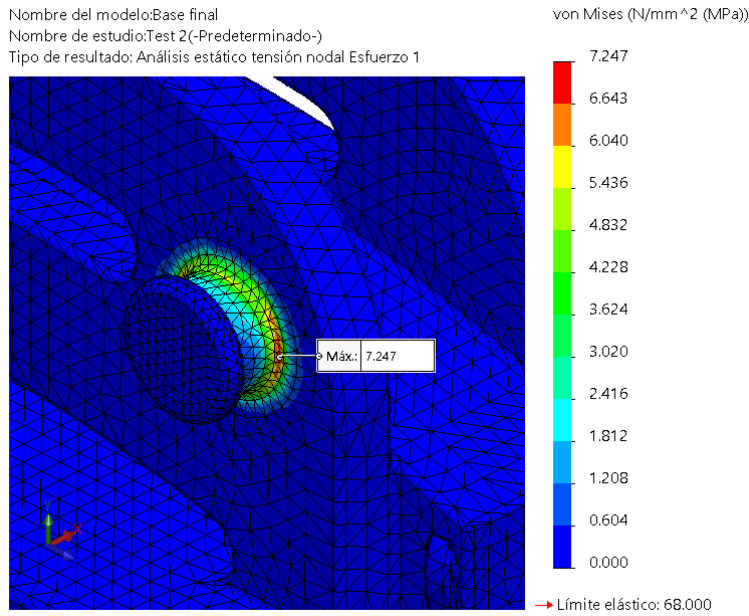
## b) Prueba 2

- **Esfuerzos de von Mises**

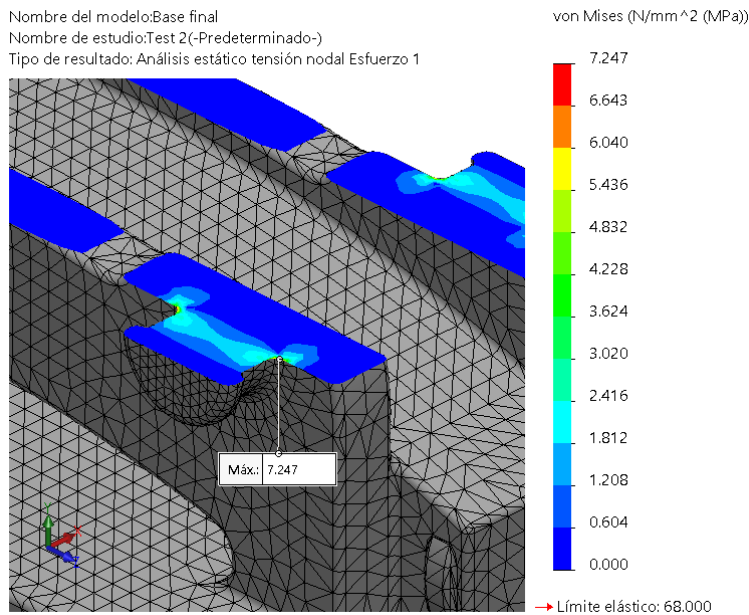
Dada la geometría de las protuberancias laterales de la base, sobre las cuales actuarán los elementos elásticos (Figura 4.32), la concentración de esfuerzos se localiza en sus respectivas bases, como se aprecia en la Figura 4.35, ya que actúa como una carga aplicada a una viga empotrada en un lado.

La distribución interna de los esfuerzos presentes en esta parte de la pieza se pueden observar en la Figura 4.36.





**Figura 4.35 Base (prueba 2): Esfuerzos (elaboración propia).**

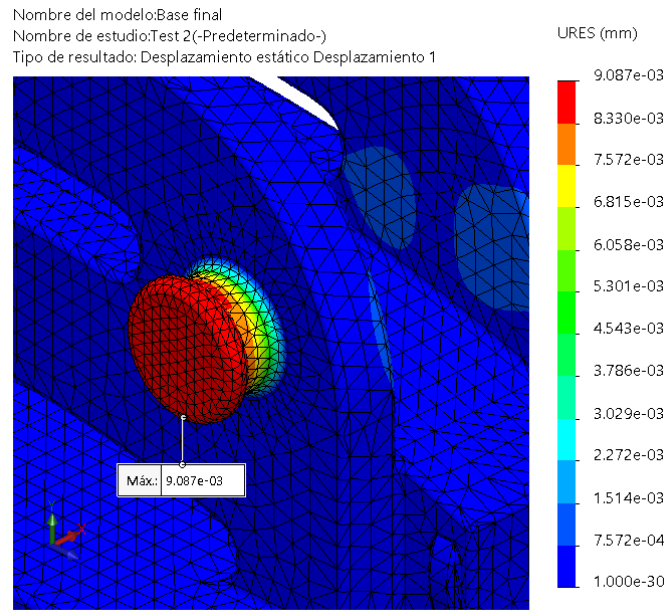


**Figura 4.36 Base (prueba 2): Esfuerzos (corte de sección paralelo al plano XZ) (elaboración propia).**

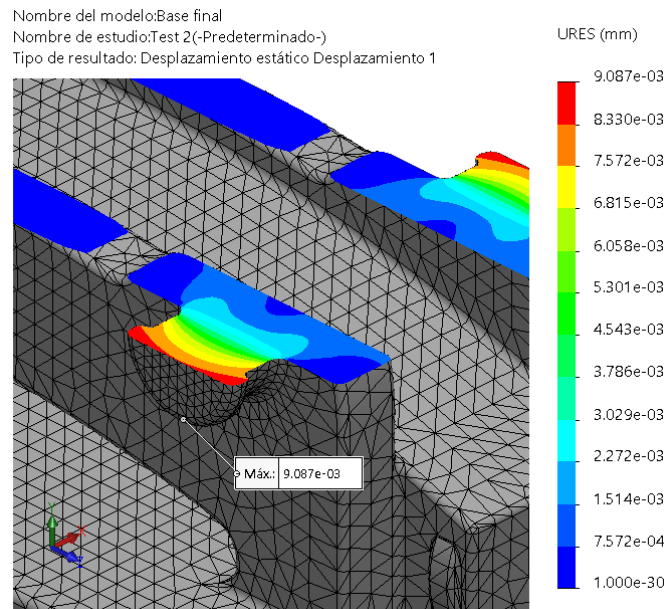
- **Desplazamientos**

El máximo desplazamiento ocurre en el extremo libre de la protuberancia cilíndrica debido a que la flexión de una viga es directamente proporcional a su longitud de aplicación de la carga

(Figura 4.37). De igual manera se muestran los desplazamientos de manera interna a lo largo de la protuberancia cilíndrica en la Figura 4.38.



**Figura 4.37 Base (prueba 2): Desplazamientos (elaboración propia).**



**Figura 4.38 Base (prueba 2): Desplazamientos (corte de sección paralelo al plano XZ) (elaboración propia).**

- **Factor de seguridad**

$$FS_{Base 2} = 9.4$$

### 4.5.3. Acoplador

#### 1. Descripción

El acoplador tiene la tarea de mover los dedos índice y medio para modificar el estado de la pinza de la mano. Debido a la forma de letra J que tiene el acoplador, existe flexión en la parte más corta. Además está unido a la corredera mediante un perno y existen fuerzas de reacción cuyo análisis es de interés.

#### 2. Suposiciones

Para el análisis de la sección donde va el perno se consideró que la corredera aplica una fuerza normal al plano YZ pero en realidad el ángulo entre ambas piezas no permanece constante durante la operación del mecanismo.

#### 3. Información del modelo

- a) **Masa:**  $20.223 \times 10^{-3}$  kg
- b) **Volumen:**  $19.4452 \times 10^{-6}$  m<sup>3</sup>
- c) **Peso:**  $198.186 \times 10^{-3}$  N

#### 4. Sujeciones y cargas

##### a) Prueba 1

- **Sujeciones**
  - **Entidades:** 1 cara
  - **Tipo:** Geometría fija

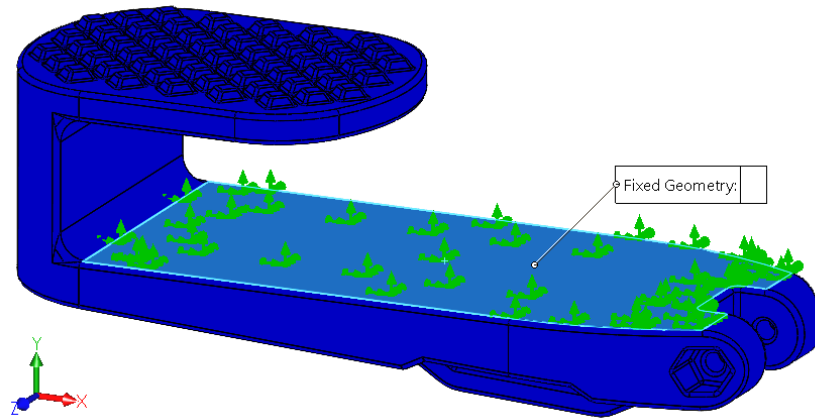


Figura 4.39 Acoplador (prueba 1): Sujeciones (elaboración propia).

