



# **POSGRADO INTERINSTITUCIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGIA**

**Maestría en Diseño y Desarrollo de Sistemas Mecánicos**

**TESIS:**

**Diseño y análisis de dispositivo de sujeción reconfigurable para uso con robot industrial**

Presentado por:

**Jesús Elizalde Balboa**

Matrícula:

1501DD3007

Asesor de tesis:

**Dr. José Ángel Segura Victorino**

Co-Asesores:

**Dr. Baidya Nath Saha**

**Dr. Eduardo Macías Ávila**

**Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial**

**Sede Nuevo León**

Apodaca, Nuevo León, Marzo de 2019



## CONTENIDO

CONTENIDO.....	2
LISTA DE FIGURAS .....	5
LISTA DE TABLAS.....	9
AGRADECIMIENTOS .....	10
Capítulo 1. Descripción del problema y objetivos.....	14
1.1 Planteamiento del problema.....	14
1.2 Justificación.....	15
1.3 Objetivos .....	16
Capítulo 2. Fundamentos teóricos.....	18
2.1 Sistemas de Manufactura Reconfigurable.....	18
2.2 Sujeción robótica.....	21
2.2.1 Definición de gripper.....	21
2.2.2 Clasificación de grippers robóticos .....	21
2.2.3 Evolución de los grippers robóticos .....	24
2.2.4 Grados de libertad y mecanismo sub-actuado .....	25
2.2.5 Determinación de puntos de contacto .....	25
2.3 Teoría de diseño .....	27
2.3.1 Proceso de diseño mecánico asistido por computadora.....	27
2.3.2 Esfuerzo normal y esfuerzo cortante .....	30
2.3.3 Vida útil.....	35
2.4 Teoría de elemento finito.....	39
2.5 Cinemática de mecanismos .....	41
2.6 Tornillos de potencia .....	43
Capítulo 3. Diseño de gripper reconfigurable y análisis cinemático .....	47
3.1 Diseño conceptual de gripper.....	47
3.2 Selección de componentes comerciales .....	53
3.3 Análisis cinemático de gripper.....	54
3.3.1 Grados de libertad del dedo .....	54
3.3.2 Cálculo de cinemática.....	56
3.3.3 Cálculo de fuerza requerida para sujeción .....	63

3.3.4	Cálculo de torque y revoluciones requeridas para sujeción.....	72
Capítulo 4. Análisis MEF para obtención de esfuerzos, deformación y vida útil de gripper reconfigurable .....		
4.1	Análisis de esfuerzos por Método de Elemento Finito a conceptos de dedo	75
4.1.1	Análisis MEF concepto dedo 1 .....	76
4.1.2	Análisis MEF concepto dedo 2 .....	81
4.1.3	Análisis MEF concepto dedo 3 .....	84
4.1.4	Selección de concepto para dedo y gripper reconfigurable .....	87
4.2	Análisis MEF a gripper reconfigurable.....	89
4.2.1	Análisis MEF a dedo diseño definitivo .....	89
4.2.2	Análisis MEF dedos y palma de gripper .....	92
4.2.3	Análisis MEF a gripper reconfigurable .....	95
4.2.4	Análisis MEF de gripper con montaje para robot.....	97
4.3	Estimación de vida útil de gripper .....	100
Capítulo 5. Fabricación y prueba de prototipo funcional de gripper reconfigurable. 104		
5.1	Impresión 3D de componentes para gripper .....	104
5.2	Electrónica y control para prueba de prototipo alfa .....	107
5.3	Prueba de gripper reconfigurable de cuatro dedos en laboratorio .....	108
5.3.1	Algoritmo para control semiautomático de prototipo beta.....	109
5.3.2	Control electrónico para prototipo beta.....	110
5.4	Planos de fabricación de gripper reconfigurable .....	114
Capítulo 6. Implementación en robot industrial y validación experimental .....		
6.1	Implementación en robot industrial.....	117
6.2	Validación experimental de gripper reconfigurable montado en robot industrial.....	118
Capítulo 7. Conclusión y trabajo futuro .....		
7.1	Conclusiones.....	125
7.2	Trabajos futuros .....	126
BIBLIOGRAFÍA .....		
ANEXO 1.....		
ANEXO 2.....		

ANEXO 3.....	138
ANEXO 4.....	142
ANEXO 5.....	154

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1 Diferencia entre RMS y las tradicionales FMS y DML.....	19
Figura 2-2 Escenario de un RMS. ....	20
Figura 2-3 Agarre de precisión (izquierda) y agarre de fuerza (derecha). ....	22
Figura 2-4 Flujo de diseño en ingeniería. ....	28
Figura 2-5 Vista isométrica de un elemento sometido a tensión a través de un perno de un lado y una tuerca al otro [39]. ....	30
Figura 2-6 Mitad izquierda del elemento en equilibrio con un esfuerzo uniformemente distribuido en la sección transversal [39]. ....	31
Figura 2-7 Líneas de fuerza a través del elemento [39]. ....	31
Figura 2-8 Tornillo sometido a esfuerzos cortantes [39]. ....	32
Figura 2-9 Falla en perno provocada por doble esfuerzo cortante directo [39]. ....	33
Figura 2-10 Diagrama S-N para prueba de fatiga del acero UNS G41300 normalizado [41]. ....	36
Figura 2-11 Bandas S-N para aleaciones de aluminio representativas, excluyendo aquellas con $S_{ut} < 38$ kpsi [41]. ....	37
Figura 2-12 Fracción de resistencia a la fatiga $f$ [41]. ....	38
Figura 2-13 Formas básicas para los elementos finitos [39]. ....	39
Figura 2-14 Peso soportado por tres elevadores. En cada elevador solo rota la parte sombreada [39]. ....	43
Figura 2-15 Desarrollo de fuerzas en la rosca [39]. ....	44
Figura 3-1 Cadena cinemática de referencia [34]. ....	48
Figura 3-2 Primer concepto de geometría para dedo. ....	49
Figura 3-3 Concepto 2 para dedo sub-actuado. ....	49
Figura 3-4 Concepto 3 para dedo sub-actuado. ....	50
Figura 3-5 Primer concepto de palma con dedos reconfigurables. ....	51
Figura 3-6 Segundo concepto de palma con dedos reconfigurables. ....	51
Figura 3-7 Variante del concepto 2 para gripper reconfigurable. ....	52
Figura 3-8 Concepto 3 para gripper reconfigurable. ....	52
Figura 3-9 Servomotor Dynamixel MX106-T. ....	53
Figura 3-10 Servomotor Hi-Tec HS-85BB. ....	54
Figura 3-11 Tornillo de potencia con rosca ACME de ½ pulgada paso 10. ....	54
Figura 3-12 Identificación de eslabones de cadena cinemática. ....	55
Figura 3-13 Diagrama cinemático para agarre de precisión. ....	55
Figura 3-14 Diagrama cinemático para agarre de fuerza. ....	56
Figura 3-15 Diagrama de cuerpo libre para análisis cinemático. ....	57
Figura 3-16 Diagrama de cuerpo libre para segmento 6-7-8. ....	58
Figura 3-17 Diagrama de cuerpo libre para segmento 3-5-6. ....	59
Figura 3-18 Diagrama de cuerpo libre para segmento 2-3-5. ....	61

Figura 3-19 Diagrama de cuerpo libre para segmento 9-1-2.....	62
Figura 3-20 Gráfica de comportamiento de desplazamiento para los tres conceptos de dedo. ....	63
Figura 3-21 Esquema de fuerzas actuando en la sujeción de un objeto. ....	64
Figura 3-22 Diagrama de cuerpo libre para calcular fuerza requerida. ....	65
Figura 3-23 Diagrama de cuerpo libre para calcular fuerza en puntos 6 y 7. ....	66
Figura 3-24 Diagrama de cuerpo libre para calcular fuerza en el punto 2.....	67
Figura 3-25 Diagrama de cuerpo libre para fuerzas en elemento $L_1$ . ....	68
Figura 3-26 Diagrama de cuerpo libre para fuerzas en elemento $L_{10}$ .....	68
Figura 3-27 Gráfica de fuerza requerida en empujador en función del tamaño del objeto. ....	70
Figura 3-28 Gráfica de fuerza total dependiente del tamaño y material del objeto....	71
Figura 3-29 Gráfica de posición y torque del servo dependiendo del tamaño del objeto. ....	73
Figura 4-1 Uniones de tipo “Joint” de revolución entre elementos del concepto dedo 1. ....	76
Figura 4-2 Mallado del modelo 3D del concepto dedo 1. ....	77
Figura 4-3 Restricción de desplazamiento en elemento empujador.....	78
Figura 4-4 Modelo 3D de concepto dedo 1 con restricciones y cargas. ....	78
Figura 4-5 Esfuerzos equivalentes (von Mises) resultantes en concepto dedo 1 (MPa). ....	79
Figura 4-6 Deformación presentada en concepto dedo 1 (mm). ....	79
Figura 4-7 Remallado de modelo 3D del concepto 1. ....	80
Figura 4-8 Esfuerzo equivalente (von Mises) de concepto 1 después de remallado (MPa). ....	80
Figura 4-9 Deformación presentada en concepto 1 después de remallado (mm). ....	81
Figura 4-10 Unión de elementos para concepto dedo 2.....	82
Figura 4-11 Mallado del modelo 3D de concepto dedo 2. ....	82
Figura 4-12 Restricciones y cargas de modelo 3D de concepto dedo 2. ....	83
Figura 4-13 Esfuerzos equivalentes (von Mises) resultantes en el concepto dedo 2 (MPa). ....	83
Figura 4-14 Deformación presentada en concepto dedo 2 (mm). ....	84
Figura 4-15 Unión de elementos en modelo importado de dedo versión 3. ....	84
Figura 4-16 Mallado del modelo 3D del concepto dedo 3. ....	85
Figura 4-17 Restricciones y cargas de modelo 3D de concepto dedo 3. ....	85
Figura 4-18 Esfuerzos equivalentes (von Mises) presentados en concepto dedo 3 (MPa). ....	86
Figura 4-19 Deformación presentada en concepto dedo 3 (mm). ....	86
Figura 4-20 Diseño preliminar de gripper reconfigurable de 4 dedos.....	88
Figura 4-21 Modelo explosionado con nombre de componentes de dedo definitivo. ....	89

Figura 4-22 Modelo 3D de diseño de dedo definitivo con uniones, restricciones y cargas. ....	90
Figura 4-23 Mallado del modelo 3D del diseño definitivo para dedo. ....	90
Figura 4-24 Esfuerzos equivalentes (von Mises) resultantes en el dedo definitivo (MPa). ....	91
Figura 4-25 Esfuerzo equivalente (von Mises) en “Perno empujador” después de refinamiento de malla (MPa). ....	91
Figura 4-26 Esfuerzo equivalente (von Mises) en “Miembro fijo” después de refinamiento de malla (MPa). ....	92
Figura 4-27 Esfuerzo equivalente (von Mises) en “Extremo de dedo” después de refinamiento de malla (MPa). ....	92
Figura 4-28 Mallado del ensamble de los dedos en la palma del gripper reconfigurable.....	94
Figura 4-29 Esfuerzos de von Mises presentados en ensamble palma-dedos (MPa). ....	94
Figura 4-30 Deformación total resultante en el ensamble palma-dedos (mm). ....	95
Figura 4-31 Mallado resultante para análisis de esfuerzos internos del gripper.....	96
Figura 4-32 Esfuerzos resultantes en el ensamble del gripper (MPa).....	96
Figura 4-33 Mallado a modelo 3D de gripper con montaje a robot.....	97
Figura 4-34 Esfuerzos presentados en análisis MEF a gripper con montaje a robot (MPa). ....	98
Figura 4-35 Deformación máxima en análisis MEF a gripper con montaje a robot (mm).....	98
Figura 4-36 Curva de fatiga para el Aluminio 6061-T6 para esfuerzos completamente reversibles. ....	102
Figura 5-1 Prototipadora Anet A8 (izquierda) y prototipadora Zortrax M200 (derecha). ....	104
Figura 5-2 Impresión 3D de componentes en la prototipadora Zortrax M200. ....	105
Figura 5-3 Prototipo alfa para concepto 2 de dedo. ....	106
Figura 5-4 Prototipo alfa para prueba de mecanismo de reconfiguración y empujador. ....	106
Figura 5-5 Prueba de prototipo alfa para reconfiguración en modo semiautomático. ....	108
Figura 5-6 Prototipo beta de gripper reconfigurable de 4 dedos. ....	109
Figura 5-7 Algoritmo para control de prototipo beta de gripper reconfigurable.....	110
Figura 5-8 Registros del módulo Dynamixel Wizard para configuración del servomotor Dynamixel.....	111
Figura 5-9 Esquema de conexión entre Dynamixel y el adaptador USB.....	111
Figura 5-10 Comportamiento de torque y posición del servomotor en función del tamaño del objeto.....	113
Figura 5-11 Pruebas de sujeción de objetos realizadas en el laboratorio. ....	113

Figura 5-12 Renderizado del diseño definitivo del gripper reconfigurable de cuatro dedos. ....	114
Figura 5-13 Plano 2D para ensamble de gripper reconfigurable de cuatro dedos. .	115
Figura 5-14 Plano 2D para ensamble de dedo sub-actuado. ....	115
Figura 6-1 Gripper reconfigurable de 4 dedos montado en robot industrial. ....	117
Figura 6-2 Configuración de gripper en 2 dedos virtuales. ....	118
Figura 6-3 Configuración de gripper en 3 dedos virtuales. ....	119
Figura 6-4 Configuración de gripper en 4 dedos. ....	119
Figura 6-5 Piezas para validación de sujeción de gripper. ....	120
Figura 6-6 Sujeción utilizando dos dedos virtuales. ....	121
Figura 6-7 Sujeción utilizando tres dedos virtuales. ....	121
Figura 6-8 Sujeción utilizando cuatro dedos. ....	122
Figura 6-9 Sujeción de objeto con posición aleatoria de dedos. ....	122
Figura 6-10 Sujeción de objeto cilíndrico utilizando dos dedos virtuales. ....	123



## LISTA DE TABLAS

Tabla 2-1 Características de los sistemas de manufactura.....	19
Tabla 2-2 Parámetros de diseño a ser determinados por el diseño y análisis. ....	42
Tabla 3-1 Coeficientes de fricción, $\mu_s$ , obtenidos experimentalmente para diferentes materiales.....	63
Tabla 3-2 Datos conocidos de la cadena cinemática del concepto 3. ....	69
Tabla 3-3 Características del resorte de compresión.....	71
Tabla 3-4 Características de tornillo ACME de ½ pulgada paso 10. ....	72
Tabla 4-1 Propiedades mecánicas del Aluminio usado en el análisis MEF.....	76
Tabla 4-2 Comparativa entre conceptos de dedo.....	87
Tabla 4-3 Propiedades mecánicas del acero estructural.....	93
Tabla 4-4 Propiedades mecánicas del ABS. ....	93
Tabla 4-5 Componentes que presentaron mayores esfuerzos en análisis MEF de gripper completo.....	99

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco primeramente a Dios por la oportunidad de concluir este trabajo y proyecto de vida, y por darme las fuerzas para superar los obstáculos presentados. A mi esposa Citlali por confiar en mí y animarme a no desistir, por la paciencia y motivación constante.

Agradezco a mi tutor de tesis José Ángel por todas sus enseñanzas tanto académicas como de vida, por su comprensión y paciencia en los momentos de mucho trabajo. A mis asesores Eduardo y Baidya por su invaluable apoyo.

Agradezco a mis padres Jesús y Ma. Guadalupe, quienes sin escatimar esfuerzos sacrificaron gran parte de su vida por mí, por su formación y educación para volverme una persona de bien y aconsejarme durante todo el tiempo.

Deseo agradecer también a mi institución CIDESI y al personal que hace posible la existencia del programa de posgrado. A todos aquellos que de una u otra forma permitieron la realización de este proyecto de investigación. A David, Yaneth, Daniel y demás compañeros de trabajo por su paciencia y apoyo en todo momento.

A Alejandro, mi compañero de generación por brindarme su apoyo y su amistad en momentos difíciles del programa académico.

## INTRODUCCION

Hoy en día las empresas manufactureras presentan grandes retos debido a cambios impredecibles de productos y procesos, cada vez con mayor frecuencia, provocados por la competencia global y las demandas del mercado. Para permanecer competitivas, dichas empresas deben poseer nuevos tipos de sistemas de manufactura los cuales deben ser rentables y sensibles al cambio del mercado [1]. Para afrontar estos nuevos problemas, se han desarrollado sistemas de manufactura reconfigurable, los cuales ofrecen un ajuste rápido en la capacidad de producción y funcionalidad en respuesta a cambios impredecibles del mercado, siendo sistemas diseñados desde su concepción para cambios rápidos en configuración, elementos y controles [2].

Un gripper robótico es una herramienta de fin de brazo usada en robots para agarrar, sujetar, levantar, mover y controlar materiales aunque estos no estén procesados [3], [4]. Con la finalidad de aprovechar completamente los beneficios de los sistemas de manufactura flexibles y reconfigurables, los grippers robóticos también deben ser diseñados de manera flexible ya que son de los pocos dispositivos que están en contacto directo con el producto al fondo de la cadena de fabricación [3]. Dicho lo anterior, en esta investigación se propone el diseño y análisis de un dispositivo de sujeción (gripper) reconfigurable para uso con robot industrial, el cual permitirá sujetar objetos de diferente forma, tamaño y material con la mínima intervención humana y sin necesidad de reemplazar el efector final, en ambientes industriales o en condiciones extremas donde el ser humano no pueda intervenir directamente.

En el capítulo 1 de este trabajo de tesis se describe el planteamiento del problema a resolver, se propone una hipótesis y se explica la justificación para el desarrollo del proyecto. También se establece el objetivo general y a manera de metodología, los objetivos particulares que corresponden a las etapas de desarrollo de la investigación. El capítulo 2 comprende la revisión de la literatura y las bases teóricas para los cálculos y ecuaciones que se utilizarán en el diseño del gripper reconfigurable. En la revisión de literatura se describen los sistemas de manufactura reconfigurable, se mencionan algunos aspectos relacionados con la sujeción robótica y se proporciona un resumen de los grippers robóticos propuestos por otros autores. En lo referente a la teoría de diseño, se describe la metodología recomendada para el diseño de ingeniería, la cual será una guía durante el desarrollo del gripper, posteriormente se mencionan algunas teorías de esfuerzos, que permiten comprender el comportamiento de los componentes del gripper cuando son sometidos a fuerzas externas desde el punto de vista de deformación y resistencia. Se describen también algunos métodos de cálculo de fatiga, los cuales serán la base para estimar la vida útil de los componentes del gripper. La teoría de diseño se complementa con la teoría de elemento finito. Finalmente, debido a que el gripper es un mecanismo, es necesario incluir las teorías correspondientes al cálculo de cinemática de mecanismos y de tornillos de potencia.

En el capítulo 3, siguiendo lo establecido por la metodología de diseño en ingeniería, se lleva a cabo el diseño y análisis cinemático del gripper. También, se propone un

concepto para el sistema de reconfiguración y para los dedos que conformarán el gripper. Una vez que se tiene un modelo, se continúa en el capítulo 4 con un estudio de esfuerzos y deformaciones de los elementos que conforman el gripper, utilizando el método de elemento finito y se estima la vida útil de los componentes que presentaron mayores esfuerzos.

En el capítulo 5, se muestra la fabricación y prueba de prototipos del gripper reconfigurable de cuatro dedos a nivel laboratorio, se menciona la electrónica y control utilizada en la prueba de dichos prototipos y se muestran algunos planos para la manufactura del dispositivo en su versión final. La implementación en un robot industrial y la validación experimental con piezas de distinta geometría se explica en el capítulo 6. Las geometrías a probar son: cilíndrica, rectangular y polígonos irregulares de hasta 5 lados. Se limita el dispositivo a la sujeción de objetos que no excedan un peso de 5 kilogramos y contenidos en un diámetro de 100 mm como máximo.

Finalmente se plantean las conclusiones de este trabajo en el capítulo 7 y se mencionan los trabajos futuros que se pueden desarrollar siguiendo la línea de investigación de sistemas reconfigurables y dispositivos de sujeción robótica.

---

---

# **Capítulo 1 - Descripción del problema y objetivos**

---

---

## Capítulo 1. Descripción del problema y objetivos

En este capítulo se describe un panorama general de la problemática que se busca resolver con el trabajo de investigación desarrollado en esta tesis, se propone una hipótesis y se plantea la justificación. Finalmente se establecen los objetivos a cumplir.

### 1.1 Planteamiento del problema

Las tareas industriales que actualmente son realizadas por humanos, en ocasiones involucran ambientes peligrosos y riesgos potenciales para su seguridad e integridad física. El obstáculo para la automatización de dichas tareas ha sido el desarrollo de herramientas de agarre versátil y manipulación [5].

Con el incremento del uso de brazos robóticos en la industria, el agarre y manipulación de componentes y piezas como parte de los procesos industriales, son de gran importancia. Por lo tanto, el diseño apropiado de grippers juega un papel importante (rol clave) en el desempeño eficiente de los brazos robóticos [6], ya que un robot es capaz de ejecutar una tarea adecuadamente solo cuando se le asigna la herramienta correcta y el método apropiado para agarrar y manipular las piezas de trabajo [7].

Otra característica útil de los robots es que no se ven afectados por ambientes fríos o calientes y no sufren daños por movimientos repetitivos o atmósferas modificadas. Además, son capaces de trabajar 24 horas al día con una calidad constante, velocidad y eficiencia. Para aprovechar todos esos beneficios, se requieren nuevos diseños de grippers [8].

Cuando un sistema robótico se enfrenta a un ambiente no estructurado o cambiante, su efector final debe satisfacer los requerimientos de destreza y autonomía del dispositivo. Dichas características son deseables en un sistema robótico industrial sometido a reconfiguraciones periódicas, el cual debe ser capaz de lidiar con objetos de diferente forma y tamaño. En estos casos, el clásico gripper de dos dedos, comúnmente con poca sensorialidad no es adecuado, pero por otro lado, las manos robóticas diestras todavía no son lo suficientemente fiables, son muy costosas e innecesariamente complejas [9].

Se ha prestado poca atención a la estrategia de agarre para fuerzas inesperadas, como la fuerza inercial que aumenta cuando el objeto sujeto es desplazado rápidamente. En operaciones en las que la fuerza debido a la carga del objeto varía, una posible estrategia de agarre para prevenir el deslizamiento del objeto, es sujetarlo con una fuerza mayor a la necesaria. Sin embargo, si la pieza a manipular es delicada o frágil, la fuerza excesiva puede dañarla [10]. En este desarrollo se pretende abordar la problemática relacionada con la capacidad de la herramienta de fin de brazo para lidiar con objetos de diferente forma y tamaño, así como la fuerza aplicada en la sujeción de los objetos.

## 1.2 Justificación

La sujeción y manipulación con dispositivos de sujeción (gripper) complejos como los multi-dedo o las manos sub-actuadas es un área de investigación activa en robótica desde hace algunos años [11], [12].

Los dispositivos de fijación representan el 10 a 20 % del costo de manufactura total y si se incluyen los dispositivos de sujeción o grippers el porcentaje se vuelve mayor. Una manera efectiva de reducir dichos costos y tiempo de producción es modularizar las herramientas, de manera que puedan sujetar gran variedad de objetos mediante la reconfiguración de sus elementos [13].

Se tiene la necesidad de contar con un dispositivo de sujeción que le permita a un robot industrial el agarre y manipulación de piezas con distinta geometría, tamaño y dureza, sin reemplazar el efector final y sin necesidad de la intervención humana. El diseño de esta tarea requiere un conocimiento profundo de varios temas interrelacionados incluyendo: diseño de agarre, fuerza, posición, rigidez y configuraciones de control y alcance [7]. Un diseñador de herramientas experto determina la forma que deberán tener los dedos de una garra robótica para un objeto de forma específica. Este proceso puede tomar varias iteraciones y ajustes hasta que el sistema funcione adecuadamente, lo cual se repite cada vez que una nueva forma en el objeto es requerida [14].

Al menos 3 puntos de soporte son requeridos para mantener la estabilidad de un objeto y deben ser colocados tan alejados como sea posible, de manera que el centro de masa del objeto esté contenido dentro del triángulo formado por dichos puntos [15]. De acuerdo con Laliberté y otros [5], y Arimoto [16], tres dedos son suficientes para inmovilizar cualquier objeto con forma triangular pero cuatro dedos son necesarios para inmovilizar un paralelepípedo.

Además, un gripper de cuatro dedos ofrece un número de cuestiones positivas relacionadas a la manipulación de objetos, como la redundancia de fuerza con respecto al objeto manipulado, o tomar amplia variedad de partes [17], [18]. Se puede comprobar que un gripper de cuatro dedos requiere menor fuerza aplicada por cada dedo hacia el objeto en comparación con grippers de dos o tres dedos, considerando el esquema y las ecuaciones utilizados por Nakazawa y otros [10]. La industria de alimentos naturales ha sido lenta en aprovechar completamente los beneficios de la automatización con robots, una de las razones es que los alimentos son muy diversos y muestran un amplio rango en tamaño, textura, peso, susceptibilidad al daño, color y forma; haciendo difícil o imposible sujetar los alimentos con grippers tradicionales "on/off" o de vacío [8].

En esta investigación se propone que es posible el agarre y manipulación de piezas con diferente forma, tamaño y material utilizando un gripper de 4 dedos sub-actuados, en el cual uno de ellos permanezca fijo y los 3 dedos restantes se puedan posicionar radialmente de manera que se permita aplicar la fuerza de sujeción en los puntos más apropiados dependiendo de la geometría de la pieza. Con el análisis cinemático será

posible conocer la apertura adecuada de los dedos dependiendo del tamaño del objeto y permitirá calcular la fuerza requerida para la sujeción, en función del material y tamaño del objeto. Por otra parte, el análisis de elemento finito realizado a los componentes del gripper permitirá optimizar el diseño y de esta manera reducir costo por materiales y manufactura del dispositivo.

### **1.3 Objetivos**

#### **Objetivo General**

Diseñar, desarrollar e implementar un dispositivo de sujeción reconfigurable para su uso con robot industrial.

#### **Objetivos específicos**

- Realizar búsqueda del Estado del Arte sobre diseño de grippers reconfigurables.
- Diseñar de manera detallada un dispositivo de sujeción reconfigurable de 4 dedos y analizar su cinemática.
- Realizar estudio de esfuerzos y deformaciones mediante análisis de elemento finito.
- Fabricar, implementar y validar experimentalmente el dispositivo de sujeción reconfigurable de cuatro dedos en un robot industrial.
- Publicación de los resultados.
- Escritura de tesis y obtención de grado.



---

---

# **Capítulo 2.- Fundamentos teóricos**

---

---

## Capítulo 2. Fundamentos teóricos

En este capítulo se presenta la revisión de la literatura con algunos tópicos relevantes en el tema de dispositivos de sujeción y sistemas de manufactura reconfigurable, se definen conceptos importantes y se presenta una síntesis de los trabajos relacionados a dispositivos de sujeción realizados por otros autores. Además, se presenta la teoría fundamental del diseño mecánico y algunas teorías que se requieren para el desarrollo del proyecto como son: el proceso de diseño mecánico asistido por computadora, esfuerzos, vida útil, teoría de elemento finito y cálculos para cinemática y tornillos de potencia.

### 2.1 Sistemas de Manufactura Reconfigurable

De acuerdo con Koren y otros [1], se identifican tres tipos principales de sistemas de manufactura: Líneas de Manufactura Dedicadas (DML), Sistemas de Manufactura Flexible (FMS) y Sistemas de Manufactura Reconfigurable (RMS). En las DML cada línea dedicada está diseñada para producir una pieza única con elevada producción alcanzada por la operación de varias herramientas simultáneamente.

En los FMS, como la aplicación específica es desconocida para el fabricante de las máquinas, los sistemas y máquinas flexibles son fabricados con toda la funcionalidad posible incorporada. Debido a esto, se asume que los FMS deben ser capaces de producir 1) cualquier pieza (dentro de la envolvente de la máquina), 2) cualquier mezcla de piezas, y 3) en cualquier secuencia.

Un RMS es diseñado desde el comienzo para cambio rápido de su estructura, en componentes tanto hardware como software, con el fin de ajustar rápidamente su capacidad de producción y funcionalidad dentro de una familia de partes en respuesta a cambios repentinos en el mercado o en sus requerimientos. En la Figura 2-1 se ilustra la diferencia entre los RMS y los tradicionales FMS y DML. Un RMS ideal combina las ventajas de los FMS y las DML tal como se observa en la

Tabla 2-1.

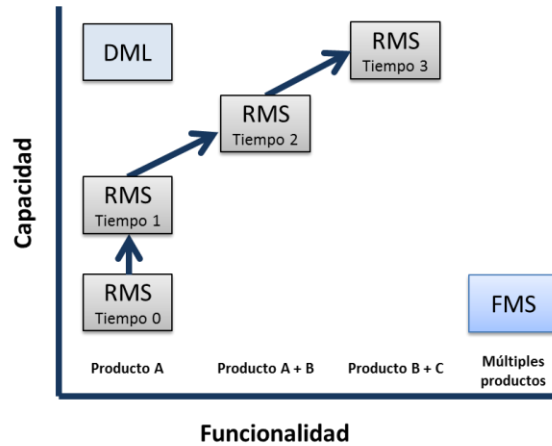


Figura 2-1 Diferencia entre RMS y las tradicionales FMS y DML.

Tabla 2-1 Características de los sistemas de manufactura.

	<b>DML</b>	<b>RMS/RMT</b>	<b>FMS/CNC</b>
Estructura de máquina	Fijo	Ajustable	Fijo
Enfoque del sistema	Partes	Familia de Partes	Máquina
Escalabilidad	No	Si	Si
Flexibilidad	No	Personalizada	General
Herramientas de operaciones simultáneas	Si	Si	No

En la Figura 2-2, se muestra un escenario de un RMS, el cual se puede clasificar en: sistemas de maquinado reconfigurables, sistemas de fijación reconfigurables, sistemas de ensamble reconfigurables, sistemas de calibración e inspección reconfigurables y sistemas de manejo de material reconfigurables [4].



Figura 2-2 Escenario de un RMS.

Tradicionalmente, la función de un sistema de fijación es sujetar una pieza con la finalidad de mantener dicha pieza en una posición y orientación deseada mientras la pieza está en algún proceso de manufactura, ensamble o verificación.

De acuerdo con Shirinzadeh [19], Du y otros [20], y Arzanpour y otros [21], para que cualquier operación de manufactura sea exitosa, las piezas deben ser localizadas y sujetas para mantenerlas en posición y orientación cuando son sometidas a fuerzas externas durante las operaciones. El enfoque tradicional de fijación involucra diseño y manufactura de dispositivos dedicados, es decir, diseñados y manufacturados para operaciones, piezas y geometrías específicas.

El costo de diseñar y fabricar los sistemas de fijación en un FMS puede alcanzar el 10-20% del costo total del sistema. Siguiendo las estrategias para enfrentar los cambios e incertidumbres, los sistemas de fijación reconfigurables se clasifican en dos tipos: sistemas modulares y sistemas flexibles integrales [4].

La Modularidad es considerada un atributo clave para los RMS debido a que es esencial para implementar productos complejos y personalizados. La Modularidad se puede definir como el grado en que un producto es compuesto de módulos independientes, sin interacción entre ellos [22].

## 2.2 Sujeción robótica

### 2.2.1 Definición de gripper

El principal objetivo de sujetar es restringir un objeto deseado en presencia de perturbaciones externas incluyendo el propio peso del objeto [11].

Un dispositivo de sujeción o gripper, es la contraparte de los dispositivos de fijación (fixtures) y tienen muchas similitudes ya que ambos son utilizados para sujetar y localizar objetos, y han sido ampliamente usados en maquinado, ensamble y otras aplicaciones [13].

De acuerdo con Arzanpour y otros [21], un gripper reconfigurable es un dispositivo en el cual, mediante la reorientación de los puntos de agarre, partes con diferentes geometrías y dimensiones pueden ser inmovilizadas, posicionadas y orientadas para varias operaciones de manufactura. Un gripper robótico puede ser como una pinza con dos, tres, o cuatro dedos, o incluso igual a mano humana [23].

### 2.2.2 Clasificación de grippers robóticos

Laliberté y otros [5] clasifican las manos robóticas en dos grupos de acuerdo a su capacidad: a) manos diseñadas principalmente para agarre y 2) manos capaces de manipular objetos. En muchas aplicaciones industriales, la manipulación de objetos no es esencial y los dispositivos de agarre son suficientes. Sin embargo, grippers simples no son apropiados en la mayoría de los casos porque no son capaces de auto-adaptarse a la geometría de distintos objetos.

De acuerdo con Laliberté y otros [5], y Elango y otros [24], se identifican dos patrones de agarre de acuerdo a su función: agarre de precisión y agarre de fuerza. El agarre de precisión sostiene objetos con la yema de los dedos y el pulgar, mientras que el agarre de fuerza manipula el objeto con múltiples puntos de contacto entre el objeto y superficies en los dedos y la palma.

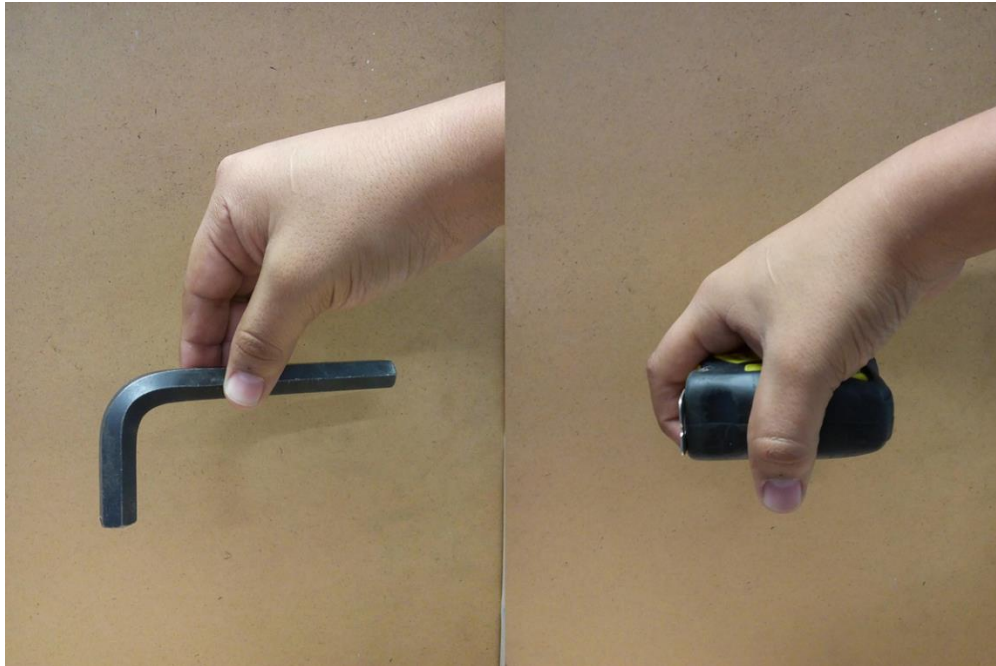


Figura 2-3 Agarre de precisión (izquierda) y agarre de fuerza (derecha).

La orientación de las fuerzas en cada uno de los dedos permite determinar la geometría de los agarres. Por lo tanto, se puede decir que es cilíndrica cuando todas las fuerzas se dirigen hacia una línea, esférica cuando todas las fuerzas se dirigen a un punto, plana cuando dos dedos se oponen y no prensil cuando todas las fuerzas son aplicadas en la misma dirección [5].

De acuerdo con Arzanpour y otros [21], un problema importante en el diseño de sujeciones flexibles es como se realiza el contacto entre la sujeción y el objeto a ser inmovilizado, lo que lleva a la clasificación de grippers basada en el tipo de contacto: a) Método de contacto con fricción, el cual utiliza materiales particulares en contacto con el objeto para incrementar la fuerza de fricción en los puntos de contacto, y b) Método de contacto sin fricción, donde se utilizan elementos mecánicos como bloques y clamps para sujetar las piezas.

Otra clasificación para los grippers robóticos está relacionada con sus requerimientos: a) Compatibilidad con el brazo robótico y controlador, b) Agarre y sostenimiento seguro de objetos y c) Realización exacta de la tarea de manipulación [3].

De acuerdo con Lee [25], una clasificación general para grippers se puede resumir de la siguiente manera:

1. Dedos mecánicos

- a. De acuerdo al número de dedos en el gripper:

- i. 2 dedos.

- ii. 3 dedos.

- iii. Multi-dedo.
  - b. De acuerdo al número de garras montadas en la muñeca del robot:
    - i. Gripper simple.
    - ii. Gripper dual.
    - iii. Multi-gripper (indexado).
  - c. Dependiendo de la estructura cinemática:
    - i. Eslabones.
    - ii. Piñón y cremallera.
    - iii. Tipo leva.
    - iv. Tipo tornillo.
    - v. Cuerda y polea.
2. Vacío y magnético. Utiliza elementos de succión o electroimanes.
3. Grippers y manos especiales.

Debido a la amplia variedad de objetos manipulados, en los procesos industriales se han desarrollado diferentes grippers basados en distintos principios. En ocasiones la selección de un gripper no solo se debe basar en las características del objeto a sujetar, también se debe tomar en cuenta las condiciones en que trabajará, por ejemplo, cómo será alimentado y condiciones de manejo, posicionamiento o liberación [26].

Existen estrategias para diseño y selección de grippers en diferentes campos de aplicación, las variables que afectan la selección del gripper pueden ser: componentes, tareas, ambiente, brazo robótico y condiciones de control. En componentes se contempla la geometría, forma, tamaño y peso. En términos de lograr una tarea de sujeción flexible se sugieren 5 estrategias para alcanzar la flexibilidad de una manera efectiva en costo: 1) utilizar grippers con cierto número de muescas en la superficie de sujeción, 2) grippers con dedos intercambiables, 3) cambio de gripper debido a cambios en tamaño, geometría y peso de objetos, 4) múltiples grippers montados sobre un revolver o sobre mecanismos deslizantes, y 5) grippers “universales” [3].

A diferencia de los dedos rígidos, el uso de materiales suaves en un dedo robótico proporciona algunas ventajas como no dejar marcas en el objeto, además, se requiere menor fuerza de aplicación para agarrar y/o manipular el objeto debido a que el coeficiente de fricción entre el objeto y el dedo será mayor [24].

Un factor importante en la sujeción robótica es la estabilidad. Morales y otros [27], caracterizan la estabilidad en dos variantes: estabilidad del contacto y estabilidad del objeto. La estabilidad del contacto incluye aquellos aspectos que involucran el contacto

de un solo dedo contra la superficie del objeto. Es conveniente que el dedo sea suave para que su superficie se deforme conforme entra en contacto con el objeto y ganar ventaja de un contacto no puntual. La estabilidad del objeto se define como la propiedad de una sujeción que es capaz de mantener al objeto sin afectación de fuerzas externas y se enfoca en el conjunto de fuerzas aplicadas en el objeto.

### 2.2.3 Evolución de los grippers robóticos

Townsend [14] mostró un gripper automáticamente reconfigurable y altamente programable, para tareas que requieren un alto grado de flexibilidad como manipular cargas de forma variable en múltiples orientaciones. Yeung y Mills [28] desarrollaron un gripper reconfigurable de seis grados de libertad y de tres dedos con dos uniones móviles y dos puntos de contacto cada uno para agarrar la pieza, con la finalidad de implementarlo en un robot basado en ensamble flexible libre de sujeciones (FFA) para la industria de ensamble automotriz.

Ragunathan y Karunamoorthy [29], propusieron un gripper reconfigurable basado en tecnología neumática para el agarre de tela en la automatización de la industria de confección. El diseño consiste en cuatro brazos inicialmente en configuración de cruz y que aloja una ventosa en cada brazo. El gripper tiene la capacidad de ajustar su configuración para que coincida con la forma y tamaño de la tela. LiCheng y otros [30], propusieron un mecanismo para un dedo sub-actuado con un grado de libertad activo y elementos resorte dentro de la estructura del mecanismo. El dedo es capaz de lograr operaciones de agarre similares a las humanas.

Cannella y otros [31], diseñaron y construyeron un gripper robótico de dos dedos con cuatro grados de libertad cada uno para el posicionamiento preciso y giro en tiempo real. Es capaz de aplicar una fuerza de agarre constante para ensamble de partes y realizar un movimiento de torsión confiable. Biagiotti y otros [9], plantearon un gripper de tres dedos capaz de manipular objetos irregulares mediante el accionamiento de sus dedos de manera independiente utilizando un actuador lineal en cada uno de ellos. En su artículo, Su y otros [32] desarrollaron el CBF (Cross-Bar Four Finger), un gripper simple, flexible y universal de cuatro dedos capaz de sujetar, agarrar y manipular diferentes piezas en el proceso de ensamble automotriz.

Petkovic y otros [33], presentaron un gripper sub-actuado construido totalmente de goma de silicona, donde sus dedos al ser completamente flexibles, se adaptan en su totalidad a la pieza a sujetar. En su proyecto de tesis, Perez-Garza [34] desarrolló un gripper flexible con dedos sub-actuados, el cual puede configurarse a 2 o 4 dedos de manera manual. Además de la modularidad, utiliza fluido magnetoreológico en las yemas de los dedos buscando que el gripper se adapte a la forma del objeto a sujetar.



#### 2.2.4 Grados de libertad y mecanismo sub-actuado

Los grados de libertad definen el número de entradas independientes requeridas para determinar la posición de todos los eslabones de un mecanismo respecto a un elemento fijo. Existen diversos tipos de elementos que pueden formar un mecanismo como son: eslabones, uniones puntuales, uniones deslizables, levas, seguidores de leva, engranes, cadenas, bandas, poleas, y otros [35].

Lee [25], establece que la mayoría de los mecanismos obedecen la siguiente ecuación general de grados de libertad:

Ecuación 2-1

$$F = \lambda(L - j - 1) + \sum f_i$$

Donde

$F$  = grados de libertad del mecanismo

$\lambda$  = número de movilidad ( $\lambda = 3$  para movimientos planos y esféricos y  $\lambda = 6$  para movimientos tridimensionales)

$L$  = número de eslabones

$j$  = número de uniones

$f_i$  = grado de libertad del movimiento relativo a la  $i$ -ésima unión.

También se establecen elementos cinemáticos que se utilizan al momento de generar el diagrama cinemático del mecanismo, siendo los más comunes: par deslizante (P), par de rotación (R), par engranado (G), par helicoidal (H), entre otros.

Se dice que un mecanismo es sub-actuado cuando su número de actuadores es menor que el número de grados de libertad. Aplicado a dedos mecánicos, el concepto sub-actuado permite su adaptación a la geometría, por ejemplo, los dedos pueden envolver los objetos a ser agarrados y adaptarse a su forma aunque cada uno de los dedos es controlado por un reducido número de actuadores y sin una estrategia de control compleja y numerosos sensores. Con la finalidad de obtener sistemas estáticamente determinados, elementos elásticos y límites mecánicos deberán ser utilizados en sistemas sub-actuados [5], [36].

#### 2.2.5 Determinación de puntos de contacto

La sujeción correcta de un objeto es un aspecto clave para la correcta ejecución de una tarea robótica, esto requiere algoritmos para determinar automáticamente los puntos de contacto apropiados, así como la configuración del gripper [11]. De acuerdo

con Roa [11], y Chen y otros [23], se plantean dos enfoques o categorías usadas en la literatura para resolver dicho problema: 1) enfoque empírico (basado en datos) y 2) enfoque analítico (mecánico).

El enfoque empírico selecciona la configuración y puntos de contacto más adecuados utilizando herramientas como aprendizaje por demostración, redes neuronales, lógica difusa, o sistemas basados en conocimiento. El enfoque analítico considera las propiedades físicas y mecánicas involucradas en la sujeción, y se basa en modelos matemáticos de la interacción entre el objeto y el gripper.

Existen diversos ejemplos de diferentes algoritmos en la literatura, aplicados para determinar los puntos de contacto en el objeto a sujetar. Du y otros [20], emplean un algoritmo de sujeción desarrollado en el concepto del círculo máximo inscrito en un polígono y utilizando información del CAD de la pieza. Kumar y otros [15], proponen tres métodos distintos para determinar los puntos de contacto. El primero, llamado "Interactivo" consiste en un método basado en CAD donde el usuario carga la pieza y otros componentes de sujeción en el sistema e identifica los puntos de sujeción adecuados y elementos de sujeción de una base de datos. El segundo método es semi-automático, aquí el usuario necesita indicar los puntos y caras de sujeción, y el sistema automatiza la selección de elementos de sujeción basado en el método de "localización de restricciones". En el tercer método, llamado automático, el usuario solamente carga el modelo 3D de la pieza y selecciona la cara de soporte, después el sistema genera una lista de puntos de sujeción candidatos que posteriormente serán seleccionados de acuerdo al principio de localización "3-2-1".

Quian y otros [13], presentan un algoritmo eficiente para calcular los puntos de contacto comenzando por convertir el contorno de un objeto en una expresión unificada, mediante la generación de ecuaciones paramétricas de la geometría. Posteriormente calcula la intersección entre las ecuaciones del objeto y la geometría del sujetador. Morales y otros [27], utilizan la segmentación del contorno extraído del objeto y después coloca los puntos de contacto utilizando un "criterio de adaptación del dedo" cuya evaluación se basa en el concepto del "cono de fricción". En el método propuesto por Su y otros [18], se basa en el ajuste de los dedos para producir una "sujeción de forma cerrada" (rectángulo formado por cuatro dedos). Arimoto [16] define un problema de balance dinámico de fuerza/torque, combinando la dinámica de la sujeción con la técnica del máximo círculo inscrito en un polígono y señales de retroalimentación sensorial para encontrar al menos tres puntos de contacto entre el círculo y el polígono que representa al objeto. Puede mantener un agarre seguro en el objeto y controlar su ángulo de rotación sin conocer los parámetros cinemáticos del objeto ni la localización de su centro de masa. Una fórmula de distancia es usada para encontrar que tanto debe cerrar cada dedo para tocar cada punto potencial en la pieza.

En el trabajo de Wagner y otros [37] se modelan los puntos de contacto en una forma discreta. Se asume que solo existirá un punto de contacto en cada cara del dedo. El algoritmo para determinar cuál punto discreto hará contacto, asume que la cara del dedo solo se puede mover paralelo a su eje de movimiento, lo cual es usado para determinar cuál punto será el primero en hacer contacto. Después se realiza un proceso iterativo que intenta todas las combinaciones y se determina el punto de

contacto con la menor distancia para cada dedo. Zitar [38] propone un método basado en inteligencia de enjambre llamado Optimización de Colonia de Hormigas (ACO, por sus siglas en inglés). Modela la habilidad para reorganizarse y comportamiento colectivo de las hormigas, donde un número de hormigas en un punto de contacto constituye la fuerza total aplicada por un dedo en ese punto de contacto. Toma ventaja de un fenómeno considerado como un proceso de “retroalimentación positiva” el cual puede ser tratado como conocimiento compartido a través de esfuerzos colaborativos. El proceso ACO se utiliza para calcular los valores óptimos del gripper.

## **2.3 Teoría de diseño**

### **2.3.1 Proceso de diseño mecánico asistido por computadora**

De acuerdo con Erdman y otros [35], el proceso complejo del diseño creativo en ingeniería tiene muchas variantes. En la Figura 2-4 se presenta una guía general en forma de un sencillo diagrama de flujo, el cual es fácilmente recordado por el diseñador. Otro propósito es mostrar que tipo de software de computadora es apropiado en cada etapa sucesiva del proceso de diseño.

Las siete etapas de diseño en ingeniería se involucraron hace algunos años partiendo de las bases de trabajos publicados y en las bases de la experiencia en la práctica y enseñanza del diseño de ingeniería. Es aplicable a tareas simples de diseño de componentes así como también en diseño de sistemas complejos y asegura una cobertura completa en las fases del proceso de diseño creativo.

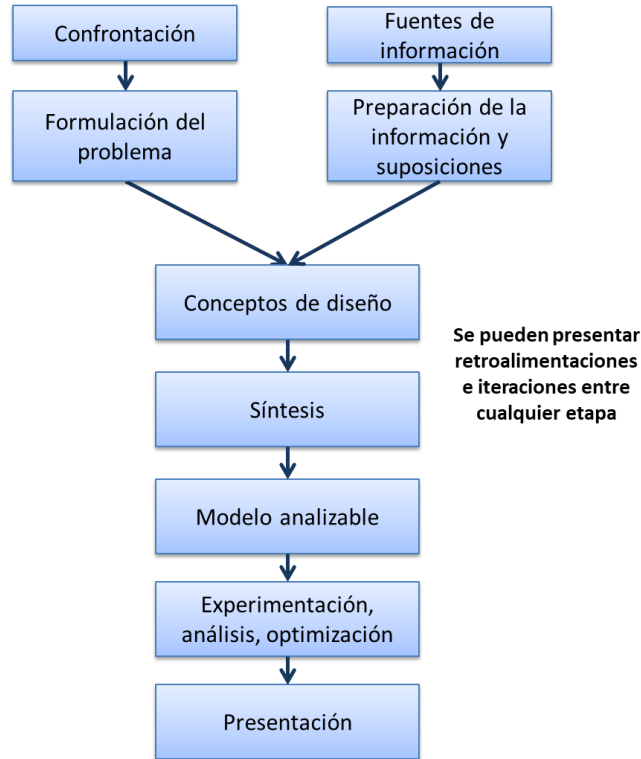


Figura 2-4 Flujo de diseño en ingeniería.

El diagrama de flujo implica retroalimentaciones e iteraciones esenciales e inevitables en el proceso creativo, sin embargo, no se ve afectado por las mismas. A continuación se describen las etapas:

1a.- Confrontación: La confrontación es el planteamiento del problema, es decir, el encuentro del ingeniero con la necesidad de actuar. Usualmente se carece de información suficiente y exige más experiencia y conocimientos que el ingeniero posee en ese momento.

2a.- Formulación del problema: El ingeniero debe aclarar el problema a resolver, es necesario descubrir la necesidad real y definir concretamente términos cuantitativos para una acción ingenieril.

1b.- Fuentes de información: La información disponible para el ingeniero abarca todo el conocimiento humano. La mejor fuente son otras personas en campos relacionados, o bien, bases de datos, catálogo de partes e información de diseño existente.

2b.- Preparación de la información y suposiciones: De la basta variedad de fuentes de información, el diseñador debe seleccionar áreas aplicables, incluyendo conocimientos empíricos y teóricos; y donde falte información, llenar los huecos con suposiciones ingenieriles.

3.- Generación y selección de diseños conceptuales: Aquí los conocimientos desarrollados en la preparación precedente se enfrentan al problema tal como fue formulado, y todos los diseños conceptuales concebidos son preparados en forma

esquemática, dibujados en campos relacionados tanto como sea posible. Los gráficos de computadora son muy útiles para probar conceptos y pre-seleccionar.

4.- Síntesis: El diseño conceptual seleccionado es un esqueleto, ahora se deben llenar los espacios con parámetros concretos con el uso de métodos de diseño sistemático como síntesis cinemática, métodos analíticos, gráficos y asistidos por computadora. De igual manera, la intuición guiada por la experiencia es el enfoque tradicional.

5.- Modelo analizable: Incluso el sistema físico o los componentes más simples son muy complejos para un análisis directo. Estos deben representarse por un modelo ameno para una evaluación analítica o empírica. El ingeniero debe representar la mayoría de las características significantes del sistema real como sea posible, proporcional al tiempo disponible, métodos y medios de análisis o técnicas experimentales. Los modelos típicos son versiones físicas simplificadas, modelos matemáticos, diagramas de cuerpo libre, diagramas cinemáticos. Además, modelos de computadora como sólidos o modelos alámbricos, ya sea en dos o tres dimensiones, entre otros.

6.- Experimentación, análisis y optimización: El objetivo es determinar y mejorar el desempeño esperado del diseño propuesto.

6.1.- Experimentación orientada al diseño ya sea en modelo físico o en su análogo, se debe tomar el lugar del análisis cuando este último no es factible. La asistencia de una computadora incluye adquisición directa de datos, procesamiento en tiempo real mientras el experimento se realiza, representación gráfica y análisis por computadora de los resultados experimentales.

6.2.- Analizar o probar el modelo representativo tiene como objetivo establecer la adecuación y respuesta del sistema físico bajo el rango completo de condiciones de operación. Como apoyo de computadoras existen paquetes para análisis cinemático y dinámico de mecanismos y estructuras, análisis lineal y no lineal de sistemas de control, análisis de elemento finito para esfuerzos y deformaciones de geometrías complejas, y respuesta dinámica en sistemas físicos.

6.3.- En la optimización de un sistema o componente, el ingeniero debe decidir tres cuestionamientos por adelantado: a) ¿Respecto a qué criterio o combinación ponderada de criterios se debe optimizar? b) ¿Qué parámetros del sistema se pueden manipular? c) ¿Cuáles son los límites de dichos parámetros y a que restricciones está sometido el sistema? Algunos apoyos computacionales incluyen programación lineal y no lineal, ajuste de curvas, métodos clásicos de seguimiento de primero, segundo y mayor grado por mencionar algunos.

Experimentación, análisis y optimización forman una etapa de lazo cerrado en el proceso de diseño. El lazo será iterativo y los resultados pueden elevar la retroalimentación e interacciones involucrando alguna o todas las etapas anteriores, incluso pueden cambiar a otro diseño conceptual.

7.- Presentación: Ningún diseño se puede considerar como completo hasta que no haya sido presentado a (y aceptado por) dos grupos de personas: aquellos que lo

usarán y aquellos que lo fabricarán. La presentación del ingeniero debe ser entendible para el usuario prospecto y debe contener todos los detalles necesarios para permitir la manufactura y construcción del diseño. Documentación, dibujos, representaciones realísticas (renderizados), modelos y animaciones son apoyos computacionales muy útiles en la etapa final.

### 2.3.2 Esfuerzo normal y esfuerzo cortante

De acuerdo con Juvinall y otros [39], una vez que las cargas aplicadas a un elemento son conocidas, el siguiente paso de interés en un proceso de diseño es conocer los esfuerzos resultantes de dichas cargas sobre los elementos. La información que se proporciona a continuación se relaciona con esfuerzo resultante de cargas esencialmente estáticas, no se consideran los esfuerzos causados por impacto o fatiga. Por convención, se utilizará la letra  $S$  para referirse a la *resistencia del material* ( $S_u$  para esfuerzo último,  $S_y$  para esfuerzo de cedencia) y las letras griegas  $\sigma$  y  $\tau$  para el esfuerzo normal y cortante respectivamente [39], [40].

#### Esfuerzo normal

En la Figura 2-5a, se muestra el caso de tensión simple, si las cargas externas  $P$  invierten su dirección (tienen valores negativos) se dice que la barra estará en compresión simple. Es importante recordar que los esfuerzos están actuando en las caras perpendiculares al plano de análisis, como se muestra en la Figura 2-5b.

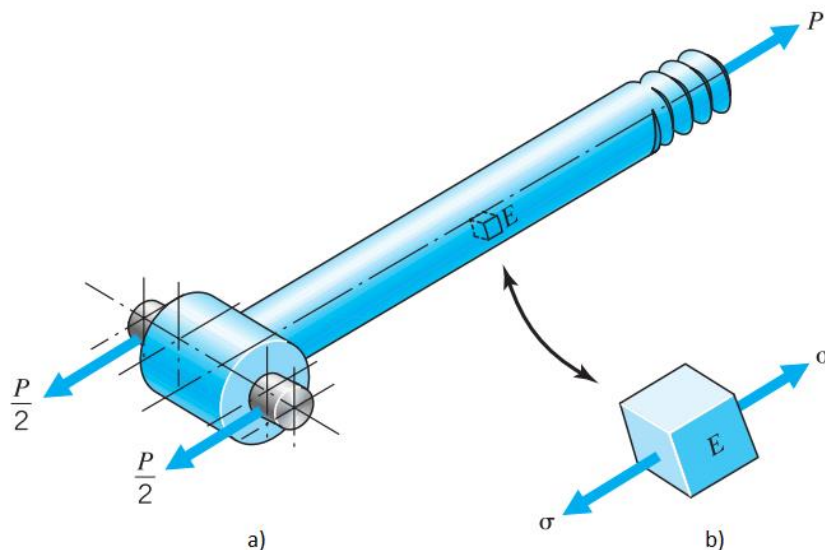


Figura 2-5 Vista isométrica de un elemento sometido a tensión a través de un perno de un lado y una tuerca al otro [39].

La Figura 2-6 muestra el equilibrio de la parte izquierda de un elemento bajo la acción de una fuerza externa aplicada del lado izquierdo y el esfuerzo de tensión actuando en el plano de corte.

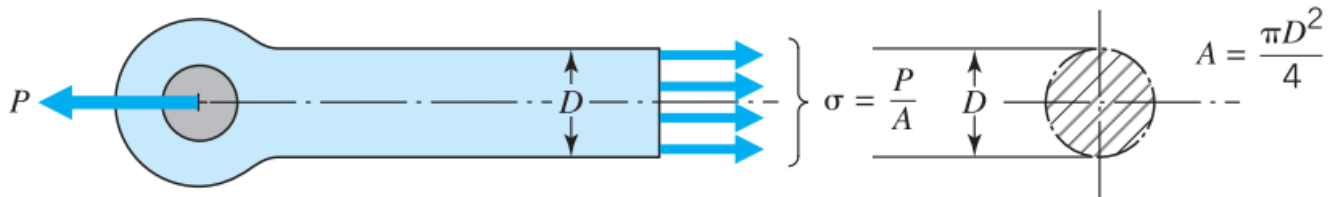


Figura 2-6 Mitad izquierda del elemento en equilibrio con un esfuerzo uniformemente distribuido en la sección transversal [39].

Del equilibrio mencionado se muestra la expresión para el *esfuerzo promedio* en cualquier sección transversal:

Ecuación 2-2

$$\sigma = \frac{P}{A}$$

Errores desastrosos pueden ocurrir si se asume que la ecuación descrita proporciona el *esfuerzo máximo* en la sección. El esfuerzo máximo es igual a  $P/A$  solamente cuando la carga se encuentra *uniformemente distribuida* sobre la sección transversal, lo que requiere lo siguiente:

1. La sección considerada está correctamente alejada de los extremos donde actúan las cargas. La Figura 2-7 muestra las “líneas de flujo de fuerza” para ilustrar la naturaleza general de la distribución de esfuerzos en secciones transversales a varias distancias de los extremos. Una distribución uniforme sustancial se alcanza en los puntos que se encuentran aproximadamente 3 veces el diámetro alejados de los extremos en algunos casos.

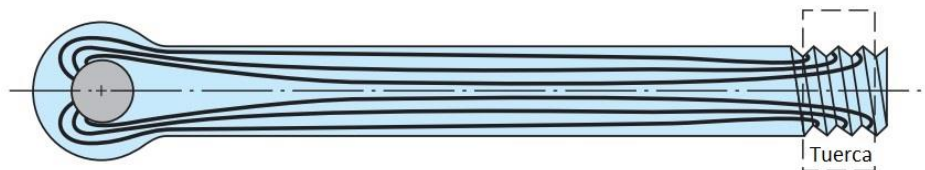


Figura 2-7 Líneas de fuerza a través del elemento [39].

2. La carga es aplicada exactamente a lo largo del eje del centroide de una barra. Por ejemplo, si la carga es aplicada ligeramente cerca de la parte superior de la barra, los esfuerzos serán mayores en la parte superior y menores en la parte inferior.
3. La barra es un cilindro perfecto, sin agujeros, muescas, roscas, imperfecciones o incluso rayones en las caras. Cualquiera de los anteriores genera *concentración de esfuerzos*.
4. La barra está totalmente libre de esfuerzos cuando la carga externa ha sido removida. Frecuentemente no es el caso, ya que durante la manufactura y las subsecuentes cargas térmicas y mecánicas le generan *esfuerzos residuales*.
5. La barra está en equilibrio estable cuando es sometida a cargas, es decir que no se encuentra alargada ni en compresión.
6. La barra es homogénea. Ejemplos de elementos no homogéneos son los materiales compuestos, como los refuerzos de fibra de vidrio o carbón en una matriz plástica.

### Esfuerzo cortante

La carga cortante directa involucra la aplicación de fuerzas iguales y opuestas prácticamente co-lineales de manera que el material entre ellas experimenta un esfuerzo cortante con deformación despreciable. La Figura 2-8 muestra un tornillo con tuerca utilizado para restringir el deslizamiento de dos placas sujetas a fuerzas opuestas  $P$ .

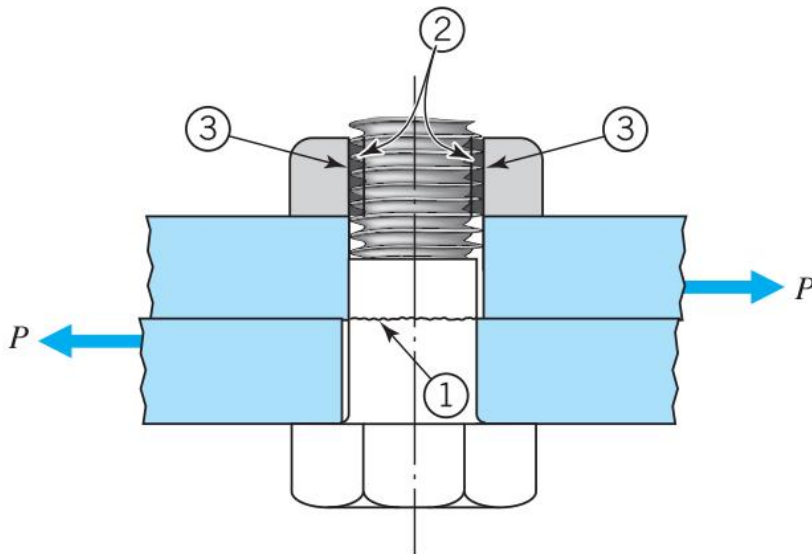


Figura 2-8 Tornillo sometido a esfuerzos cortantes [39].

Con la fricción entre platos despreciada, la sección transversal del tornillo con área  $A$  (marcada como 1) experimenta un esfuerzo cortante directo de valor promedio:



$$\tau = \frac{P}{A}$$

Algunos ejemplos de cortante directo se presentan en remaches, pernos, cuñas, entre otros. Además, la carga en cortante directo es comúnmente utilizada para cortar, como en tijeras, cortadores de papel, cizallas industriales, etc. La Figura 2-9 muestra una bisagra donde el perno está sometido a cortante doble, donde la carga  $P$  es soportada en cortante a través de dos áreas en paralelo, por lo tanto el área  $A$  que se debe considerar es el doble del área de sección transversal del perno.

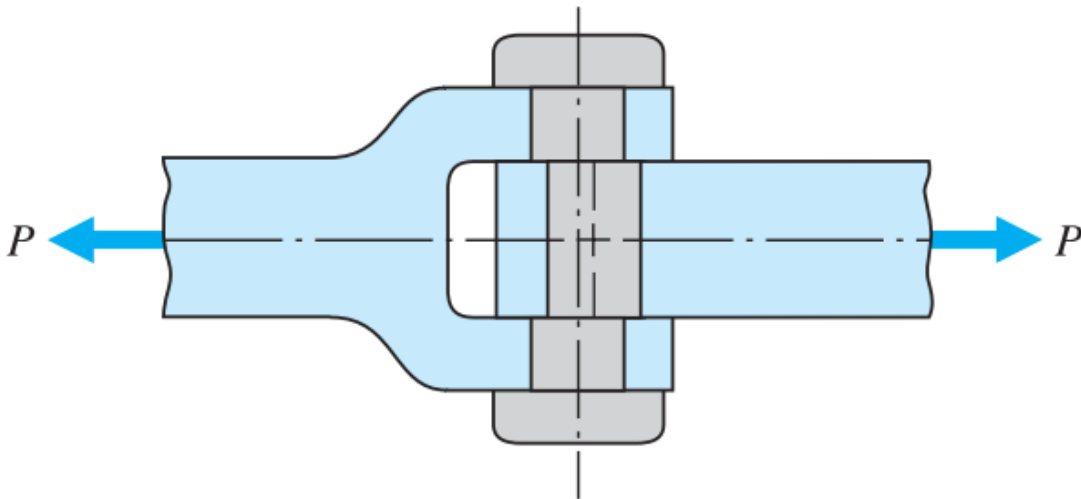


Figura 2-9 Falla en perno provocada por doble esfuerzo cortante directo [39].

El estudio de esfuerzos estáticos se realiza con la finalidad de considerar la relación entre la resistencia y la carga estática que tiene un elemento o componente, con la finalidad de tomar decisiones concernientes al material y su tratamiento, fabricación y geometría, para satisfacer sus necesidades de funcionalidad, seguridad, confiabilidad, competitividad, usabilidad, manufacturabilidad y comercialización [41].

Una carga estática es una fuerza estacionaria aplicada a un elemento, la cual debe permanecer sin cambio en magnitud, punto o puntos de aplicación y dirección. Como se describió en las secciones anteriores, una carga estática puede producir tensión o compresión axial, carga cortante, flexionante o torsional, o cualquier combinación de las anteriores.

De acuerdo con Budynas y Nisbet [41], una *falla* puede significar que una parte se ha separado en dos o más piezas, ha sido distorsionada permanentemente, afectando su geometría; se ha degradado su confiabilidad, o se ha comprometido su función, por cualquiera que sea el motivo. Desafortunadamente, no existe una teoría de falla universal para un caso general de propiedades del material y estado de esfuerzos; con el paso de los años se han formulado y probado diversas hipótesis llevando a las

prácticas aceptadas hoy en día, mismas que se caracterizan como las “teorías de falla” que la mayoría de los ingenieros utilizan.

Las teorías generales aceptadas son:

### **Materiales dúctiles (criterio de deformación)**

- Máximo esfuerzo cortante (MSS).
- Energía de distorsión (DE).
- Coulomb-Mohr para materiales dúctiles (DCM).

### **Materiales frágiles (criterio de fractura)**

- Máximo esfuerzo normal (MNS).
- Coulomb-Mohr para materiales frágiles (BCM).
- Mohr modificado (MM).

### **Teoría de la energía de distorsión para materiales dúctiles y Esfuerzo de von Mises**

De acuerdo con La teoría de la energía de deformación máxima predice que la falla por fluencia ocurre cuando la energía de deformación total por unidad de volumen alcanza o excede la energía de deformación por unidad de volumen correspondiente a la resistencia a la fluencia en tensión o en compresión del mismo material. La teoría de la energía de distorsión se originó debido a que se comprobó que los materiales dúctiles sometidos a esfuerzos hidrostáticos presentan resistencias a la fluencia que exceden en gran medida los valores que resultan del ensayo de tensión simple.

Para un volumen unitario sometido a cualquier estado de esfuerzo tridimensional designado por los esfuerzos  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  y  $\sigma_3$ , se predice la fluencia con la ecuación dada por:

Ecuación 2-4

$$\left[ \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \right]^{1/2} \geq S_y$$

Si se tuviera un caso simple de tensión  $\sigma$ , entonces la fluencia podría ocurrir cuando  $\sigma \geq S_y$ . Por lo tanto, el lado izquierdo de la ecuación puede considerarse como un esfuerzo *sencillo, equivalente o efectivo* del estado general total del esfuerzo dado por

$\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  y  $\sigma_3$ . Por lo general, este esfuerzo efectivo se llama *esfuerzo von Mises*,  $\sigma'$ , en honor del doctor R. von Mises, quien contribuyó a elaborar la teoría [41].

### 2.3.3 Vida útil

En la sección anterior se mostraron las teorías de falla que aplican solamente cuando las condiciones de carga son estáticas, sin embargo, cuando el gripper se encuentra en funcionamiento los esfuerzos varían con el tiempo y fluctúan entre diferentes niveles. De acuerdo con Budynas y Nisbet [41], dichos esfuerzos son llamados *esfuerzos variables, repetidos, alternantes o fluctuantes*.

Cuando algún componente de una máquina falla cuando se encuentra bajo la acción de esfuerzos fluctuantes o repetitivos, se dice que sufre una falla por *fatiga*. A diferencia de las cargas estáticas donde la mayoría de las fallas muestran advertencias visibles anticipadas, las fallas por fatiga no dan ninguna advertencia ni señales anticipadas, por el contrario, son totalmente repentinas y por ende, peligrosas.

#### **Métodos de vida útil por fatiga**

Los tres métodos más utilizados en diseño y análisis para estimar vida útil son: método de duración al esfuerzo, método de duración a la deformación y el método de mecánica de fractura lineal-elástica, los cuales intentan predecir la vida del componente en número de ciclos ( $N$ ) para fallar, con un nivel específico de carga. La vida útil generalmente se clasifica como fatiga de bajo ciclo ( $1 \leq N \leq 10^3$ ) y fatiga de alto ciclo ( $N > 10^3$ ).

El método de duración al esfuerzo, es el enfoque menos preciso ya que se basa solamente en los niveles de esfuerzo, sin embargo es el método más tradicional, puesto que es el más sencillo de implementar para un amplio rango de aplicaciones, sobretodo en aplicaciones de bajo ciclo.

El método de duración a la deformación involucra un análisis más detallado de la deformación plástica en regiones localizadas donde los esfuerzos y deformaciones se consideran para estimar la vida útil. Este método es especialmente bueno para aplicaciones de fatiga de bajo ciclo.

El método de mecánica de fractura asume que una grieta ya está presente y ha sido detectada, misma que se emplea para predecir el crecimiento de la grieta con respecto a la intensidad del esfuerzo. Es el método más práctico cuando se aplica en estructuras grandes en conjunto con códigos de computadora y un programa de inspección periódico.

#### **Método de duración al esfuerzo**

Para determinar la resistencia de materiales bajo la acción de cargas de fatiga, varias probetas son sometidas a fuerzas variantes o repetidas de magnitudes específicas

mientras que los ciclos o esfuerzos invertidos son contados hasta la destrucción. Los resultados son graficados en un *diagrama S-N* donde se representa la resistencia a la fatiga  $S_f$  y es acompañado del número de ciclos  $N$  correspondiente (Figura 2-10).

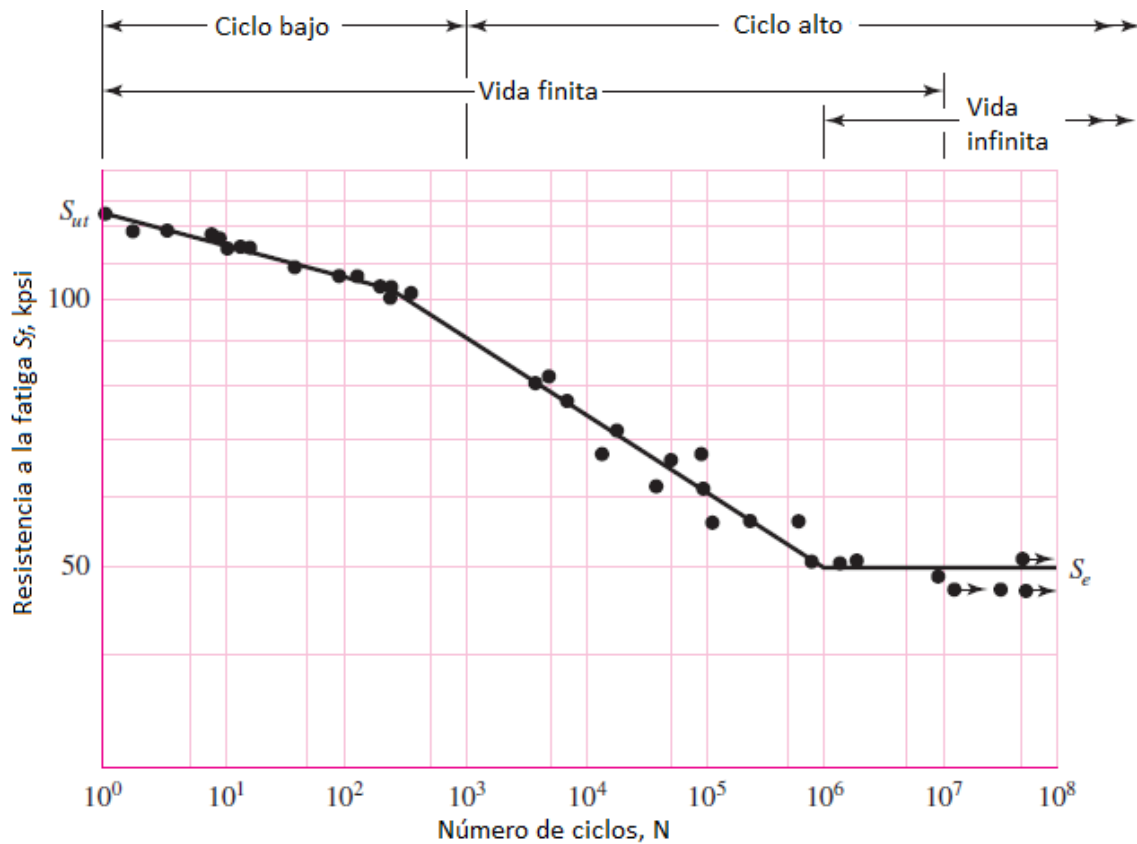


Figura 2-10 Diagrama S-N para prueba de fatiga del acero UNS G41300 normalizado [41].

En el caso de los aceros se presenta el quiebre mostrado en el diagrama donde más allá de ese punto, no ocurrirá la falla. La resistencia correspondiente a dicho quiebre se denomina *límite de resistencia a la fatiga*  $S_e$  o simplemente *límite de fatiga*. Tal como se muestra en la Figura 2-11, la gráfica nunca se vuelve horizontal para metales no ferrosos y aleaciones, por lo tanto dichos materiales no tienen un límite de fatiga.

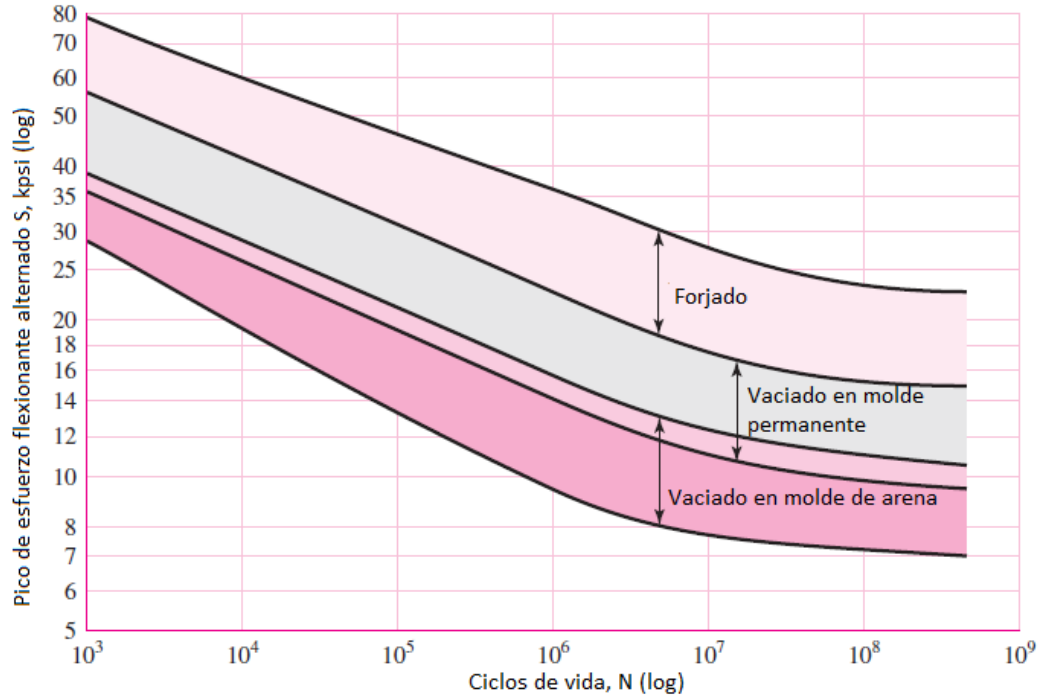


Figura 2-11 Bandas S-N para aleaciones de aluminio representativas, excluyendo aquellas con  $S_{ut} < 38$  kpsi [41].

Debido a que el aluminio no presenta un límite de fatiga, normalmente el esfuerzo de fatiga  $S_f$  es reportado a un específico número de ciclos de esfuerzo invertido, normalmente  $N = 5(10^8)$ .

Para desarrollar un enfoque analítico, la ecuación de la recta S-N se propone como:

Ecuación 2-5

$$S_f = a \cdot N^b$$

Donde  $N$  son los ciclos para fallar y las constantes  $a$  y  $b$  se definen en los puntos  $10^3$ ,  $(S_f)_{10^3}$  y  $10^6$ ,  $S_e$  con  $(S_f)_{10^3} = fS_{ut}$ . Sustituyendo esos dos puntos en la Ecuación 2-5 se obtiene:

Ecuación 2-6

$$a = \frac{(f \cdot S_{ut})^2}{S_e}$$

Ecuación 2-7

$$b = -\frac{1}{3} \log\left(\frac{f \cdot S_{ut}}{S_e}\right)$$

Donde  $S_e$  representa el límite de fatiga y  $f$  la fracción de resistencia a la fatiga.

La Figura 2-12 representa una gráfica de  $f$  para  $70 \leq S_{ut} \leq 200$  kpsi, siendo conservativos, para  $S_{ut} < 70$  kpsi se puede utilizar  $f = 0.9$  [41].

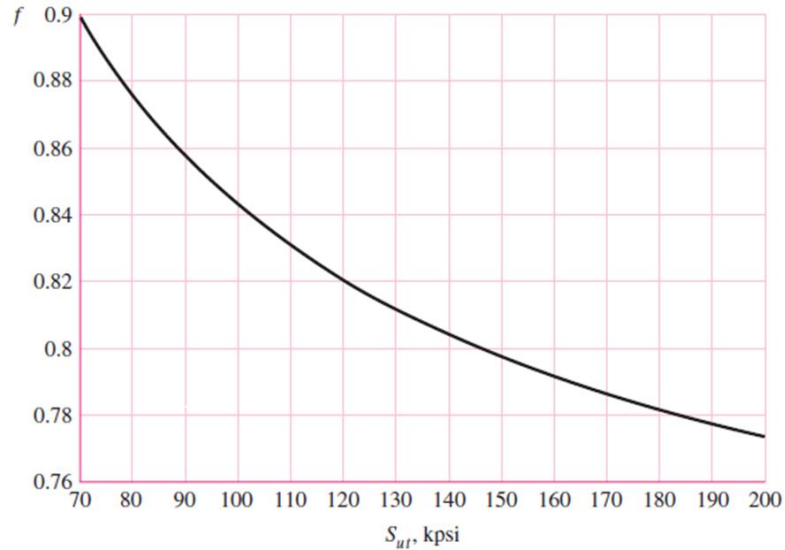


Figura 2-12 Fracción de resistencia a la fatiga  $f$  [41].

Si se proporciona un *esfuerzo completamente reversible*  $\sigma_{rev}$ , se puede considerar  $S_f = \sigma_{rev}$ , por lo tanto el número de ciclos para fallar puede ser expresado como:

Ecuación 2-8

$$N = \left( \frac{\sigma_{rev}}{a} \right)^{1/b}$$

Cuando se trabaja con el esfuerzo máximo, se puede utilizar la relación de Goodman representada como:

Ecuación 2-9

$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_{ut}} = 1$$

Donde:

Ecuación 2-10

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}$$

Ecuación 2-11

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}$$

## 2.4 Teoría de elemento finito

Por generaciones, un asunto de interés para los ingenieros ha sido la determinación de esfuerzos y deformaciones en máquinas y estructuras. Aunque el método de Castigliano puede calcular deflexiones elásticas y cargas para problemas complejos, el método del elemento finito (MEF) puede resolver problemas cuando la geometría es compleja, es decir, que no puede ser modelada con precisión, de acuerdo al estándar del análisis de resistencia de materiales [39].

El *MEF* es actualmente uno de los métodos de cálculos numéricos universales y más eficientes para resolver ecuaciones diferenciales parciales en los campos científico y de ingeniería. El concepto matemático básico está basado en el trabajo de Ritz, Galerkin, Trefftz y otros, al inicio del siglo XX. La formulación del método de elemento finito en su forma actual fue desarrollado gracias al trabajo pionero de Argyris, Zienkiewicz, Turner, Wilson, entre otros. En dicha formulación, el sistema de ecuaciones diferenciales es convertido en un problema variacional equivalente, principalmente utilizando principios mecánicos o métodos residuales ponderados [42].

De acuerdo con Juvinal y otros [39], de manera simple, el método de elemento finito es una técnica de aproximación numérica que divide un componente o estructura en regiones discretas (elementos finitos) y la respuesta es descrita por un conjunto de funciones que representan los desplazamientos o esfuerzos en cada región. Conociendo las interrelaciones físicas de los elementos basado en como son ensamblados juntos, una evaluación aproximada pero precisa del comportamiento del componente puede ser determinada. En la Figura 2-13, se muestran algunas formas básicas de los elementos finitos.

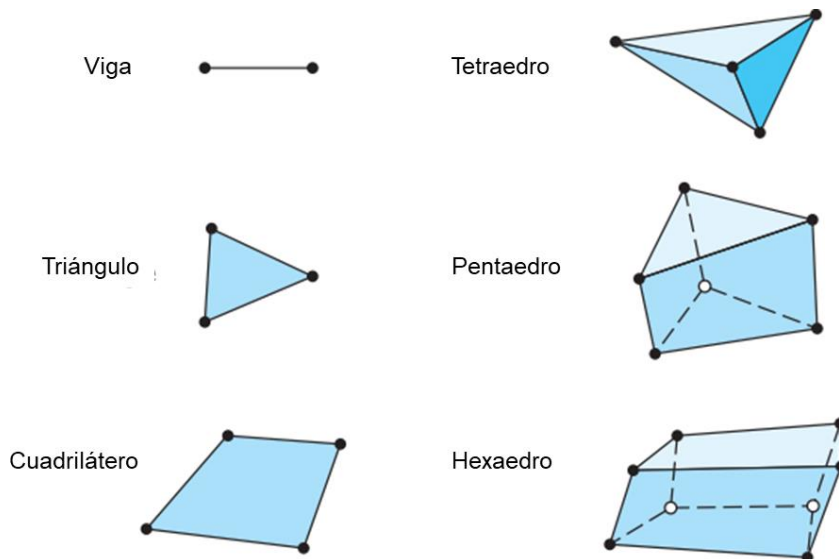


Figura 2-13 Formas básicas para los elementos finitos [39].

Usualmente los pasos a seguir en el método de elemento finito para análisis de esfuerzos son los siguientes:

- 1.- Dividir la parte en elementos discretos.
- 2.- Definir las propiedades de cada elemento.
- 3.- Ensamblar la matriz de rigidez del elemento.
- 4.- Aplicar las cargas externas conocidas a los nodos.
- 5.- Especificar las condiciones de soporte de la parte.
- 6.- Resolver el sistema de ecuaciones algebraicas lineales simultáneas.
- 7.- Calcular el esfuerzo en cada elemento.

Donde los pasos 1, 2, 4, 5 y 7 son entradas del usuario al programa de elemento finito.

Como se mencionó, el componente o estructura es dividido en un ensamblaje de elementos finitos individuales. Se definen las propiedades del material para cada elemento y se identifican las fuerzas y desplazamientos en las uniones (nodos) para cada miembro. Cada elemento posee fuerzas nodales y cuando los miembros son conectados, todas las fuerzas nodales son combinadas en un nodo e igualadas con la carga actual aplicada en ese nodo. Para componentes fijos o estacionarios, las fuerzas en cada nodo deberán estar en equilibrio estático. Se desarrollan ecuaciones para relacionar las fuerzas nodales con los desplazamientos nodales, y dichas ecuaciones además de fuerzas y deformaciones usualmente involucran el módulo de elasticidad del miembro, su área de sección transversal y su longitud, formando así la matriz de rigidez  $[k^{(j)}]$ . Un coeficiente de rigidez es utilizado para relacionar la fuerza nodal con el desplazamiento nodal.

La fuerza total se puede escribir en términos de la deformación y los coeficientes de rigidez. La matriz de rigidez de cada elemento se ensamblan en una matriz de rigidez estructural  $[K]$  que modelara la estructura y su ecuación es:

Ecuación 2-12

$$[K]\{\delta\} = \{F\}$$

Donde  $\delta$  es el vector desplazamiento y  $\{F\}$  es el vector fuerza. De la solución de la Ecuación 2-12 se pueden obtener las fuerzas nodales y las reacciones en los soportes. De las fuerzas, geometría y propiedades de material, se calcula el esfuerzo de cada elemento.