- **Cargas**

- **Entidades:** 1 cara
- **Tipo:** Aplicar fuerza normal
- **Valor:** 50 N (dirección +Y)

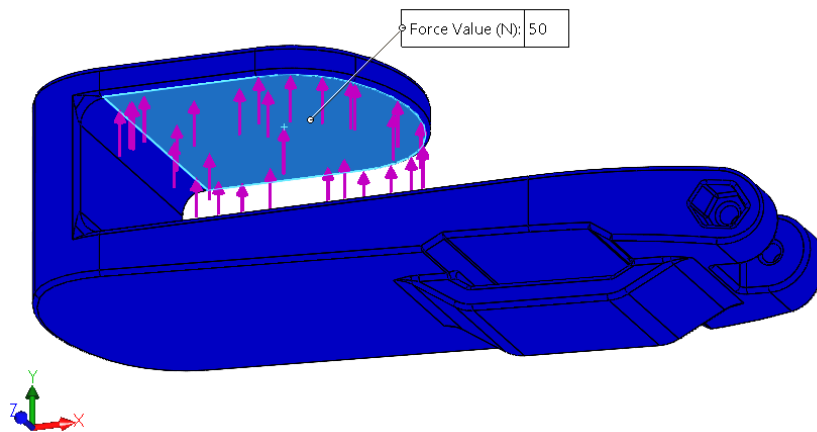


Figura 4.40 Acoplador (prueba 1): Cargas (elaboración propia).

**b) Prueba 2**

- **Sujeciones**

- **Entidades:** 8 caras
- **Tipo:** Geometría fija

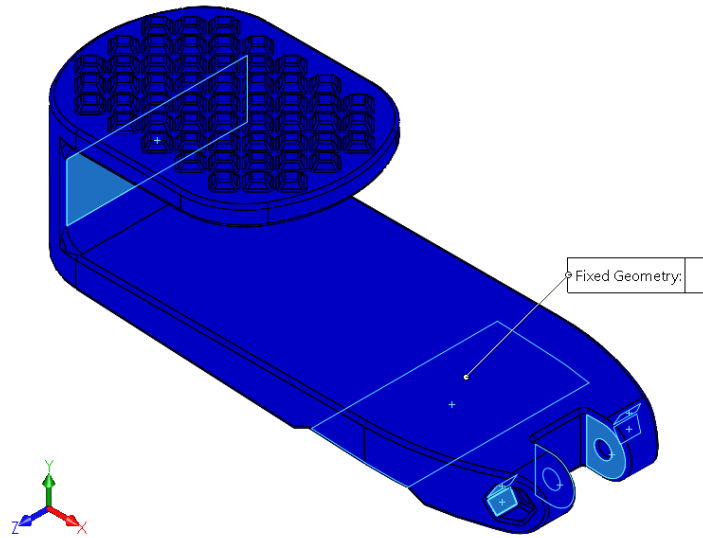


Figura 4.41 Acoplador (prueba 2): Sujeciones (elaboración propia).

- **Cargas**

- **Entidades:** 2 caras
- **Referencia:** Arista (dirección +X)
- **Tipo:** Aplicar fuerza
- **Valor:** 50 N (dirección +X)

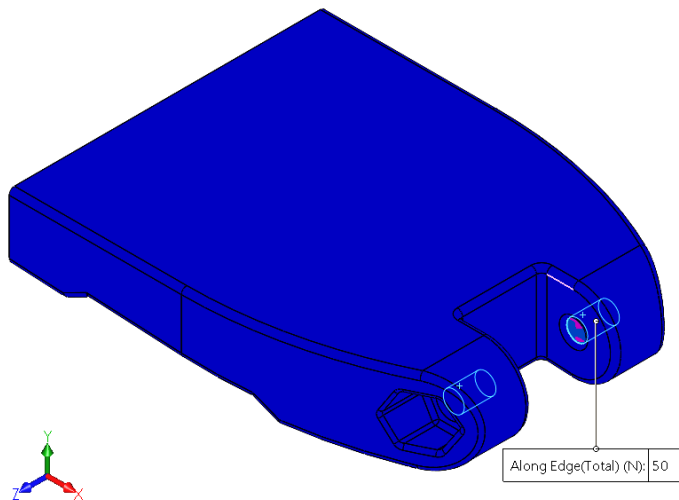


Figura 4.42 Acoplador (prueba 2): Cargas (elaboración propia).

## 5. Resultados del estudio

### a) Prueba 1

- **Esfuerzos de von Mises**

En la Figura 4.43 se puede observar que hay concentraciones de esfuerzos en los cambios de geometría en el patrón que se repite en la superficie de la pieza.

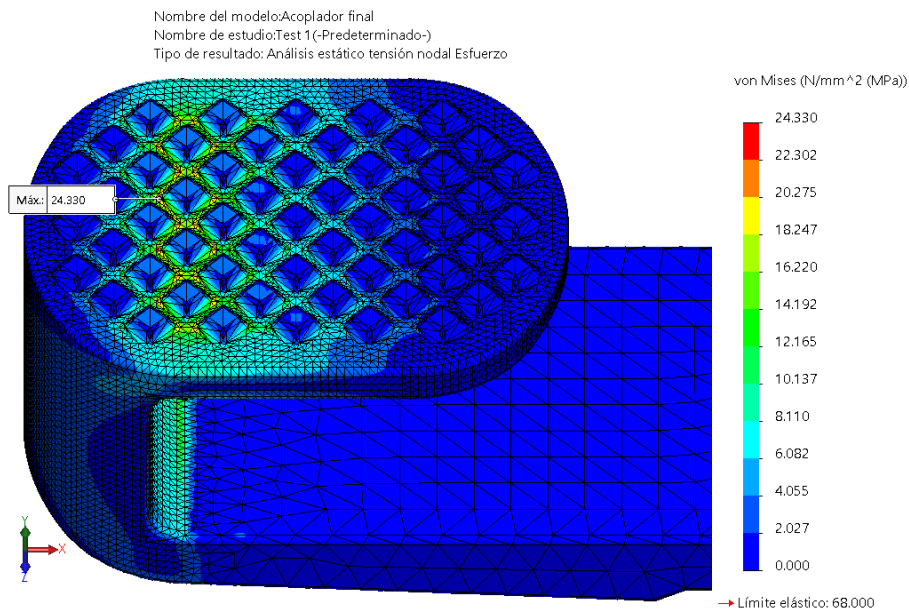


Figura 4.43 Acoplador (prueba 1): Esfuerzos (corte de sección paralelo al plano XY) (elaboración propia).

- **Desplazamientos**

Como es de esperarse en una viga en voladizo sometida a flexión, el mayor desplazamiento se va a encontrar en su extremo. El comportamiento de los desplazamientos se puede visualizar en la Figura 4.44.

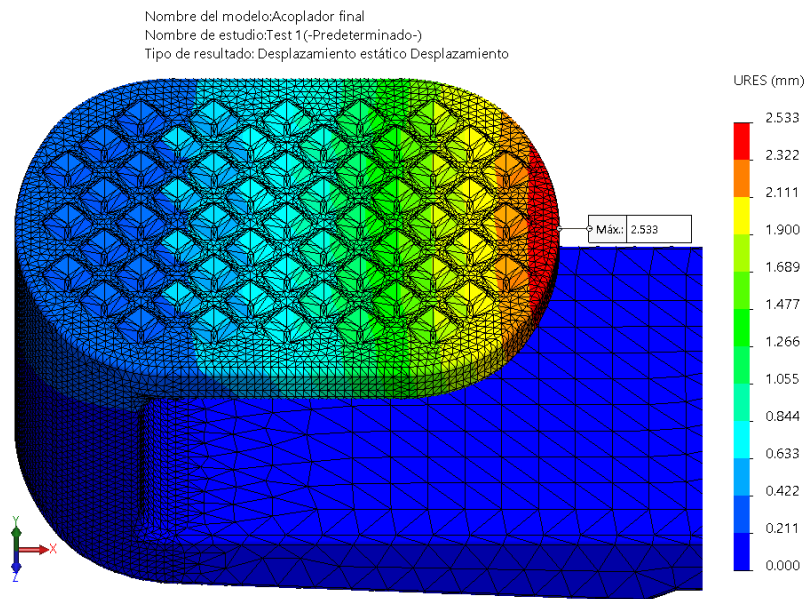


Figura 4.44 Acoplador (prueba 1): Desplazamientos (corte de sección paralela al plano XY) (elaboración propia).

- **Factor de seguridad**

$$FS_{Acoplador\ 1} = 2.8$$

## b) Prueba 2

- **Esfuerzos de von Mises**

Cuando un perno ejerce una fuerza en el interior de una perforación circular, los esfuerzos se van a encontrar en los puntos cuyas tangentes son paralelas a la fuerza aplicada. El perfil circular tiende a alargarse y formar una especie de elipse, lo cual queda en evidencia en la Figura 4.45.

- **Desplazamientos**

Similar a los resultados mostrados para la corredera y la base, el mayor desplazamiento va a ocurrir paralelamente a la fuerza aplicada y alineado con el centro de la circunferencia del cilindro (Figura 4.46).

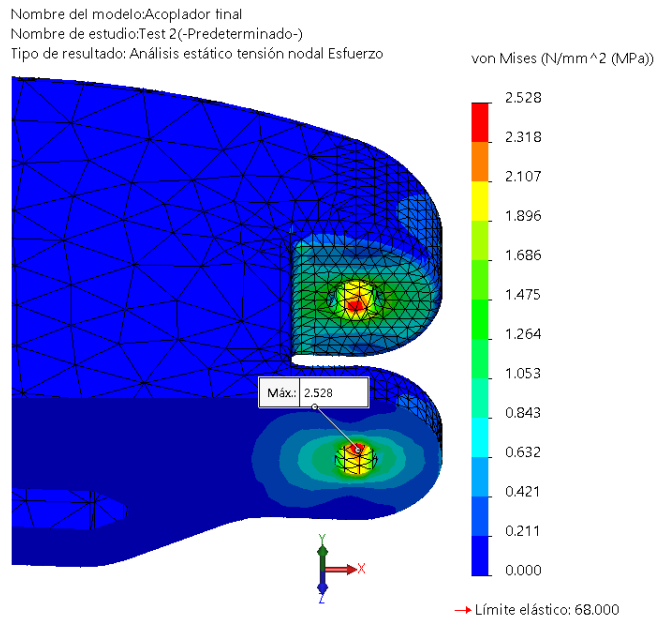


Figura 4.45 Acoplador (prueba 2): Esfuerzos (corte de sección paralelo al plano XY) (elaboración propia).

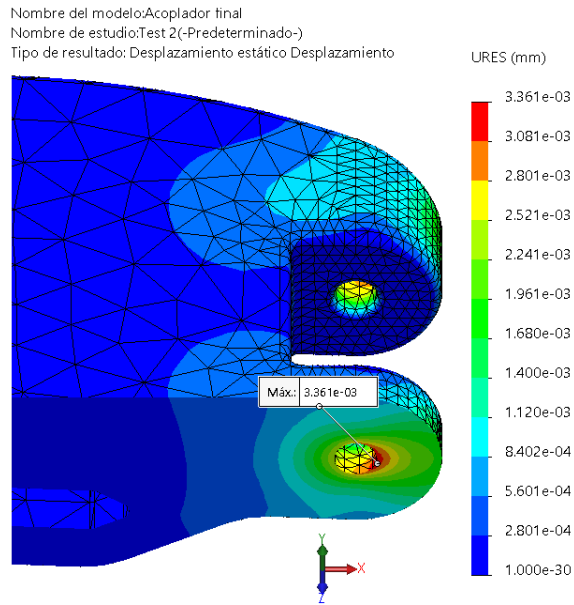


Figura 4.46 Acoplador (prueba 2): Desplazamientos (corte de sección paralelo al plano XY) (elaboración propia).

- Factor de seguridad

$$FS_{Acoplador\ 2} = 26.9$$



#### 4.5.4. Tapa

##### 1. Descripción

La tapa solamente hace la función de protección del mecanismo para evitar que entren objetos extraños y que éste no se atore, por ejemplo, con la ropa del usuario (Figura 4.47).

##### 2. Suposiciones

La tapa no se encuentra sometida a cargas propias del funcionamiento del mecanismo, por lo que su análisis mediante FEM no se consideró necesario para el alcance de este proyecto.

##### 3. Información del modelo

- a) **Masa:**  $16.4135 \times 10^{-3}$  kg
- b) **Volumen:**  $15.7822 \times 10^{-6}$  m<sup>3</sup>
- c) **Peso:**  $160.853 \times 10^{-3}$  N

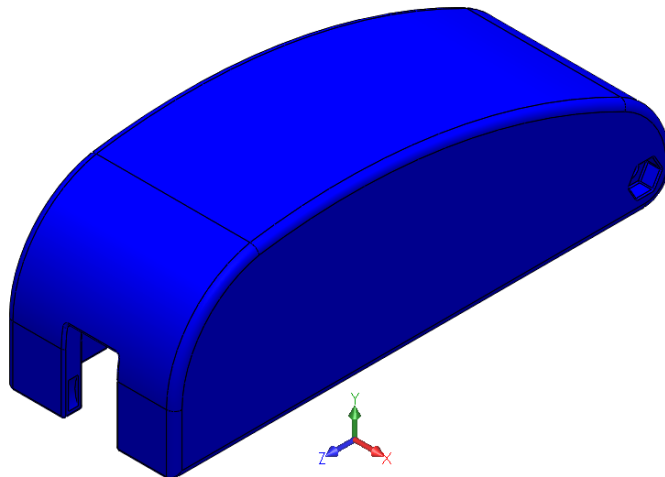


Figura 4.47 Base (elaboración propia).

#### 4.5.5. Polea cable

##### 1. Descripción

La polea solamente gira sobre el perno que se encuentra en la bisagra de la tapa gracias al contacto con el cable de transmisión y puede presentar fricción entre sus caras paralelas y la parte interna de la tapa (Figura 4.48).

##### 2. Suposiciones

Presenta una situación similar a la de la tapa ya que no recibe cargas directamente para que el mecanismo funcione, solamente entra en contacto con el cable de manera tangencial, por lo que su estudio por FEM es prescindible para este proyecto.

##### 3. Información del modelo

- a) **Masa:**  $386.723 \times 10^{-6}$  kg
- b) **Volumen:**  $371.849 \times 10^{-9}$  m<sup>3</sup>
- c) **Peso:**  $3,789.88 \times 10^{-6}$  N

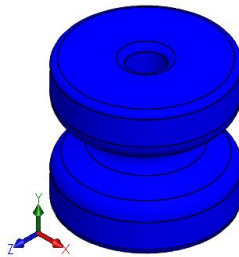


Figura 4.48 Polea cable (elaboración propia).

## 5. CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO

El método que se llevó a cabo para este proyecto consistió en la revisión del trabajo previo (Torres Martínez, 2012) para identificar las áreas de oportunidad que darían la pauta para la realización de un rediseño de la ortoprótesis de mano, ya sea porque se cubrían ciertas necesidades parcialmente o eran inexistentes en otros casos. Durante este análisis se buscaron alternativas de solución para las necesidades determinadas anteriormente. Después del análisis de los requerimientos, así como su relación con las especificaciones propuestas mediante el método QFD, se obtuvieron los doce resultados mostrados en la Figura 2.2. Finalmente, las especificaciones fueron ordenadas según su importancia (de mayor a menor), como se aprecia en la Tabla 2.2.

Las correcciones que se lograron respecto al modelo anterior de la ortoprótesis son las siguientes:

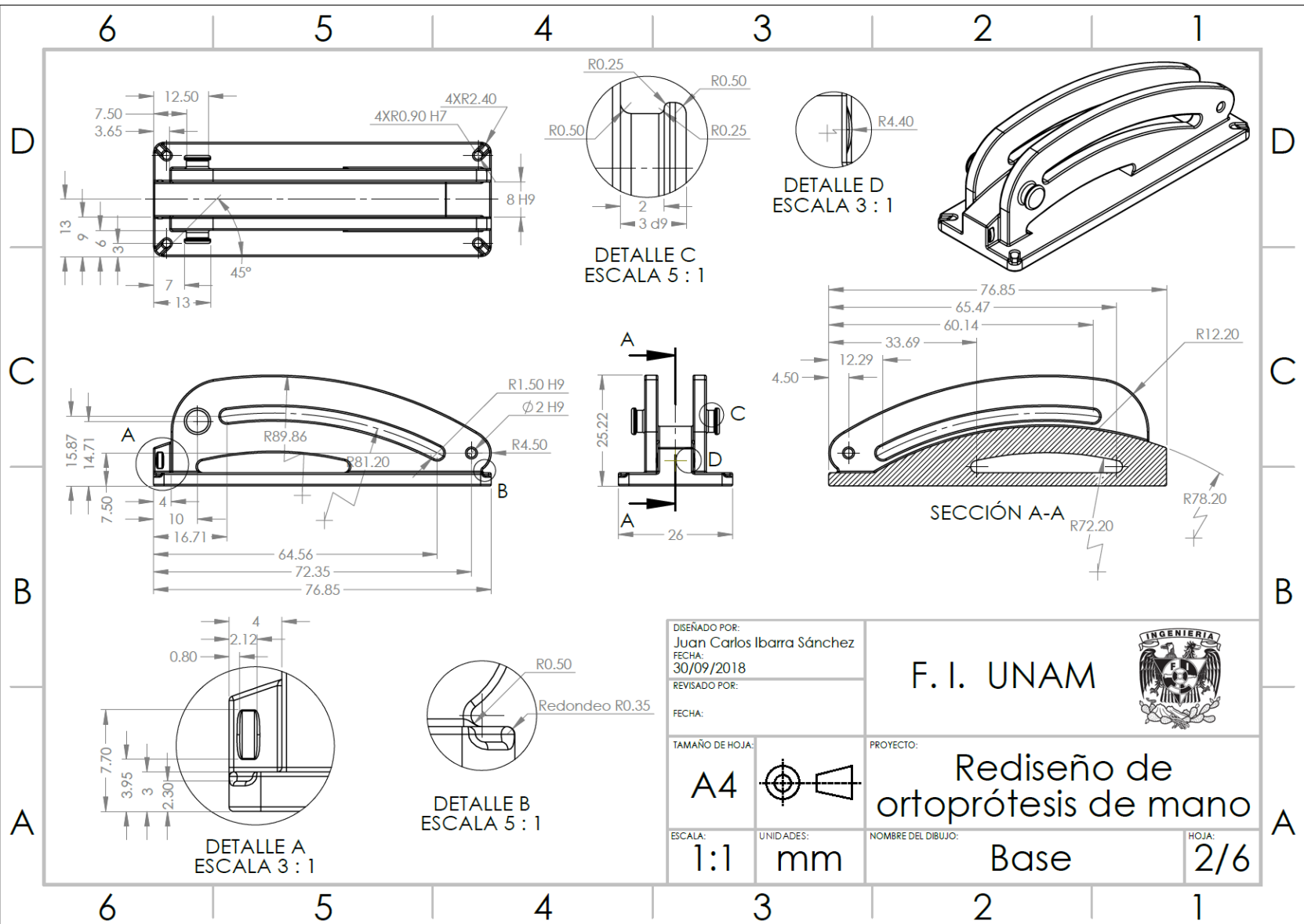
1. Los dedos que hacen la pinza (índice y medio) no se sueltan o desajustan porque el acoplador tiene un tope para evitar que se desplacen longitudinalmente, así como un soporte mediante una cinta con gancho y bucle para mantenerlos sobre su propio eje.
2. La bisagra de la base está diseñada para que un tornillo pueda ser colocado por ambos lados sin la necesidad de hacer una cuerda en la perforación de la base, ya que cuenta con una ranura hexagonal para que una tuerca, igualmente hexagonal, se apoye sin requerir sujeción con otra mano.
3. La tapa cuenta con un cierre a presión al estar cerrada, lo que evita la fatiga de una pestaña para sujeción y el uso de un tornillo que requiera herramienta adicional, facilitando su instalación.
4. El cable de transmisión está canalizado mediante el uso de una pequeña polea que evita que el cable esté desalineado, lo que podría causar desgaste prematuro en la parte interna de la bisagra de la base y/o mal funcionamiento del mecanismo.
5. El Factor de seguridad mínimo, de acuerdo a las pruebas realizadas, fue de 2.8 (Prueba 1 del acoplador), lo cual nos indica que el material empleado funcionará correctamente con las cargas simuladas. Cabe aclarar que las propiedades mecánicas del filamento de ABS están dentro de un rango los cuales dependen de la manufactura del mismo, hasta la forma de deposición del material, como se vio en el capítulo 4.