## 2.5 Cinemática de mecanismos

En muchos casos, la ingeniería involucra el análisis de la conversión de energía de una fuente a una o más salidas, usando uno o más principios básicos de las ciencias fundamentales como las matemáticas o la física. La mecánica de sólidos es una de las ramas de la física, misma que contiene tres grandes ramas: *cinemática*, que trata el estudio del movimiento relativo; *estática*, la cual es el estudio de las fuerzas y momentos a parte del movimiento; y *cinética*, que trata con la acción de las fuerzas en los cuerpos. La combinación de la cinemática y cinética es referida como *dinámica* [35].

Existen diversas definiciones para un *mecanismo*, sin embargo todas coinciden en esencia. Por ejemplo, Erdman y otros [35], definen un mecanismo como un dispositivo mecánico que tiene el propósito de transferir movimiento y/o fuerza de una fuente a una salida. Otra definición planteada por Norton [43] para un mecanismo es: un *sistema de elementos dispuestos para transmitir movimiento de una manera predeterminada*, o bien, un dispositivo que transforma movimiento a un patrón deseado y que típicamente desarrolla fuerzas bajas y transmite poca potencia.

Un *eslabonamiento* se compone de *eslabones* (o barras), generalmente considerados rígidos, los cuales son conectados por *uniones*, como pernos (o revolutas), o *uniones prismáticas*, para formar cadenas abiertas o cerradas (lazos). Una cadena cinemática con al menos un eslabón fijo, se convierte en un mecanismo si al menos dos de los eslabones restantes tiene movimiento, o se convierte en estructura cuando no permite movimiento [35].

En ocasiones es difícil visualizar el movimiento de una cadena, especialmente cuando otros componentes aparecen en el mismo diagrama. Debido a lo anterior, el primer paso en el análisis de movimiento de mecanismos complicados es dibujar un diagrama cinemático o esquelético equivalente, cuyo propósito es similar al de un esquema eléctrico o diagrama de circuito en el que solo se muestra lo esencial del mecanismo, el cual, sin embargo, incorpora las dimensiones clave que afectan su movimiento. Para conveniencia, los eslabones deben ser numerados (comenzando con el eslabón fijo como número 1), las uniones identificadas con letras, además de identificar la entrada y salida. Se plantea un rango completo de posibles parámetros de diseño que pueden ser designados para la solución de un problema en particular, el cual es aplicable a mecanismos en general. El análisis y síntesis de mecanismos pueden ser clasificados en dos grandes grupos: cinemáticos y dinámicos tal como se muestra en Tabla 2-2 [35], donde un grupo distinto de parámetros está disponible en cada paso y en general, cada paso sucesivo tiene parámetros adicionales que no están disponibles y no afectan los objetivos en pasos anteriores. De las categorías mostradas en la tabla, K1 a K4 son cinemáticas, mientras que las categorías D1 a D4 son consideradas dinámicas. En las categorías K1 a D4 los eslabones son tratados como cuerpos rígidos y en la categoría D5 como cuerpos elásticos [35].

Tabla 2-2 Parámetros de diseño a ser determinados por el diseño y análisis.

		Dimensiones	Posiciones iniciales	Localización de uniones	Posición de puntos de rastreo	Ubicación de centros de masa	Masa de eslabones	Momentos de inercia de eslabones	Ubicación de elementos de fuerza	Tipo y magnitud de elementos de fuerza	Torque de entrada requerido	Holguras en uniones	Propiedades de sección transversal	Propiedades del material
Categoría de diseño	Parámetros:	$L_i$	$\Phi_i$	$O_i$	$P_i$	$G_i$	$M_i$	$J_i$	$S_i$	$F_{ij}$	$T_{ij}$	$C_{ij}$	$A_i$	$E_i$
K1	Generación de función	X	X											
K2	Guiado de cuerpo rígido	X	X	X	X									
K3	Generación de trayectoria	X	X	X	X									
K4	Análisis estático de fuerzas	X	X	X		X*	X*		X	X				
D1	Balaceo	X				X	X							
D2	Análisis dinámico de fuerzas	X		X		X	X	X	X	X				
D3	Análisis de respuesta tiempo-movimiento	X		X	X	X	X	X	X	X	X			
D4	Efecto de las holguras	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X		
D5	Dinámica de cuerpo elástico	X		X	X	X	X	X	X	X	X		X	X

En la literatura se encontraron diferentes métodos para resolver las categorías mencionadas dependiendo del objetivo del análisis. Por ejemplo, Arimoto [16] analizó la cinemática del gripper a la vez que realizaron un balanceo de fuerza y torque donde incluyeron algunas propiedades del objeto a sujetar; Birglen y otros [36], analizaron la trayectoria de los puntos de contacto de un dedo sub-actuado aplicando la matriz Jacobiana. Datta y otros [12], Wu y otros [30], y Kragten y otros [44], realizaron un análisis estático de fuerzas y posición; Chen y otros [45], analizaron la cinemática aplicando el método vectorial.

Birglen [46], y Ha y otros [47], realizaron un análisis cinetostático para definir la fuerza y movimiento, mientras que Chen y otros en [23] y [48] realizaron un análisis dinámico aplicando la formulación de Newton-Euler. Un método estático convencional fue utilizado por Biagotti y otros [9], Jung y otros [49], Petkovic y otros [50], y Yeung y otros [28], con algunas variantes como son: aplicación de simples traslaciones, aplicación de trabajo virtual, planteamiento como mecanismo básico de manivela deslizante y aplicación de cinemática inversa respectivamente.

## 2.6 Tornillos de potencia

Los tornillos de potencia, también llamados actuadores lineales o tornillos de traslación, son utilizados para convertir el movimiento rotacional ya sea de la tuerca o el tornillo, a un movimiento lineal de algún miembro conectado al mismo, a lo largo del eje del tornillo [39]. El propósito de muchos tornillos de potencia es obtener una gran ventaja mecánica en elevadores como los gatos tipo tijera, o ejercer grandes fuerzas como en prensas y máquinas de prueba de tensión, compactadores, C-Clamps, entre otros. La siguiente figura muestra un dibujo simplificado de tres diferentes elevadores soportando una carga (Figura 2-14).

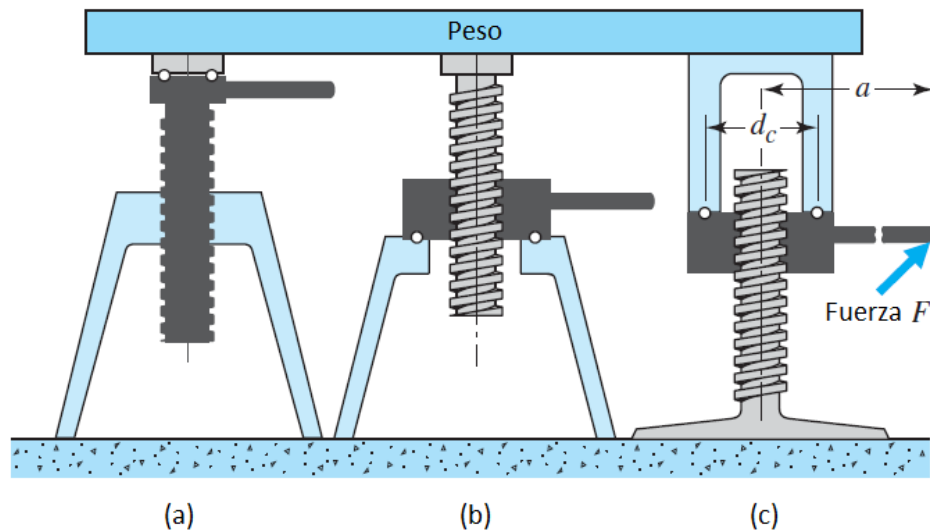


Figura 2-14 Peso soportado por tres elevadores. En cada elevador solo rota la parte sombreada [39].

Si se rota la tuerca en la Figura 2-14c se forzará a cada porción de la rosca de la tuerca a ascender en un plano inclinado. Si se representa dicho plano desarrollando o desarrollando una porción de una vuelta de la rosca del tornillo como lo muestra la Figura 2-15, se formará un triángulo que ilustrará la relación:

Ecuación 2-13

$$\tan \lambda = \frac{L}{\pi \cdot d_m}$$

Donde

$\lambda$  = ángulo de avance

$L$  = avance o paso

$d_m$  = diámetro medio de la rosca de contacto

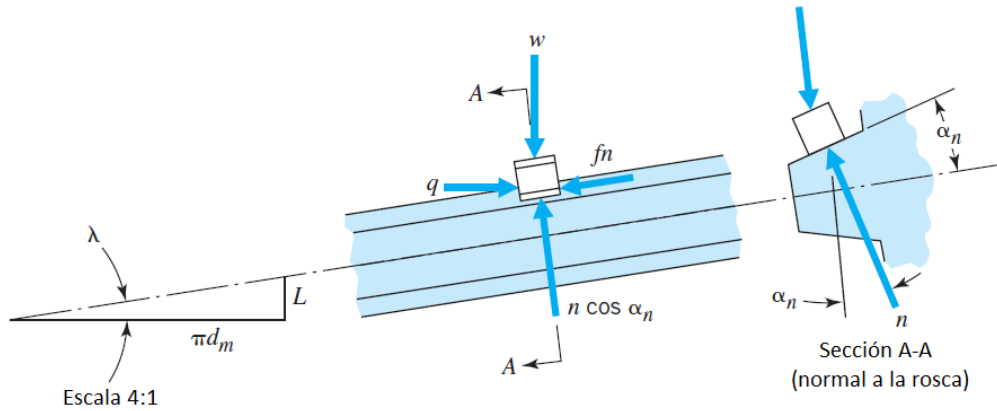


Figura 2-15 Desarrollo de fuerzas en la rosca [39].

Sumando las fuerzas tangenciales que actúan en el bloque se obtiene:

Ecuación 2-14

$$\Sigma F_t = 0: q - n(f \cdot \cos \lambda + \cos \alpha_n \cdot \sin \lambda) = 0$$

Sumando las fuerzas axiales se obtiene:

Ecuación 2-15

$$\Sigma F_a = 0: w - n(f \sin \lambda + \cos \alpha_n \cdot \cos \lambda) = 0$$

O bien,

Ecuación 2-16

$$n = \frac{w}{\cos \alpha_n \cdot \cos \lambda - f \cdot \sin \lambda}$$

Donde  $w$  representa la carga (una porción de la carga axial total  $W$ ),  $n$  la fuerza normal,  $f$  el coeficiente de fricción,  $q$  la fuerza tangencial y  $\alpha_n$  el ángulo de carga (ángulo de la rosca).

Después de combinar la Ecuación 2-14 y la Ecuación 2-16, e integrar sobre la superficie entera de la rosca en contacto, se obtiene la ecuación de torque requerido para elevar una carga  $W$ .

Ecuación 2-17

$$T = \frac{W \cdot d_m}{2} \cdot \frac{f \cdot \pi \cdot d_m + L \cdot \cos \alpha_n}{\pi \cdot d_m \cdot \cos \alpha_n - f \cdot L}$$

La ecuación anterior aplica cuando se eleva una carga o cuando se gira el elemento rotatorio “contra la carga”. Para el caso donde desciende la carga o se gira el elemento rotatorio “con la carga” aplica la misma ecuación con la excepción de que las direcciones de  $q$  y  $f$  se invierten, como se puede observar en la Ecuación 2-18.

Ecuación 2-18

$$T = \frac{W \cdot d_m}{2} \cdot \frac{f \cdot \pi \cdot d_m - L \cdot \cos \alpha_n}{\pi \cdot d_m \cdot \cos \alpha_n + f \cdot L}$$

---

---

# **Capítulo 3 - Diseño de gripper reconfigurable y análisis cinemático**

---

---

## Capítulo 3. Diseño de gripper reconfigurable y análisis cinemático

En este capítulo se realiza el diseño del gripper reconfigurable y se analiza su funcionalidad considerando su forma geométrica y disponibilidad de los componentes en el mercado para su fabricación. Primero fue necesario generar conceptos a mano alzada con la información disponible en las áreas del conocimiento humano como lo indica la metodología de diseño en ingeniería. Posteriormente se estudió la cinemática del diseño para conocer la interrelación de los componentes en tiempos y movimientos, así como las fuerzas requeridas.

### 3.1 Diseño conceptual de gripper

Para el diseño del gripper reconfigurable, se consideraron las siete etapas de diseño descritas en el apartado 2.5.1 con la finalidad de seguir un orden y facilitar el diseño. En la etapa de confrontación (1A) se realiza el planteamiento del problema, que consiste en definir lo que se desea desarrollar, en este caso: un gripper reconfigurable de cuatro dedos para uso con robot industrial.

Para las etapas de fuentes de información (1B) y, suposiciones e información aplicable (2B), se realizó una búsqueda de componentes comerciales que pudieran ser utilizados para implementar el gripper, esto es importante para el diseño ya que puede generar restricciones al momento de integrar componentes y dimensionar el dispositivo. Como resultado de dicha búsqueda se generó una lista de posibles componentes electrónicos y mecánicos a utilizar, como lo son: engranes, servomotores de alto torque, servomotores con control de fuerza, velocidad y posición, micro-controladores; así como materiales de fabricación y tornillería.

Siguiendo con la etapa de formulación del problema (etapa 2A), es necesario considerar restricciones y especificaciones del diseño para el gripper, para ello se tomó en cuenta la necesidad que existe en la industria de contar con dispositivos reconfigurables y la información obtenida en la revisión de literatura. De lo anterior se plantean las siguientes especificaciones:

- Dispositivo reconfigurable capaz de montarse en robot Motoman de 10 y 50 kg de capacidad de carga (Modelos MH6-10 y MH50 respectivamente).
- Tener 4 dedos sub-actuados.
- Se considera agarre de precisión como prioridad (agarre con la “yema” del dedo).
- Un dedo permanecerá fijo y los tres restantes deberán posicionarse radialmente y de manera independiente.

- Capaz de sujetar objetos contenidos en un círculo desde 1 hasta 10 cm de diámetro o un cuadrado de 10 x 10 cm y hasta 5 kg de peso.
- Capaz de operar sin intervención humana en la parte mecánica.
- El cierre de los cuatro dedos será simultáneo.
- Deberá tener control de fuerza de cierre con la finalidad de tomar objetos de diferente material sin dañarlos.

Después de revisar patentes (Anexo 5), trabajos previos encontrados en la literatura y considerando las especificaciones y componentes comerciales disponibles, se procedió con la etapa de diseño conceptual.

En la revisión de literatura se pudo observar que existe gran diversidad en la geometría y la cadena cinemática utilizada para los dedos de los grippers robóticos. En este desarrollo se busca que tanto los dedos como los mecanismos del gripper sean sencillos y tengan la menor cantidad posible de componentes, es por eso que se decidió tomar como referencia la cadena cinemática utilizada en el trabajo de Perez-Garza [34], el cual consiste en un gripper con dos dedos sub-actuados que permiten tanto el agarre de precisión como el agarre de fuerza. En la Figura 3-1 se muestra la cadena cinemática que se tomó como referencia para el diseño. Cabe señalar que en los trabajos de referencia mencionados, los dedos permanecen con una posición fija respecto a la palma de gripper, por lo que fue necesario rediseñar la parte conductora o que aplica la fuerza para el cierre.

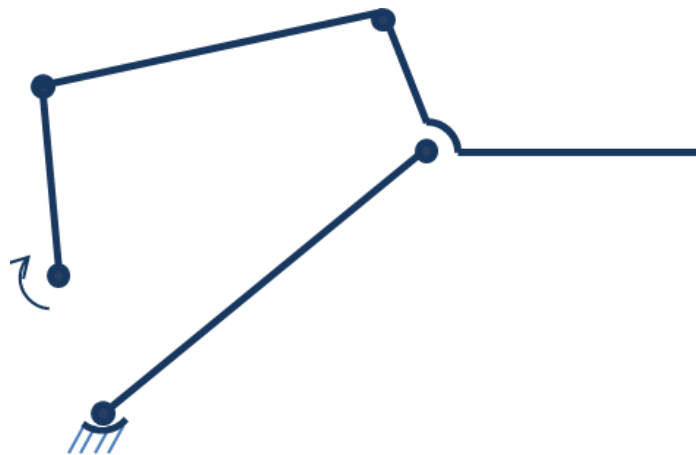


Figura 3-1 Cadena cinemática de referencia [34].

En la cadena cinemática mostrada, el movimiento de cierre proviene de un movimiento de rotación. En el diseño propuesto en este desarrollo se utiliza un tornillo rosca ACME para proporcionar la fuerza de cierre ya que con el tornillo es posible desplazar grandes cargas con un bajo torque de entrada. Debido a esto, es necesario agregar un



componente empujador, el cual deberá estar conectado al tornillo ACME y un componente de unión, mismo que servirá para cambiar el sentido de la fuerza aplicada de horizontal a giratoria. Con la ayuda de software CAD se comenzó a dar forma a los conceptos mediante modelado 3D, mismos que se muestran a continuación.

**Concepto dedo 1.** El primer concepto para la geometría de los componentes que forman el dedo, consiste en geometrías tipo barra de espesor constante (12 mm). Se puede apreciar que al igual que el trabajo propuesto por Perez-Garza [34], en el concepto ya se contempla un elemento empujador y un elemento de unión con la cadena cinemática del dedo (Figura 3-2).

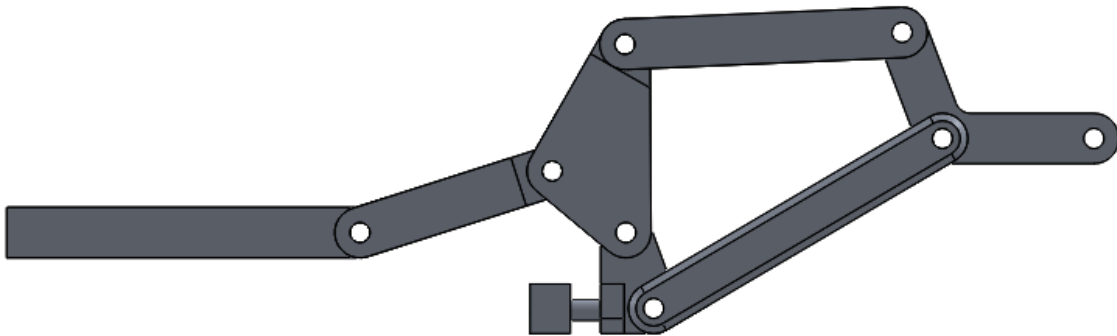


Figura 3-2 Primer concepto de geometría para dedo.

**Concepto dedo 2.** Un segundo concepto para el dedo sub-actuado (Figura 3-3) contempla la misma cadena cinemática pero tiene una variante en el elemento empujador, el cual considera un elemento empujador de forma cilíndrica, además, en este concepto se reduce el tamaño de los elementos que forman el dedo. Se agregó un elemento para guiar al empujador y en lugar de tener un elemento de unión entre el empujador y la cadena cinemática, se utiliza una ranura (slot) para convertir el desplazamiento lineal del empujar en una rotación.

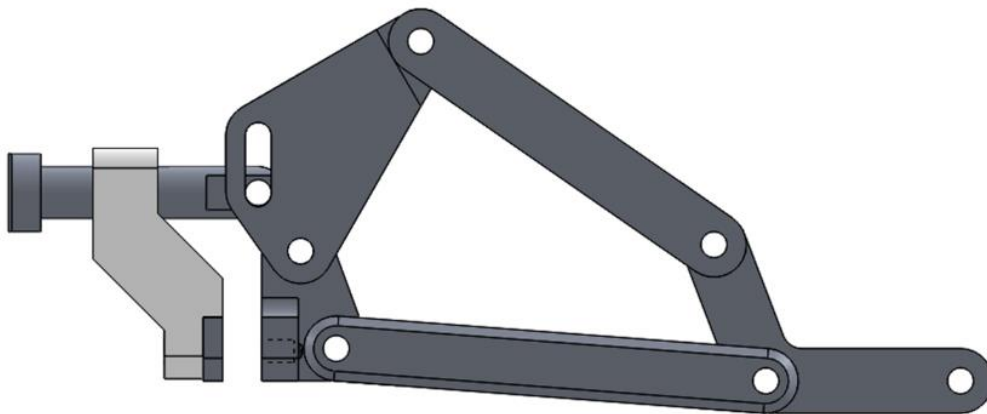


Figura 3-3 Concepto 2 para dedo sub-actuado.

**Concepto dedo 3.** Una combinación de los conceptos anteriores generó un tercer concepto, en el cual se toma la cadena cinemática del primer concepto pero se incluye el sistema de elemento empujador del concepto dos. En este concepto, se puede observar que se simplificó la geometría de los elementos del dedo.

Otra diferencia respecto a los conceptos anteriores es que este modelo realiza la apertura y cierre de manera paralela respecto al eje horizontal (Figura 3-4).

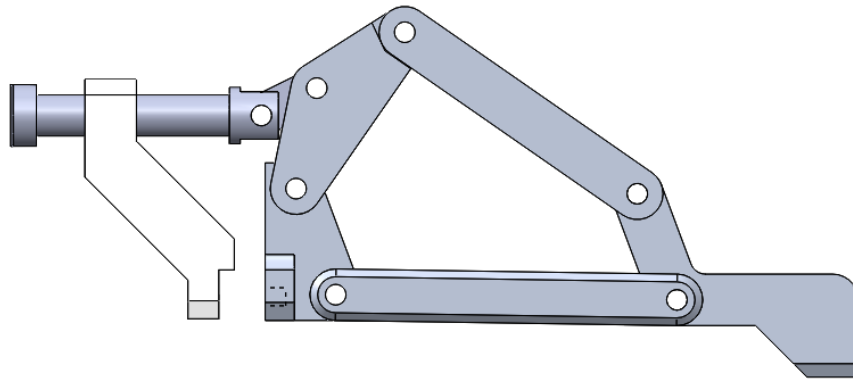


Figura 3-4 Concepto 3 para dedo sub-actuado.

Conforme se avanzaba con el concepto del dedo, se trabajó en conceptos para la palma del gripper y el mecanismo reconfigurable, los cuales comprenden tres tipos y se presentan a continuación:

**Concepto gripper 1.** Un primer acercamiento al modelo del gripper es el mostrado en la Figura 3-5, en el cual se plantea una base (palma) con ranuras sobre la cual deslizan los dedos. En este concepto se contempla la incorporación de un servomotor unido a la parte fija de cada dedo, que se conecta mediante un engrane a una corona fija a la palma del gripper, lo que permite al dedo comportarse como “satélite” y lograr el posicionamiento radial de los dedos. Se puede observar que mecánicamente existe una limitante debido a la geometría de los dedos, por ejemplo la separación angular mínima entre los dedos será de  $45^\circ$  aproximadamente.

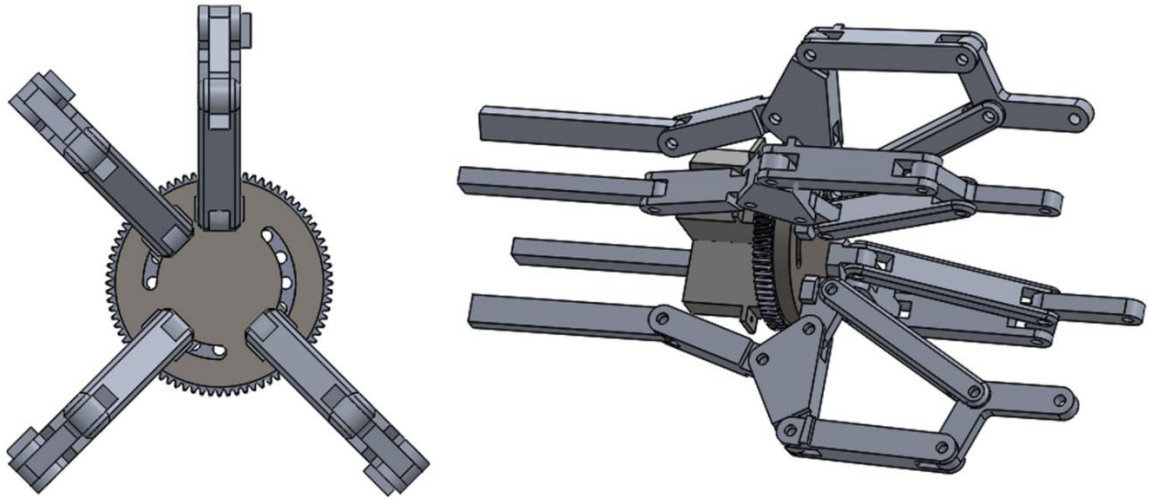


Figura 3-5 Primer concepto de palma con dedos reconfigurables.

**Concepto gripper 2.** Un segundo concepto para la palma y el acomodo de los dedos consiste en una base (palma) con ranuras sobre la cual deslizan los dedos, donde cada dedo estará conectado a una flecha y un engrane. En este concepto los servomotores estarán fijos, unidos a la palma y “encapsulados” de manera que queden al interior de la palma. Se puede observar el concepto en la Figura 3-6.

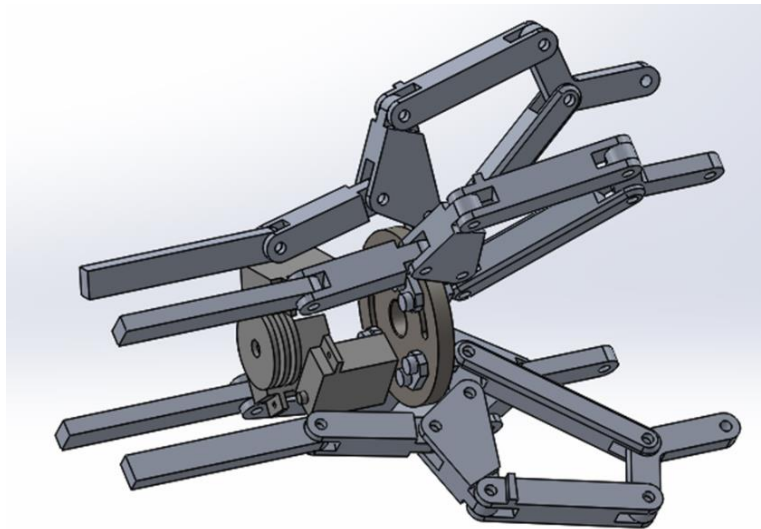


Figura 3-6 Segundo concepto de palma con dedos reconfigurables.

Una variante de este concepto se muestra en la Figura 3-7 donde se considera el mismo principio pero utilizando el dedo del concepto 2, donde ya se incluyen algunos componentes adicionales y se agrega el plato empujador, el cual se encargará de cerrar todos los dedos al mismo tiempo y bajo la acción de un solo actuador.

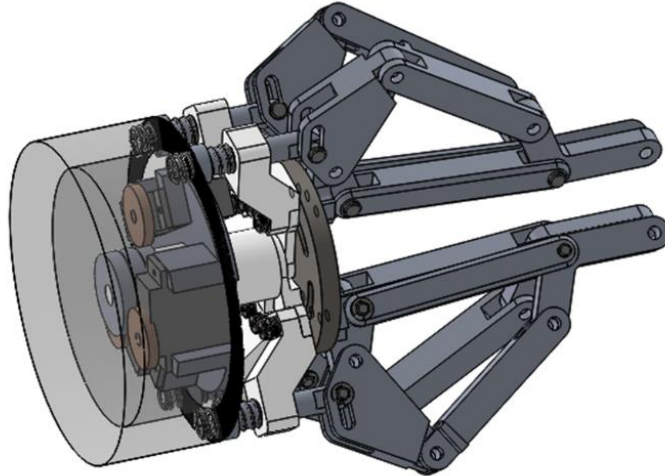


Figura 3-7 Variante del concepto 2 para gripper reconfigurable.

**Concepto gripper 3.** Un tercer concepto se generó buscando simplificar el funcionamiento del gripper y buscando la manufacturabilidad y ensamble del mismo, en este concepto se contempla el tercer concepto para dedo. Se considera la opción de fijar los servomotores y transmitir la rotación mediante engranes conectados a cada dedo. Además, en este concepto ya se definen los límites de posicionamiento para cada dedo. Se puede observar el modelo 3D de dicho concepto en la Figura 3-8.

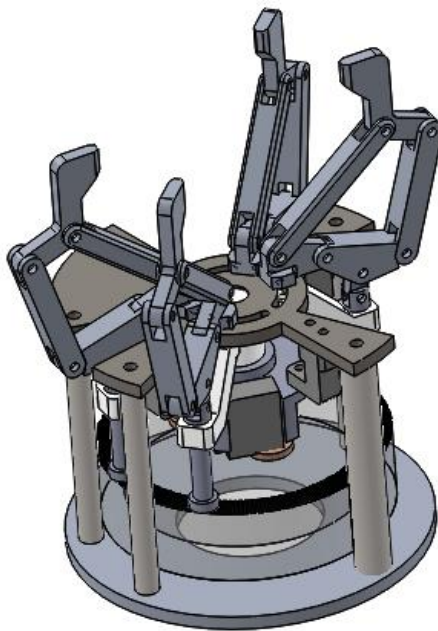


Figura 3-8 Concepto 3 para gripper reconfigurable.

Retomando las etapas de diseño mencionadas en el capítulo 2, se puede apreciar que con los conceptos generados se cumplen las etapas 4 y 5 de la metodología, lo que permite tener modelos analizables y con funciones básicas.

### 3.2 Selección de componentes comerciales

Otra etapa importante en el diseño conceptual, es la selección de componentes comerciales, ya que es necesario integrarlos en el diseño y asegurar la funcionalidad del gripper. Se realizó una primera selección de componentes disponibles en el mercado y con la posibilidad de cumplir con los requerimientos del gripper, como actuadores, elementos mecánicos y electromecánicos. A continuación se describen los componentes comerciales más importantes en el funcionamiento del gripper reconfigurable de cuatro dedos.

Servomotor MX106-T.- Propuesto para accionar la apertura y cierre del gripper, permite controlar fuerza (controlando la corriente), posición y velocidad. Cuando es alimentado a 12 volts de corriente directa ofrece las siguientes capacidades: 8.4 Nm de torque, consumo de 5.2 Amper, y 45 rpm sin carga.



Figura 3-9 Servomotor Dynamixel MX106-T.

Servomotor HS-85BB.- Propuesto para el mecanismo de reposicionamiento angular de los dedos respecto a la palma del gripper. Ofrece muy alto torque en relación a su tamaño y cuando es alimentado a 6 volts de corriente directa tiene las siguientes características: torque de 3.0 kg-cm, consumo de 240 mA sin carga y velocidad de 0.16 s/60°.



Figura 3-10 Servomotor Hi-Tec HS-85BB.

Tornillo de potencia.- Tornillo rosca ACME de 0.5 pulgadas y paso 10 (hilos por pulgada). Utilizado para convertir el movimiento de rotación proporcionado por el servomotor en un desplazamiento lineal para la aplicación de fuerza de cierre.



Figura 3-11 Tornillo de potencia con rosca ACME de ½ pulgada paso 10.

En los temas siguientes se analizará cada concepto para el dedo y se determinará cual es la opción más viable en el diseño del gripper reconfigurable.

### 3.3 Análisis cinemático de gripper

#### 3.3.1 Grados de libertad del dedo

Utilizando la Ecuación 2-1 planteada en un apartado anterior se calculan los grados de libertad de la cadena cinemática utilizada en el concepto 3 del dedo. Para ello, es necesario crear un diagrama cinemático donde se representen claramente las uniones y eslabones del mecanismo. Además, es conveniente etiquetar los eslabones para tener una referencia congruente en los elementos. En la Figura 3-12 se muestra la manera en que etiquetaremos los eslabones, siendo F el elemento fijo, G el elemento empujador y A el elemento de sujeción del objeto.

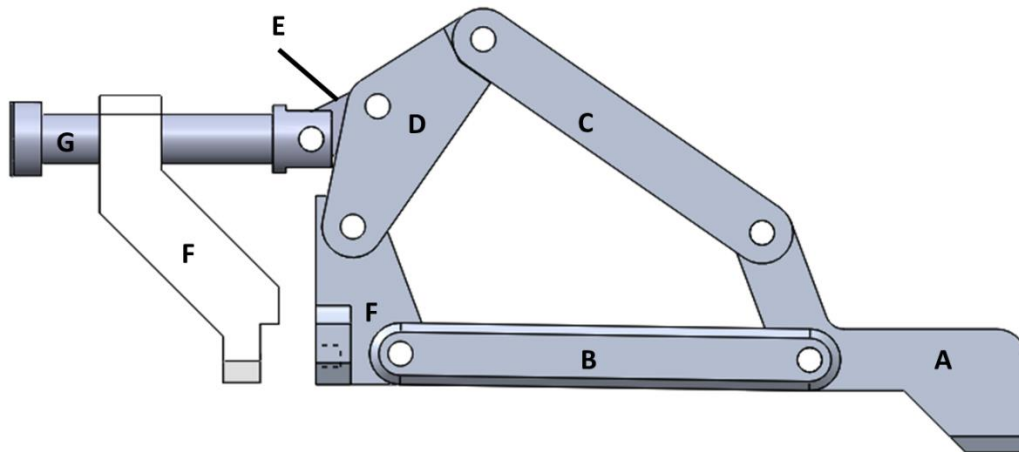


Figura 3-12 Identificación de eslabones de cadena cinemática.

Cabe mencionar que el dedo puede tener dos comportamientos dependiendo del tipo de agarre que se desee ejecutar, por ejemplo, si se desea un agarre de precisión (con la “yema” del dedo o elemento A) los elementos C y D actuarán como un mismo eslabón; mientras que si se desea un agarre de fuerza (contacto de elementos A y B con el objeto), los elementos C y D se comportan como eslabones independientes. Lo anterior es posible debido a que se trata de un dedo sub-actuado tal como se mencionó en la revisión de literatura.

Para el agarre de precisión, se tiene el siguiente diagrama cinemático mostrado en la Figura 3-13. Se define el grado de movilidad  $\lambda = 3$  para ambos casos ya que se trata de un movimiento plano.

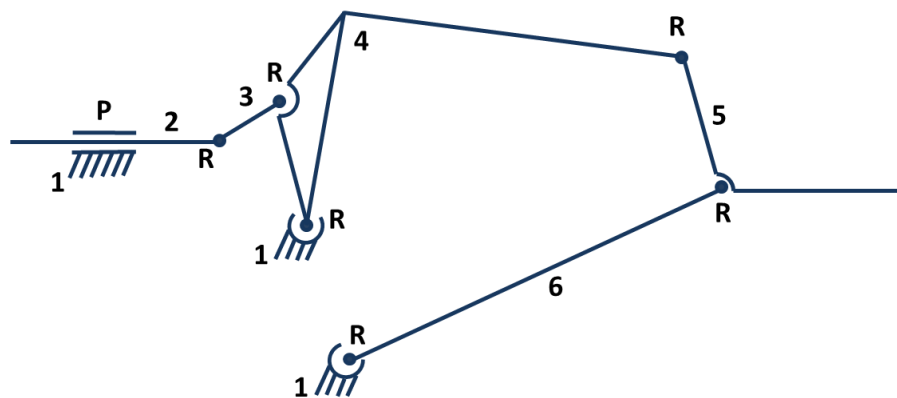


Figura 3-13 Diagrama cinemático para agarre de precisión.

Como se mencionó, en el agarre de precisión los elementos C y D actúan como un mismo eslabón; por lo tanto  $L = 6$ , el número de uniones  $j = 7$  y la suma de movimientos

relativos  $\Sigma f_i = \text{PRRRRRR} = 7$ . Aplicando los valores en la Ecuación 2-1 se determina que la cadena cinemática tiene un grado de libertad:

$$F = (3)(6 - 7 - 1) + 7$$

$$F = 1$$

Ahora se realizará el análisis para el dedo considerando un agarre de fuerza o envolvente (Figura 3-14), donde el elemento 7 es el primero en hacer contacto con el objeto, provocando una rotación entre los elementos 4 y 5. Aplicando los siguientes valores a la ecuación:  $\lambda = 3$ ,  $L = 7$ ,  $j = 8$ ,  $\Sigma f_i = \text{PRRRRRRR} = 8$ , se encuentra que el mecanismo tiene dos grados de libertad.

$$F = (3)(7 - 8 - 1) + 8$$

$$F = 2$$

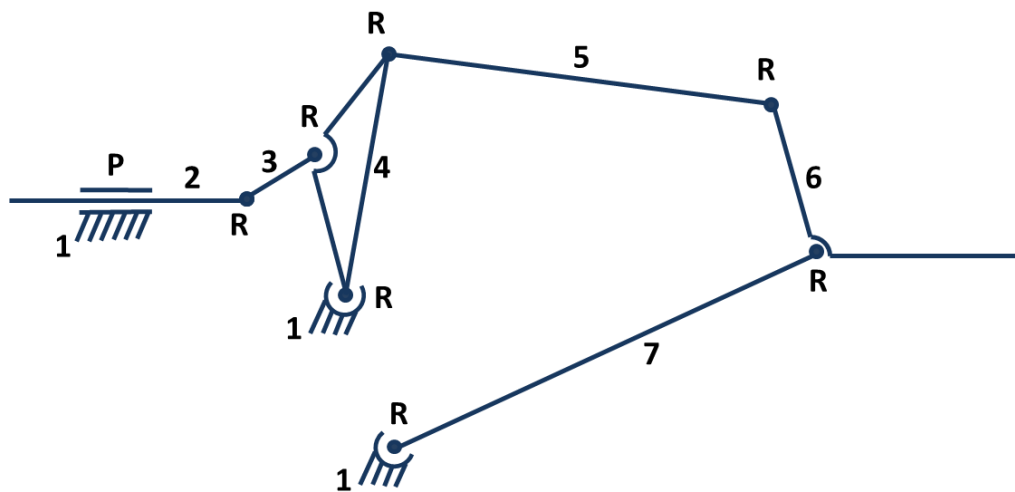


Figura 3-14 Diagrama cinemático para agarre de fuerza.

Debido a que solamente se tiene un actuador, con esto se comprueba que se trata de un mecanismo sub-actuado al tener más grados de libertad que actuadores, tal como se menciona en la literatura.

### 3.3.2 Cálculo de cinemática

El análisis cinemático es importante ya que se requiere determinar el desplazamiento de los dedos y las fuerzas requeridas para una sujeción estable o en equilibrio. El comportamiento dinámico juega un rol importante en tareas de manipulación [17], sin embargo, en este desarrollo el enfoque se dará a tareas de sujeción.



De acuerdo con Laliberté y otros [5], en este tipo de análisis se puede considerar que los dedos se mueven relativamente despacio y que las fuerzas inerciales son despreciables en comparación con la fuerza de sujeción, por lo tanto no se considera la dinámica del sistema y se asume que el análisis estático es suficiente para caracterizar el comportamiento del gripper.

El análisis cinemático planteado en esta sección permite conocer la posición del elemento empujador así como de cada nodo, dependiendo de la dimensión del objeto que se desee sujetar. En la Figura 3-15 se muestra el diagrama de cuerpo libre que se utilizó en el análisis, con el cual se pretende conocer la posición de los nodos en función de los ángulos y la longitud de los elementos de la cadena cinemática. El análisis se realizó considerando un segmento a la vez y se comenzó por los elementos de la “yema” del dedo (nodo 8 de la figura) hasta llegar al elemento empujador (nodo 9 de la figura).

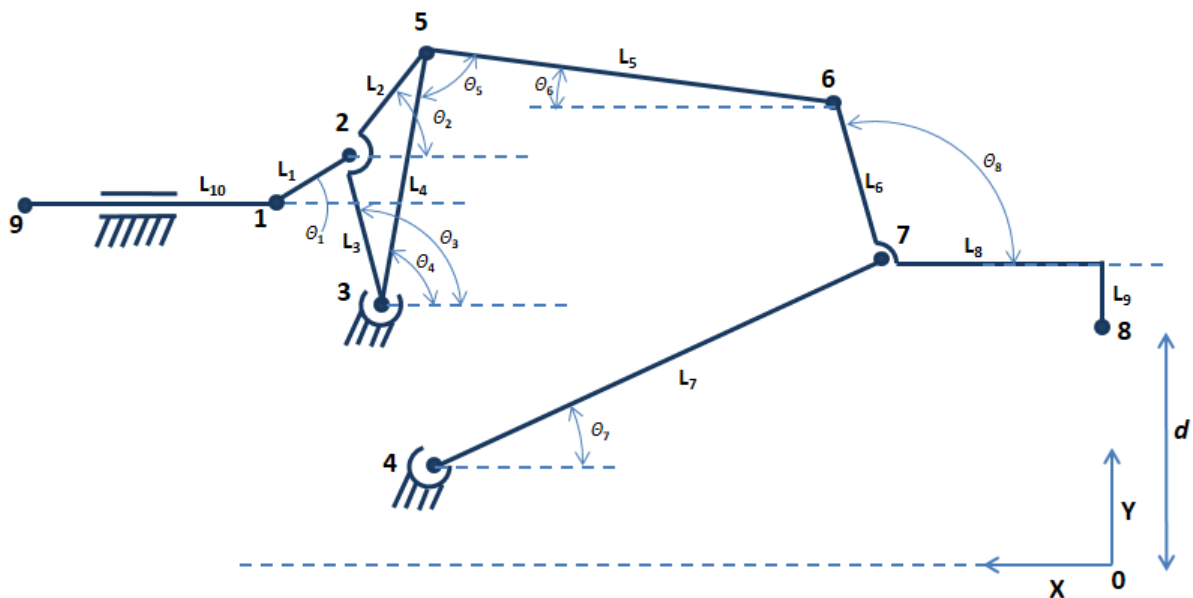


Figura 3-15 Diagrama de cuerpo libre para análisis cinemático.

Para este análisis es necesario asumir lo siguiente:

- Los cuatro dedos del gripper cierran y abren de manera simultánea, por lo tanto este análisis cinemático aplica para todos los dedos.
- La dimensión de los elementos ( $L_1$  a  $L_{10}$ ) y el ángulo  $\Theta_8$  son conocidos.
- Los nodos 3 y 4 son puntos fijos, por lo tanto se conocen las coordenadas  $X$  y  $Y$  de dichos puntos.
- El elemento  $L_{10}$  tiene movimiento prismático paralelo al eje  $X$ , por lo tanto se conoce su coordenada en el eje  $Y$ .