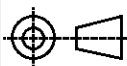
## Trabajo a futuro

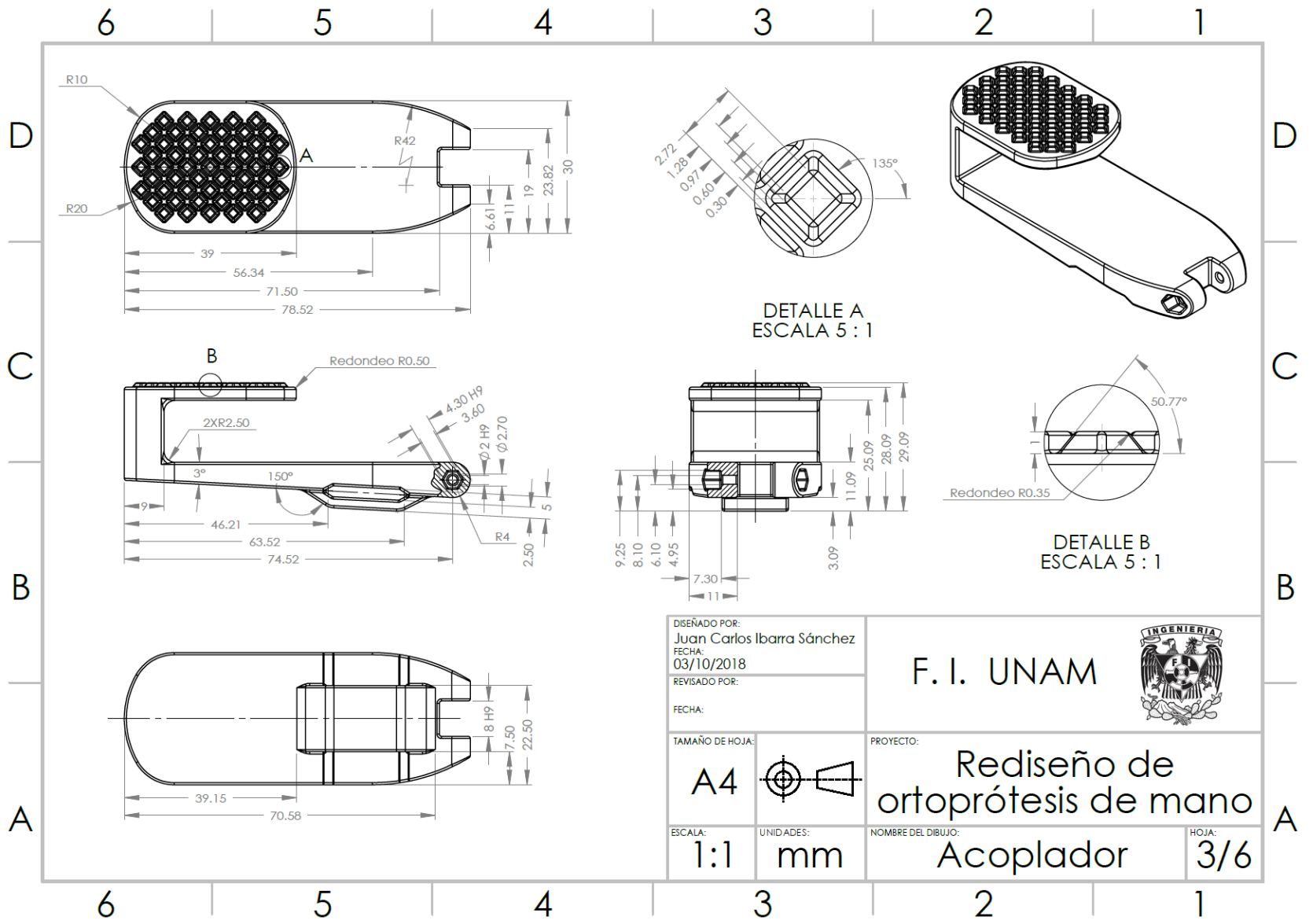
A continuación se exponen algunas alternativas de solución que surgieron durante el desarrollo del proyecto pero al final no fueron realizadas ya que suponían un desarrollo posterior al prototipo aquí propuesto:


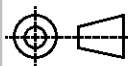
1. El alcance del proyecto se centró en el rediseño del mecanismo de la ortoprótesis, sin tomar en cuenta los sistemas auxiliares como el guante y el arnés con el cable de transmisión. Dichos sistemas requieren una revisión a detalle para evaluar las alternativas de solución para sus respectivos rediseños.
2. La superficie a los costados de la tapa se debe mejorar para aumentar la sujeción con los dedos, así como un bloqueo al levantarla completamente para que se quede en su lugar mientras se manipula el interior del mecanismo.
3. El acoplador debe tener una superficie adecuada para los dedos para evitar la generación de ampollas por el contacto constante con el plástico liso.
4. Este proyecto concluyó con la fabricación del prototipo, pero un análisis para diseño de manufactura y de ensamble son necesarios para tener un costo real de la nueva ortoprótesis.
5. Se consideró un tope a presión en la tapa para que ésta quede bloqueada al estar abierta, pero no se realizó en los planos.
6. Considerando la automatización del sistema de flexoextensión como un trabajo futuro, sería muy recomendable que el acoplador cuente con un par de sensores en la parte que hace contacto con el objeto a sujetar: de presión, para evitar lastimar los dedos, y de temperatura para que la persona sepa antes de cambiar el objeto de mano.
7. Esta es una primera iteración para el rediseño de la ortoprótesis, una vez hechas las pruebas se necesitarán más iteraciones.
8. La validación de este trabajo se hará mediante pruebas preclínicas y clínicas para lo que se requieren una autorización del comité de bioética.

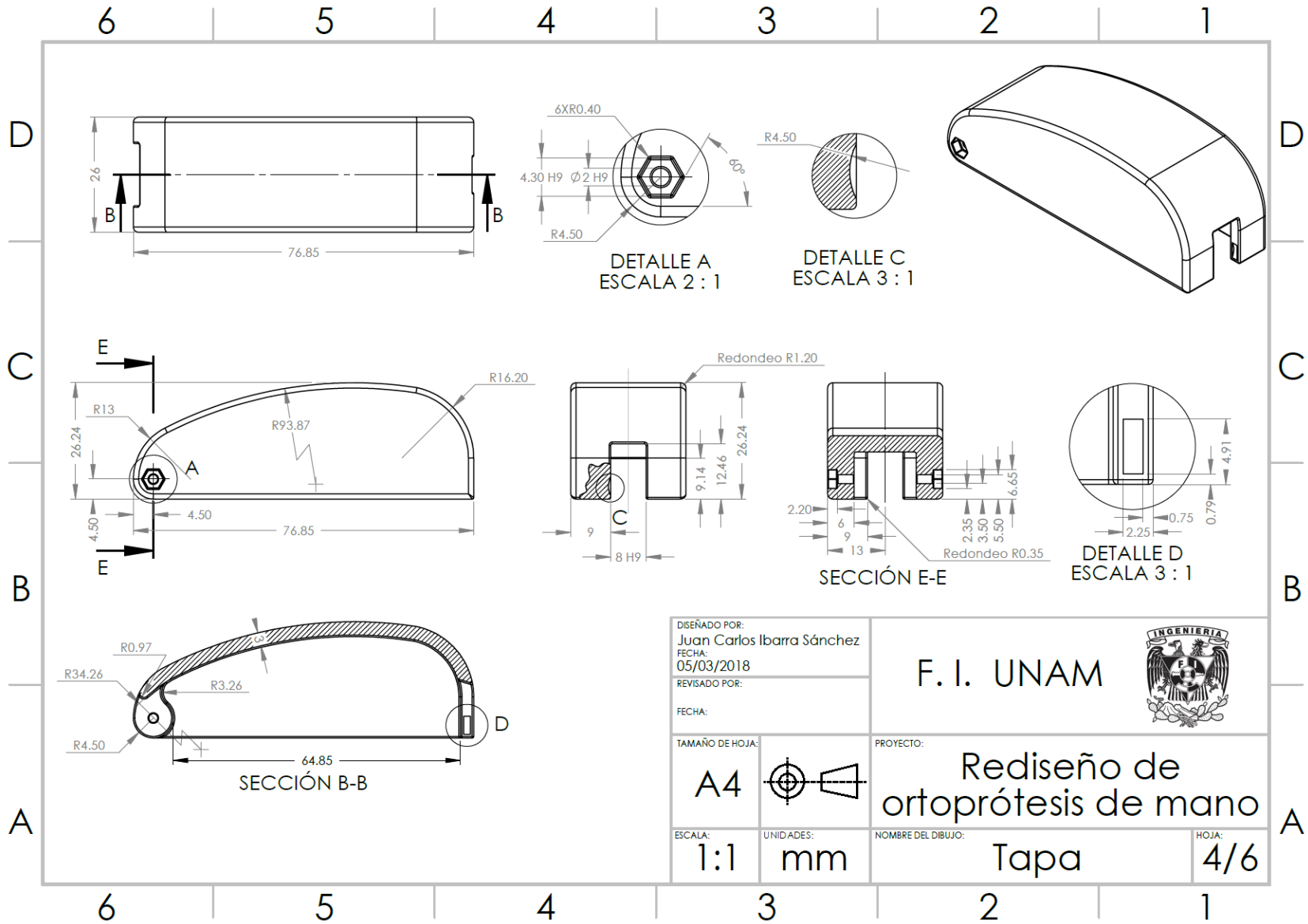




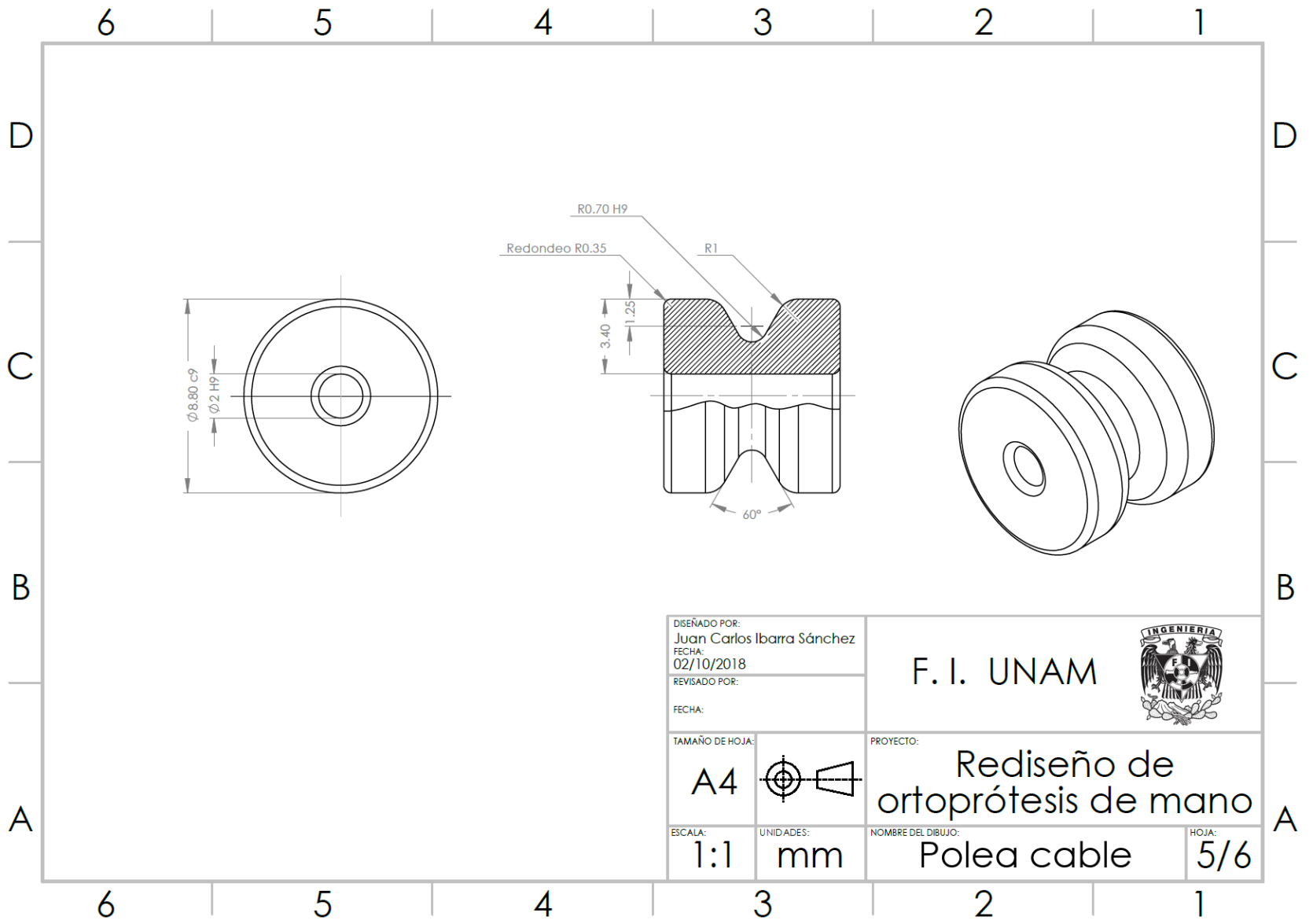
DISEÑADO POR: Juan Carlos Ibarra Sánchez		F. I. UNAM	
FECHA: 30/09/2018			
REVISADO POR:			
FECHA:			
TAMAÑO DE HOJA: <b>A4</b>		PROYECTO: <b>Rediseño de ortoprótesis de mano</b>	
ESCALA: <b>1:1</b>	UNIDADES: <b>mm</b>	NOMBRE DEL DIBUJO: <b>Base</b>	HOJA: <b>2/6</b>


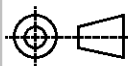


DISEÑADO POR: Juan Carlos Ibarra Sánchez FECHA: 03/10/2018 REVISADO POR:		F. I. UNAM 	
FECHA:		PROYECTO: Rediseño de ortoprótesis de mano	
TAMAÑO DE HOJA: A4		NOMBRE DEL DIBUJO: Acoplador	
ESCALA: 1:1	UNIDADES: mm	HOJA: 3/6	



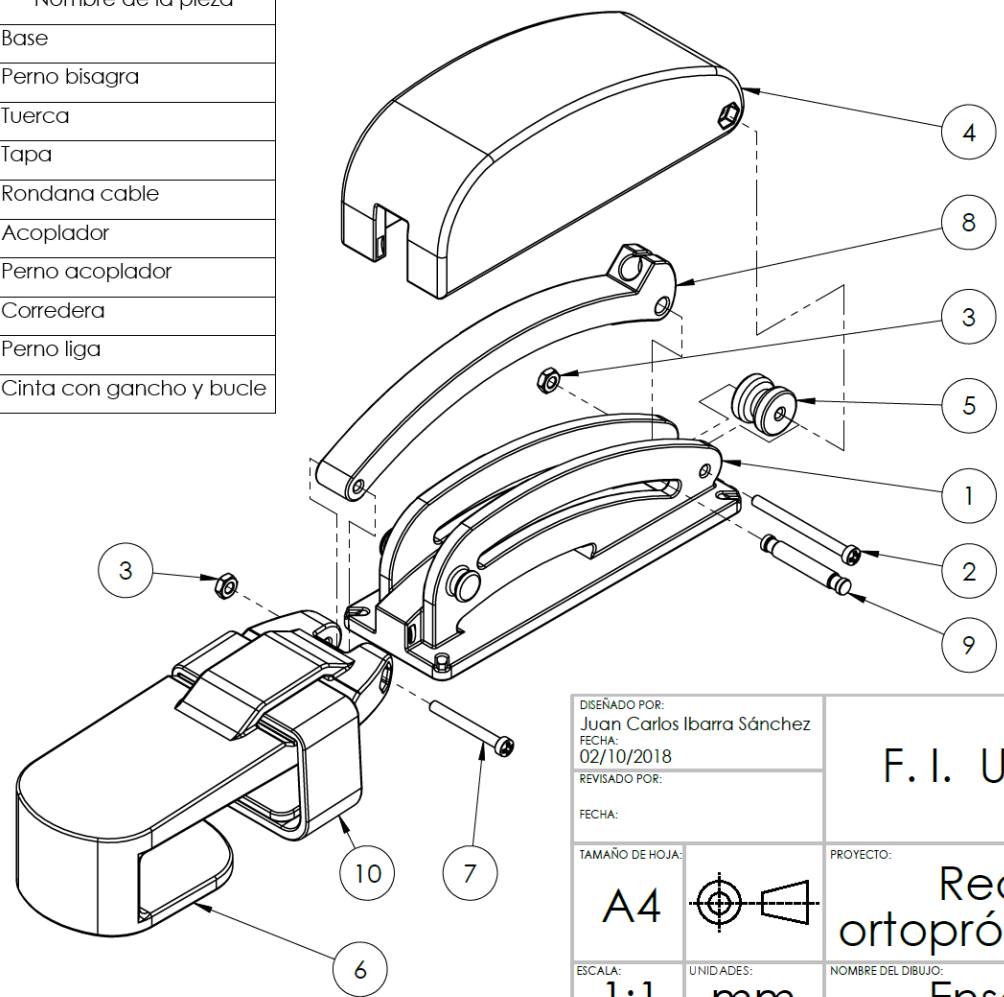




DISEÑADO POR: Juan Carlos Ibarra Sánchez FECHA: 02/10/2018 REVISADO POR:  FECHA:		F. I. UNAM 	
TAMAÑO DE HOJA: <b>A4</b>		PROYECTO: <b>Rediseño de ortoprótesis de mano</b>	
ESCALA: <b>1:1</b>	UNIDADES: <b>mm</b>	NOMBRE DEL DIBUJO: <b>Polea cable</b>	HOJA: <b>5/6</b>


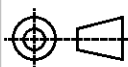
6 5 4 3 2 1

Número de pieza	Nombre de la pieza
1	Base
2	Perno bisagra
3	Tuerca
4	Tapa
5	Rondana cable
6	Acoplador
7	Perno acoplador
8	Corredera
9	Perno liga
10	Cinta con gancho y bucle