- La dimensión permitida para el objeto comprende un rango de 10 a 100 mm.
- Se ubicó el origen sobre el eje central del gripper.

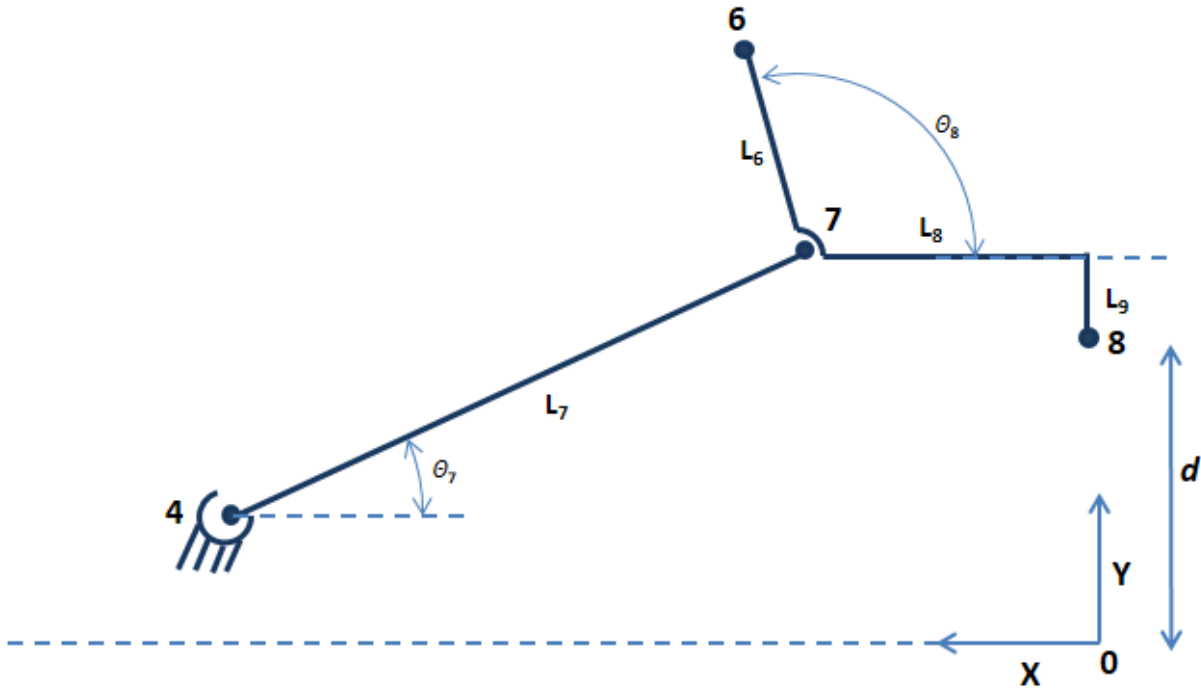


Figura 3-16 Diagrama de cuerpo libre para segmento 6-7-8.

Del análisis del segmento 6-7-8 (Figura 3-16) obtenemos las siguientes ecuaciones para el punto 7:

Ecuación 3-1

$$y_7 = L_9 + d$$

Donde  $d$  representa la mitad de la dimensión del objeto.

Ecuación 3-2

$$\theta_7 = \text{sen}^{-1} \left( \frac{y_7 - y_4}{L_7} \right)$$

Ecuación 3-3

$$x_7 = x_4 - L_7 \cdot \cos \theta_7$$

Las ecuaciones para el punto 8 quedan de la siguiente manera:

Ecuación 3-4

$$x_8 = x_7 - L_8$$

Ecuación 3-5

$$y_8 = d$$

Para el punto 6 se encuentra que:

Ecuación 3-6

$$x_6 = x_7 + L_6 \cdot \text{sen}(\theta_8 - 90^\circ)$$

Ecuación 3-7

$$y_6 = y_7 + L_6 \cdot \text{cos}(\theta_8 - 90^\circ)$$

Para calcular la posición del punto 5 se utiliza el triángulo formado por el segmento 3-5-6 (Figura 3-17).

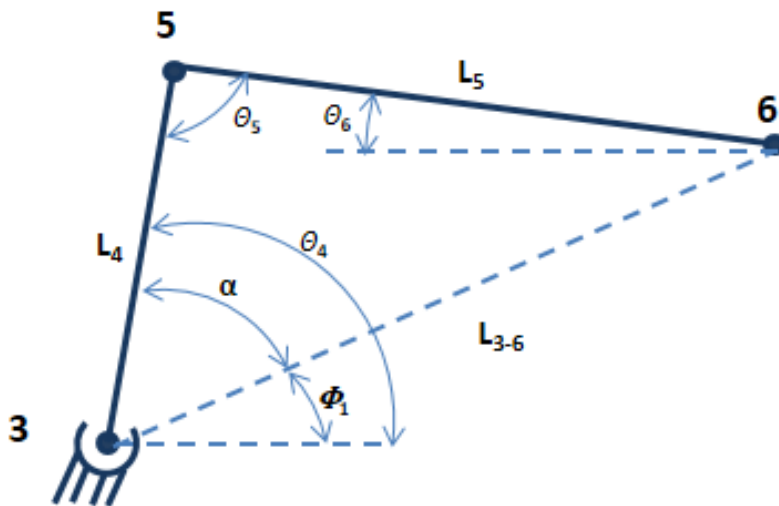


Figura 3-17 Diagrama de cuerpo libre para segmento 3-5-6.

Ecuación 3-8

$$L_{3-6} = \sqrt{(x_6 - x_3)^2 + (y_6 - y_3)^2}$$

Ecuación 3-9

$$\phi_1 = \text{sen}^{-1}\left(\frac{y_6 - y_3}{L_{3-6}}\right)$$

Aplicando ley de cosenos se encuentra que:

Ecuación 3-10

$$L_5^2 = L_4^2 + L_{3-6}^2 - 2 \cdot L_4 \cdot L_{3-6} \cdot \cos \alpha$$

Despejando  $\alpha$ :

Ecuación 3-11

$$\alpha = \cos^{-1} \left( \frac{-L_5^2 + L_4^2 + L_{3-6}^2}{2 \cdot L_4 \cdot L_{3-6}} \right)$$

Ecuación 3-12

$$\theta_4 = \Phi_1 + \alpha$$

Ecuación 3-13

$$x_5 = x_3 - L_4 \cdot \cos \theta_4$$

Ecuación 3-14

$$y_5 = y_3 + L_4 \cdot \sen \theta_4$$

Ecuación 3-15

$$\theta_6 = \sen^{-1} \left( \frac{|y_5 - y_6|}{L_5} \right)$$

En la Ecuación 3-15 se consideró el valor absoluto de la diferencia entre la coordenada Y del punto 5 y 6, debido a que conforme se cierra el gripper, el ángulo  $\theta_6$  cambia de cuadrante.

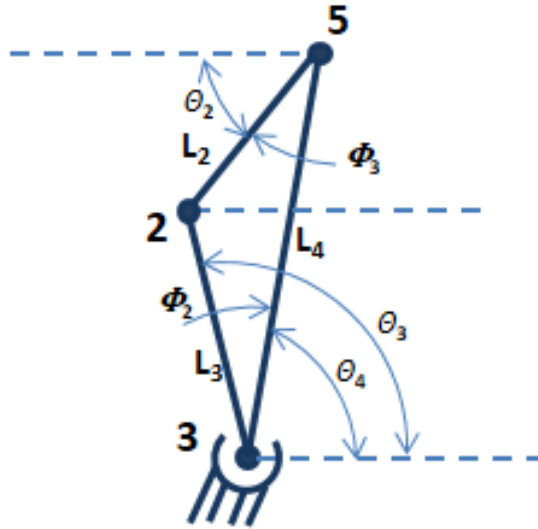


Figura 3-18 Diagrama de cuerpo libre para segmento 2-3-5.

Para obtener las coordenadas del punto 2 se consideró el triángulo formado por el segmento 2-3-5 (Figura 3-18). Aplicando ley de cosenos y despejando se encontró que:

Ecuación 3-16

$$\phi_2 = \cos^{-1} \left( \frac{L_2^2 - L_3^2 - L_4^2}{-2 \cdot L_3 \cdot L_4} \right)$$

Ecuación 3-17

$$\theta_3 = \phi_2 + \theta_4$$

Ecuación 3-18

$$\phi_3 = \cos^{-1} \left( \frac{-L_3^2 + L_2^2 + L_4^2}{2 \cdot L_2 \cdot L_4} \right)$$

Ecuación 3-19

$$\theta_2 = \theta_4 - \phi_3$$

Ecuación 3-20

$$x_2 = x_5 + L_2 \cdot \cos \theta_2$$

Ecuación 3-21

$$y_2 = y_5 - L_2 \cdot \text{sen } \theta_2$$

Finalmente, se consideró el segmento 9-1-2 (Figura 3-19) para obtener las coordenadas de los puntos 1 y 9.

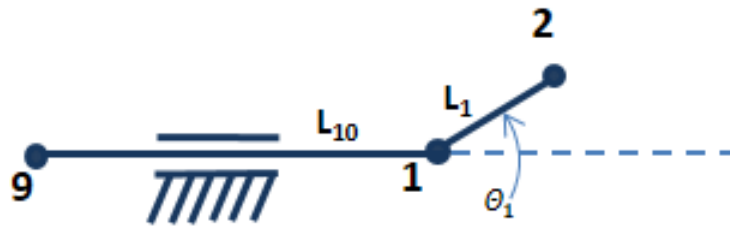


Figura 3-19 Diagrama de cuerpo libre para segmento 9-1-2.

Ecuación 3-22

$$\theta_1 = \text{sen}^{-1} \left( \frac{y_2 - y_1}{L_1} \right)$$

Ecuación 3-23

$$x_1 = x_2 + L_1 \cdot \cos \theta_1$$

$$y_1 = y_9 = \text{conocida por diseño}$$

El punto 9 corresponde al elemento empujador para la apertura y cierre del gripper, por lo tanto, conociendo el valor inicial y valor final de dicho punto se puede calcular la carrera o desplazamiento total que requiere el empujador para llevar el gripper desde su apertura máxima hasta la apertura mínima y viceversa.

Ecuación 3-24

$$x_9 = x_1 + L_{10}$$

Realizando algunas modificaciones a las ecuaciones planteadas, fue posible evaluar la posición para los tres conceptos propuestos con la intención de realizar una comparación del comportamiento de la cadena cinemática correspondiente a cada concepto. En la Figura 3-20 se muestra una gráfica de la posición del elemento empujador respecto a la dimensión del objeto, en otras palabras, determina el desplazamiento que deberá generar el actuador de apertura/cierre dependiendo de la dimensión del objeto.

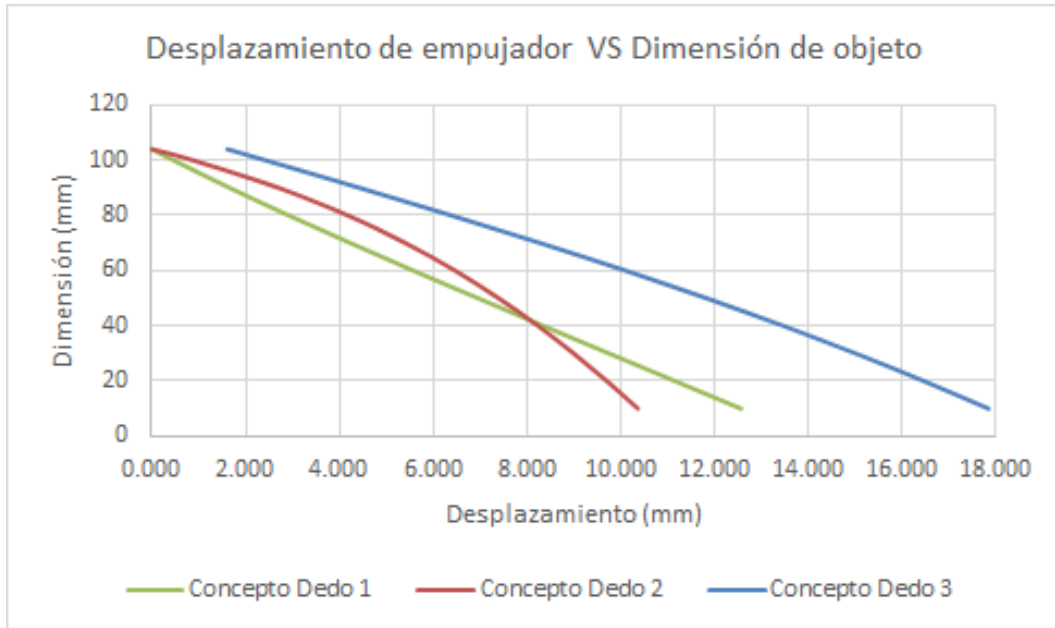


Figura 3-20 Gráfica de comportamiento de desplazamiento para los tres conceptos de dedo.

### 3.3.3 Cálculo de fuerza requerida para sujeción

Antes de comenzar con el cálculo de la fuerza requerida para sujetar el objeto, se realizó un experimento para obtener los coeficientes de fricción estático entre neopreno (material propuesto en la “yema” del dedo) y algunos materiales como nylamid, bronce, aluminio, acero inoxidable y acero al carbón. Se aplicó la ecuación descrita por Davis [51] para obtener el coeficiente de fricción estático de los materiales mencionados y se utilizó un plano inclinado sobre el cual se colocaron los objetos con la finalidad de determinar el ángulo de deslizamiento y de esa manera obtener una estimación de dicho coeficiente. En Tabla 3-1 se muestran los resultados obtenidos del experimento.

Tabla 3-1 Coeficientes de fricción,  $\mu_s$ , obtenidos experimentalmente para diferentes materiales.

$\mu_s$	Neopreno
Nylamid	0.477
Acero inoxidable	0.511
Acero al carbono	0.635
Bronce	0.704
Aluminio	0.715
Neopreno	0.947

De acuerdo con Pettersson y otros [8], Nazakawa y otros [10], Wu y otros [52], Kolluru y otros [53], si el objetivo de sujetar es para desplazar un objeto de un lugar a otro una vez que es agarrado por el gripper, se necesita considerar la aceleración en el movimiento del objeto y es posible determinar la fuerza requerida para sujetar un objeto siguiendo el esquema de la Figura 3-21.

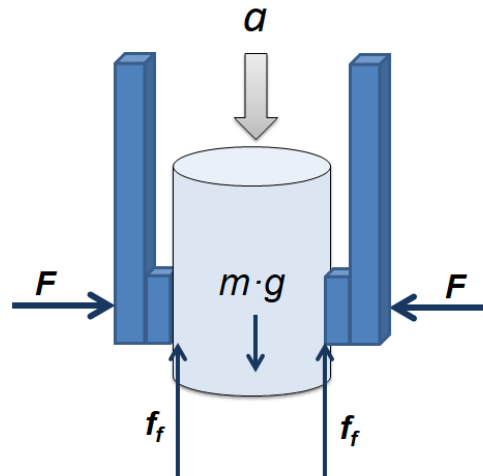


Figura 3-21 Esquema de fuerzas actuando en la sujeción de un objeto.

Para inmovilizar el objeto es necesario que se cumpla la siguiente condición:

Ecuación 3-25

$$F_o \leq \mu \cdot F$$

Donde  $F_o$  es la fuerza resultante considerando la acción de la gravedad, la masa del objeto y la aceleración,  $\mu$  es el coeficiente de fricción entre el objeto y los dedos, y  $F$  es la fuerza aplicada por los dedos [24], [27].

De acuerdo con Nazakawa y otros [10], y Arzanpour y otros [21], se puede determinar la fuerza mínima requerida aplicada por un solo dedo para inmovilizar el objeto considerando la siguiente ecuación:

Ecuación 3-26

$$F_{1d} = \frac{m(a + g)}{\mu \cdot \#dedos}$$

Recordando que en las primeras etapas de diseño se plantearon especificaciones para el gripper, dentro de las cuales se encontraba el tamaño y peso máximo del objeto a sujetar. El peso máximo del objeto será de 5 kg y la aceleración máxima que se permitirá una vez sujeto el objeto será de 5 m/s<sup>2</sup>. El peor escenario se presenta cuando el gripper ya está agarrando un objeto y lo desplaza hacia abajo con la aceleración planteada, ya que dicha aceleración se estará sumando a la acción de la gravedad. Si la aceleración del objeto no se considera en el cálculo de la fuerza, el objeto podría



salir proyectado debido a la inercia provocada por la aceleración. Además, se consideró un objeto de Nylamid como material, con un coeficiente de fricción estático de 0.477. Este material presentó el menor coeficiente de fricción contra el neopreno de acuerdo con el experimento descrito al inicio de esta sección.

Sustituyendo los valores en la Ecuación 3-26 se obtiene que:

$$F_{1d} = \frac{5kg(5\frac{m}{s^2} + 9.81\frac{m}{s^2})}{0.477 \cdot 4}$$

$$F_{1d} = 38.81 N$$

Se puede deducir que a mayor número de dedos, la fuerza requerida por cada dedo será menor, lo que brindará ventajas al momento de optimizar el diseño ya que los esfuerzos presentados en los elementos del dedo serán menores. Lo mismo ocurre al incrementar el coeficiente de fricción estático del material.

Para calcular la fuerza requerida para sujetar el objeto al cerrar el gripper, se consideró el diagrama de cuerpo libre de la Figura 3-22. La fuerza  $F_8$  corresponde a la fuerza requerida para inmovilizar el objeto, obtenida de la Ecuación 3-26. La fuerza  $F_9$  corresponde a la fuerza que deberá aplicarse en el empujador ( $L_{10}$ ) para lograr la sujeción.

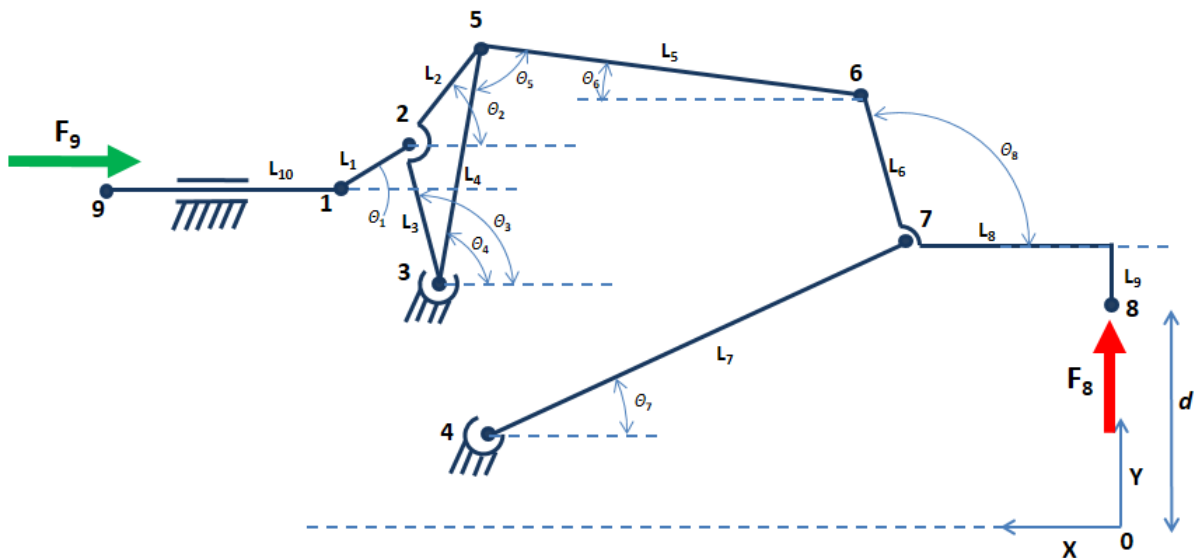


Figura 3-22 Diagrama de cuerpo libre para calcular fuerza requerida.

Se analizó el dedo comenzando por el elemento  $L_7$  y el segmento 6-7-8 (Figura 3-23) considerando un balance de momentos en el punto 6.

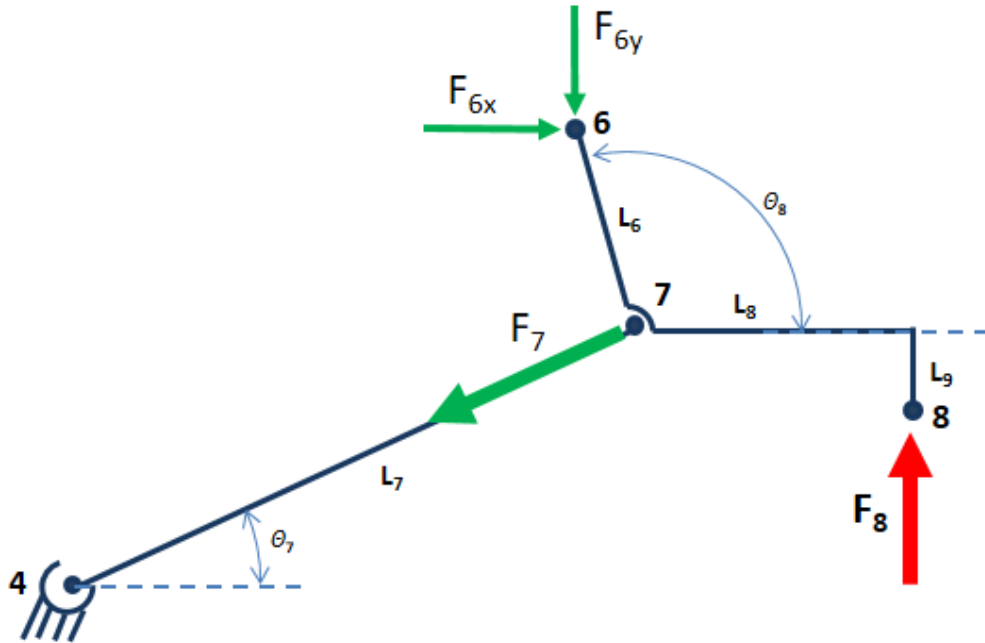


Figura 3-23 Diagrama de cuerpo libre para calcular fuerza en puntos 6 y 7.

Ecuación 3-27

$$\Sigma M_6 = 0$$

$$-F_7 \cdot \cos \theta_7 \cdot (y_6 - y_7) - F_7 \cdot \sin \theta_7 \cdot (x_6 - x_7) + F_8 \cdot (x_6 - x_8) = 0$$

Despejando  $F_7$  se encontró que:

Ecuación 3-28

$$F_7 = \frac{F_8 \cdot (x_6 - x_8)}{\cos \theta_7 \cdot (y_6 - y_7) + \sin \theta_7 \cdot (x_6 - x_7)}$$

Haciendo sumatoria de fuerzas en el segmento 6-7-8 se obtuvo:

$$\Sigma F = 0$$

Ecuación 3-29

$$F_{6x} = F_{7x} = F_7 \cdot \cos \theta_7$$

Ecuación 3-30

$$F_{6y} = F_8 - F_7 \cdot \sin \theta_7$$

Después se consideró un balance de momentos en el punto 3 del diagrama de cuerpo libre de la Figura 3-24 para obtener:

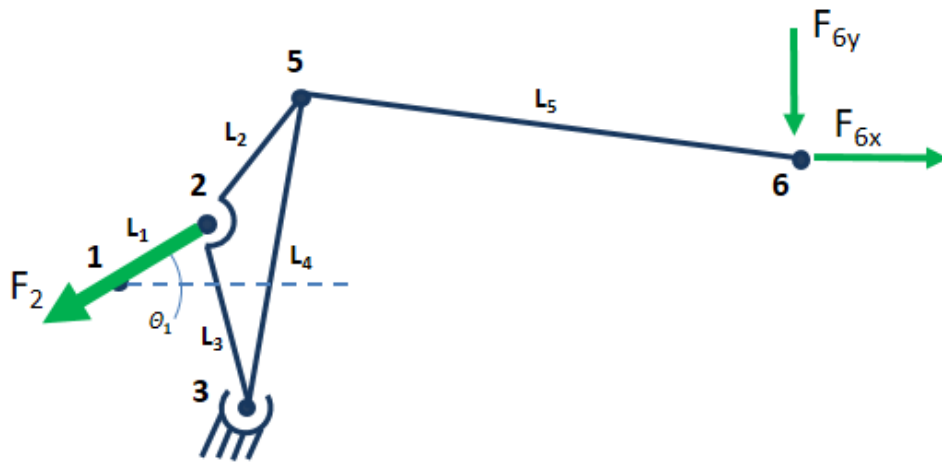


Figura 3-24 Diagrama de cuerpo libre para calcular fuerza en el punto 2.

Ecuación 3-31

$$\Sigma M_3 = 0$$

$$F_2 \cdot \cos \theta_1 \cdot (y_2 - y_3) + F_2 \cdot \sin \theta_1 \cdot (x_2 - x_3) - F_{6y} \cdot (x_3 - x_6) - F_{6x} \cdot (y_6 - y_3) = 0$$

Se despejó  $F_2$  y se obtuvo:

Ecuación 3-32

$$F_2 = \frac{F_{6y} \cdot (x_3 - x_6) + F_{6x} \cdot (y_6 - y_3)}{\cos \theta_1 \cdot (y_2 - y_3) + \sin \theta_1 \cdot (x_2 - x_3)}$$

Las fuerzas que actúan el elemento  $L_1$  se obtuvieron con una sumatoria de fuerzas (Figura 3-25).

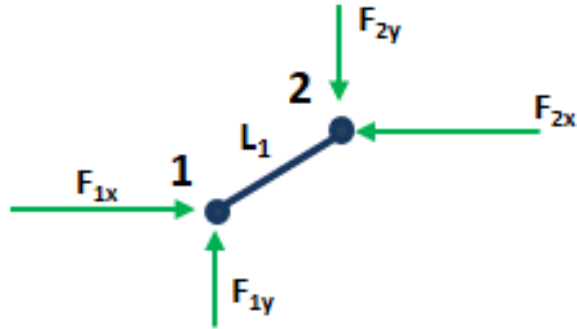


Figura 3-25 Diagrama de cuerpo libre para fuerzas en elemento L<sub>1</sub>.

Ecuación 3-33

$$F_{1x} = F_{2x} = F_2 \cdot \cos \theta_1$$

Ecuación 3-34

$$F_{1y} = F_{2y} = F_2 \cdot \sin \theta_1$$

Finalmente se obtuvieron las fuerzas en el punto 9 realizando sumatoria de fuerzas en el elemento L<sub>10</sub> (Figura 3-26).

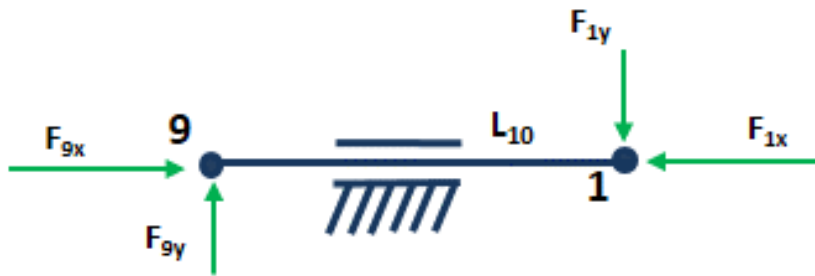


Figura 3-26 Diagrama de cuerpo libre para fuerzas en elemento L<sub>10</sub>.

Ecuación 3-35

$$F_{9x} = F_{1x}$$

Ecuación 3-36

$$F_{9y} = F_{1y}$$

En la Tabla 3-2 se muestran los valores para los datos conocidos de la cinemática del dedo. Sustituir dichos valores en la Ecuación 3-1 a la Ecuación 3-24 permitió calcular la posición de los nodos y el desplazamiento del empujador en función del tamaño del objeto.

Tabla 3-2 Datos conocidos de la cadena cinemática del concepto 3.

Dato	Valor	Unidad
x3	102.235	mm
y3	40.61	mm
x4	94.535	mm
y4	20	mm
y1	54.5	mm
L1	12	mm
L2	20.251	mm
L3	19.937	mm
L4	37.002	mm
L5	55	mm
L6	22.001	mm
L7	66.285	mm
L8	28.25	mm
L9	15.675	mm
L10	53.2	mm
$\theta_8$	110.49	°
d	$4.634 < d < 56$	mm

Con la Ecuación 3-26 fue posible calcular la fuerza de empuje requerida para sujetar un objeto en el peor escenario (mayor peso, mayor dimensión y menor coeficiente de fricción). Sustituyendo dicha fuerza y los valores de la Tabla 3-2 en la Ecuación 3-27 a la Ecuación 3-36 fue posible calcular la mayor fuerza requerida en el elemento empujador. En la Figura 3-27 se muestra el comportamiento del gripper en función del tamaño del objeto.

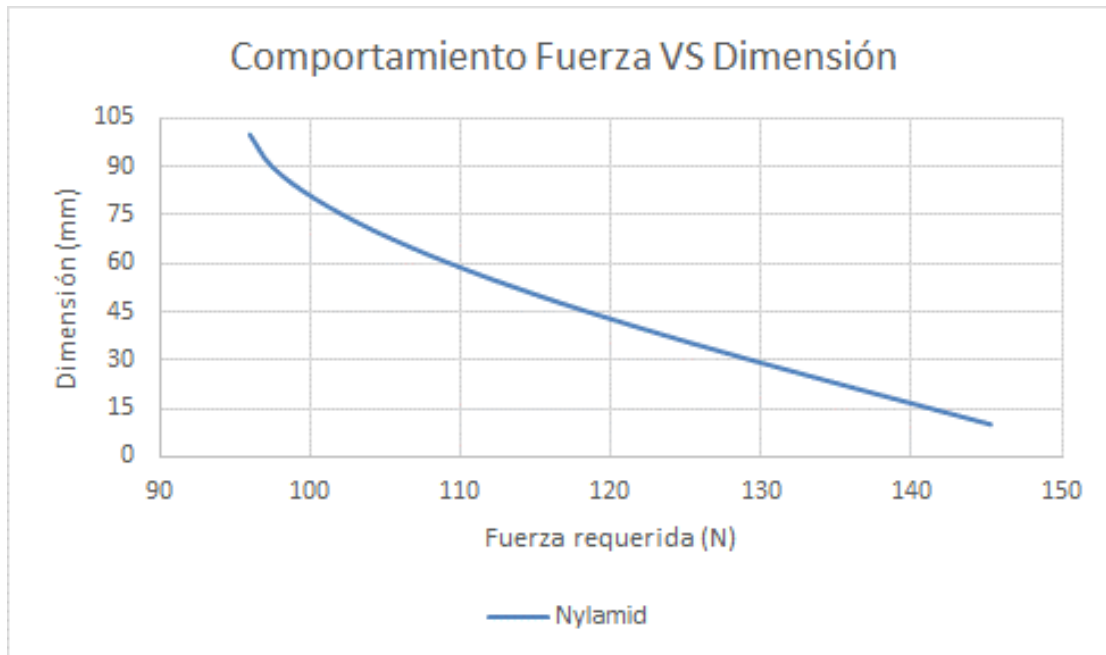


Figura 3-27 Gráfica de fuerza requerida en empujador en función del tamaño del objeto.

Cabe mencionar, que el concepto que se seleccionó para el gripper, considera que el avance (cierre) del gripper se realiza mediante el empuje o desplazamiento lineal generado por un tornillo rosca ACME; sin embargo, debido al mecanismo de reconfiguración de los dedos no es posible utilizar el mismo sistema para retraer los dedos, lo que requirió utilizar un resorte para forzar el regreso de los dedos a su posición inicial.

Dicho lo anterior, es necesario considerar la fuerza requerida para comprimir el resorte en cada dedo, misma que dependerá del desplazamiento del empujador necesario para lograr el cierre total del gripper. Juvinall y Saunders [39], plantearon la siguiente ecuación para la constante del resorte  $k$ :

Ecuación 3-37

$$k = \frac{F_r}{\delta}$$

Donde  $F_r$  es la fuerza almacenada en el resorte a la compresión de manera que se genere un desplazamiento  $\delta$ . Despejando la fuerza y aplicando las reglas para analizar resortes en paralelo encontramos que:

Ecuación 3-38

$$F_r = k_{eq} \cdot \delta$$

Donde  $k_{eq}$  representa la suma de las constantes de los cuatro resortes. Los datos del resorte seleccionado se muestran en la Tabla 3-3.

Tabla 3-3 Características del resorte de compresión.

# de parte	
# de parte	LC 041GH 06S
Diámetro externo	13.716 mm
Diámetro del agujero	14.274 mm
Diámetro del alambre	1.041 mm
Carga a altura sólida	27.043 N
Altura libre	31.750 mm
Constante	1.10 N/mm
Altura sólida	7.010 mm
Diámetro de flecha	11.049 mm
# de espirales	4.5
Espirales totales	6.5
Material	Acero inoxidable

Para obtener la fuerza de empuje que necesita aplicar el tornillo ACME, es necesario considerar la fuerza aplicada en los cuatro dedos y sumar la fuerza a vencer en los cuatro resortes. En la Figura 3-28 se muestra el comportamiento del gripper considerando la aplicación de fuerza en los cuatro dedos para diferentes materiales, incluyendo los cuatro resortes.

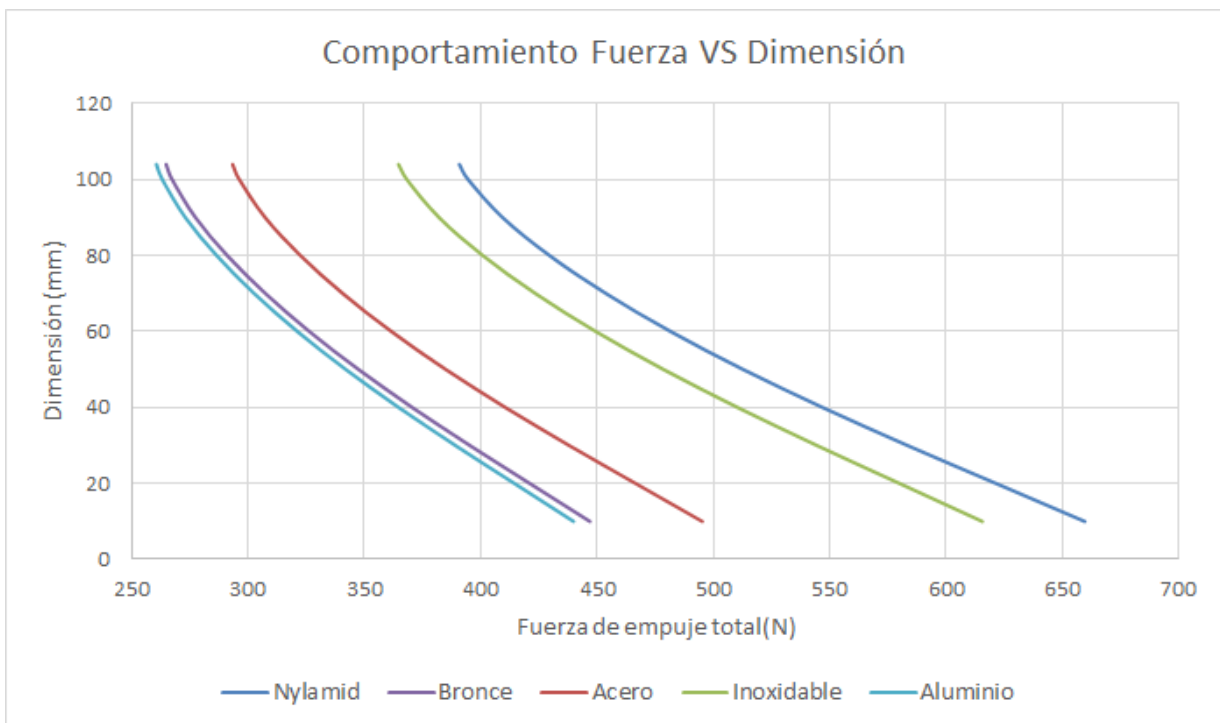


Figura 3-28 Gráfica de fuerza total dependiente del tamaño y material del objeto.

### 3.3.4 Cálculo de torque y revoluciones requeridas para sujeción

Conociendo el desplazamiento requerido por el empujador y con los datos del tornillo rosca ACME (Tabla 3-4), es posible calcular las revoluciones que se requieren en el servomotor que acciona el mecanismo de apertura/cierre del gripper así como el torque requerido por el servomotor que acciona al tornillo.

Tabla 3-4 Características de tornillo ACME de ½ pulgada paso 10.

Características tornillo ACME ½" – paso 10		
Diámetro ( $D$ )	0.0127	m
Diámetro medio ( $dm$ )	0.01143	m
Paso ( $L$ )	0.00254	m
$\mu_s$ tornillo-tuerca ( $f$ )	0.74	
Ángulo de carga ( $\alpha_n$ )	14.5	°

La relación entre las revoluciones y el desplazamiento está dada por la siguiente ecuación:

Ecuación 3-39

$$\text{Revoluciones} = \frac{\text{Desplazamiento requerido}}{\text{Paso del tornillo}}$$

Se consideró el paso del tornillo seleccionado y el desplazamiento del empujador obtenido del análisis cinemático y se obtuvo que:

$$\text{Revoluciones} = \frac{17.948 \text{ mm}}{2.54 \text{ mm/rev}}$$

$$\text{Revoluciones} = \mathbf{7.066}$$

Se substituyó el valor de fuerza de empuje del peor escenario (659.6 N, Figura 3-28) y los datos del tornillo ACME en la Ecuación 2-17 y se obtuvo el valor de torque que requiere aplicar el servomotor para sujetar el objeto:

$$T = \frac{(659.6 \text{ N})(0.01143 \text{ m})}{2} \cdot \frac{(0.74) \cdot \pi \cdot (0.01143 \text{ m}) + (0.00254 \text{ m}) \cdot \cos(14.5^\circ)}{\pi \cdot (0.01143 \text{ m}) \cdot \cos(14.5^\circ) - (0.74)(0.00254 \text{ m})}$$



$$T = 3.32816 \text{ Nm}$$

El servomotor utilizado para accionar la apertura y cierre del gripper es un Dynamixel MX106-T el cual puede proporcionar un torque máximo de 8.4 Nm alimentado con 12 Volts de corriente directa, de tal manera que si la relación motriz entre el tornillo ACME y el servomotor es de 1:1, el servomotor será capaz de proporcionar el torque requerido y con un factor de seguridad de 2.52.

En la gráfica de la Figura 3-29 se muestra la relación entre la posición y torque del servomotor para un objeto de diferente dimensión pero del mismo peso. Se puede observar que el comportamiento no es lineal y que a mayor apertura del gripper, se requiere menor torque aplicado. Esto significa que si la zona de agarre en el objeto es de menor dimensión, el gripper requiere aplicar mayor fuerza para lograr la sujeción del objeto.

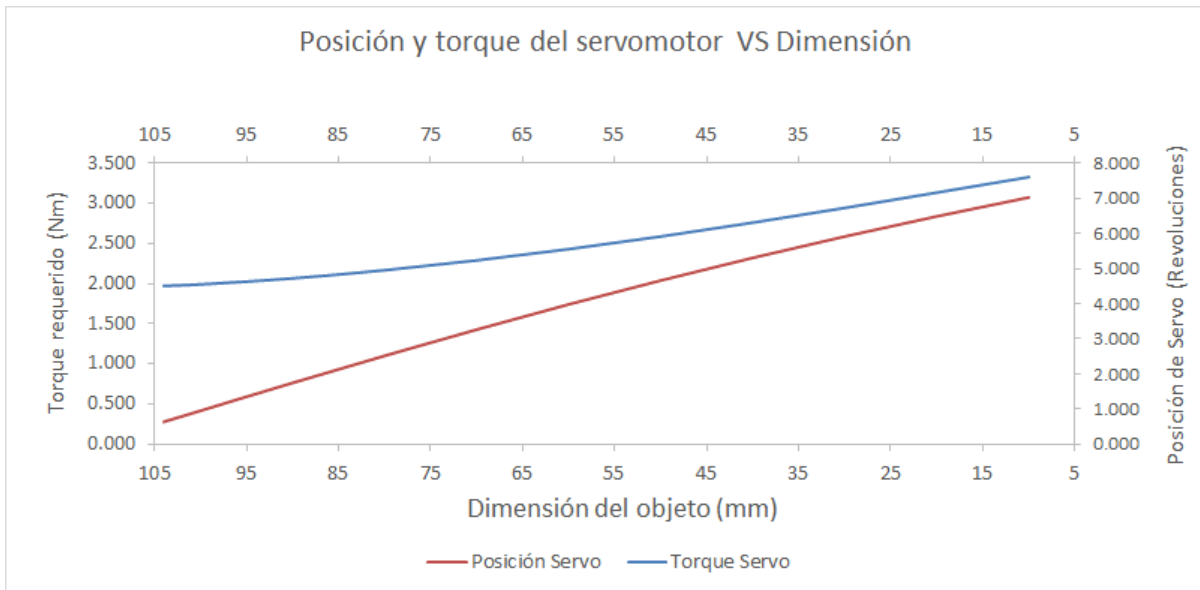


Figura 3-29 Gráfica de posición y torque del servo dependiendo del tamaño del objeto.

---

---

# **Capítulo 4 – Análisis MEF para obtención de esfuerzos, deformación y vida útil de gripper reconfigurable**

---

---

## **Capítulo 4. Análisis MEF para obtención de esfuerzos, deformación y vida útil de gripper reconfigurable**

Una vez que se tiene un modelo analizable y los valores de fuerza en cada nodo, el siguiente paso es analizar los esfuerzos en cada componente con la finalidad de determinar si alguno de ellos requerirá un rediseño o bien, pueda ser optimizado. Del análisis cinemático se obtuvo que el caso donde se requiere mayor fuerza aplicada es cuando el dedo se encuentra en posición cerrada, es decir, cuando el objeto que se pretende sujetar tiene la dimensión más pequeña permitida por el gripper.

### **4.1 Análisis de esfuerzos por Método de Elemento Finito a conceptos de dedo**

Se realizó un estudio por el Método de Elemento Finito (MEF) a los tres conceptos de dedo para determinar los esfuerzos máximos presentados por las fuerzas anteriormente calculadas. Para esto, se aplicó el procedimiento planteado en la sección 2.5 para realizar el análisis utilizando la plataforma Workbench de ANSYS en su versión 15.0. Primero, se exportó el modelo 3D de Solidworks 2016 a la plataforma Workbench. En este paso se recomienda utilizar el formato Parasolid cuya extensión es “.x\_t” ya que no presenta problemas al momento de traducir desde un archivo nativo de Solidworks. Otros formatos disponibles para exportar el modelo son STEP e IGES, sin embargo, con el formato STEP el tamaño del archivo suele ser mayor y el formato IGES ha presentado problemas de superficies o caras faltantes exportando desde Solidworks.