D  
C  
B  
A

D  
C  
B  
A

DISEÑADO POR: Juan Carlos Ibarra Sánchez FECHA: 02/10/2018 REVISADO POR:		F. I. UNAM 	
FECHA:		PROYECTO: Rediseño de ortoprótesis de mano	
TAMAÑO DE HOJA: A4		NOMBRE DEL DIBUJO: Ensamble	
ESCALA: 1:1	UNIDADES: mm	HOJA: 6/6	

6 5 4 3 2 1

# REFERENCIAS

## Bibliografía y páginas web

- 3DCeram. (30 de mayo de 2019). *3DMIX, ceramics for 3D printing*. Obtenido de <http://3dceram.com/en/materiaux-ceramique-impression-3d/>
- Absoludanse. (2018). *Flexibility band (TA-F-110)*. Obtenido de <https://www.absoludanse.be/Product.aspx?Article=2738&Name=&Lng=FR>
- Aislamiento y Estanqueidad Erica. (2 de junio de 2018). *Normas de inflamabilidad*. Obtenido de <http://www.erica.es/web/ensayos-y-tests/>
- Arm Dynamics. (2024). *Prosthetic Technology: Devices, materials and other options to maximize your rehabilitation potential*. Obtenido de <https://www.armdynamics.com/research-and-technology/prosthetic-technology>
- Avechi. (2018). *Ventilated microwave plate food cover lid clear big*. Obtenido de <https://avechi.com/ventilated-microwave-plate-food-cover-lid-clear-big.html>
- Baños Bernad, M. Á. (23 de octubre de 2014). *Ortoprótisis: conceptos y elaboración*. Obtenido de <https://www.institutcataladelpeu.com/ortoprotesis-conceptes-i-elaboracio/>
- Bayer Material Science. (9 de mayo de 2016). *Snap-fit joints for plastics - A design guide*. Obtenido de [http://fab.cba.mit.edu/classes/S62.12/people/vernelle.noel/Plastic\\_Snap\\_fit\\_design.pdf](http://fab.cba.mit.edu/classes/S62.12/people/vernelle.noel/Plastic_Snap_fit_design.pdf)
- Benedyk, J. (15 de marzo de 2018). *Additive manufacturing of aluminum alloys*. Obtenido de <https://www.lightmetalage.com/news/industry-news/3d-printing/article-additive-manufacturing-of-aluminum-alloys/>
- Berning, K., Cohick, S., Johnson, R., Miller, L. A., & Sensinger, J. W. (2014). Comparison of body-powered voluntary opening and voluntary closing Prehensor for activities of daily life. *The Journal of Rehabilitation Research and Development, Volume 51, Number 2*, pág. 254.
- Bicicletes Restore-It! (s.f.). *Cable cambio de marchas*. Obtenido de [https://www.bicicletesrestoreit.com/epages/78191719.sf/es\\_ES/?ObjectPath=/Shops/78191719/Products/0343](https://www.bicicletesrestoreit.com/epages/78191719.sf/es_ES/?ObjectPath=/Shops/78191719/Products/0343)
- Bike 24. (s.f.). *Avid 20 R Performance Standard Brake Shoes*. Obtenido de <https://www.bike24.de/p17334.html>
- BioDic. (s.f.). *Diccionario de Biología - Un diccionario de términos científicos, sencillo*. Obtenido de <https://www.biodic.net/palabra/circunduccion/#.XfFqCehKg2w>
- China Brands. (30 de mayo de 2019). *Walkera 250 - Z - 27 Magic Tape Strap for Runner 250 RC Drone*. Obtenido de <https://www.chinabrands.com/item/dropship-walkera-250-z-27-magic-tape-strap-for-runner-250-rc-drone-1352031-p.html>
- Cienciasfera. (s.f.). *Torno*. Obtenido de [http://www.cienciasfera.com/materiales/tecnologia/tecno01/tema18/1\\_torno.html](http://www.cienciasfera.com/materiales/tecnologia/tecno01/tema18/1_torno.html)

- Clockura. (23 de enero de 2017). *Cómo elegir la correa adecuada para tu reloj de pulsera*. Obtenido de <https://clockura.com/blogs/noticias-relojes/como-elegir-la-correa-adecuada-para-tu-reloj-de-pulsera>
- Color Plus. (16 de octubre de 2025). *Filamento ABS 1.75mm White Artic*. Obtenido de <https://www.colorplus3d.com/producto/filamento-abs-white-artic-1-75mm/>
- Contalent. (2017). *Prótesis oculares*. Obtenido de <http://www.contalent.cl/protesis-oculares/>
- Corrales Espinoza, M. (28 de octubre de 2013). Obtenido de Solicitaciones mecánicas de los materiales: <https://corralesespinoza.wordpress.com/2013/10/28/solicitaciones-mecanicas-de-los-materiales/>
- Decathlon. (2017). *Correa de pecho de recambio*. Obtenido de [https://www.decathlon.com.co/es/p/1788429\\_correa-de-pecho-de-recambio.html?reviews\\_note=3#/22-254-](https://www.decathlon.com.co/es/p/1788429_correa-de-pecho-de-recambio.html?reviews_note=3#/22-254-)
- Direct Industry. (12 de junio de 2019). *Máquina de prueba de torsión/de materiales/horizontal/electromecánica*. Obtenido de <http://www.directindustry.es/prod/instron/product-18463-1663419.html>
- Disfruta las matemáticas. (16 de mayo de 2008). *Combinaciones y permutaciones*. Obtenido de <http://www.disfrutalasmatematicas.com/combinatoria/combinaciones-permutaciones.html>
- Dykes, M., & Watson, W. (2010). *Cursos Crash: Lo esencial de anatomía*. Barcelona, España: Elsevier.
- E-Ducativa CATEDU. (s.f.). 1.2. *Ensayo de compresión*. Obtenido de [http://e-educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/4750/4913/html/12\\_ensayo\\_de\\_comp\\_resin.html](http://e-educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/4750/4913/html/12_ensayo_de_comp_resin.html)
- Epson. (7 de junio de 2018). *¿Cómo reemplazo la lámpara?* Obtenido de [https://epson.com.mx/faq/SPT\\_V11H799021~faq-00003f3-plhc3710?faq\\_cat=faq-topFaqs](https://epson.com.mx/faq/SPT_V11H799021~faq-00003f3-plhc3710?faq_cat=faq-topFaqs)
- Esteve, F., Olivier, D., Hu, Q., & Baumers, M. (2017). *Micro-additive Manufacturing Technology*. En I. Fassi, & D. Shipley (Edits.), *Micro-Manufacturing Technologies and Their Applications: A Theoretical and Practical Guide*. Suiza: Springer.
- Esteve, F., Olivier, D., Hu, Q., & Baumers, M. (2017). *Micro-additive Manufacturing Technology*. En I. Fassi, D. Shipley, & Springer (Ed.), *Micro-manufacturing technologies and their applications: A theoretical and practical guide*. Suiza: Springer.
- Farmasana. (s.f.). *Órtesis semirrígida lumbosacra laboral*. Obtenido de <http://www.farmaciachurra.es/producto/ortesis-semirrígida-lumbosacra-laboral/>
- Frei, W. (22 de octubre de 2013). Obtenido de Meshing Considerations for Linear Static Problems: <https://www.comsol.com/blogs/meshing-considerations-linear-static-problems/>
- Gatto, F. (27 de febrero de 2017). *Kaia Joyas Uruguay*. Obtenido de Comparativo entre las 9 mejores impresoras 3D: [https://kaiajoyasuruguay.blogspot.com/2017\\_02\\_27\\_archive.html](https://kaiajoyasuruguay.blogspot.com/2017_02_27_archive.html)
- Godínez Morado, I. (11 de junio de 2013). *Arcos y ángulos de movimiento*. Obtenido de <https://es.slideshare.net/pedroespinoza106/52756563-angulosyarcosdemovimiento>
- González Ortiz, M. A. (2015). *Diseño de ortoprótesis de mano: Análisis DFMA*. CDMX: UNAM.

- Goural. (s.f.). *AirLoc Órtesis estabilizadora para estabilizar el tobillo*. Obtenido de [https://www.goural.es/airloc-ortesis-estabilizadora-para-estabilizar-el-tobillo-xml-1785\\_1835-781.html](https://www.goural.es/airloc-ortesis-estabilizadora-para-estabilizar-el-tobillo-xml-1785_1835-781.html)
- Ibertest. (s.f.). *Máquina de ensayo universal hidráulica - Serie IBMU2*. Obtenido de <https://www.ibertest.es/products/maquina-de-ensayo-universal-hidraulica-serie-ibmu2-2/>
- Impresión Tresde. (9 de marzo de 2019). *Imprimiendo cerámica en 3D*. Obtenido de <https://impresiontresde.com/imprimiendo-ceramica/>
- Instron. (s.f.). *ASTM A370 Ensayos de tracción y flexión para varillas de alta resistencia (barras reforzadas)*. Obtenido de <https://www.instron.es/es-es/testing-solutions/by-material/metals/flexure/astm-a370>
- Interbionic. (21 de marzo de 2024). *Interbionic*. Obtenido de Prótesis mecánicas e híbridas: <https://interbionic.mx/protesis-mecanicas-e-hibridas/>
- Jimeno Bernal, J. (18 de octubre de 2012). *Despliegue de la función calidad (QFD): Guía de uso. Para qué sirve el QFD y cómo realizarlo*. (PDCA Home) Obtenido de <https://www.pdcahome.com/1932/qfd-despliegue-calidad/>
- Leroy Merlin. (3 de junio de 2019). *Cierre por imán 1015*. Obtenido de <http://www.leroymerlin.es/fp/11032826/cierre-por-iman-1015>
- López, F. M. (28 de 11 de 2017). *Especialidades*. Obtenido de <http://drmarques.es/especialidades/>
- Marina. (2 de febrero de 2017). *Piano à coeur*. Obtenido de La desviación de la mano: una de las principales causas de lesión en pianistas: <http://pianoacoeur.com/es/desviacion-cubital-lesion-pianistas/>
- Martínez Roa, A. M. (9 de octubre de 2015). *www.3Dnatives.com*. Obtenido de Airbus-partes: <https://www.3dnatives.com/es/airbus-imprime-en-3d-piezas-para-vuelos-comerciales-12102015/airbus-partes/>
- Mediciclopedia. (2017). *Regaliz-REYE*. Obtenido de <http://www.iqb.es/diccio/r/re2.htm>
- Medline Plus. (2025). *Enciclopedia médica - Proximal*. Obtenido de <https://medlineplus.gov/spanish/ency/article/002287.htm>
- MedlinePlus. (10 de julio de 2018). *Edema*. Obtenido de <https://medlineplus.gov/spanish/edema.html>
- Mirlisenna, G. (22 de enero de 2016). Obtenido de Método de los elementos finitos: ¿Qué es?: <https://www.esss.co/blog/es/metodo-de-los-elementos-finitos-que-es/>
- Mora Cantellano, M. A. (octubre de 2017). *Material didáctico: El lenguaje de los objetos, la evolución en las diversas fases del diseño y su interacción simbólica para la satisfacción de las necesidades sociales*. Obtenido de [http://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/70736/secme-6672\\_1.pdf;jsessionid=7B49BA277900DA8FB21221476B8462AD?sequence=1](http://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/70736/secme-6672_1.pdf;jsessionid=7B49BA277900DA8FB21221476B8462AD?sequence=1)
- Ms. Diva. (23 de marzo de 2016). *Micropore Tape*. Obtenido de <https://www.ms-diva-lash-products.com/products/micropore-tape>
- Muñoz, L. (6 de junio de 2016). *Pirámide de Maslow: La jerarquía de necesidades humanas*. (Programa de Bienestar Social Laboral SENA) Obtenido de

- <http://programadebienestarlaboral.blogspot.com/2016/06/piramide-de-maslow-la-jerarquia-de-las.html>
- Norma Estándar Operacional. (s.f.). *Manejo de cargas con cables de acero, eslingas/estrobos*. Obtenido de <https://es.slideshare.net/mustafax/72975821-neo01manejodecablesyeslingas>
- OLX. (9 de abril de 2019). *Limpieza y mantenimiento domos Bucaramanga*. Obtenido de <http://coloranks.info/30/6662467-Techos-en-cristal.html>
- Orliman. (s.f.). *Órtesis funcional de rodilla con control de flexo-extensión OCR200*. Obtenido de <http://www.orliman.com/producto/ortesis-funcional-de-rodilla-con-control-de-flexo-extensionocr200/>
- Ortho Axis. (Agosto de 2025). *Ortho Axis - Targeted Muscle Reinnervation (TMR)*. Obtenido de [https://doortoaxis.net/product.html?product\\_id=8435](https://doortoaxis.net/product.html?product_id=8435)
- Ortiz Prado, A., Ortiz Valera, J. A., & Ruiz Cervantes, O. (2014). *Introducción a la mecánica del medio continuo*. CDMX: UNAM.
- Ortopedia Ceorma S. L. (24 de marzo de 2017). *Prótesis y órtesis ¿cuáles son sus diferencias?* Obtenido de <https://www.ortopediaceormatarragona.com/es/noticias-detalle/protesis-y-ortesis-cuales-son-sus-diferencias/>
- Ortopedia Verástegui. (2025). *Tipos de prótesis*. Obtenido de <https://verasteguiprotetica.com/protesis/>
- Paterna, C. (22 de octubre de 2012). *Movimiento barefoot (I): los por qué de correr descalzo*. Obtenido de <http://cristinapaternafisiosalud.blogspot.com/2012/10/>
- Periódico de salud. (s.f.). *Agnesia - Qué es, definición, medicina*. Obtenido de <https://periodicosalud.com/agenesia-que-es-definicion-medicina/>
- Pic Click. (4 de noviembre de 2018). *No Tie Elastic Lock Lace System Lock Shoe Laces Shoelaces Runners Kids Adults*. Obtenido de <https://picclick.co.uk/No-Tie-Elastic-Lock-Lace-System-Lock-Shoe-142502977212.html>
- Plastic Technologies México. (29 de febrero de 2016). *Las 7 familias de la manufactura aditiva*. Obtenido de [https://www.pt-mexico.com/cdn/cms/Las\\_7\\_familias\\_de\\_la\\_manufactura\\_aditiva.pdf](https://www.pt-mexico.com/cdn/cms/Las_7_familias_de_la_manufactura_aditiva.pdf)
- PZ Serigrafía. (8 de junio de 2018). *Pulseras de control mod 1102*. Obtenido de [http://www.pzserigrafia.com/contents/es/p221\\_Pulseras-de-control.html](http://www.pzserigrafia.com/contents/es/p221_Pulseras-de-control.html)
- Quezada, E. (10 de octubre de 2015). *Funciones del brazo y de la mano*. Obtenido de <https://eunicequezada.wordpress.com/funciones-del-brazo-y-de-la-mano/>
- S&P Sistemas de ventilación. (25 de septiembre de 2017). *HVAC ¿Qué es?* Obtenido de <https://www.solerpalau.com/es-es/blog/hvac-que-es/>
- Sánchez, M., Gordillo, A., & Martínez, A. (1 de marzo de 1997). Obtenido de Diseño optimizado de piezas de plásticos: <http://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/4808-Diseno-optimizado-de-piezas-de-plasticos.html>
- Sarstedt. (2019). *Tip SystemBox con tapa bisagra*. Obtenido de <https://www.sarstedt.com/es/productos/laboratorio/manejo-de-liquidos/accesorios/producto/95.1298.001/>

- Sculpteo. (2019). *Material de impresión 3D: CarbonMide*. Obtenido de <https://pro.sculpteo.com/es/materiales/materiales-carbonmide/>
- Telmeds. (s.f.). *Tejido conectivo areolar laxo*. Obtenido de <http://www.telmeds.org/atlas/histologia/tejido-conectivo/tejido-conectivo-areolar-laxo/>
- Torres Martínez, P. D. (2012). Diseño de ortoprótesis para mano. En *Tesis de pregrado* (págs. 64-70). CDMX: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Unimat. (1 de febrero de 2016). *8400 Piso Antiderrapante Mil Rayas*. Obtenido de <https://www.unimat.com.mx/mat/portfolio/productos/8400-piso-antiderrapante-mil-rayas/>
- Wilhelmi, B. J. (29 de junio de 2016). *Hand anatomy*. Obtenido de <https://emedicine.medscape.com/article/1285060-overview>
- Wolak, D. (30 de septiembre de 2013). *Why the right shoes are as important as the right lure in bass fishing*. Obtenido de <https://www.fieldandstream.com/blogs/lateral-line/2013/09/why-right-shoes-are-important-right-lure-bass-fishing>
- XYZPrinting. (2018). Obtenido de da Vinci 1.0 AiO: <https://www.xyzprinting.com/en-US/product/da-vinci-1-0-aio>
- Zocca, A. (diciembre de 2011). *3D ceramic scaffolds by laser sintering (LSD)*. Obtenido de [http://tesi.cab.unipd.it/40252/1/Tesi\\_Magistrale\\_ANDREA\\_ZOCCA\\_Ingegneria\\_dei\\_Materiali\\_Dicembre\\_2011.pdf](http://tesi.cab.unipd.it/40252/1/Tesi_Magistrale_ANDREA_ZOCCA_Ingegneria_dei_Materiali_Dicembre_2011.pdf)

## Imágenes

- Absoludanse. (2018). *Flexibility band (TA-F-110)*. Obtenido de <https://www.absoludanse.be/Product.aspx?Article=2738&Name=&Lng=FR>
- Avechi. (2018). *Ventilated microwave plate food cover lid clear big*. Obtenido de <https://avechi.com/ventilated-microwave-plate-food-cover-lid-clear-big.html>
- Bayer Material Science. (9 de mayo de 2016). *Snap-fit joints for plastics - A design guide*. Obtenido de [http://fab.cba.mit.edu/classes/S62.12/people/vernelle.noel/Plastic\\_Snap\\_fit\\_design.pdf](http://fab.cba.mit.edu/classes/S62.12/people/vernelle.noel/Plastic_Snap_fit_design.pdf)
- Benedyk, J. (15 de marzo de 2018). *Additive manufacturing of aluminum alloys*. Obtenido de <https://www.lightmetalage.com/news/industry-news/3d-printing/article-additive-manufacturing-of-aluminum-alloys/>
- Berning, K., Cohick, S., Johnson, R., Miller, L. A., & Sensinger, J. W. (2014). Comparison of body-powered voluntary opening and voluntary closing Prehensor for activities of daily life. *The Journal of Rehabilitation Research and Development, Volume 51, Number 2*, pág. 254.
- Bicicletes Restore-It! (s.f.). *Cable cambio de marchas*. Obtenido de [https://www.bicicletesrestoreit.com/epages/78191719.sf/es\\_ES/?ObjectPath=/Shops/78191719/Products/0343](https://www.bicicletesrestoreit.com/epages/78191719.sf/es_ES/?ObjectPath=/Shops/78191719/Products/0343)
- Bike 24. (s.f.). *Avid 20 R Performance Standard Brake Shoes*. Obtenido de <https://www.bike24.de/p17334.html>