El análisis realizado en el programa de elemento finito fue de tipo estático. Se definió el material aluminio para la construcción del dedo. Esto porque para la construcción del gripper, se requiere un material ligero y a su vez resistente, sin comprometer el peso final del dispositivo y por ende su costo.

Dicho lo anterior, se contempló el Aluminio como material para en análisis del dedo dadas sus características de densidad y resistencia. En la Tabla 4-1 se muestran las propiedades de una Aleación de Aluminio General existentes en la librería de materiales de ANSYS.

Tabla 4-1 Propiedades mecánicas del Aluminio usado en el análisis MEF.

Propiedades de Aleación de Aluminio General*		
Propiedad	Valor	Unidad
Densidad	2770	Kg/m <sup>3</sup>
Módulo de Young	71	GPa
Relación de Poisson	0.33	-
Esfuerzo de cedencia a tensión	280	MPa
Esfuerzo de cedencia a compresión	280	MPa
Módulo Cortante	26	GPa

\* Obtenidas del Engineering Data de ANSYS

#### 4.1.1 Análisis MEF concepto dedo 1

Una vez que se definió el material y se importó el modelo 3D en la plataforma Workbench, se procedió a realizar el ensamble de los elementos que conforman al dedo. Las uniones que se consideran son de tipo “Joint” de revolución y no se considera fricción entre los componentes; recordando que se contempló únicamente el análisis para el comportamiento del gripper en sujeciones de precisión, es decir, cuando toma el objeto con el extremo (“yema”) del dedo; por lo tanto los elementos intermedios (miembro empujador y eslabón) permanecen con una unión rígida entre ellos. En la siguiente figura se muestran las uniones de revolución que se aplicaron al modelo 3D.

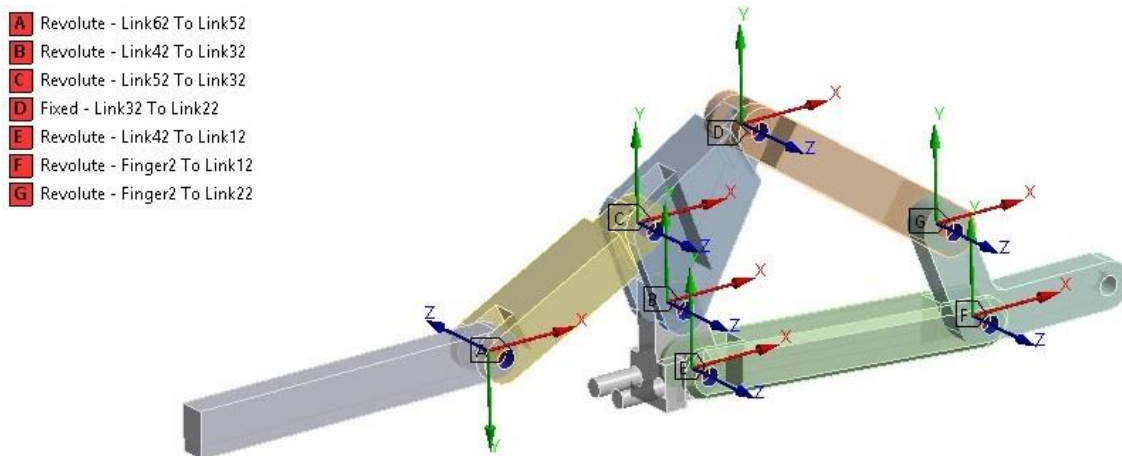


Figura 4-1 Uniones de tipo “Joint” de revolución entre elementos del concepto dedo 1.

Después se convirtió el modelo 3D a elementos finitos, es decir, se realiza el “Mallado” al modelo 3D. En esta operación se pueden o no, especificar los parámetros para la discretización del modelo, sin embargo, la calidad y tamaño de los elementos formados

dependerá de la capacidad del equipo de cómputo donde se realice el mallado. Las características del equipo de cómputo utilizadas en este trabajo son las siguientes: Procesador AMD A10-7300 1.9 – 3.2 Ghz, tarjeta gráfica ATI Radeon R6, 16 GB de memoria RAM y el tipo de elementos finitos utilizados son del tipo tetraedro.

Es importante realizar un análisis de convergencia de malla, esto es, encontrar el número de elementos finitos mínimo requerido para considerar que el resultado del análisis MEF es confiable. En la Figura 4-2 se muestra el mallado del modelo 3D en el cual, se consideraron los parámetros por defecto. Se puede observar que se generaron 10,928 nodos y se formaron 5,841 elementos. Más adelante se mostrará el resultado del análisis considerando la convergencia de malla.

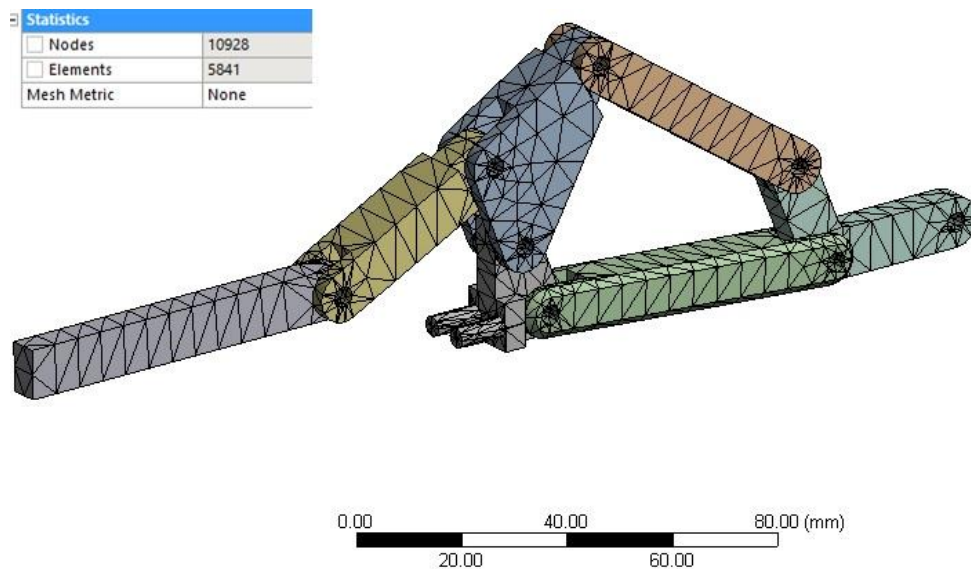


Figura 4-2 Mallado del modelo 3D del concepto dedo 1.

El siguiente paso en el análisis MEF fue especificar las restricciones del sistema, por lo tanto fue necesario indicarle al software que comportamiento tendrán los elementos del modelo 3D.

Debido a que se desea que el análisis se asemeje al comportamiento que tendrá el dedo al sujetar objetos, al elemento empujador se le agregó una restricción de desplazamiento en una de las caras, es decir, como el empujador se deslizará sobre otros componentes del gripper en sentido del eje “x”, se definió un desplazamiento igual a cero en los ejes “y” y “z”, dejando un desplazamiento libre en el eje “x”, tal como se muestra en la Figura 4-3. Se consideró el mismo criterio para el análisis de los conceptos siguientes.

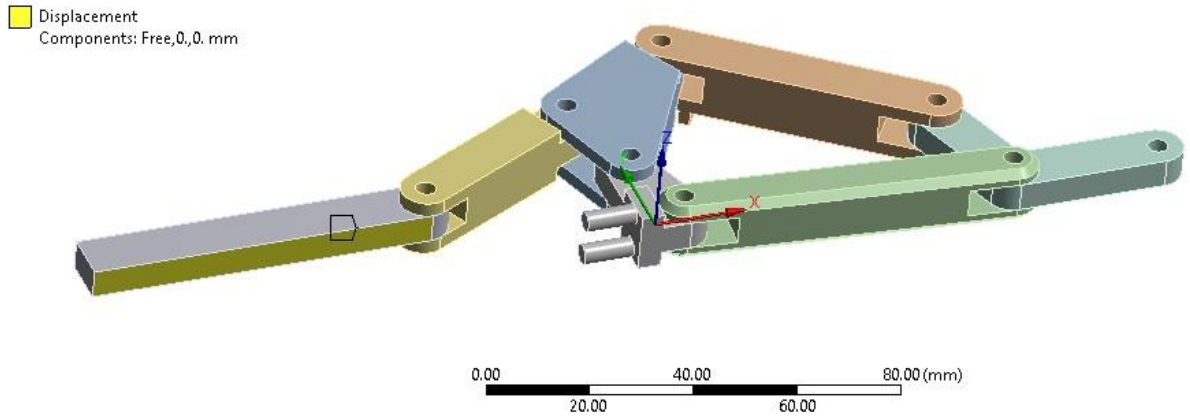


Figura 4-3 Restricción de desplazamiento en elemento empujador.

Después se especificaron los elementos fijos y las cargas en el dedo. Se consideró una fuerza de **38.81 N** aplicada en la “yema” del dedo, ya que dicha fuerza es la requerida para sujetar un objeto en el peor escenario, misma que se obtuvo en el análisis estático realizado en el capítulo 3. En la Figura 4-4 se muestra el modelo 3D con las restricciones y la carga aplicada.

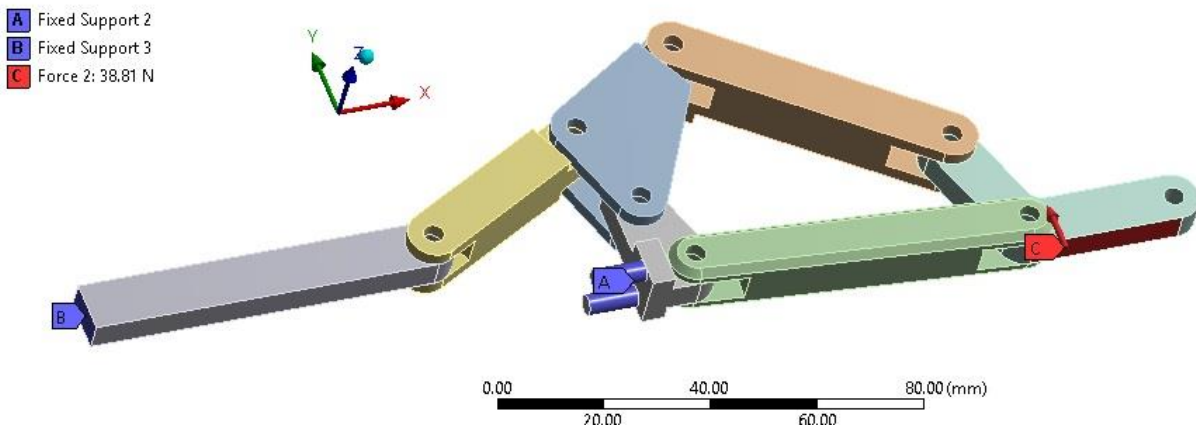


Figura 4-4 Modelo 3D de concepto dedo 1 con restricciones y cargas.

Una vez que el modelo estuvo listo para análisis MEF, se ejecutó la solución del sistema para obtener el esfuerzo equivalente (von Mises) y la deformación en los elementos. En la Figura 4-5 y la Figura 4-6 se muestra el esfuerzo equivalente y las deformaciones presentadas respectivamente.

**B: Static Structural Tesis**

Equivalent Stress  
Type: Equivalent (von-Mises) Stress  
Unit: MPa  
Time: 1  
30/01/2019 08:23 p. m.

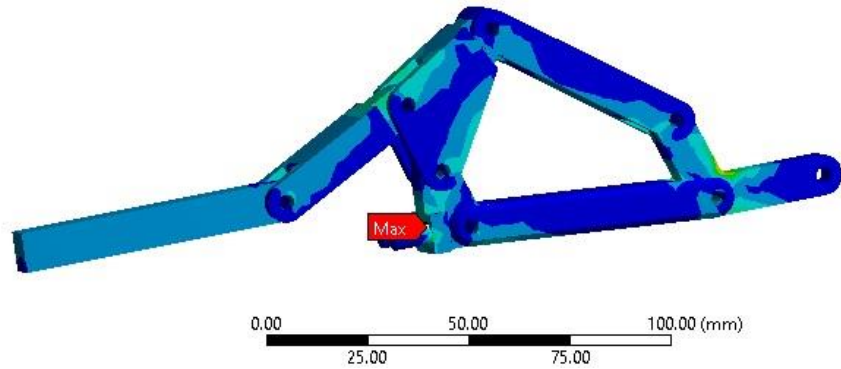
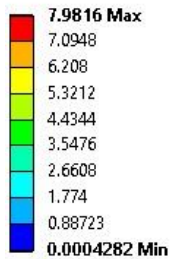


Figura 4-5 Esfuerzos equivalentes (von Mises) resultantes en concepto dedo 1 (MPa).

**B: Static Structural Tesis**

Total Deformation  
Type: Total Deformation  
Unit: mm  
Time: 1  
30/01/2019 08:24 p. m.

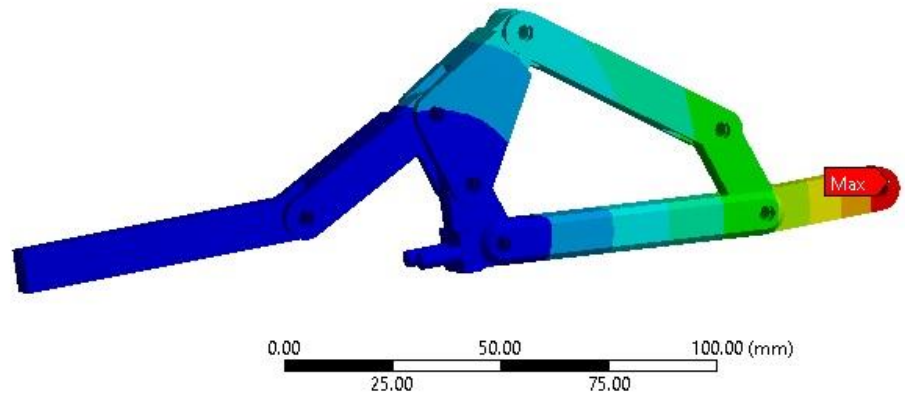
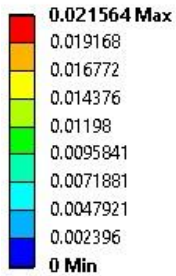


Figura 4-6 Deformación presentada en concepto dedo 1 (mm).

De los resultados se puede observar que el esfuerzo de von Mises máximo es de 7.98 MPa y se presenta una deformación máxima de 0.021 mm. Cabe señalar que los resultados anteriores no consideran el análisis de convergencia de malla. El tiempo de cómputo del análisis fue de 499 segundos en el equipo con las características descritas anteriormente

En la Figura 4-7 se muestra el remallado considerando un tamaño de elemento de 0.8 mm como máximo, ahora la malla es formada por 744,941 nodos y 500,729 elementos.

Statistics	
Nodes	744941
Elements	500729
Mesh Metric	None

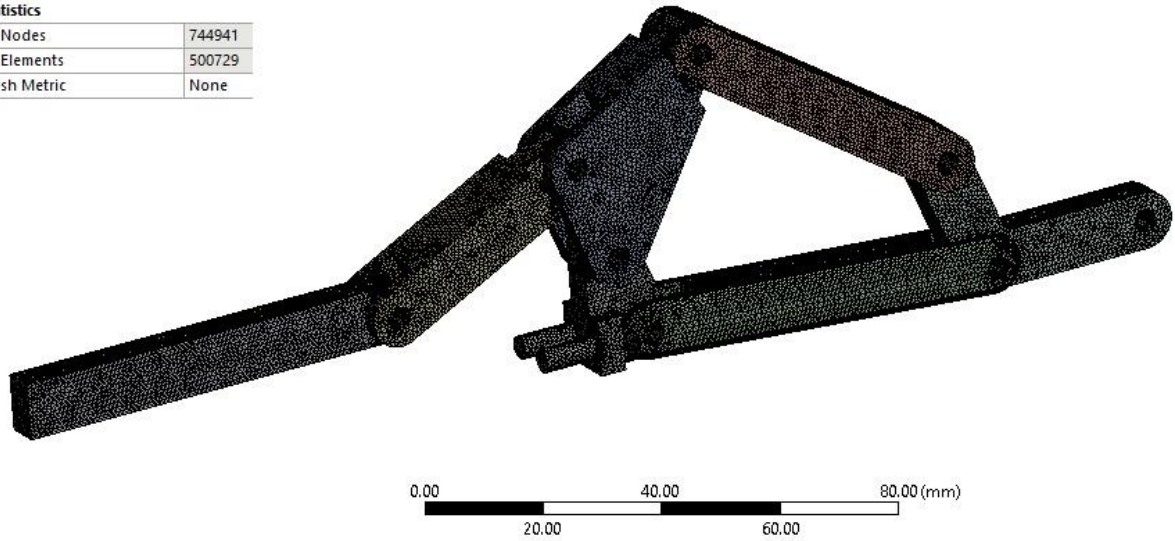


Figura 4-7 Remallado de modelo 3D del concepto 1.

Finalmente, el esfuerzo de von Mises máximo fue de 22.626 MPa y se tuvo una deformación de 0.022 mm tal como se puede observar en la Figura 4.8 y 4.9 respectivamente.

**B: Concepto 1 Tesis**

Equivalent Stress  
 Type: Equivalent (von-Mises) Stress  
 Unit: MPa  
 Time: 1  
 26/02/2019 10:24 p. m.

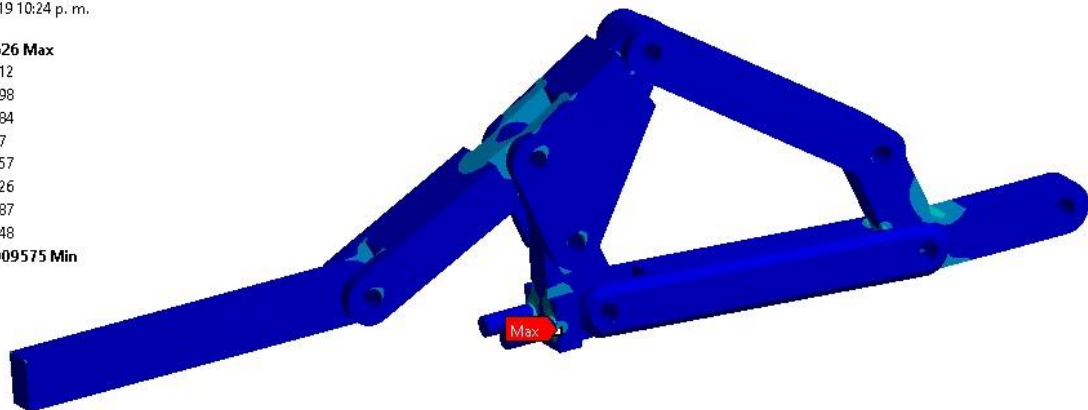
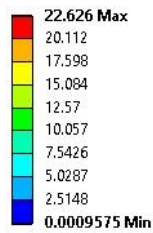


Figura 4-8 Esfuerzo equivalente (von Mises) de concepto 1 después de remallado (MPa).



**B: Static Structural Tesis**  
Total Deformation  
Type: Total Deformation  
Unit: mm  
Time: 1  
31/01/2019 01:33 p. m.

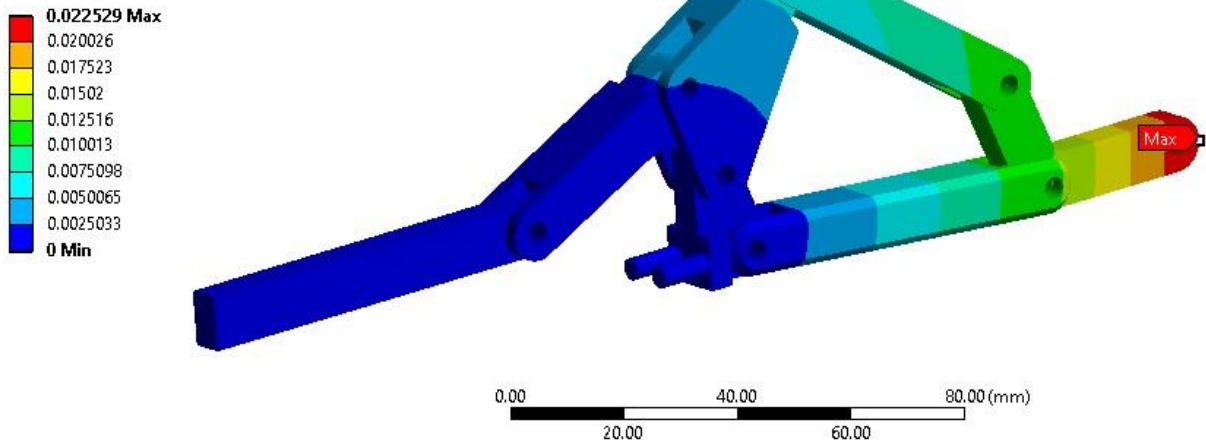


Figura 4-9 Deformación presentada en concepto 1 después de remallado (mm).

El tiempo de cómputo del análisis fue de 2,957 segundos. Para evaluar la convergencia de malla, se realizaron 8 iteraciones (incluyendo las dos anteriores) elevando la cantidad de nodos y elementos, donde la última iteración generó 1,748,013 nodos y 1,185,481 elementos ya que considera un refinamiento con 0.5 mm como tamaño máximo para los elementos. Con la última iteración se obtuvo un esfuerzo de von Mises máximo de 21.092 MPa, una deformación máxima de 0.0226 mm y se completó en un tiempo de 11,913 segundos (3.3 hr). Con las iteraciones realizadas del análisis anterior se observó que a partir de 200,000 elementos el esfuerzo máximo de von Mises alcanza los 21 MPa y conforme se incrementa el número de elementos fluctúa entre los 21 y 23 MPa, por lo tanto, se pueden considerar el tamaño máximo de elemento de 0.8 mm y un mínimo de 300,000 elementos como parámetros para obtener un resultado válido en los análisis de conceptos siguientes.

#### 4.1.2 Análisis MEF concepto dedo 2

Se repitió el procedimiento anterior para realizar un análisis MEF al concepto dedo 2, donde se presenta un diseño diferente para el elemento empujador, el cual ya contempla la reconfiguración y además se reduce el tamaño de los elementos que forman el dedo. En la Figura 4-10 se muestra el modelo 3D importado a la plataforma con la unión de sus elementos siguiendo los criterios del análisis del concepto 1.

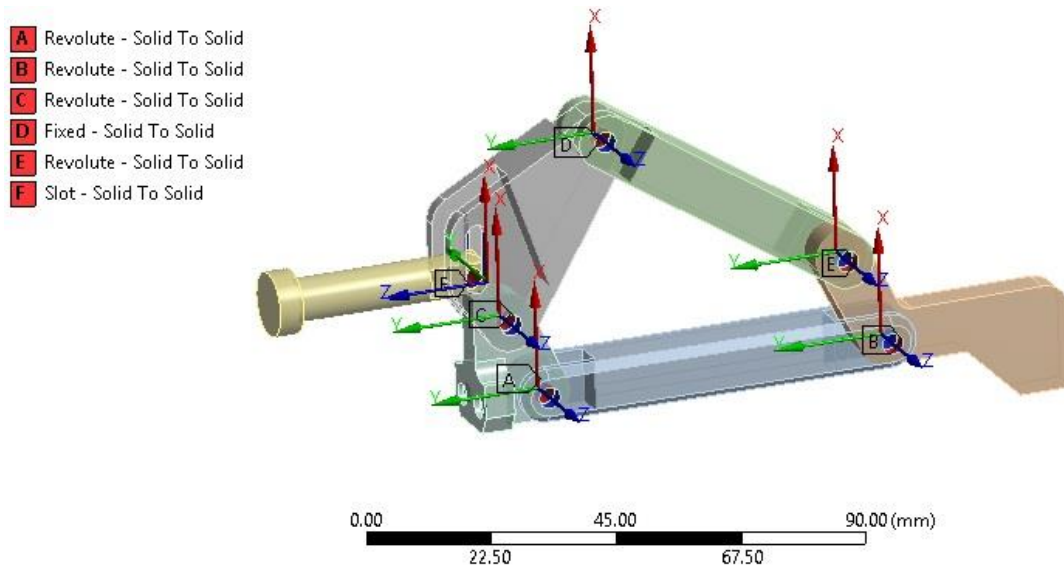


Figura 4-10 Unión de elementos para concepto dedo 2.

Para este concepto, el mallado que se consideró está formado por 536,198 nodos y 338,312 elementos tal como lo muestra la Figura 4-11.

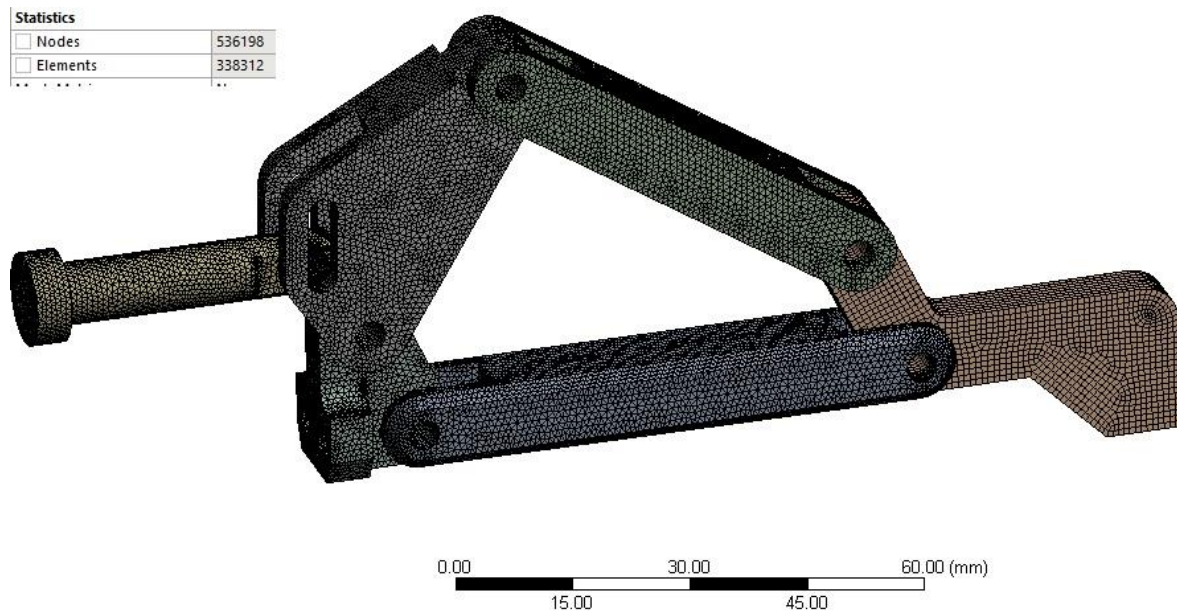


Figura 4-11 Mallado del modelo 3D de concepto dedo 2.

Se agregaron las restricciones y cargas para completar los requerimientos del análisis, tal como se muestra en la Figura 4-12.

**B: Slot tesis**  
 Static Structural  
 Time: 1. s  
 27/02/2019 11:43 a. m.

- A Fixed Support
- D Displacement
- E Fixed Support 3
- F Force 2: 38.81 N

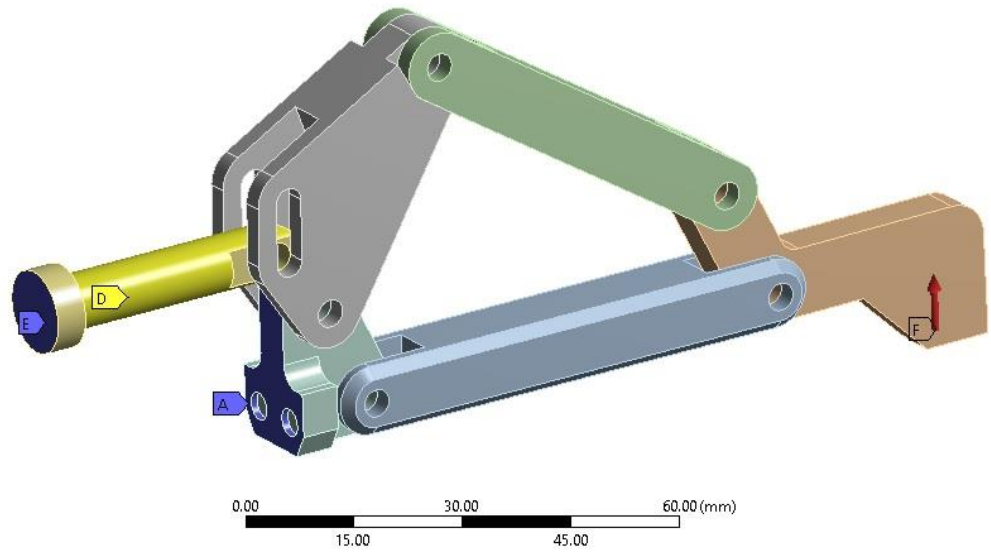


Figura 4-12 Restricciones y cargas de modelo 3D de concepto dedo 2.

Finalmente se ejecutó el análisis MEF y se observó que el esfuerzo máximo de von Mises presentado fue de 75.874 MPa en el miembro empujador y que la deformación máxima fue de 0.134 mm en el extremo del dedo. Si bien la mayoría de los elementos presentaron esfuerzos bajos, existe una gran concentración en el elemento que sirve de enlace entre el empujador y los demás elementos. En la Figura 4-13 y Figura 4-14 se muestra el resultado de los esfuerzos equivalentes (von Mises) y la deformación total respectivamente, los cuales ya consideran la convergencia de malla. El tiempo de cómputo de la simulación fue de 1,544 segundos.

**B: Slot tesis**  
 Equivalent Stress  
 Type: Equivalent (von-Mises) Stress  
 Unit: MPa  
 Time: 1  
 27/02/2019 11:40 a. m.

- 75.874 Max
- 67.444
- 59.013
- 50.583
- 42.153
- 33.722
- 25.292
- 16.862
- 8.4312
- 0.00085766 Min

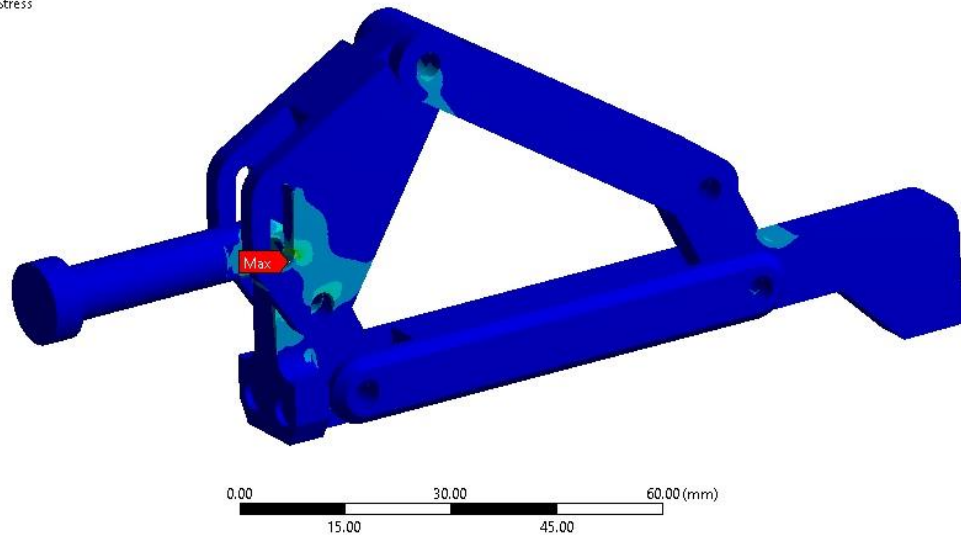


Figura 4-13 Esfuerzos equivalentes (von Mises) resultantes en el concepto dedo 2 (MPa).

**B: Slot tesis**  
 Total Deformation  
 Type: Total Deformation  
 Unit: mm  
 Time: 1  
 27/02/2019 11:49 a. m.

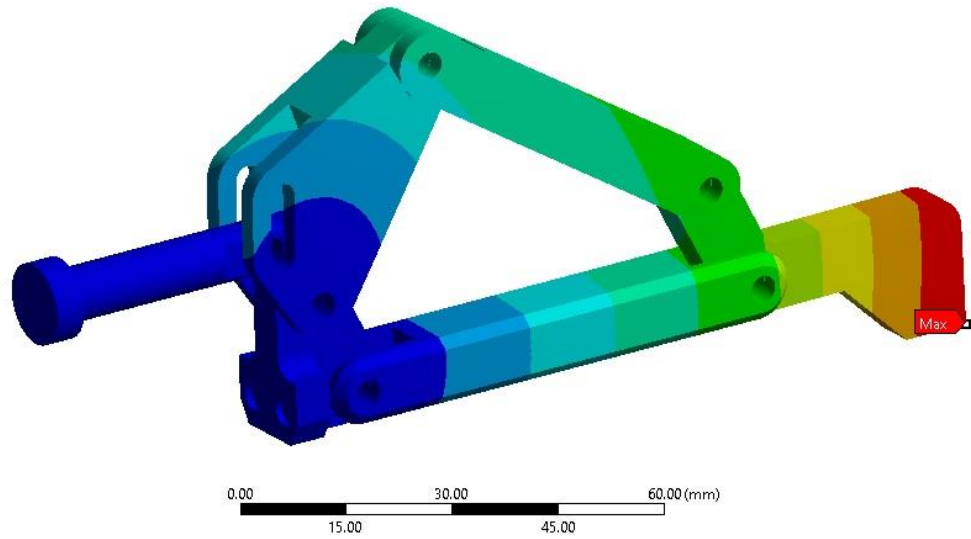
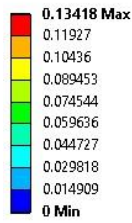


Figura 4-14 Deformación presentada en concepto dedo 2 (mm).

#### 4.1.3 Análisis MEF concepto dedo 3

En la Figura 4-15 se muestran las uniones entre elementos del concepto dedo 3, se considera el mismo tipo de uniones que para los análisis previos.

- A** Revolute - Solid To Solid
- B** Revolute - Solid To Solid
- C** Revolute - Solid To Solid
- D** Fixed - Solid To Solid
- E** Revolute - Solid To Solid
- F** Revolute - Solid To Solid
- G** Revolute - Solid To Solid

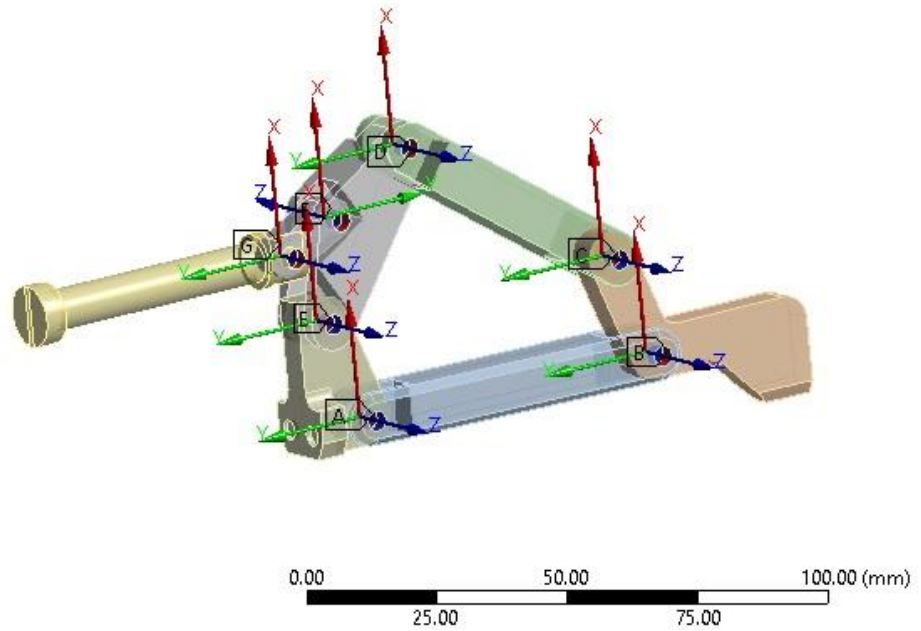


Figura 4-15 Unión de elementos en modelo importado de dedo versión 3.

Al mallar el modelo se generaron 603,297 nodos y se formaron 398,913 elementos, tal como se muestra en la Figura 4-16.

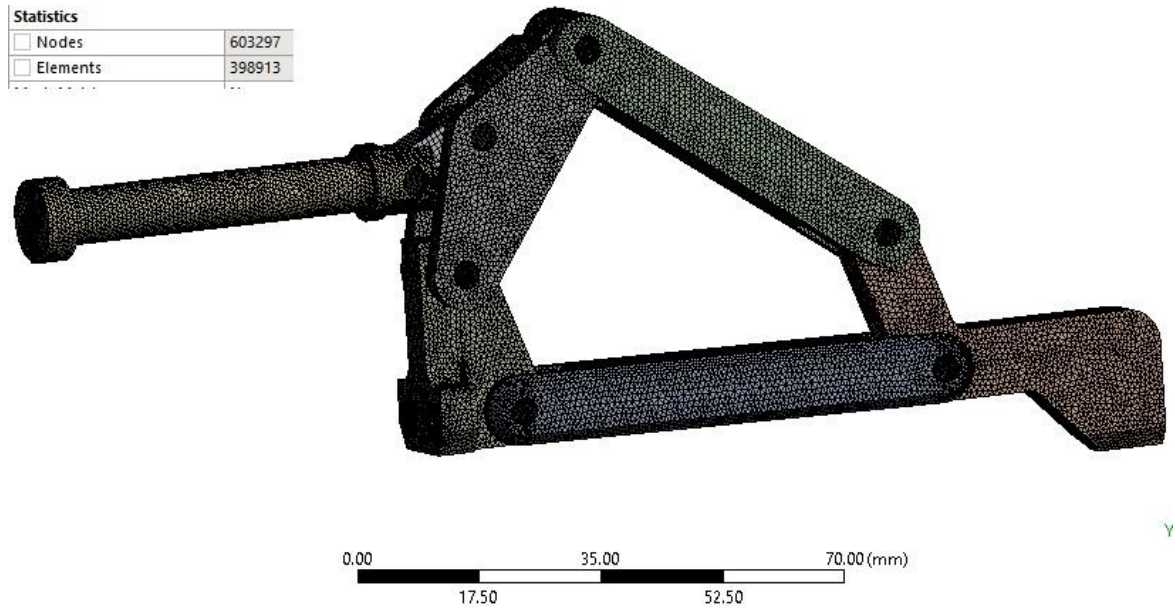


Figura 4-16 Mallado del modelo 3D del concepto dedo 3.

Al igual que con las versiones anteriores, se definieron restricciones para los elementos del dedo (Figura 4-17), es importante aclarar que se está considerando la misma fuerza aplicada, ya que la fuerza requerida en la “yema” del dedo para sujetar el objeto es independiente de la cinemática utilizada.

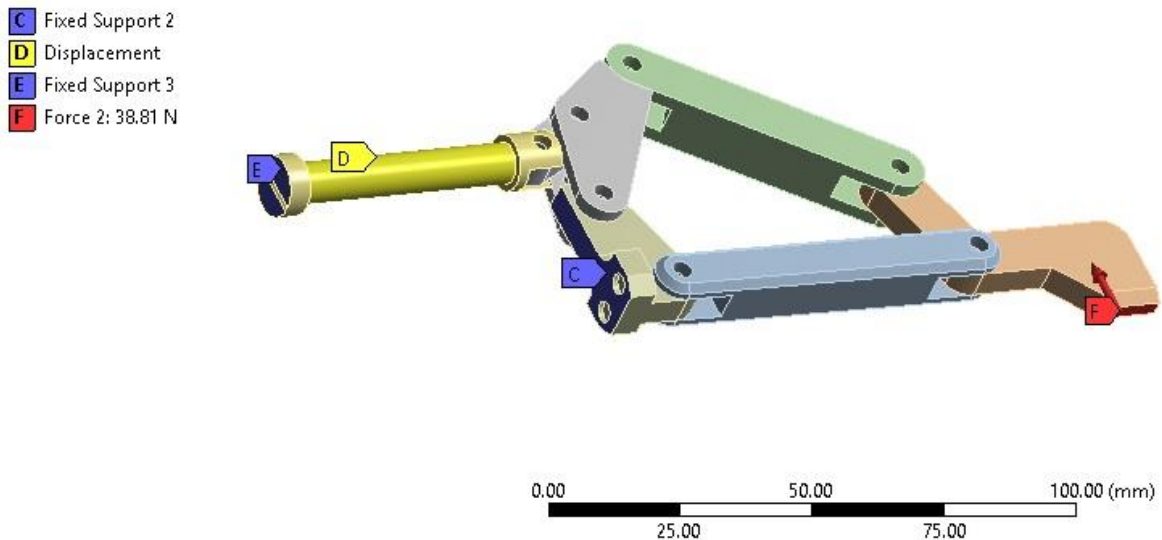


Figura 4-17 Restricciones y cargas de modelo 3D de concepto dedo 3.

El resultado del análisis se muestra en la Figura 4-18 y Figura 4-19. El esfuerzo de von Mises máximo que se presentó fue de 22.94 MPa en el perno empujador y se presentó

una deformación de 0.048 mm ubicada en el extremo del dedo. La simulación tomó un tiempo de cómputo de 1,673 segundos.