- China Brands. (30 de mayo de 2019). *Walkera 250 - Z - 27 Magic Tape Strap for Runner 250 RC Drone*. Obtenido de <https://www.chinabrands.com/item/dropship-walkera-250-z-27-magic-tape-strap-for-runner-250-rc-drone-1352031-p.html>
- Cienciasfera. (s.f.). *Torno*. Obtenido de [http://www.cienciasfera.com/materiales/tecnologia/tecno01/tema18/1\\_torno.html](http://www.cienciasfera.com/materiales/tecnologia/tecno01/tema18/1_torno.html)
- Clockura. (23 de enero de 2017). *Cómo elegir la correa adecuada para tu reloj de pulsera*. Obtenido de <https://clockura.com/blogs/noticias-relojes/como-elegir-la-correa-adecuada-para-tu-reloj-de-pulsera>
- Contalent. (2017). *Prótesis oculares*. Obtenido de <http://www.contalent.cl/protesis-oculares/>
- Decathlon. (2017). *Correa de pecho de recambio*. Obtenido de [https://www.decathlon.com.co/es/p/1788429\\_correa-de-pecho-de-recambio.html?reviews\\_note=3#/22-254-](https://www.decathlon.com.co/es/p/1788429_correa-de-pecho-de-recambio.html?reviews_note=3#/22-254-)
- Direct Industry. (12 de junio de 2019). *Máquina de prueba de torsión/de materiales/horizontal/electromecánica*. Obtenido de <http://www.directindustry.es/prod/instron/product-18463-1663419.html>
- Dykes, M., & Watson, W. (2010). *Cursos Crash: Lo esencial de anatomía*. Barcelona, España: Elsevier.
- E-Ducativa CATEDU. (s.f.). *1.2. Ensayo de compresión*. Obtenido de [http://e-ducativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/4750/4913/html/12\\_ensayo\\_de\\_compresin.html](http://e-ducativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/4750/4913/html/12_ensayo_de_compresin.html)
- Epson. (7 de junio de 2018). *¿Cómo reemplazo la lámpara?* Obtenido de [https://epson.com.mx/faq/SPT\\_V11H799021~faq-00003f3-plhc3710?faq\\_cat=faq-topFaqs](https://epson.com.mx/faq/SPT_V11H799021~faq-00003f3-plhc3710?faq_cat=faq-topFaqs)
- Esteve, F., Olivier, D., Hu, Q., & Baumers, M. (2017). *Micro-additive Manufacturing Technology*. En I. Fassi, & D. Shipley (Edits.), *Micro-Manufacturing Technologies and Their Applications: A Theoretical and Practical Guide*. Suiza: Springer.
- Farmasana. (s.f.). *Órtesis semirrígida lumbosacra laboral*. Obtenido de <http://www.farmaciacurra.es/producto/ortesis-semirrigida-lumbosacra-laboral/>
- Frei, W. (22 de octubre de 2013). Obtenido de *Meshing Considerations for Linear Static Problems*: <https://www.comsol.com/blogs/meshing-considerations-linear-static-problems/>
- Gatto, F. (27 de febrero de 2017). *Kaia Joyas Uruguay*. Obtenido de *Comparativo entre las 9 mejores impresoras 3D*: [https://kaiajoyasuruguay.blogspot.com/2017\\_02\\_27\\_archive.html](https://kaiajoyasuruguay.blogspot.com/2017_02_27_archive.html)
- Godínez Morado, I. (11 de junio de 2013). *Arcos y ángulos de movimiento*. Obtenido de <https://es.slideshare.net/pedroespinosa106/52756563-angulosyarcosdemovimiento>
- Goural. (s.f.). *AirLoc Órtesis estabilizadora para estabilizar el tobillo*. Obtenido de [https://www.goural.es/airloc-ortesis-estabilizadora-para-estabilizar-el-tobillo-xml-1785\\_1835-781.html](https://www.goural.es/airloc-ortesis-estabilizadora-para-estabilizar-el-tobillo-xml-1785_1835-781.html)
- Ibertest. (s.f.). *Máquina de ensayo universal hidráulica - Serie IBMU2*. Obtenido de <https://www.ibertest.es/products/maquina-de-ensayo-universal-hidraulica-serie-ibmu2-2/>
- Impresión Tresde. (9 de marzo de 2019). *Imprimiendo cerámica en 3D*. Obtenido de <https://impresiontresde.com/imprimiendo-ceramica/>



- Instron. (s.f.). *ASTM A370 Ensayos de tracción y flexión para varillas de alta resistencia (barras reforzadas)*. Obtenido de <https://www.instron.es/es-es/testing-solutions/by-material/metals/flexure/astm-a370>
- Leroy Merlin. (3 de junio de 2019). *Cierre por imán 1015*. Obtenido de <http://www.leroymerlin.es/fp/11032826/cierre-por-iman-1015>
- López, F. M. (28 de 11 de 2017). *Especialidades*. Obtenido de <http://drmarques.es/especialidades/>
- Martínez Roa, A. M. (9 de octubre de 2015). *www.3Dnatives.com*. Obtenido de Airbus-partes: <https://www.3dnatives.com/es/airbus-imprime-en-3d-piezas-para-vuelos-comerciales-12102015/airbus-partes/>
- Mora Cantellano, M. A. (octubre de 2017). *Material didáctico: El lenguaje de los objetos, la evolución en las diversas fases del diseño y su interacción simbólica para la satisfacción de las necesidades sociales*. Obtenido de [http://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/70736/secme-6672\\_1.pdf;jsessionid=7B49BA277900DA8FB21221476B8462AD?sequence=1](http://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/70736/secme-6672_1.pdf;jsessionid=7B49BA277900DA8FB21221476B8462AD?sequence=1)
- Ms. Diva. (23 de marzo de 2016). *Micropore Tape*. Obtenido de <https://www.ms-diva-lash-products.com/products/micropore-tape>
- OLX. (9 de abril de 2019). *Limpieza y mantenimiento domos Bucaramanga*. Obtenido de <http://coloranks.info/30/6662467-Techos-en-cristal.html>
- Orliman. (s.f.). *Órtesis funcional de rodilla con control de flexo-extensión OCR200*. Obtenido de <http://www.orliman.com/producto/ortesis-funcional-de-rodilla-con-control-de-flexo-extensionocr200/>
- Ortho Axis. (Agosto de 2025). *Ortho Axis - Targeted Muscle Reinnervation (TMR)*. Obtenido de [https://doortoaxis.net/product.html?product\\_id=8435](https://doortoaxis.net/product.html?product_id=8435)
- Ortopedia Verástegui. (2025). *Tipos de prótesis*. Obtenido de <https://verastegui protesica.com/protesis/>
- Paterna, C. (22 de octubre de 2012). *Movimiento barefoot (I): los por qué de correr descalzo*. Obtenido de <http://cristinapaternafisiosalud.blogspot.com/2012/10/>
- Pic Click. (4 de noviembre de 2018). *No Tie Elastic Lock Lace System Lock Shoe Laces Shoelaces Runners Kids Adults*. Obtenido de <https://picclick.co.uk/No-Tie-Elastic-Lock-Lace-System-Lock-Shoe-142502977212.html>
- PZ Serigrafía. (8 de junio de 2018). *Pulseras de control mod 1102*. Obtenido de [http://www.pzserigrafia.com/contents/es/p221\\_Pulseras-de-control.html](http://www.pzserigrafia.com/contents/es/p221_Pulseras-de-control.html)
- Quezada, E. (10 de octubre de 2015). *Funciones del brazo y de la mano*. Obtenido de <https://eunicequezada.wordpress.com/funciones-del-brazo-y-de-la-mano/>
- Sánchez, M., Gordillo, A., & Martínez, A. (1 de marzo de 1997). Obtenido de Diseño optimizado de piezas de plásticos: <http://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/4808-Diseno-optimizado-de-piezas-de-plasticos.html>
- Sarstedt. (2019). *Tip SystemBox con tapa bisagra*. Obtenido de <https://www.sarstedt.com/es/productos/laboratorio/manejo-de-liquidos/accesorios/producto/95.1298.001/>

- Sculpteo. (2019). *Material de impresión 3D: CarbonMide*. Obtenido de <https://pro.sculpteo.com/es/materiales/materiales-carbonmide/>
- Unimat. (1 de febrero de 2016). *8400 Piso Antiderrapante Mil Rayas*. Obtenido de <https://www.unimat.com.mx/mat/portfolio/productos/8400-piso-antiderrapante-mil-rayas/>
- Wilhelmi, B. J. (29 de junio de 2016). *Hand anatomy*. Obtenido de <https://emedicine.medscape.com/article/1285060-overview>
- Wolak, D. (30 de septiembre de 2013). *Why the right shoes are as important as the right lure in bass fishing*. Obtenido de <https://www.fieldandstream.com/blogs/lateral-line/2013/09/why-right-shoes-are-important-right-lure-bass-fishing>
- Zocca, A. (diciembre de 2011). *3D ceramic scaffolds by laser sintering (LSD)*. Obtenido de [http://tesi.cab.unipd.it/40252/1/Tesi\\_Magistrale\\_ANDREA\\_ZOCCA\\_Ingegneria\\_dei\\_Materiali\\_Dicembre\\_2011.pdf](http://tesi.cab.unipd.it/40252/1/Tesi_Magistrale_ANDREA_ZOCCA_Ingegneria_dei_Materiali_Dicembre_2011.pdf)