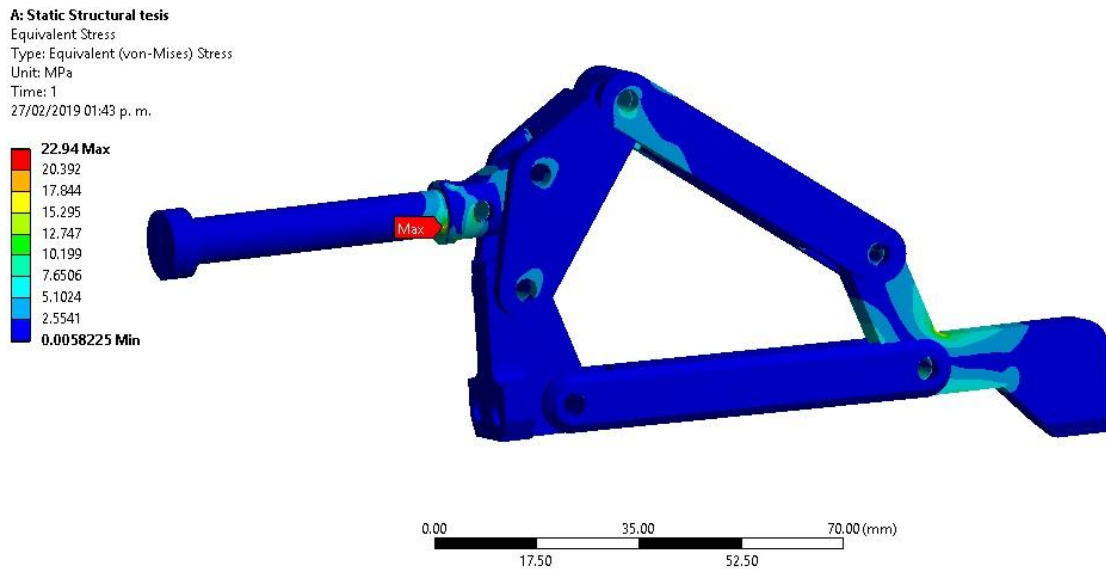


Figura 4-18 Esfuerzos equivalentes (von Mises) presentados en concepto dedo 3 (MPa).

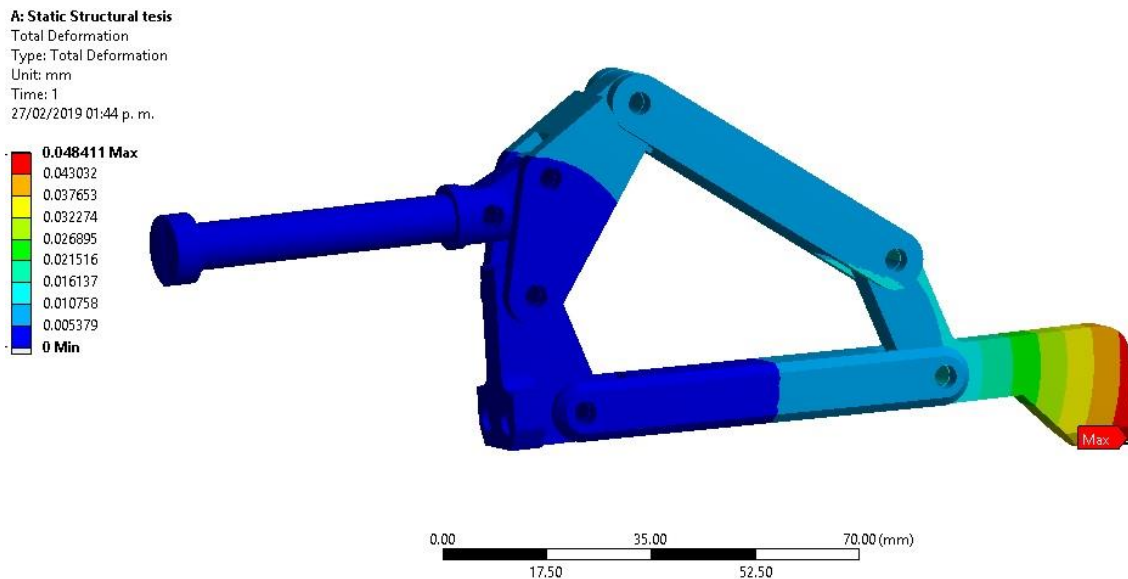


Figura 4-19 Deformación presentada en concepto dedo 3 (mm).

El análisis anterior sirvió para comparar los esfuerzos y deformaciones máximas en los tres conceptos para el dedo, puesto que en los tres conceptos se consideró el mismo tamaño para los elementos finitos se puede considerar como válida la comparación. Es importante que en el diseño definitivo también se considere la convergencia de malla con la finalidad de asegurar la cantidad de elementos suficientes para obtener resultados confiables en el análisis MEF.

#### 4.1.4 Selección de concepto para dedo y gripper reconfigurable

Se pudo observar en el capítulo 3 que los conceptos generados para el dedo presentan diversas cualidades pero con el mismo principio de funcionamiento. Sin embargo, es necesario elegir un concepto para continuar con la etapa de diseño de detalle, donde se deben incluir componentes comerciales definitivos y se deberá realizar un análisis con mayor profundidad para posteriormente validar materiales de fabricación y planos para manufactura.

Como se pudo observar, el primer concepto presenta ventajas desde el punto de vista cinemático, sin embargo, una desventaja de dicho concepto es la dificultad para conectar el elemento empujador al actuador, ya que el empujador requiere de una unión rígida al mecanismo de apertura/cierre, lo que genera conflicto con la necesidad de posicionar radialmente los dedos.

El segundo concepto presenta ventajas en el hecho de requerir menos componentes y tener geometría compacta, además de presentar un mínimo desplazamiento en el elemento empujador. Sin embargo, es el concepto que representa menor ventaja mecánica en relación de la fuerza requerida para sujetar el objeto con la fuerza aplicada por el actuador (ver Tabla 4-2). Del análisis MEF se observan esfuerzos resultantes alrededor de 75 MPa, valor que está por encima del presentado en los otros conceptos, sin embargo, son aceptables desde el punto de vista de la resistencia del material.

En lo que al tercer concepto se refiere, se contempla la cinemática del concepto 1 pero se simplifica la geometría al igual que en el concepto 2. Si bien es el concepto que requiere mayor desplazamiento en el elemento empujador, esto representa una ventaja al momento de controlar el avance y la velocidad de cierre al sujetar un objeto. Los esfuerzos que se presentan y la fuerza requerida son muy cercanos al concepto 1. En la Tabla 4-2 se muestra la comparación entre los conceptos descritos.

Tabla 4-2 Comparativa entre conceptos de dedo.

	Concepto dedo 1	Concepto dedo 2	Concepto dedo 3
Fuerza requerida en empujador (N)	136.08	271.63	152.75
Desplazamiento del empujador (mm)	12.57	10.37	16.05
Esfuerzo máximo (MPa)	22.62	75.87	22.94
Compatibilidad con reconfiguración	Limitada	Si	Si

De lo anterior se puede confirmar la selección del concepto número 3 al ser considerado el más adecuado para el diseño definitivo del gripper reconfigurable.

Respecto al diseño de la palma mostrado en el capítulo 3, el primer concepto no es viable ya que el utilizar una corona o rueda dentada, no solo complica la fabricación, además complica el montaje y encapsulado de otros componentes como los

servomotores y bridas de soporte. En cambio, los conceptos 2 y 3 donde los servomotores que generan la rotación de los dedos se encuentran fijos, son más sencillos de fabricar, además de tener una buena relación de espacio disponible para la movilidad de los dedos. Por lo tanto, se elige el concepto 3 para continuar con el diseño de la palma y el resto del gripper.

Al continuar la etapa de diseño detallado se integraron los componentes comerciales enlistados en la sección 3.2. En la Figura 4-20 se muestra una versión más completa del gripper reconfigurable, donde ya se incluye el servomotor Dynamixel MX106T que servirá para aplicar torque controlado y el tornillo ACME que tendrá la función de convertir la rotación del servomotor en un desplazamiento con fuerza de empuje controlada. Además, se incorporan los servomotores que darán la posición radial a los dedos así como los elementos de unión entre los engranes y los dedos.

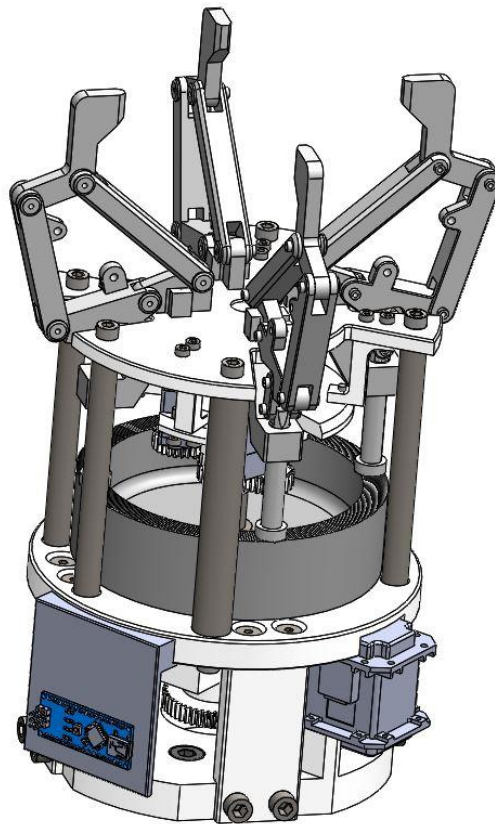


Figura 4-20 Diseño preliminar de gripper reconfigurable de 4 dedos.

Se debe recordar que uno de los requerimientos es la compatibilidad del gripper con los robots Motoman MH50 y MH6-10, por lo tanto, en la parte inferior del gripper se puede observar la placa de montaje para robot, misma que se puede intercambiar fácilmente dependiendo del modelo de robot utilizado.



## 4.2 Análisis MEF a gripper reconfigurable

En esta sección se realizó un análisis por elemento finito más detallado para validar el diseño del gripper reconfigurable, primero se realizó el análisis al diseño definitivo para el dedo sub-actuado y se fueron integrando componentes al análisis hasta llegar al análisis del gripper en condiciones similares al montaje en el robot industrial. Se aplicó el mismo procedimiento realizado en la sección 4.1 y se ejecutó un análisis estático en la plataforma ANSYS Workbench en su versión 15.0. Cabe mencionar que se hizo un refinamiento en el mallado de los componentes que presentaron mayor concentración de esfuerzos para verificar que los esfuerzos estuvieran en un rango aceptable y que aseguren un correcto funcionamiento del gripper.

En la Figura 4-21 se muestra un modelo explosionado del dedo reconfigurable con el nombre de cada componente, dicha nomenclatura servirá para referenciar a los componentes en análisis MEF a ejecutar.

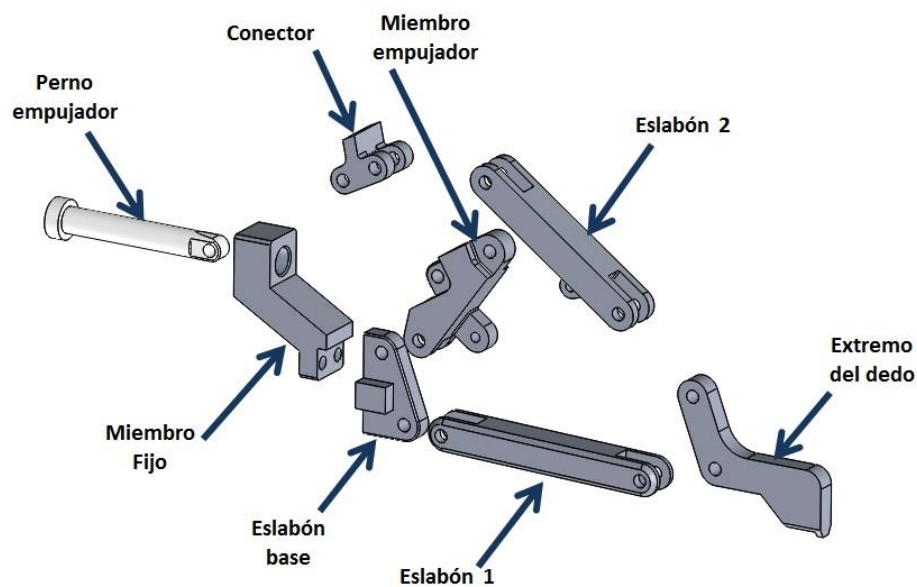


Figura 4-21 Modelo explosionado con nombre de componentes de dedo definitivo.

### 4.2.1 Análisis MEF a dedo diseño definitivo

Se realizaron las uniones de tipo "Joint" de revolución en el modelo definitivo para el dedo y se aplicaron las restricciones y cargas tal como se realizó en las secciones previas, lo anterior se puede observar en la Figura 4-22. Cabe señalar que en este análisis se está incluyendo el componente "Miembro fijo" y se agregó la unión de tipo "Joint" cilíndrica entre el componente mencionado y el componente "Perno empujador",

por lo tanto, no es necesario agregar una restricción de desplazamiento al “Perno empujador” como en los análisis previos.

Después se realizó el mallado del modelo 3D, dando como resultado la formación de 910,960 nodos y 608,217 elementos como se muestra en la Figura 4-23.

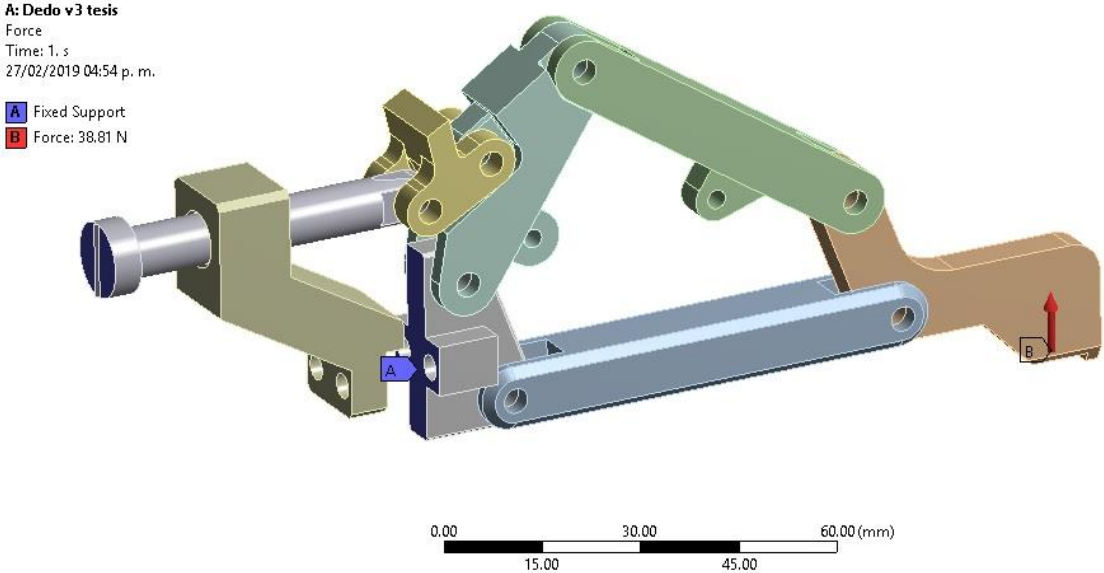


Figura 4-22 Modelo 3D de diseño de dedo definitivo con uniones, restricciones y cargas.

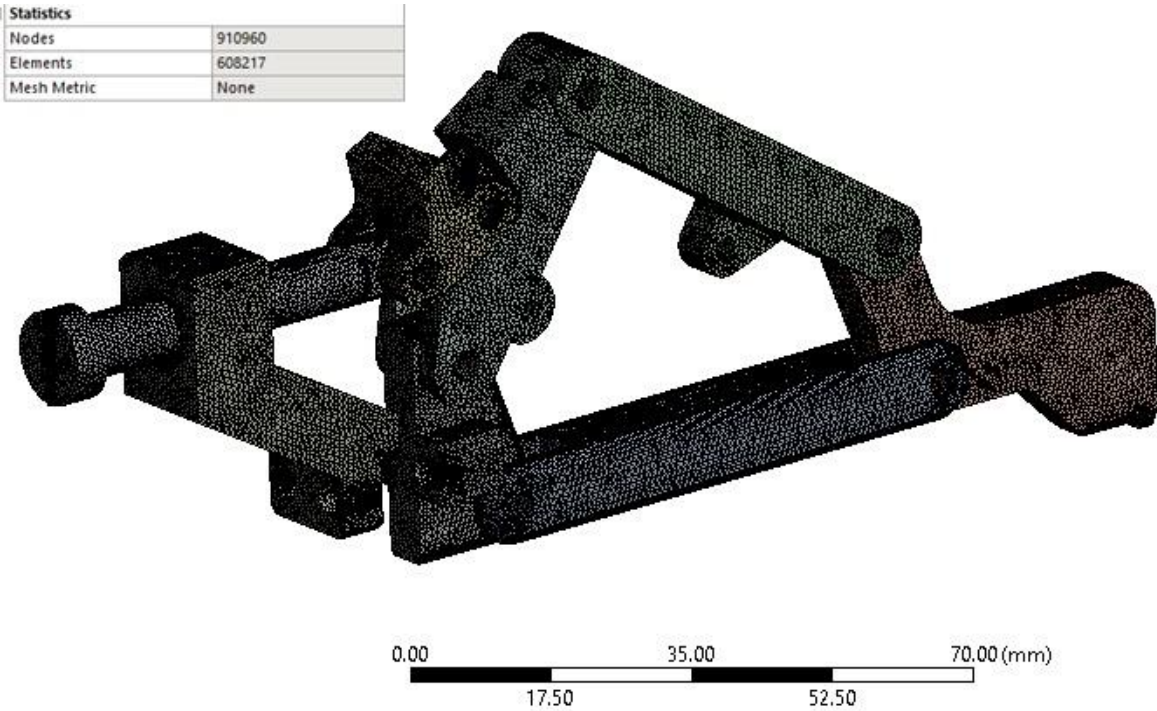


Figura 4-23 Mallado del modelo 3D del diseño definitivo para dedo.

Se ejecutó el análisis y se presentó un esfuerzo de von Mises máximo de 18.75 MPa como se muestra en la Figura 4-24. Dicho esfuerzo se presentó en el componente “Perno empujador”.

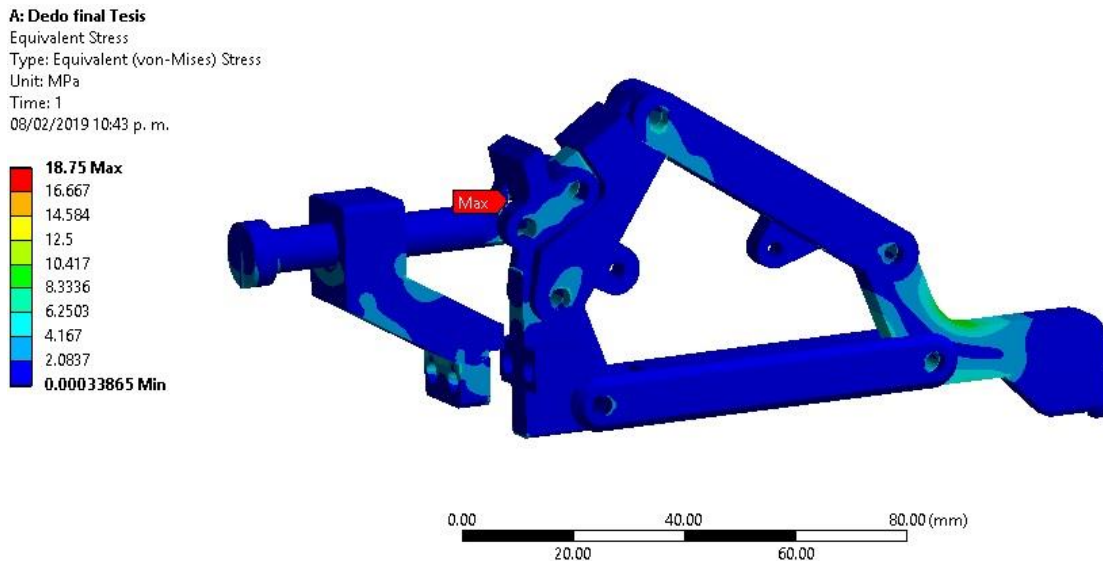


Figura 4-24 Esfuerzos equivalentes (von Mises) resultantes en el dedo definitivo (MPa).

Se hizo un refinamiento de malla a los tres componentes que presentaron mayores esfuerzos: “Perno empujador”, “Miembro fijo” y “Extremo de dedo”, después del refinamiento se formaron 2,017,322 nodos y 1,411,902 elementos. El tiempo de cómputo para realizar la simulación fue de 22,806 segundos (6.33 hr) con el equipo antes mencionado y se obtuvieron los valores de esfuerzo von-Mises mostrados de la Figura 4-25 a la Figura 4-27.



Figura 4-25 Esfuerzo equivalente (von Mises) en “Perno empujador” después de refinamiento de malla (MPa).

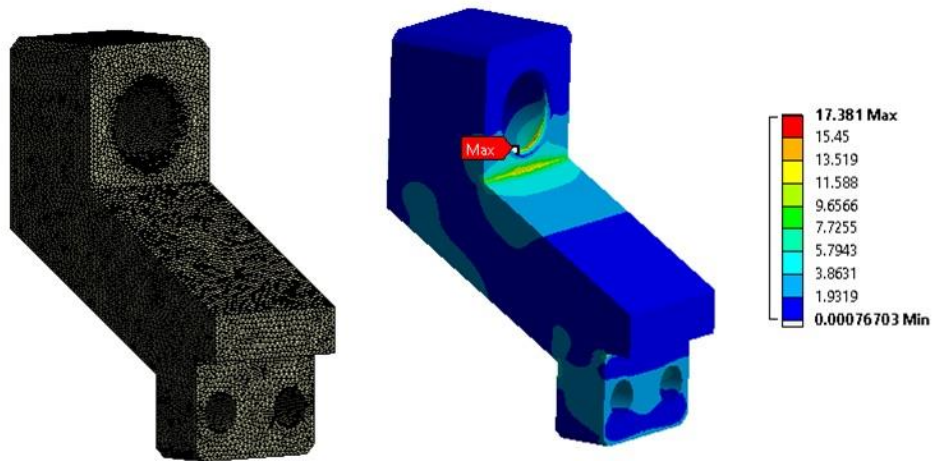


Figura 4-26 Esfuerzo equivalente (von Mises) en “Miembro fijo” después de refinamiento de malla (MPa).

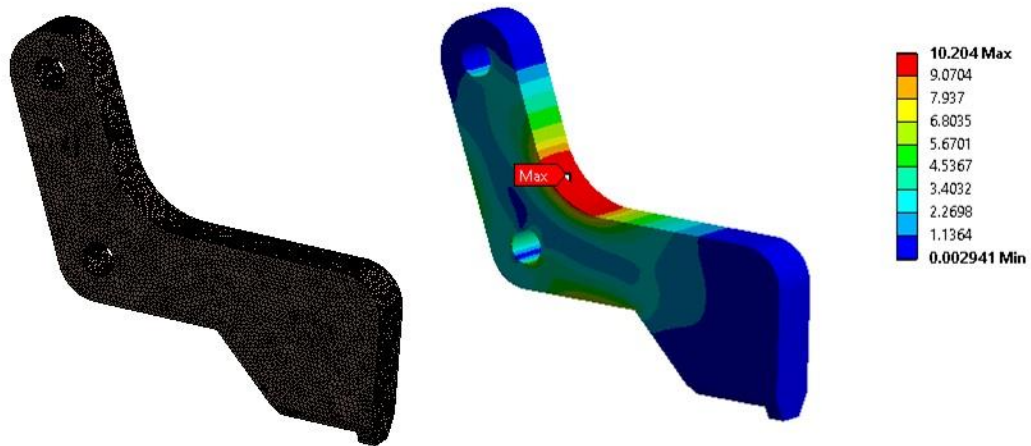


Figura 4-27 Esfuerzo equivalente (von Mises) en “Extremo de dedo” después de refinamiento de malla (MPa).

Se puede observar que al generar una malla más fina se incrementan los esfuerzos, sin embargo debido a la resistencia del material, siguen siendo aceptables desde un análisis estático.

#### 4.2.2 Análisis MEF dedos y palma de gripper

Como se mencionó, se fueron integrando componentes al análisis de elemento finito con la intención de ir validando cada subsistema del gripper reconfigurable. A partir de esta sección solo se mostrarán las imágenes del mallado con refinamiento y los

esfuerzos en los componentes. El procedimiento que se siguió para el análisis, es el mismo que el efectuado en las secciones anteriores.

Cabe señalar que se asignará diferente material a los componentes, por ejemplo, el plato empujador se está proponiendo que sea de material ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno), las barras que unen la palma con la placa base y la tuerca ACME son de acero estructural. En la Tabla 4-3 y la Tabla 4-4 se pueden observar las propiedades mecánicas para el acero y el ABS respectivamente.

Tabla 4-3 Propiedades mecánicas del acero estructural.

Propiedades del Acero estructural*		
Propiedad	Valor	Unidad
Densidad	7850	Kg/m <sup>3</sup>
Módulo de Young	200	GPa
Relación de Poisson	0.3	-
Esfuerzo de cedencia a tensión	250	MPa
Esfuerzo de cedencia a compresión	250	MPa
Módulo Cortante	76.9	GPa

\* Obtenidas del Engineering Data de ANSYS

Tabla 4-4 Propiedades mecánicas del ABS.

Propiedades del ABS*		
Propiedad	Valor	Unidad
Densidad	1040	Kg/m <sup>3</sup>
Módulo de Young	1.86	GPa
Relación de Poisson	0.42	-
Esfuerzo de cedencia a tensión	30.3	MPa
Esfuerzo de cedencia a compresión	-	MPa
Módulo Cortante	38	MPa

\* Obtenidas del datasheet del material Z-ABS

En la Figura 4-28 se puede observar el resultado del mallado aplicado al ensamble de la palma y dedos, se realizó un refinamiento en los componentes donde se presentaron mayores esfuerzos como el “Perno empujador”, “Plato empujador”, “Miembro fijo” y “Miembro empujador”.

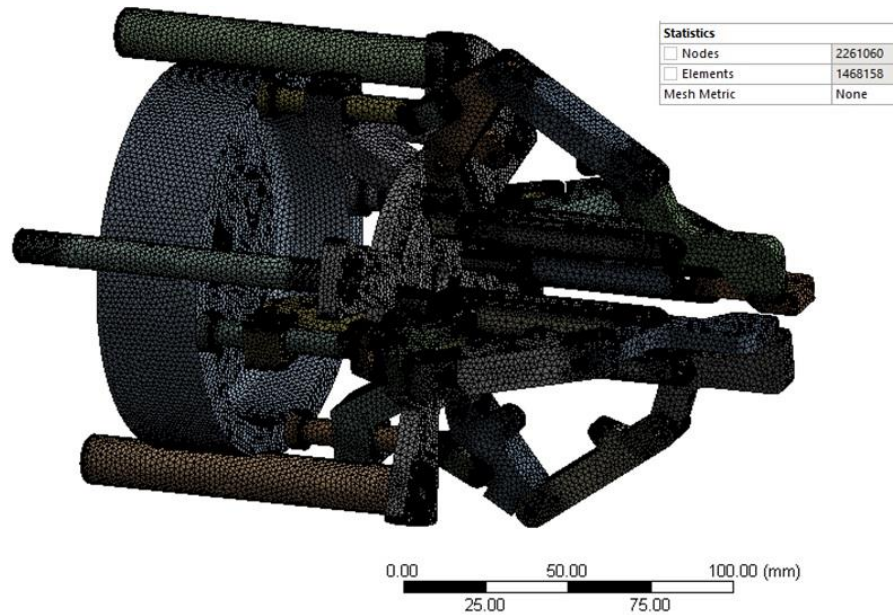


Figura 4-28 Mallado del ensamble de los dedos en la palma del gripper reconfigurable.

De acuerdo al resultado del análisis se encontró que el esfuerzo máximo que se presentó fue de 27.198 MPa y se ubicó en el componente “Perno empujador”, tal como se había estado presentando en los análisis previos. El esfuerzo de la mayoría de los elementos oscila entre los 3 y 9 MPa, a excepción de los componentes “Miembro fijo”, “Miembro empujador” y “Plato empujador” que sobrepasan los 15 MPa. En la Figura 4-29 se puede ver el resultado del análisis de esfuerzos del ensamble.

**B: Static Palma-Dedos**  
 Equivalent Stress  
 Type: Equivalent (von-Mises) Stress  
 Unit: MPa  
 Time: 1  
 09/02/2019 12:54 p. m.

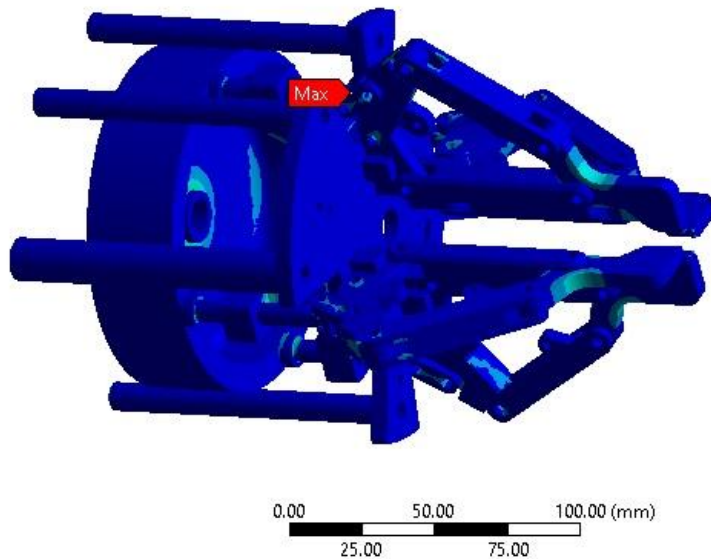
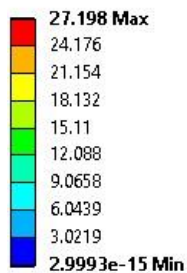


Figura 4-29 Esfuerzos de von Mises presentados en ensamble palma-dedos (MPa).

También se analizó la deformación en el ensamble, se puede ver en la Figura 4-30 que el mayor desplazamiento fue de 0.23 mm y se presentó en el centro del plato empujador.

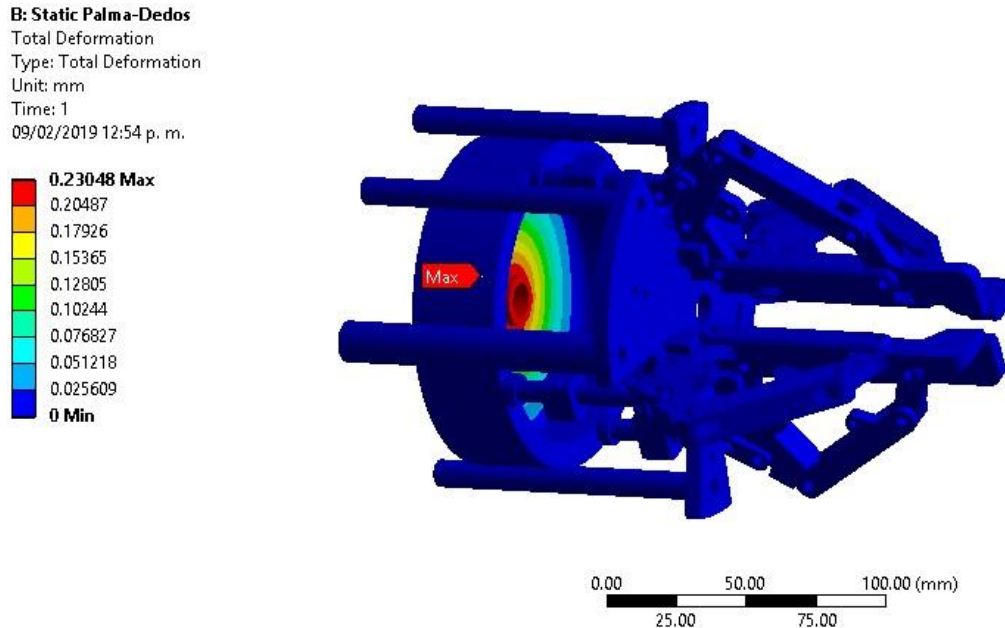


Figura 4-30 Deformación total resultante en el ensamble palma-dedos (mm).

#### 4.2.3 Análisis MEF a gripper reconfigurable

Otro punto importante para la validación del gripper, es el análisis MEF donde se considera la reacción en los componentes que darán soporte al tornillo ACME, de manera que permita obtener los esfuerzos generados al interior del gripper. Dicho lo anterior, se realizó un análisis incluyendo el plato superior y el bracket de montaje para el tornillo ACME. La unión entre los componentes de los dedos se consideran del tipo “Joint” de revolución, la unión entre los demás elementos del gripper se consideraron de contacto tipo “Bonded” con excepción de la unión entre el plato empujador y las barras redondas que se consideró del tipo “Joint” cilíndrico. En la Figura 4-31 se puede observar el mallado realizado al ensamble, cabe mencionar que las imágenes mostradas consideran la convergencia de malla y corresponden a la última iteración realizada en el análisis.

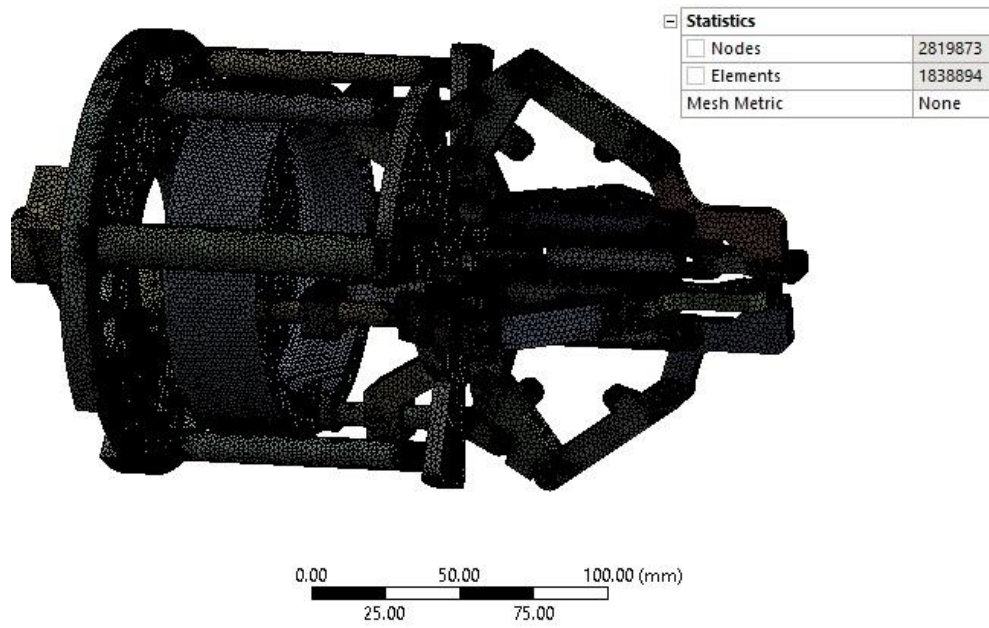


Figura 4-31 Mallado resultante para análisis de esfuerzos internos del gripper.

Se asignó el material correspondiente a cada componente y se definieron las restricciones necesarias. Se presentó un esfuerzo de von Mises máximo de 27.208 MPa, el cual se sigue presentando en el “Perno empujador” y los esfuerzos en los demás componentes oscilan entre los 6 y 15 MPa, con excepción de los componentes “Plato empujador” y “Miembro empujador” que sobrepasan los 18 MPa (Figura 4-32).

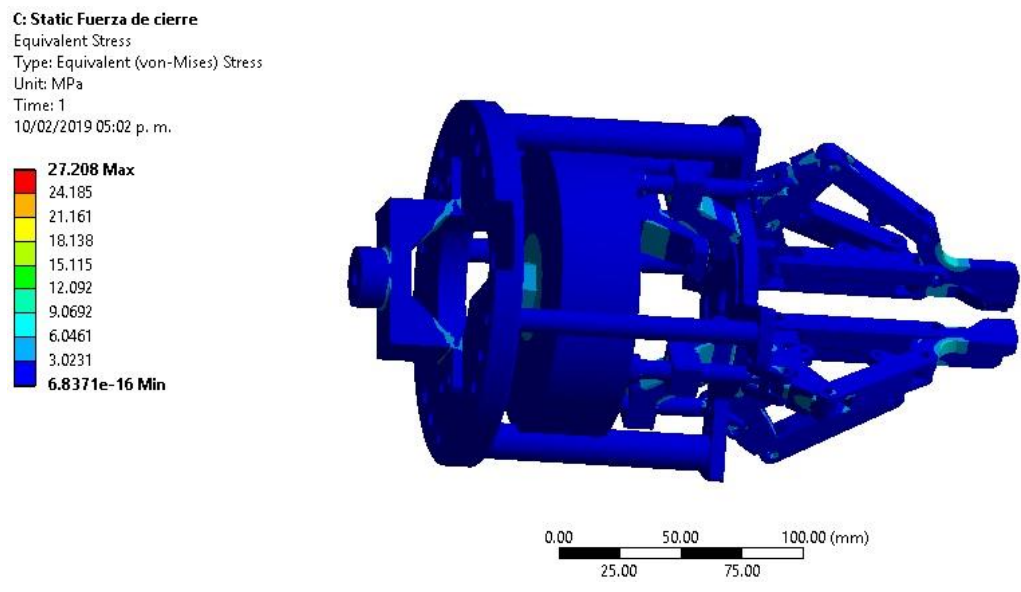


Figura 4-32 Esfuerzos resultantes en el ensamble del gripper (MPa).

La deformación total máxima se presentó en la zona de unión entre la tuerca ACME y el plato empujador y fue de 0.23 mm. El valor de esfuerzo obtenido en el análisis se puede considerar aceptable dada la resistencia de los materiales correspondientes a cada componente. La deformación presentada se puede considerar despreciable ya



que se está presentando en el plato empujador y no en algún otro componente crítico que pudiera afectar la funcionalidad del gripper. El tiempo de cómputo de la simulación fue de 6,901 segundos.

#### 4.2.4 Análisis MEF de gripper con montaje para robot

Finalmente, se realizó un análisis donde se establecen las condiciones similares al funcionamiento del gripper en un entorno real, es decir, instalado en un robot industrial y sujetando un objeto cuya masa corresponde al valor máximo admitido para el gripper (5 Kg). En el modelo 3D se incluyó el plato para montaje en robot y los soportes que unen el gripper con dicho plato, además se contempla la tornillería y otros componentes comerciales. El modelo mallado se puede observar en la Figura 4-33.

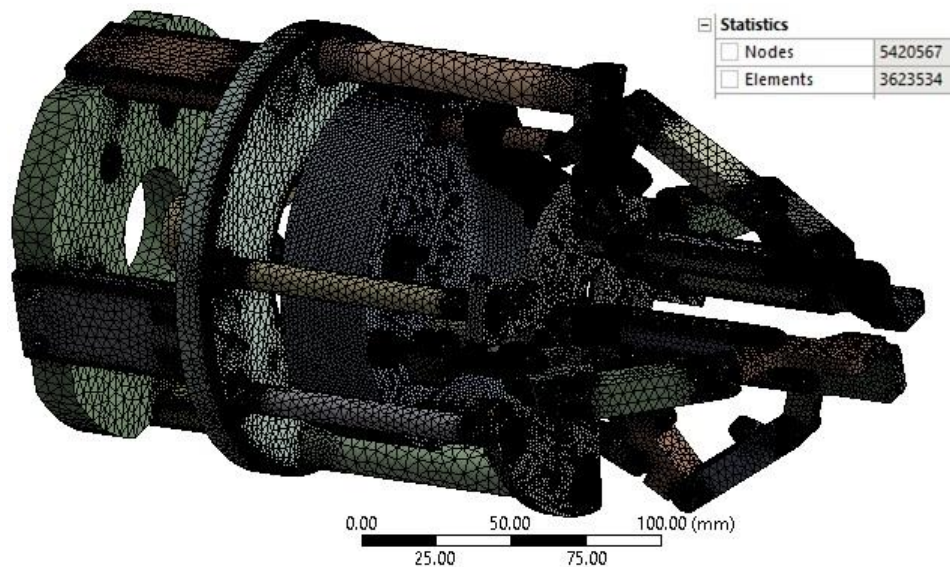


Figura 4-33 Mallado a modelo 3D de gripper con montaje a robot.

Para este análisis, se considera que ahora la restricción fija se encontrará en los tornillos que se utilizan para montaje en el robot, además se consideran la acción de la gravedad y el peso del objeto. Los resultados del análisis se pueden observar en la Figura 4-34.

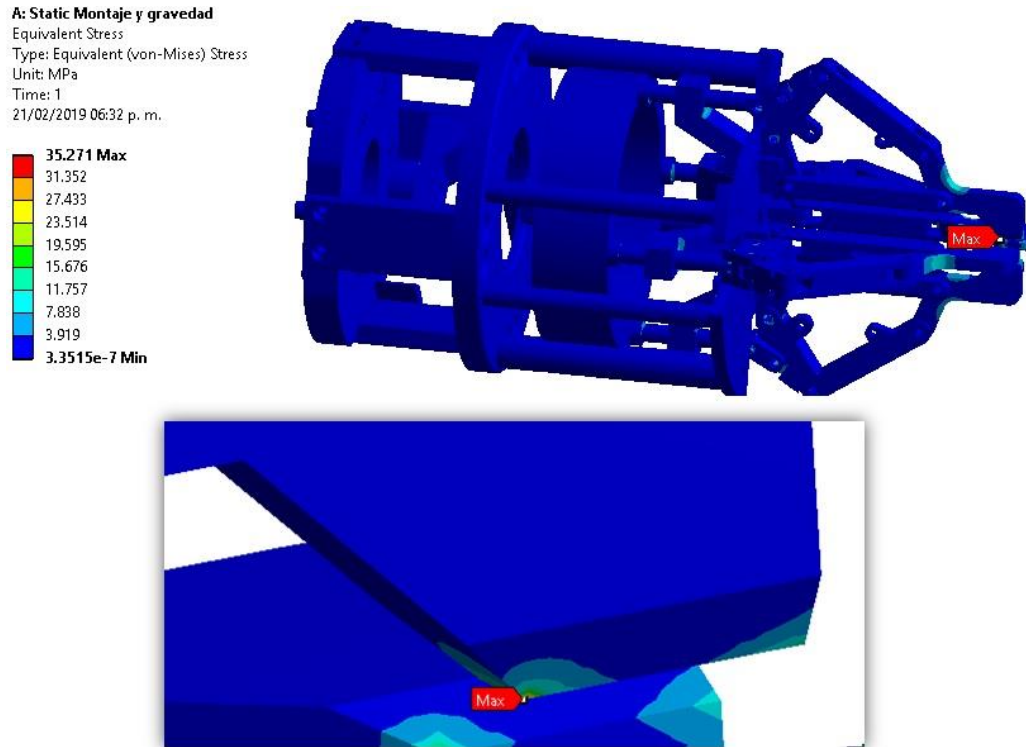


Figura 4-34 Esfuerzos presentados en análisis MEF a gripper con montaje a robot (MPa).

Se observa que el esfuerzo de von Mises máximo que se presentó ahora es de 35.27 MPa y se localiza en el componente “Extremo de dedo”. De acuerdo con la Figura 4-35, la deformación máxima se presenta en la unión del plato empujador y la tuerca ACME y es de 0.25 mm. El tiempo de cómputo requerido por esta última simulación considerando el remallado a componentes específicos fue de 35,755 segundos (9.9 hr).

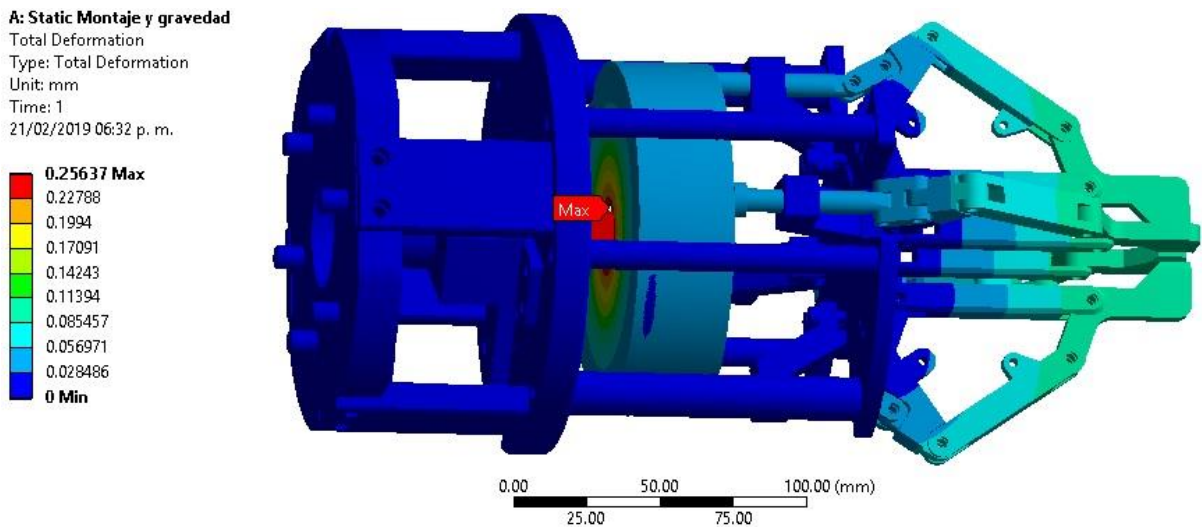
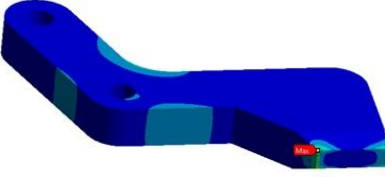
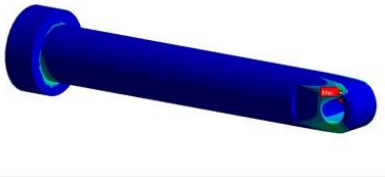
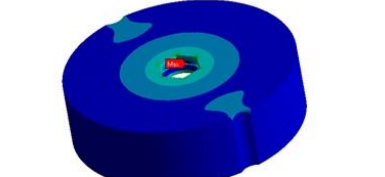
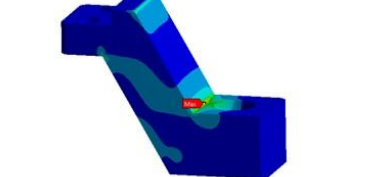
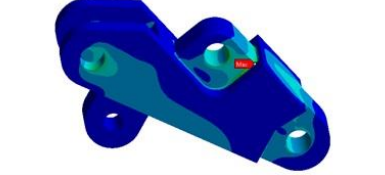


Figura 4-35 Deformación máxima en análisis MEF a gripper con montaje a robot (mm).

En la Tabla 4-5 se muestran los componentes que presentaron mayor concentración de esfuerzos en el análisis del gripper con las condiciones de un ambiente real.

Tabla 4-5 Componentes que presentaron mayores esfuerzos en análisis MEF de gripper completo.

Componentes que presentaron mayores esfuerzos		
Componente	Esfuerzo (MPa)	Imagen
Extremo de dedo	35.27	
Perno empujador	24.23	
Plato empujador	17.99	
Miembro fijo	16.73	
Miembro empujador	14.49	

Del análisis anterior se puede concluir que el aluminio es un material adecuado para la mayoría de los componentes ya que la máxima concentración de esfuerzos se presentó en el componente “Extremo de dedo” y alcanzó los 35 MPa, incluso algunos componentes pudieran fabricarse en ABS para reducir el peso del gripper reconfigurable sin comprometer la funcionalidad. En la siguiente sección se realiza un análisis para la estimación de la vida útil de los componentes que presentaron mayor concentración de esfuerzos.

### 4.3 Estimación de vida útil de gripper

En esta sección se realiza un análisis para la estimación de la vida útil de los componentes que presentaron mayor concentración de esfuerzos. El análisis MEF permitió validar su resistencia bajo condiciones estáticas pero es necesario asegurar la resistencia de los componentes a la fatiga.

Teniendo el valor de los esfuerzos equivalentes mostrados en la Tabla 4-5 de la sección anterior, es posible estimar el número de ciclos que podrá soportar algún elemento antes de fallar por fatiga, bajo las condiciones de carga establecidas en el análisis.

Los componentes que presentaron la mayor concentración de esfuerzos, se fabricarán en material Aluminio 6061-T6 ya que es un material más ligero que el acero y se encuentra disponible en el mercado, excepto el "Plato empujador", el cual se consideró su fabricación en material ABS.

Para efectuar la estimación de vida útil se considera la teoría correspondiente mencionada en el capítulo 2. De la Ecuación 2-6 y la Ecuación 2-7 se calculan los factores  $a$  y  $b$  respectivamente, y se consideran las propiedades del material ( $S_{ut}$  y  $S_e$ ) quedando de la siguiente manera:

$$a = \frac{(f \cdot S_{ut})^2}{S_e}$$

$$a = \frac{(0.9 \cdot 310 \text{ MPa})^2}{96.5 \text{ MPa}}$$

$$a = \mathbf{806.64 \text{ MPa}}$$

$$b = -\frac{1}{3} \log\left(\frac{f \cdot S_{ut}}{S_e}\right)$$

$$b = -\frac{1}{3} \log\left(\frac{0.9 \cdot 310 \text{ MPa}}{96.5 \text{ MPa}}\right)$$

$$b = \mathbf{-0.153692}$$

De la Ecuación 2-10 y Ecuación 2-11 se calculó el esfuerzo alternante y el esfuerzo medio respectivamente, considerando el esfuerzo de von Mises que se obtuvo en el componente con mayor concentración de esfuerzos (35.27 MPa).

$$\sigma_a = \frac{35.27 \text{ MPa} - 0 \text{ MPa}}{2}$$

$$\sigma_a = \mathbf{17.63 \text{ MPa}}$$

$$\sigma_m = \frac{35.27 \text{ MPa} + 0 \text{ MPa}}{2}$$

$$\sigma_m = \mathbf{17.63 \text{ MPa}}$$

Después se calculó el esfuerzo reversible utilizando la Ecuación 2-9 y se tomó la Ecuación 2-8 para estimar el número de ciclos que soporta el componente “Extremo de dedo”:

$$\sigma_{rev} = \frac{17.63 \text{ MPa}}{1 - \frac{17.63 \text{ MPa}}{310 \text{ MPa}}}$$

$$\sigma_{rev} = \mathbf{18.69 \text{ MPa}}$$

$$N = \left( \frac{\sigma_{rev}}{a} \right)^{1/b}$$

$$N = \left( \frac{18.69 \text{ MPa}}{806.64 \text{ MPa}} \right)^{1/-0.153692}$$

$$N = \mathbf{4.35 \times 10^{10} \text{ Ciclos}}$$

Se realizó el mismo análisis para los componentes “Perno empujador”, “Miembro fijo y “Miembro empujador”, se obtuvieron  $5.63 \times 10^{11}$ ,  $6.8 \times 10^{12}$  y  $1.77 \times 10^{13}$  ciclos respectivamente. Para el caso del plato empujador, se utilizan las mismas ecuaciones que se utilizaron para el aluminio, la diferencia radica en el límite de fatiga estimado para el material ABS. Es posible estimar el número de ciclos que soportará el componente utilizando el valor de límite a la fatiga obtenido por Caliskan y otros [54] dado por:  $S_e = 0.55 \sigma_{ult}$ . De tal manera que el número de ciclos estimados para el plato empujador es de  $4.08 \times 10^7$  ciclos.

Considerando un proceso industrial del tipo “Pick and Place” donde se tuvieran que manipular 400 componentes por hora, es decir 9,600 componentes al día (tres turnos), el componente con menor número de ciclos (Plato empujador) tendría una vida útil de 4,254 días o de 11.65 años en condiciones ideales de operación.

Es posible comparar el valor de vida útil estimado para los componentes de aluminio en el cálculo anterior con las curvas de fatiga proporcionadas por Yahr [55] para el aluminio 6061-T6, material que se está considerando para la fabricación de la mayoría de los componentes del gripper. En la Figura 4-36 [55] se muestra la curva de fatiga para el aluminio 6061-T6 sometido a un esfuerzo de fatiga completamente reversible, misma que fue obtenida experimentalmente.

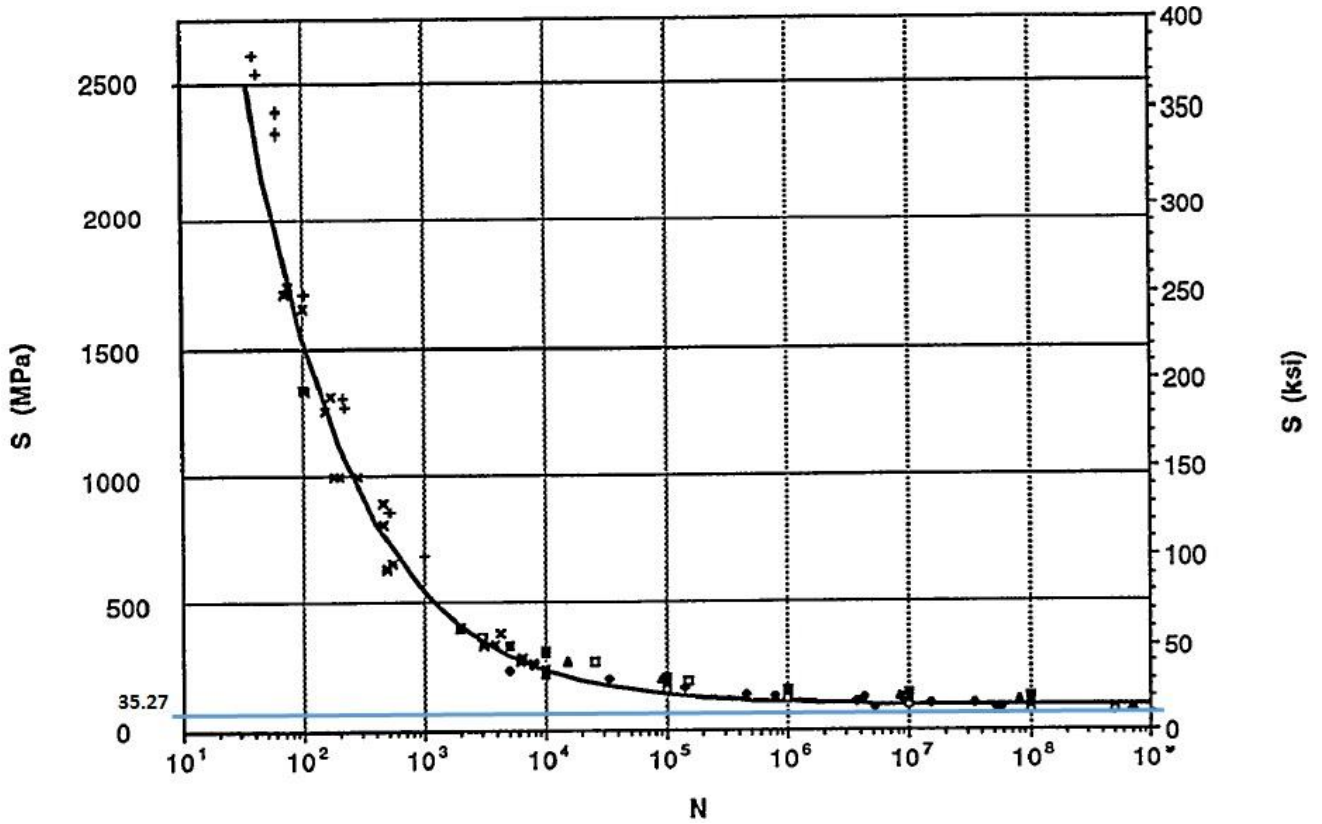


Figura 4-36 Curva de fatiga para el Aluminio 6061-T6 para esfuerzos completamente reversibles.

Si bien la gráfica anterior no permite obtener un valor definido de ciclos, ayuda a confirmar que incluso para el componente más esforzado tiene una vida útil por encima de los  $10^7$  ciclos.

---

---

# **Capítulo 5 – Fabricación y prueba de prototipo funcional de gripper reconfigurable**

---

---

## Capítulo 5. Fabricación y prueba de prototipo funcional de gripper reconfigurable

En este capítulo se presenta la fabricación del gripper reconfigurable de 4 dedos y su prueba en laboratorio. Primero se da una breve explicación del proceso de impresión en 3D, posteriormente se menciona el control requerido y diagrama de flujo para realizar la prueba. Después se muestra la prueba del prototipo en el laboratorio y finalmente se presentan algunos planos de fabricación para el gripper.

### 5.1 Impresión 3D de componentes para gripper

Algunos componentes del gripper reconfigurable, sobre todo aquellos con geometría compleja y que no están sometidos a grandes esfuerzos se propusieron en material ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno) y PLA (Ácido Poliláctico). El PLA se recomienda para piezas grandes debido a su estabilidad térmica mientras que el ABS se recomienda para piezas pequeñas y que requieren mayor resistencia mecánica. Las especificaciones de dichos materiales se pueden encontrar en el Anexo 2. La fabricación de las piezas que se requieren en los materiales mencionados, se realizó utilizando las prototipadoras 3D AnetA8 y Zortrax M200. En la Figura 5-1 se muestran la prototipadora AnetA8, la cual tiene un espacio de trabajo de 220x220x240 mm y la prototipadora Zortrax M200 con un espacio de trabajo de 200x200x180 mm.

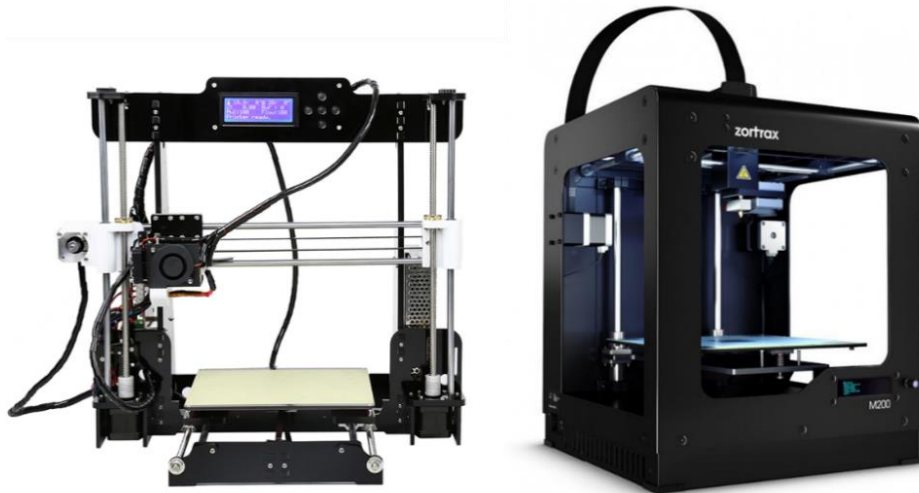


Figura 5-1 Prototipadora Anet A8 (izquierda) y prototipadora Zortrax M200 (derecha).



Las piezas que se fabricaron en materiales plásticos corresponden al mecanismo de reconfiguración y a los soportes para los servomotores que posicionan los dedos radialmente.

El proceso de prototipado rápido o “impresión en 3D” se ejecuta de la siguiente manera:

- 1) Modelado 3D de pieza a fabricar
- 2) Conversión de modelo 3D a formato “.STL”
- 3) Selección de material (ABS o PLA)
- 4) Conversión de formato de capas a código de prototipadora. Utilizando el software Cura y código G para Anet A8 y utilizando ZSuite y código Zcode para Zortrax M20.
- 5) Cargar código en prototipadora (vía SDCard o USB)

En la Figura 5-2 se muestra la prototipadora Zortrax M200 durante la impresión 3D de algunos componentes del gripper.



Figura 5-2 Impresión 3D de componentes en la prototipadora Zortrax M200.

Posterior a la fabricación, se realiza un ajuste para asegurar de que las partes embonan correctamente y asegurar que los mecanismos cumplirán con su función. Parte del ajuste consiste en comprobar que la holgura en las uniones sea la adecuada buscando reducir la fricción (uniones apretadas o con interferencias) o evitar el desgaste prematuro (provocado por demasiada holgura en uniones).

En la Figura 5-3 se puede observar el primer prototipo realizado del concepto 2 del dedo reconfigurable.

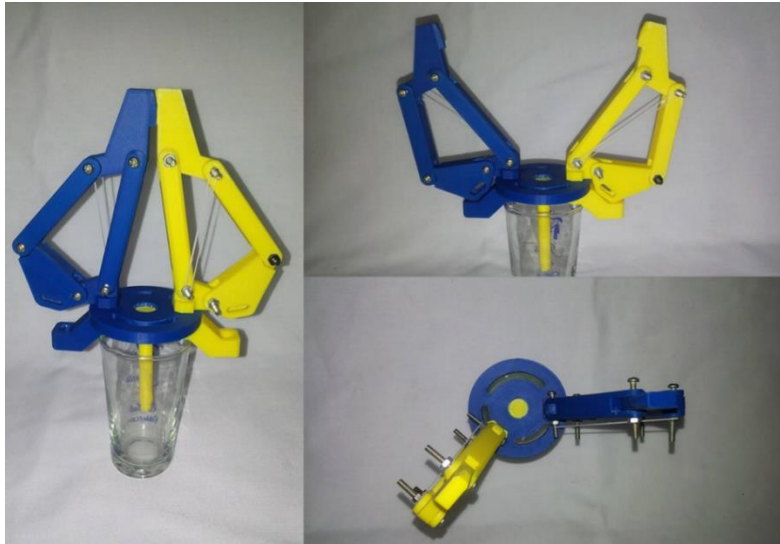


Figura 5-3 Prototipo alfa para concepto 2 de dedo.

El segundo prototipo alfa impreso es el mostrado en la Figura 5-4, el cual permitió validar físicamente posibles interferencias entre componentes y permitió comprobar el comportamiento del elemento empujador y del posicionamiento radial de los dedos. Dicho prototipo se puede validar de manera semiautomática con la electrónica y control adecuados.

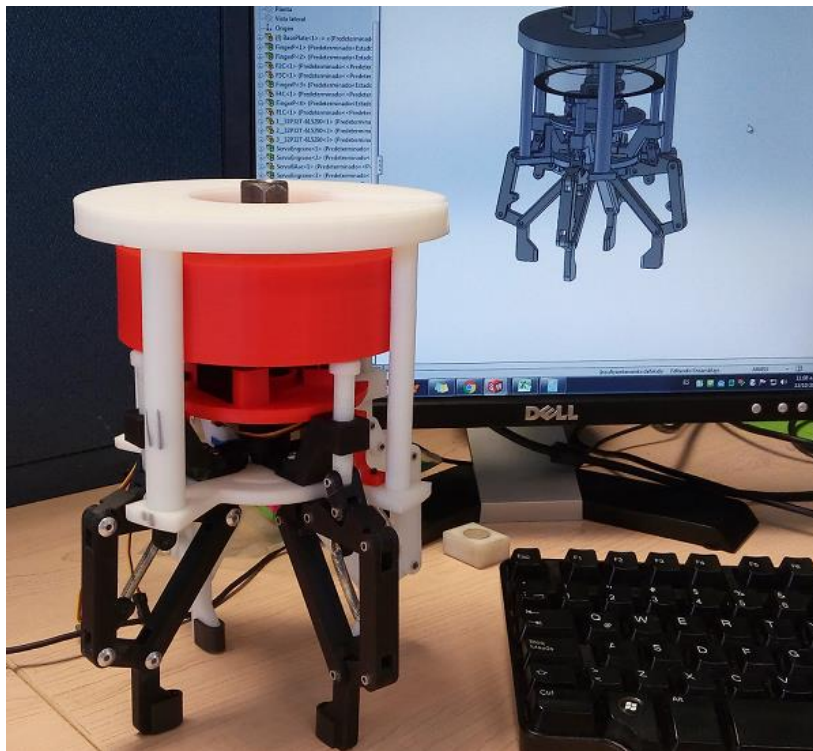


Figura 5-4 Prototipo alfa para prueba de mecanismo de reconfiguración y empujador.

## 5.2 Electrónica y control para prueba de prototipo alfa

Para validar el funcionamiento del prototipo alfa del sistema de reconfiguración, antes de desarrollar la electrónica y control, es necesario contar con cierta información de los componentes electromecánicos involucrados. El posicionamiento de los dedos se realiza mediante un servomotor Hi-Tec HS-85BB, el cual se controla mediante Pulse Width Modulation (PWM) y tiene un rango de 553 a 2300 microsegundos con una carrera de 182.5°. De acuerdo al diseño propuesto, se tiene un dedo fijo (dedo 1) a la palma mientras que los tres restantes pueden posicionarse en el siguiente rango:

Dedo 2: 90° a 135°.

Dedo 3: 180° a 225°.

Dedo 4: 270° a 315°.

De manera que los servomotores mencionados deberán sintonizarse para ubicarse dentro del rango para el dedo correspondiente. Se puede obtener más información de los servomotores en la hoja de datos ubicada en el Anexo 1.

Se realizó un programa sencillo que contiene 4 posiciones predefinidas y que fueron utilizadas para validar el funcionamiento del mecanismo de reconfiguración. Dicho programa se realizó utilizando un micro-controlador Arduino, debido a que éste último ya contiene librerías para controlar servomotores por PWM. El programa se puede revisar en el Anexo 3. Se realizaron pruebas de funcionamiento tal como se muestra en la Figura 5-5.

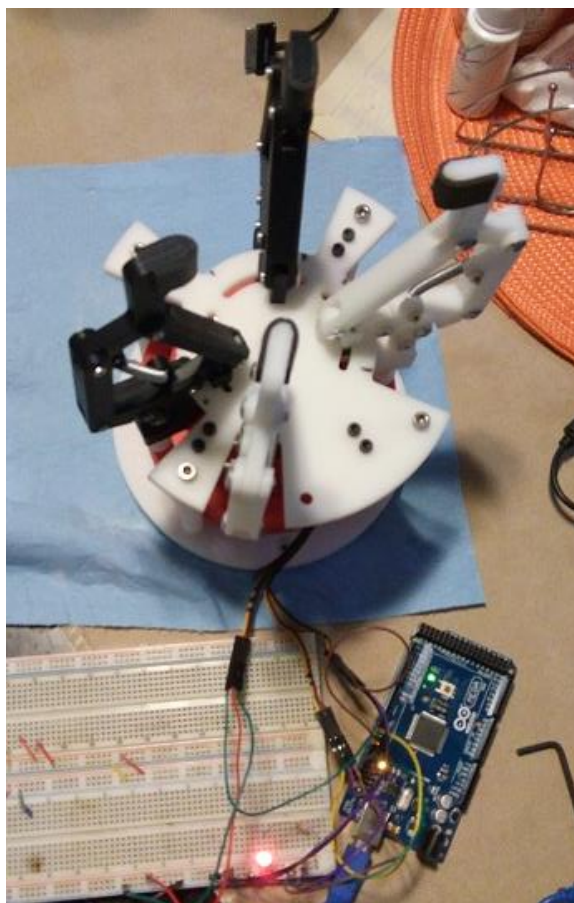


Figura 5-5 Prueba de prototipo alfa para reconfiguración en modo semiautomático.

Una vez que se validó el funcionamiento del mecanismo reconfigurable, se diseñó y fabricó un circuito impreso con la finalidad de integrar el micro-controlador y la electrónica requerida para accionar los servomotores. En el Anexo 3 se puede observar el diseño del circuito impreso para el control de los servomotores.

### **5.3 Prueba de gripper reconfigurable de cuatro dedos en laboratorio**

La siguiente etapa de validación requirió de la fabricación de un prototipo beta, el cual ya incorpora la mayoría de las funciones del gripper reconfigurable de cuatro dedos. El prototipo beta está fabricado en su mayoría por piezas de ABS impresas en la prototipadora 3D tal como se puede observar en la Figura 5-6.

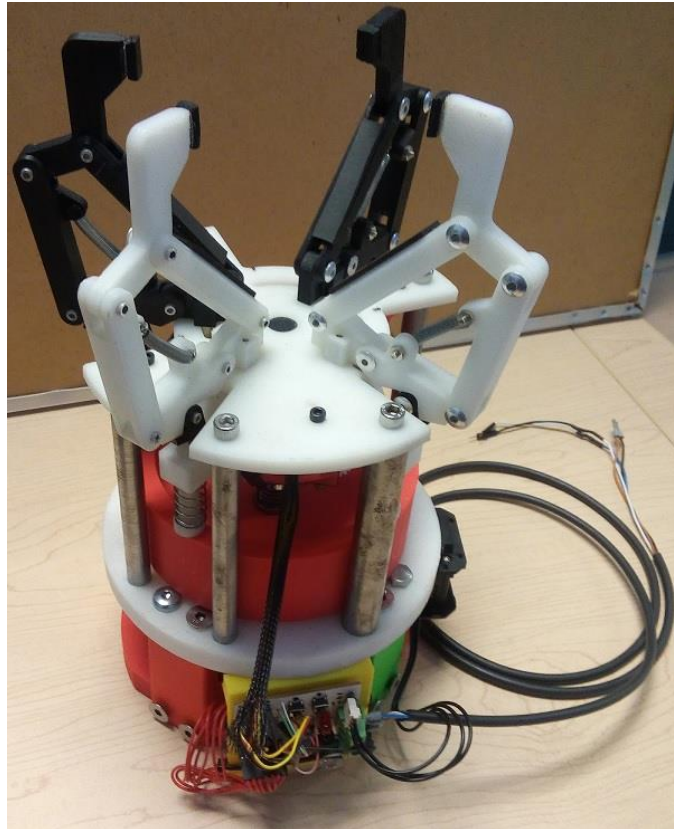


Figura 5-6 Prototipo beta de gripper reconfigurable de 4 dedos.

### 5.3.1 Algoritmo para control semiautomático de prototipo beta

Se desarrolló un algoritmo sencillo para definir la forma en que funcionará el gripper (Figura 5-7). Con la dimensión del objeto se deciden tanto la apertura que debe tener el gripper como la posición del dedo una vez que sujeta el objeto. Con dicha posición, con la masa y el material del objeto, se calcula la fuerza requerida para la sujeción utilizando las ecuaciones mostradas en el capítulo 3. Con la geometría del objeto se define la posición que deberá tener cada uno de los dedos y se da la orden al mecanismo de reconfiguración. Finalmente, se convierte la fuerza requerida a cierto valor en bits con los cuales el servomotor Dynamixel tomará el torque objetivo y comenzará a cerrar hasta alcanzar dicho valor.

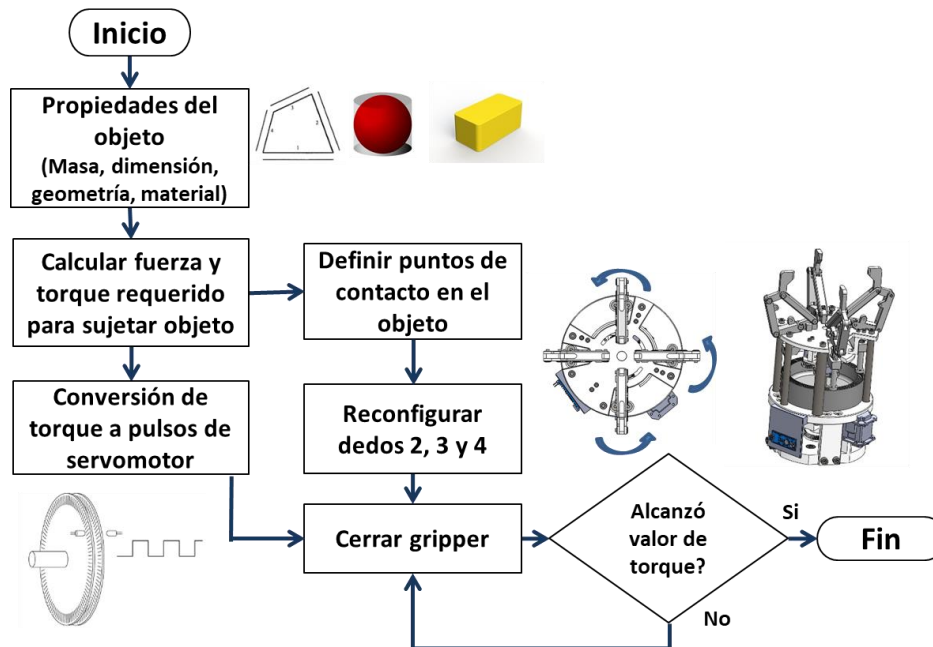


Figura 5-7 Algoritmo para control de prototipo beta de gripper reconfigurable.

### 5.3.2 Control electrónico para prototipo beta

En el capítulo 3 se mencionó que el control de la apertura y cierre del gripper se realizará utilizando un servomotor Dynamixel MX106T, el cual posee características muy adecuadas para el funcionamiento del gripper, ya que permite controlar velocidad, posición o torque durante su accionamiento. En nuestro caso, se utilizará el control de posición para abrir el gripper en su totalidad y para acercarse a la dimensión del objeto, mientras que el control por torque lo utilizaremos para presionar el objeto con una fuerza calculada de acuerdo a la dimensión y material del objeto. El servomotor Dynamixel se controla mediante la escritura de registros y a través de comunicación serial TTL.

Debido a que de momento no se cuenta con un programa avanzado para el microcontrolador Arduino, la prueba de apertura/cierre del prototipo beta del gripper se realizó a través del módulo Dynamixel Wizard (Figura 5-8) del software RoboPlusWeb, el cual sirve para configurar y mover los servomotores Dynamixel de manera manual; utilizando el adaptador “USB2Dynamixel” siguiendo el esquema de conexión de la Figura 5-9 (obtenida del datasheet del adaptador).

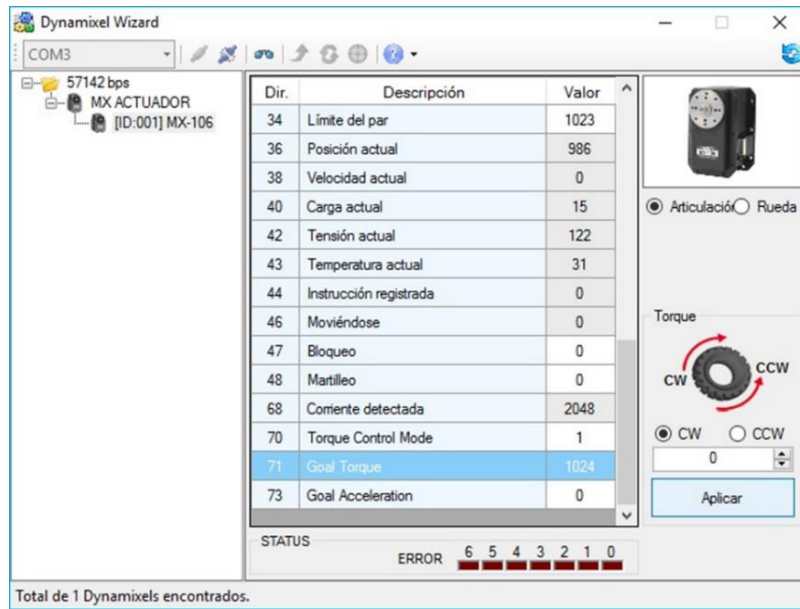


Figura 5-8 Registros del módulo Dynamixel Wizard para configuración del servomotor Dynamixel.

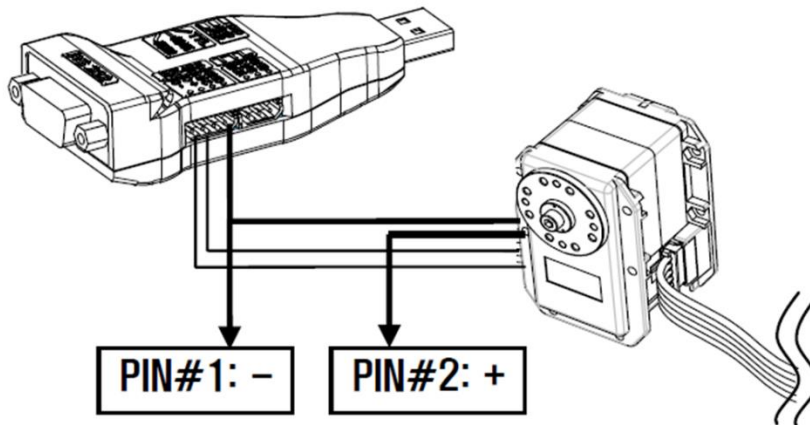


Figura 5-9 Esquema de conexión entre Dynamixel y el adaptador USB.

La manera de girar el servomotor para abrir o cerrar el gripper es seleccionar el sentido (CW o CCW) y asignar un valor en el registro “Goal Torque”, una vez que se presiona el botón “Aplicar” el servomotor comenzará a girar en el sentido seleccionado indefinidamente hasta que alcance el valor de torque configurador. Aplicado al funcionamiento del gripper, se deberá calcular el valor del torque requerido para sujetar un objeto en función de su material (coeficiente de fricción) y convertir el valor a la escala de bits admitida por el servomotor.

En el capítulo 3 en la sección de análisis, se mostró como calcular el torque requerido para la sujeción y de la hoja de datos del Dynamixel encontramos que si alimentamos el servomotor con 12 VCD, **1 bit** equivale a **0.00821114 Nm** de torque. Por lo tanto la relación de torque requerido (en Newton-metro) y bits queda de la siguiente manera:

Ecuación 5-1

$$\text{Valor de torque en bits} = \frac{\text{Torque requerido para sujeción}}{0.00821114 \text{ Nm/bit}}$$

De manera que si se toma el torque máximo requerido que se calculó en el capítulo 3, se obtiene que el valor correspondiente es de **405 bits**. Como se mencionó anteriormente, se requiere el control por posición para abrir/cerrar el gripper a cierta distancia del objeto antes de cerrar controlando el torque. De los datos del servomotor se observa que una revolución equivale a **4096 bits**. Por lo tanto, se tiene la siguiente relación para encontrar el valor de bits en control por posición:

Ecuación 5-2

$$\text{Valor de posición en bits} = \text{Revoluciones requeridas} * 4096$$

De acuerdo al cálculo de cinemática realizado previamente se encontró que se requieren **7.028 revoluciones** para llevar al gripper desde su apertura máxima hasta la apertura mínima. Por lo tanto, para cerrar completamente el gripper se requieren:

$$\text{Valor de posición en bits} = 7.028 \text{ rev} * 4096 \text{ bits/rev}$$

$$\text{Valor de posición en bits} = 28,786.68 \approx 28,787$$

Suponiendo que se sujetará un objeto con la misma masa (5 kg) y material pero diferente dimensión, el gripper se comportará de la forma en que se muestra en la Figura 5-10.



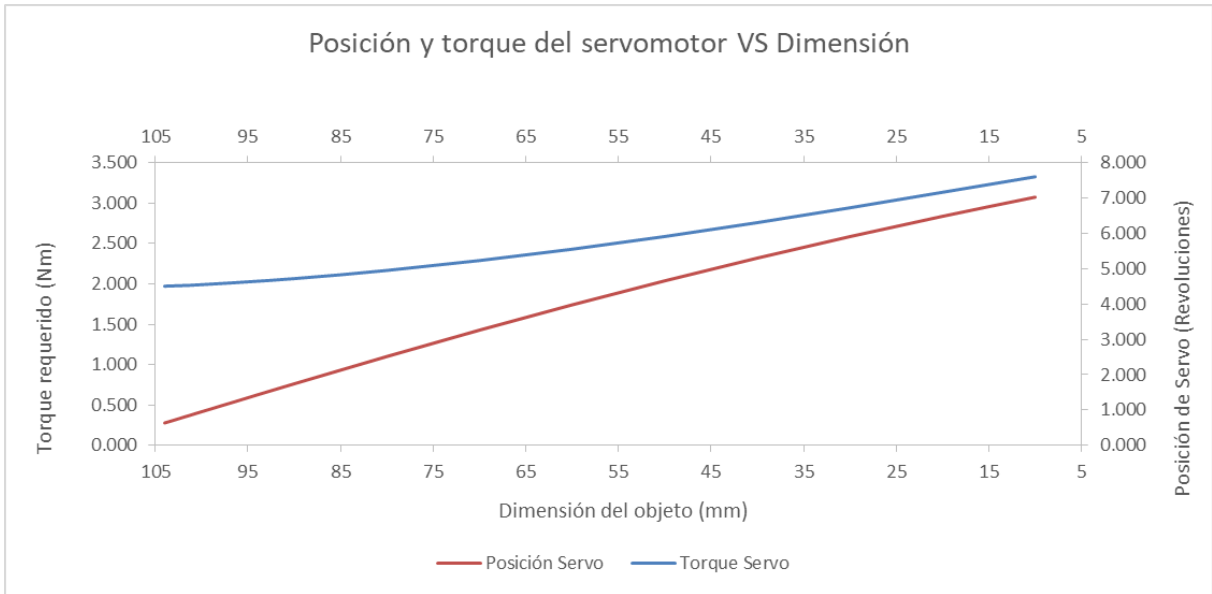


Figura 5-10 Comportamiento de torque y posición del servomotor en función del tamaño del objeto.

Una vez que se conoce como obtener los valores para la posición y torque en bits, es posible controlar el gripper reconfigurable de manera semi-automática utilizando el Dynamixel Wizard. En la Figura 5-11 se muestran algunas pruebas de sujeción con diferentes objetos realizadas en el laboratorio.

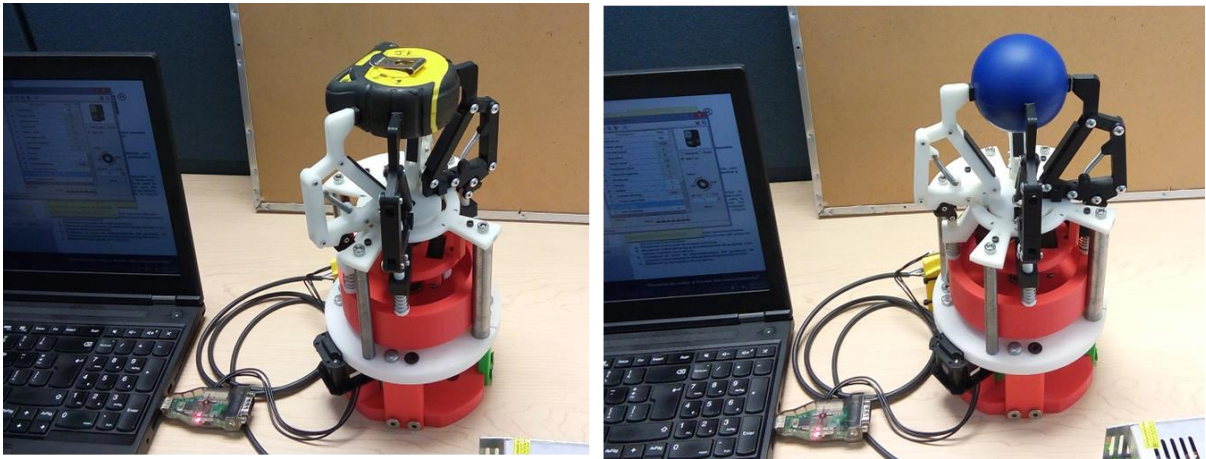


Figura 5-11 Pruebas de sujeción de objetos realizadas en el laboratorio.

#### 5.4 Planos de fabricación de gripper reconfigurable

Con las pruebas del gripper reconfigurable realizadas en el laboratorio se comprobó el diseño del gripper reconfigurable de cuatro dedos, por lo tanto se puede determinar que el diseño actual ya es el definitivo, mismo que incluye componentes comerciales definitivos y los materiales con los cuales se fabricará cada elemento. En la Figura 5-12 se muestra un renderizado del modelo 3D definitivo para el gripper reconfigurable de cuatro dedos. Ahora es necesario elaborar planos detallados que servirán de referencia para la manufactura de los componentes, dichos planos deberán contener toda la información necesaria para deducir el funcionamiento, la fabricación y, en caso de requerirse, la medición de las piezas a fabricar.



Figura 5-12 Renderizado del diseño definitivo del gripper reconfigurable de cuatro dedos.

De la Figura 5-13 a la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestran algunos planos de ensamble y planos de fabricación. La lista completa se encuentra en el Anexo 4.

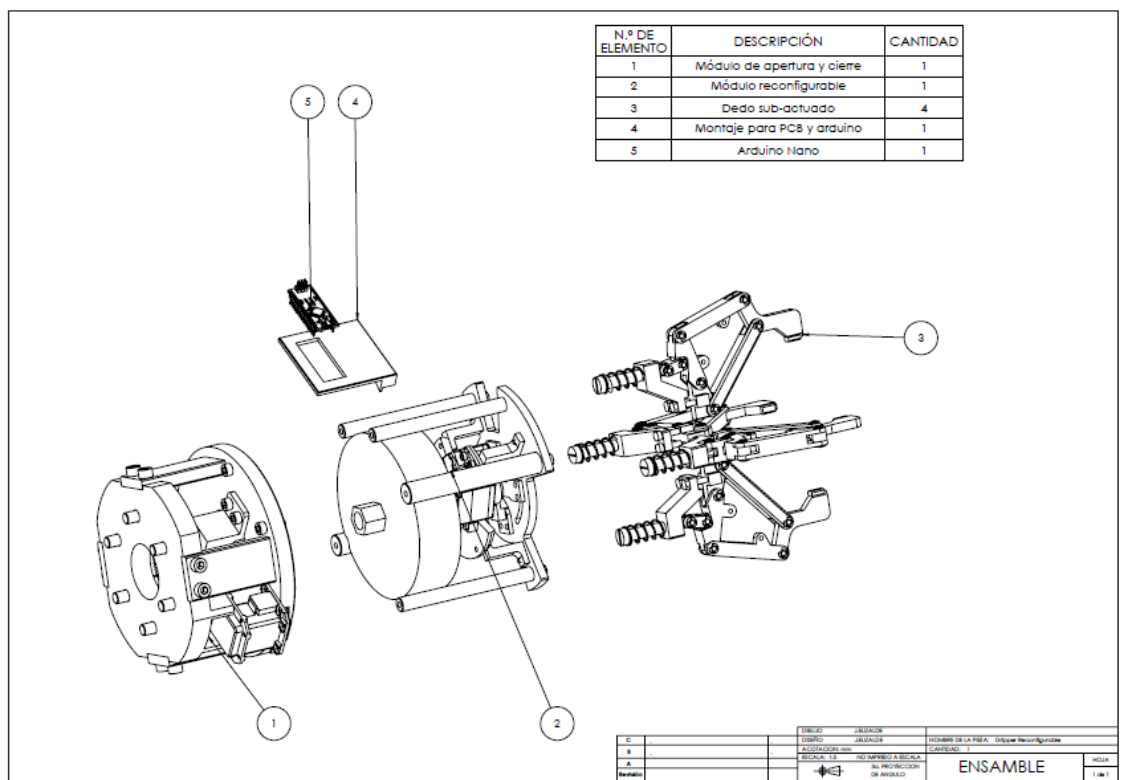


Figura 5-13 Plano 2D para ensamble de gripper reconfigurable de cuatro dedos.

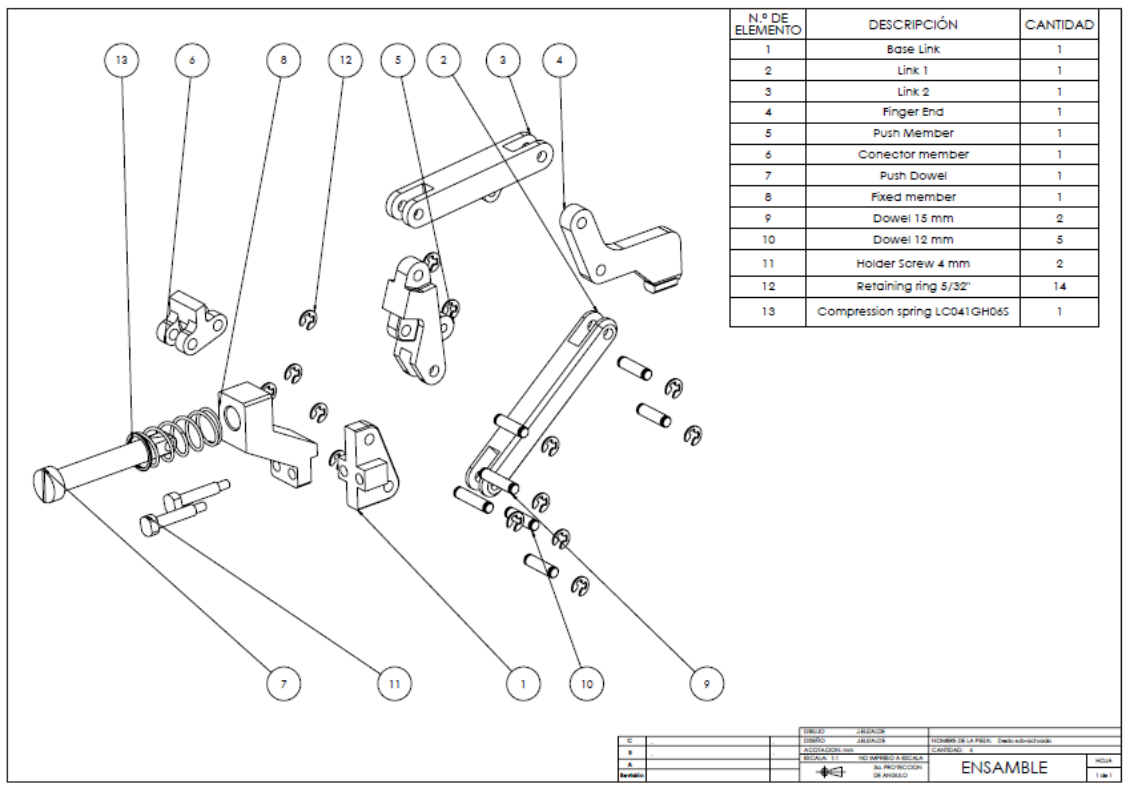


Figura 5-14 Plano 2D para ensamble de dedo sub-actuado.

---

---

# **Capítulo 6 – Implementación en robot industrial y validación experimental**

---

---

## Capítulo 6. Implementación en robot industrial y validación experimental

En este apartado se muestra la implementación del gripper reconfigurable en un robot industrial y el resultado de la validación de la sujeción con piezas de distinta forma y material. Se describen los pasos a seguir para la instalación del gripper en el robot así como la secuencia del robot para una operación de “pick and place” con el gripper. Finalmente se muestran imágenes de las pruebas realizadas.

### 6.1 Implementación en robot industrial

Previo a la validación experimental del gripper reconfigurable de cuatro dedos, fue necesario montar el gripper en el robot Motoman MH50 disponible en el laboratorio de robótica. El montaje en el robot requiere la siguiente secuencia:

- 1) Desensamblar la placa de montaje del gripper retirando los 8 tornillos ubicados en las caras laterales.
- 2) Ensamblar placa de montaje en el robot.
- 3) Ensamblar el gripper reconfigurable en la placa de montaje.

La Figura 6-1 muestra el prototipo beta del gripper reconfigurable de cuatro dedos montado en el robot Motoman MH50, energizado y listo para validar su funcionamiento.

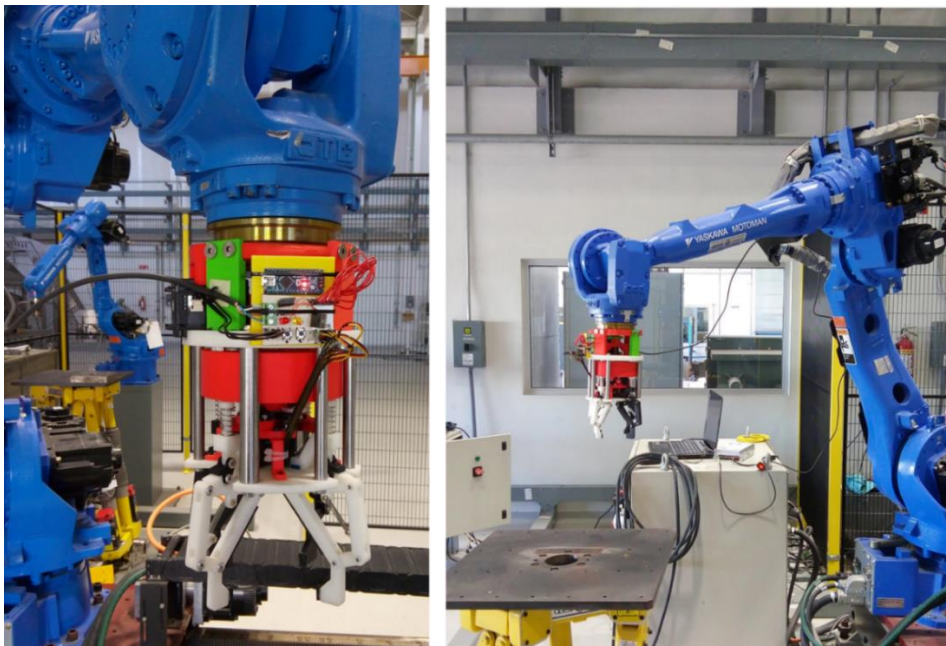


Figura 6-1 Gripper reconfigurable de 4 dedos montado en robot industrial.

Posterior al montaje del gripper, se configuró el TCP de la herramienta y se programaron algunas rutinas en el robot industrial. El gripper reconfigurable fue diseñado para permitir su montaje en los robots Motoman MH50 y MH6-10, disponibles en el laboratorio de robótica, sin embargo, puede ser montado en cualquier otra marca y modelo con solo reemplazar la placa de montaje superior del gripper.

## 6.2 Validación experimental de gripper reconfigurable montado en robot industrial

En esta sección se muestra el resultado de la validación experimental del gripper reconfigurable montado en el robot Motoman MH50. Es importante señalar que la experimentación descrita está enfocada a validar la funcionalidad del mecanismo reconfigurable y la sujeción.

No se contempla la selección de los puntos de sujeción de manera automática, es decir, que el gripper no puede definir los puntos en los cuales debe sujetar las piezas por su propia cuenta. Se utiliza el control desarrollado para el prototipo alfa del gripper, por lo tanto se tienen posiciones radiales ya definidas para los cuatro dedos del gripper, mismas que corresponden a configuraciones virtuales para emular la sujeción que realizarían grippers de 2 y 3 dedos. Se dice que corresponde a una configuración virtual debido a que para todos los casos se tendrán cuatro puntos de sujeción, sin embargo, la ubicación de los dedos será equivalente a la de un gripper de 2, 3 y 4 dedos según sea el caso.

La primera parte de la experimentación consistió en validar que el sistema de reconfiguración posicione los dedos en la ubicación deseada, misma que ya está definida en el programa de control. En las Figura 6-2, Figura 6-3 y Figura 6-4 se puede observar la configuración virtual equivalente a 2, 3 y cuatro dedos respectivamente, la cual se compara con la posición obtenida en el modelo 3D del gripper reconfigurable.

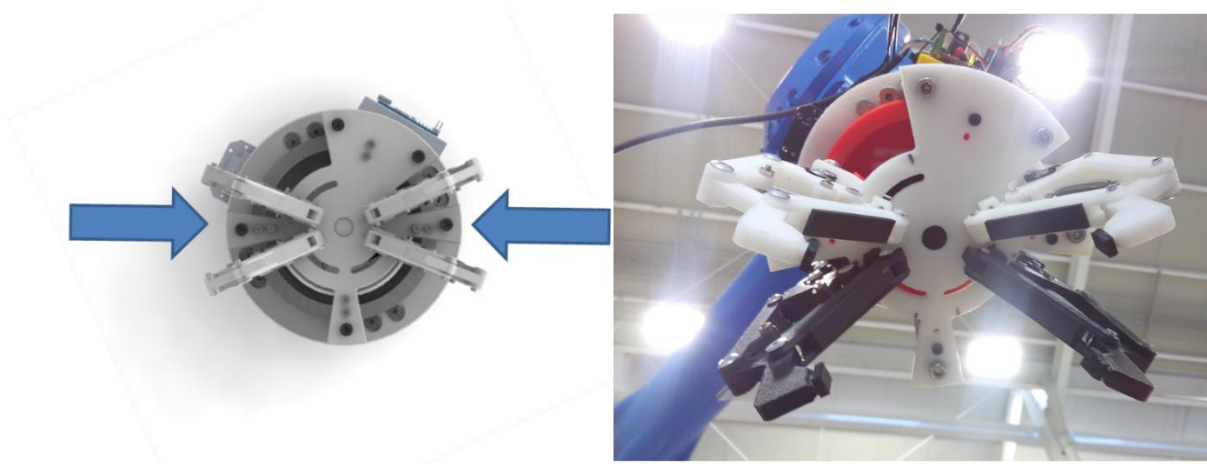


Figura 6-2 Configuración de gripper en 2 dedos virtuales.

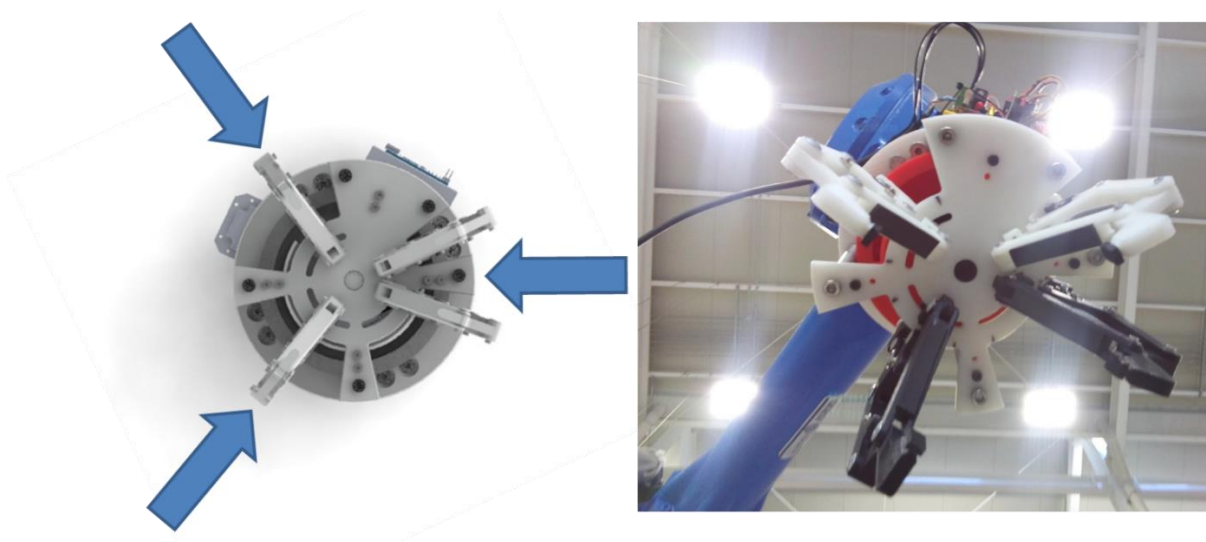


Figura 6-3 Configuración de gripper en 3 dedos virtuales.

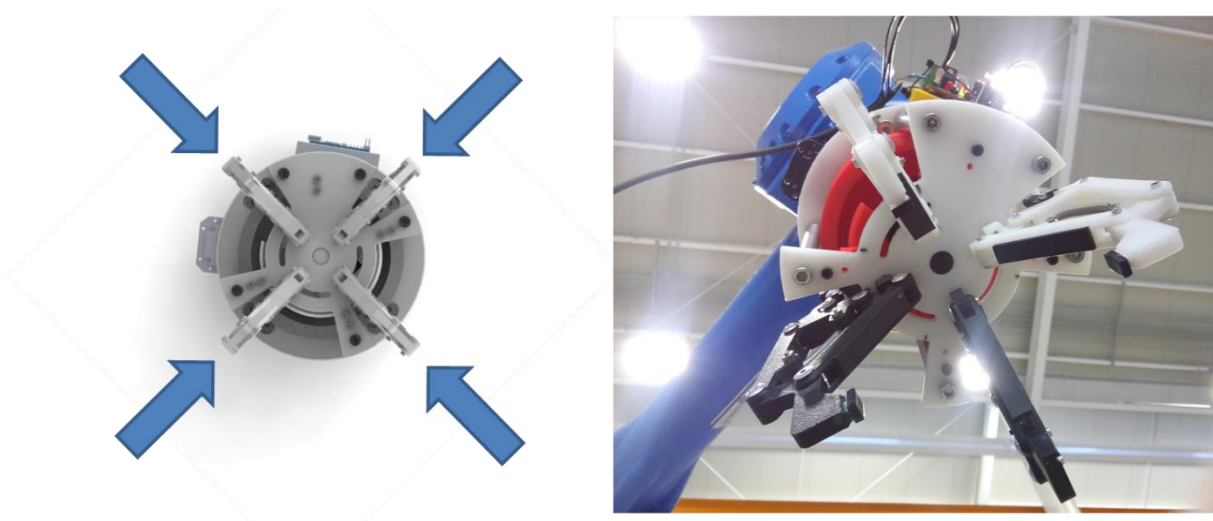


Figura 6-4 Configuración de gripper en 4 dedos.

La segunda parte de la experimentación consiste en sujetar objetos de diferente forma, tamaño y material. En la Figura 6-5 se muestran las piezas que se utilizaron en la validación.

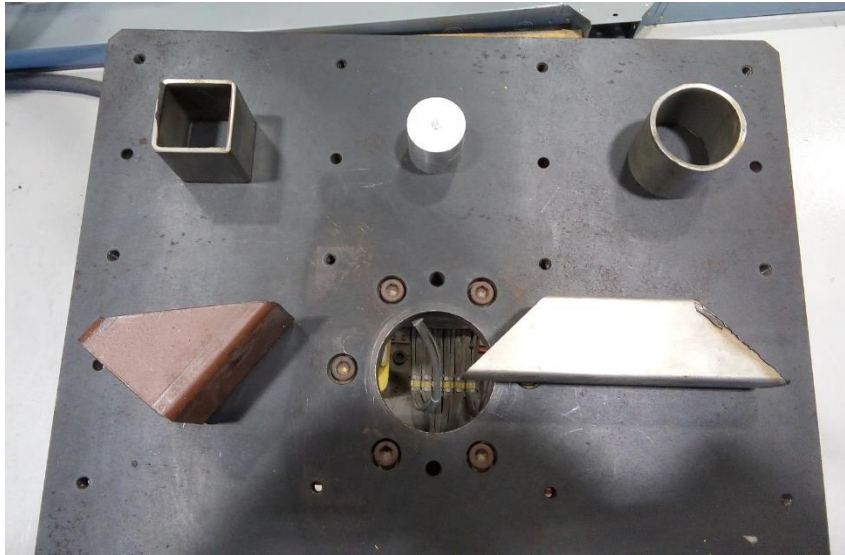


Figura 6-5 Piezas para validación de sujeción de gripper.

Las piezas seleccionadas para validar la sujeción del gripper son: perfil cuadrado de acero estructural, cilindro sólido de aluminio, cilindro hueco de acero inoxidable, pieza triangular de acero estructural y pieza trapezoidal de acero inoxidable.

La rutina que se programó en el robot industrial es semejante a una operación de “pick and place” donde básicamente el robot realiza las operaciones:

- 1) Movimiento a posición definida.
- 2) Desplazamiento en eje vertical en dirección negativa (eje  $-Z$ ).
- 3) Sujeción (pick) del objeto.
- 4) Desplazamiento en eje vertical en dirección positiva (eje  $+Z$ ).
- 5) Movimiento a posición definida.
- 6) Desplazamiento en eje vertical en dirección negativa.
- 7) Liberación (place) del objeto.
- 8) Desplazamiento en eje vertical en dirección positiva.
- 9) Movimiento a posición definida.

El proceso se repite para los cinco objetos de prueba. De la Figura 6-6 a la Figura 6-10 se puede observar el resultado de las pruebas de sujeción del gripper reconfigurable de cuatro dedos implementado con un robot industrial de seis grados de libertad.





Figura 6-6 Sujeción utilizando dos dedos virtuales.



Figura 6-7 Sujeción utilizando tres dedos virtuales.



Figura 6-8 Sujeción utilizando cuatro dedos.



Figura 6-9 Sujeción de objeto con posición aleatoria de dedos.



Figura 6-10 Sujeción de objeto cilíndrico utilizando dos dedos virtuales.

---

---

# **Capítulo 7 – Conclusión y trabajo futuro**

---

---

## Capítulo 7. Conclusión y trabajo futuro

### 7.1 Conclusiones

De acuerdo con la información obtenida de la literatura, el diseño de dispositivos reconfigurables es una fuerte necesidad en la industria debido a los cambios de mercado que cada vez se vuelven más frecuentes y de mayor complejidad. El gripper que se desarrolló en esta investigación permitirá sujetar componentes de diferente forma, tamaño y material aunque éstos no hayan sido procesados.

La metodología de diseño de ingeniería que se utilizó para el desarrollo del gripper permitió seguir un orden y establecer el entregable de cada etapa con la finalidad de evaluar el avance y tomar una decisión sobre si el camino a seguir era el adecuado. Por otra parte, la aplicación del análisis cinemático a cada uno de los conceptos para dedo permitió evaluar las ventajas y desventajas de cada uno, que además se complementó con un análisis de elemento finito lo que permitió observar el comportamiento de los esfuerzos en cada componente del dedo.

Otra actividad que ayudó a elegir el concepto más adecuado fue el cálculo de fuerza requerida, el cual permitió conocer cuanta fuerza se requiere aplicar para lograr una sujeción estable y evitar que el objeto deslice en una operación de “pick and place” por citar un ejemplo. Además, es muy importante conocer la fuerza requerida por el objeto, ya que si se trata de un material frágil se puede dañar el objeto al intentar sujetarlo con una fuerza superior a la requerida.

Con el análisis de elemento finito realizado al gripper completo, es decir, considerando la sujeción de un objeto en el peor escenario, la sujeción en el robot industrial y la acción de la gravedad; fue posible validar tanto materiales de fabricación como el diseño del gripper. Con los resultados del análisis MEF, fue posible estimar la vida útil para aquellos componentes que presentaron mayores esfuerzos bajo las condiciones descritas. El componente que presentó una cantidad de ciclos menor (menor vida útil) fue el componente llamado “Plato empujador” con  $4.08 \times 10^7$  ciclos. Es posible expresar la vida útil en horas o años si se conoce la frecuencia de sujeción que tendrá el gripper en una operación industrial, además, es conveniente recordar que la vida útil se estimó considerando el peor escenario dentro de las capacidades del gripper, por lo tanto, si se trabaja con objetos que requieran menor fuerza aplicada, el número de ciclos que soporta se incrementarán considerablemente.

Finalmente con la validación del gripper al implementarlo en un robot industrial permitió comprobar que el gripper tiene la capacidad de trabajar en un entorno industrial desde el punto de vista de funcionalidad y compatibilidad, además de ser un dispositivo de bajo costo en comparación con grippers adaptativos que se encuentran disponibles en el mercado.

En conclusión, se pueden enlistar las siguientes ventajas del gripper reconfigurable de cuatro dedos desarrollado en esta investigación:

- Sujeción de objetos de diferente geometría, peso y material sin necesidad de reemplazar el gripper.
- Evita el daño del objeto al distribuir la fuerza aplicada en más puntos de sujeción en comparación con los grippers convencionales de 2 y 3 dedos. Además, se tiene control de la fuerza aplicada dependiendo del material del objeto a sujetar.
- Es posible cambiar la localización de los puntos de sujeción conforme el objeto lo requiera (reconfigurabilidad de los dedos).
- Ofrece mayor capacidad de carga (hasta 5 kg) en agarre de precisión en comparación con los grippers adaptativos disponibles en el mercado.
- El análisis MEF permitió optimizar el diseño de los componentes y la selección de materiales más ligeros, permitiendo obtener un gripper de menor costo a los grippers disponibles en el mercado.
- Esta investigación proporciona las bases para el desarrollo de dispositivos de sujeción inteligentes aplicados en un entorno industrial.

## **7.2 Trabajos futuros**

Conforme se avanzó en el desarrollo de esta investigación y de acuerdo a lo que se encontró en la literatura, se identificaron algunas variantes que se pueden aplicar tomando como base el gripper reconfigurable propuesto en este trabajo de tesis. Como se mencionó, este trabajo solamente comprende el análisis del gripper para la sujeción de precisión, es decir, aquella que se realiza con la “yema” de los dedos. Por lo tanto, un trabajo a futuro es continuar con el análisis del gripper pero considerando una sujeción de fuerza, la cual se presenta cuando los dedos “abrazan” al objeto que se desea sujetar, similar a la sujeción de una pelota o un martillo por la mano humana.

También es posible trabajar en un algoritmo para definir cuáles son los puntos de sujeción más adecuados dependiendo de la forma del objeto, ya que en el presente trabajo es necesario definirlos puntos de sujeción manualmente. Dicho lo anterior, se puede combinar el algoritmo de puntos de sujeción con un sistema de visión e inteligencia artificial para desarrollar un gripper reconfigurable, autónomo e inteligente.

Otra variante es instrumentar los dedos del gripper para sustituir el control de torque del servomotor actual por un sistema de control en lazo cerrado que incluya sensores de fuerza en la “yema” de los dedos, lo que permitirá utilizar un actuador de menor costo. Además, se puede complementar el sistema de control integrando acelerómetros para variar la fuerza aplicada en tiempo real conforme se varía la

aceleración al trasladar un objeto de un lugar a otro en una actividad de “pick and place” por citar un ejemplo.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Y. Koren *et al.*, “Reconfigurable Manufacturing Systems,” *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 48, no. 2, pp. 527–540, 1999.
- [2] M. Bruccoleri, Z. J. Pasek, and Y. Koren, “Operation management in reconfigurable manufacturing systems: Reconfiguration for error handling,” *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 100, no. 1, pp. 87–100, 2006.
- [3] H. Choi and M. Koç, “Design and feasibility tests of a flexible gripper based on inflatable rubber pockets,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 46, pp. 1350–1361, 2006.
- [4] Z. M. Bi, S. Y. T. Lang, M. Verner, and P. Orban, “Development of reconfigurable machines,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 39, no. 11–12, pp. 1227–1251, 2008.
- [5] T. Laliberté and M. C. Gosselin, “Pergamon,” *Mech. Mach. Theory*, vol. 33, no. 1/2, pp. 39–57, 1998.
- [6] F. C. Samavati, A. Feizollahi, P. Sabetian, and S. A. A. Moosavian, “Design, fabrication and control of a three-finger robotic gripper,” in *Proceedings - 1st International Conference on Robot, Vision and Signal Processing, RVSP 2011*, 2011, pp. 280–283.
- [7] N. Boubekri and P. Chakraborty, “Robotic grasping: gripper designs, control methods and grasp configurations – a review of research,” *Integrated Manufacturing Systems*, vol. 13, no. 7, pp. 520–531, 2002.
- [8] A. Pettersson, S. Davis, J. O. Gray, T. J. Dodd, and T. Ohlsson, “Design of a magnetorheological robot gripper for handling of delicate food products with varying shapes,” *J. Food Eng.*, vol. 98, no. 3, pp. 332–338, 2010.
- [9] L. Biagiotti, C. Melchiorri, and G. Vassura, “A dexterous robotic gripper for autonomous grasping,” *Ind. Robot An Int. J.*, vol. 30, no. 5, pp. 449–458, 2003.
- [10] N. Nakazawa, I. Kim, H. Inooka, and R. Ikeura, “Force control of a robot gripper based on human grasping schemes,” *Control Eng. Pract.*, vol. 9, no. 7, pp. 735–742, 2001.
- [11] M. A. Roa and R. Suárez, “Grasp quality measures: review and performance,” *Auton. Robots*, vol. 38, no. 1, pp. 65–88, 2015.
- [12] R. Datta, S. Pradhan, and B. Bhattacharya, “Analysis and Design Optimization of a Robotic Gripper Using Multiobjective Genetic Algorithm,” *IEEE Trans. Syst. Man, Cybern. Syst.*, vol. 46, no. 1, pp. 16–26, 2016.
- [13] W.-H. Qian and H. Qiao, “An efficient algorithm for computing object poses in a modular fixture or gripper,” *J. Robot. Syst.*, vol. 19, no. 3, pp. 99–114, 2002.
- [14] W. Townsend, “The BarrettHand grasper – programmably flexible part handling and assembly,” *Ind. Robot An Int. J.*, vol. 27, pp. 181–188, 2000.
- [15] a. S. Kumar, J. Y. H. Fuh, and T. S. Kow, “Automated design and assembly of interference-free modular fixture setup,” *CAD Comput. Aided Des.*, vol. 32, no. 10, pp. 583–596, 2000.
- [16] S. Arimoto, “Intelligent control of multi-fingered hands,” *Annu. Rev. Control*, vol. 28, no. 1, pp. 75–85, 2004.
- [17] E. A. Al-Gallaf, “Multi-fingered robot hand optimal task force distribution,” *Rob. Auton. Syst.*, vol. 54, no. 1, pp. 34–51, 2006.
- [18] J. Su, Z. Ou, and H. Qiao, “Form-closure caging grasps of polygons with a



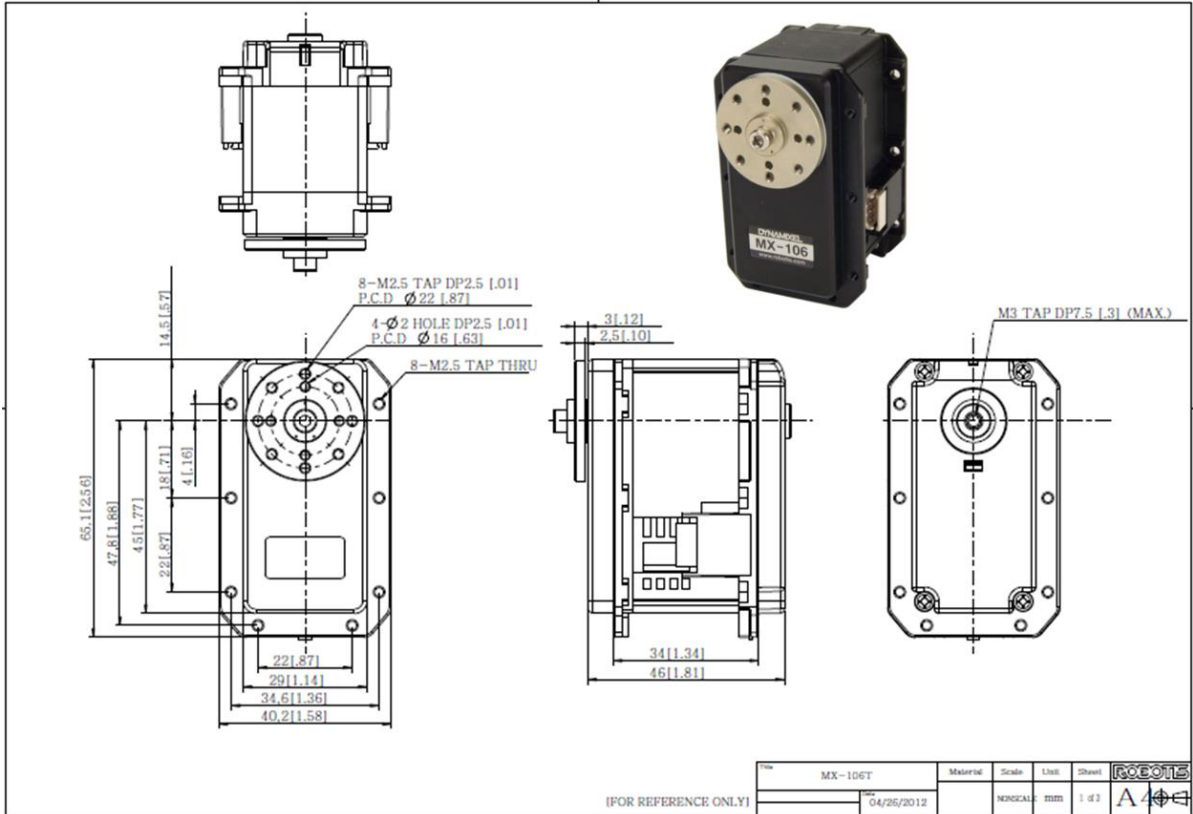
- parallel-jaw gripper,” *Robotica*, vol. 33, no. 06, pp. 1375–1392, 2015.
- [19] B. Shirinzadeh, “Strategies for planning and implementation of flexible fixturing systems in a computer integrated manufacturing environment,” *Comput. Ind.*, vol. 30, no. 3, pp. 175–183, 1996.
- [20] H. Du and G. C. I. Lin, “Development of an automated flexible fixture for planar objects,” *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 14, no. January, pp. 173–183, 1998.
- [21] S. Arzanpour, J. Fung, J. K. Mills, and W. L. Cleghorn, “Flexible fixture design with applications to assembly of sheet metal automotive body parts,” *Assem. Autom.*, vol. 26, no. 2, pp. 143–153, 2006.
- [22] R. Galan, J. Racero, I. Eguia, and J. M. Garcia, “A systematic approach for product families formation in Reconfigurable Manufacturing Systems,” *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 23, no. 5, pp. 489–502, 2007.
- [23] F. Chen, L. Carbonari, C. Canali, M. D’Imperio, and F. Cannella, “Design of a novel dexterous robotic gripper for in-hand twisting and positioning within assembly automation,” *Assem. Autom.*, vol. 35, no. 3, pp. 259–268, 2015.
- [24] N. Elango and a. a. M. Faudzi, “A review article: investigations on soft materials for soft robot manipulations,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, pp. 1027–1037, 2015.
- [25] J. Lee, “Kinematic synthesis of industrial robot hand/gripper - a creative design approach,” *Rob. Auton. Syst.*, vol. 4, no. 3, pp. 257–263, 1988.
- [26] G. Fantoni, S. Capiferri, and J. Tilli, “Method for Supporting the Selection of Robot Grippers,” *Procedia CIRP*, vol. 21, pp. 330–335, 2014.
- [27] A. Morales, P. J. Sanz, A. P. del Pobil, and A. H. Fagg, “Vision-based three-finger grasp synthesis constrained by hand geometry,” *Rob. Auton. Syst.*, vol. 54, pp. 496–512, 2006.
- [28] B. H. B. Yeung and J. K. Mills, “Design of a six DOF reconfigurable gripper for flexible fixtureless assembly,” *IEEE Trans. Syst. Man Cybern. Part C Appl. Rev.*, vol. 34, no. 2, pp. 226–235, 2004.
- [29] S. RAGUNATHAN and L. KARUNAMOORTHY, “Modeling and Dynamic Analysis of Reconfigurable Robotic Gripper System for Handling Fabric Materials in Garment Industries,” *J. Adv. Manuf. Syst.*, vol. 5, no. 2, pp. 233–254, 2006.
- [30] L. Wu, G. Carbone, and M. Ceccarelli, “Designing an underactuated mechanism for a 1 active DOF finger operation,” *Mech. Mach. Theory*, vol. 44, no. 2, pp. 336–348, 2009.
- [31] F. Cannella, F. Chen, C. Canali, A. Eytan, A. Bottero, and D. Caldwell, “Design of an industrial robotic gripper for precise twisting and positioning in high-speed assembly,” *Proc. 2013 IEEE/SICE Int. Symp. Syst. Integr.*, pp. 443–448, 2013.
- [32] J. Su, C. Liu, and H. Qiao, “A new, simple and universal four-finger gripper for 3D objects grasping,” *Lect. Notes Comput. Sci. (including Subser. Lect. Notes Artif. Intell. Lect. Notes Bioinformatics)*, vol. 5315 LNAI, no. PART 2, pp. 659–668, 2008.
- [33] D. Petkovic, N. D. Pavlovic, S. Shamshirband, and N. B. Anuar, “Development of a new type of passively adaptive compliant gripper,” *Ind. Robot An Int. J.*, vol. 40, no. 6, pp. 610–623, 2013.
- [34] E. E. Perez-garza, “Adaptive Reconfigurable Gripper Implementing Magnetorheological Fluids: Design and Analysis by Finite Element Method,” Thesis to Master in Mechatronics, Center of Engineering and Industrial Development, 2013.

- [35] A. G. Erdman and G. N. Sandor, *Mechanism Design*, no. v. 2. Prentice-Hall, 1984.
- [36] L. Birglen and C. M. Gosselin, "Grasp-state plane analysis of two-phalanx underactuated fingers," *Mech. Mach. Theory*, vol. 41, no. 7, pp. 807–822, 2006.
- [37] M. Wagner, J. Morehouse, and S. Melkote, "Prediction of part orientation error tolerance of a robotic gripper," *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 25, no. 2, pp. 449–459, 2009.
- [38] R. a. A. Zitar, "Optimum gripper using ant colony intelligence," *Ind. Robot An Int. J.*, vol. 32, no. 1, pp. 17–23, 2005.
- [39] R. C. Juvinall and H. Saunders, *Fundamentals of Machine Component Design*, vol. 105, no. 4. 1983.
- [40] J. M. Gere, B. J. Goodno, and J. L. Cárdenas, *Mecánica de Materiales*. Cengage Learning Latin America, 2009.
- [41] R. Budynas and K. Nisbett, *Shigley's Mechanical Engineering Design*. McGraw-Hill Education, 2010.
- [42] M. Kuna, *Finite Elements in Fracture Mechanics*, vol. 201. 2013.
- [43] R. L. Norton, *Design of Machinery: An Introduction to the Synthesis and Analysis of Mechanisms and Machines*. McGraw-Hill Higher Education, 2003.
- [44] G. a. Kragten and J. L. Herder, "The ability of underactuated hands to grasp and hold objects," *Mech. Mach. Theory*, vol. 45, no. 3, pp. 408–425, 2010.
- [45] F. Chen, F. Cannella, C. Canali, A. Eytan, A. Bottero, and D. Caldwell, "Theoretical and Kinematic Solution of High Reconfigurable Grasping for Industrial Manufacturing," no. December, pp. 734–739, 2013.
- [46] L. Birglen, "Enhancing versatility and safety of industrial grippers with adaptive robotic fingers," *IEEE Int. Conf. Intell. Robot. Syst.*, vol. 2015–Decem, pp. 2911–2916, 2015.
- [47] X. V. Ha, C. Ha, and D. K. Nguyen, "A general contact force analysis of an underactuated finger in robot hand grasping," *Int. J. Adv. Robot. Syst.*, vol. 13, no. 1, 2016.
- [48] F. Chen, F. Cannella, C. Canali, T. Hauptman, G. Sofia, and D. Caldwell, "In-hand precise twisting and positioning by a novel dexterous robotic gripper for industrial high-speed assembly," *2014 IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, pp. 270–275, 2014.
- [49] G. P. Jung, J. S. Koh, and K. J. Cho, "Underactuated adaptive gripper using flexural buckling," *IEEE Trans. Robot.*, vol. 29, no. 6, pp. 1396–1407, 2013.
- [50] D. Petkovic, N. D. Pavlovic, S. Shamshirband, and N. B. Anuar, "Development of a new type of passively adaptive compliant gripper," *Ind. Robot An Int. J.*, vol. 40, no. 6, pp. 610–623, 2013.
- [51] J. R. Davis, *Surface Engineering for Corrosion and Wear Resistance*. Maney Publishing, 2001.
- [52] Y. Wu, Y. Rong, W. Ma, and S. R. Leclair, "Automated modular fixture planning : Geometric analysis," *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 14, pp. 1–15, 1998.
- [53] R. Kolluru, K. P. Valavanis, S. a. Smith, and N. Tsourveloudis, "Design fundamentals of a reconfigurable robotic gripper system," *IEEE Trans. Syst. Man, Cybern. Part A Systems Humans.*, vol. 30, no. 2, pp. 181–187, 2000.
- [54] S. Çalışkan, H. Lekesiz, A. Karaca, and A. Yildiz, "Fatigue properties of ABS Thermoplastics used in exterior lighthing," 2016.

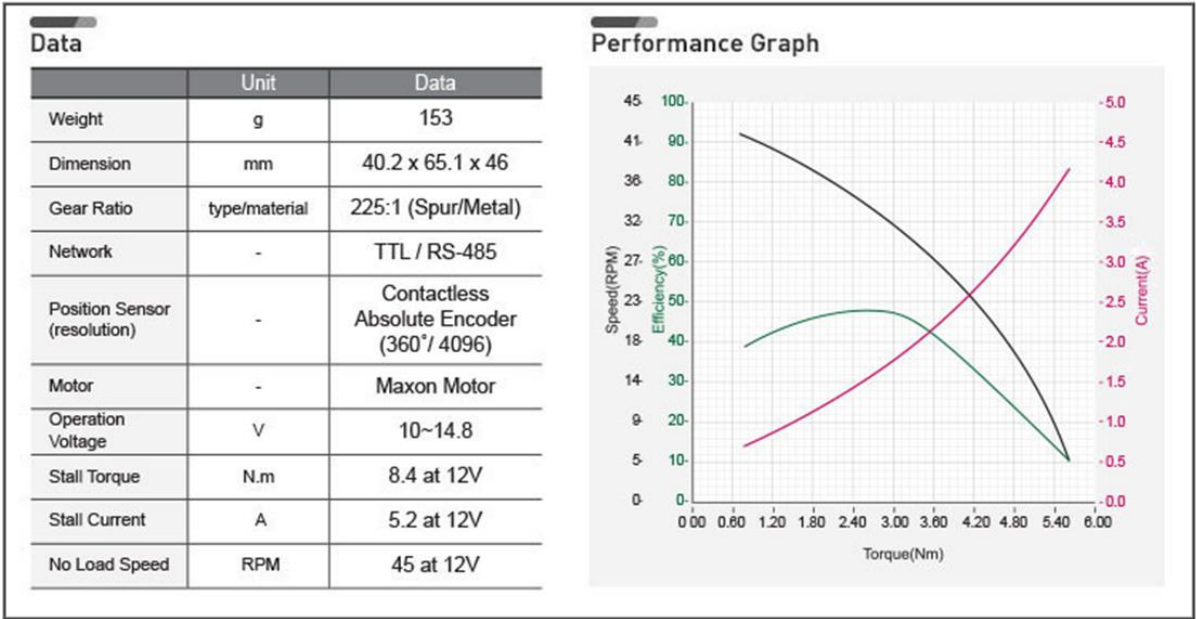
- [55] G. T. Yahr, "Fatigue Design Curves for 6061-T6 Aluminum," *Journal of Pressure Vessel Technology*, vol. 119, no. 2. p. 211, 1997.
- [56] L. Y. Shum and B. D. Ottinger, "Force-controlled gripper with adaptive accommodation," 1986.
- [57] K. F. Fischer, "Flexible part-centering pneumatic gripper." Google Patents, 1987.
- [58] G. Guo, X. Qian, and W. A. Gruver, "Multi-function mechanical hand with shape adaptation." Google Patents, 1995.
- [59] M. S. Kim, B. S. Kang, W. J. Chung, H. J. Lee, and C. Lee, "Robot hand and robot hand finger." Google Patents, 2005.
- [60] W. T. Townsend *et al.*, "Intelligent, self-contained robotic hand." Google Patents, 2007.
- [61] J. Koyama, "Finger unit and multi-finger grasping mechanism." Google Patents, 2009.
- [62] H. Park, S. W. Jung, J. C. Hwang, and Y. W. Choi, "Industrial gripper with multiple degrees of freedom." Google Patents, 2013.
- [63] L. Birglen, "Self-adaptive mechanical finger and method," 2014.
- [64] L. A. A. Demers, S. Lefrançois, and J. P. Jobin, "Gripper having a two degree of freedom underactuated mechanical finger for encompassing and pinch grasping." Google Patents, 2015.

# ANEXO 1

## Ficha técnica de Servomotor Dynamixel MX106T



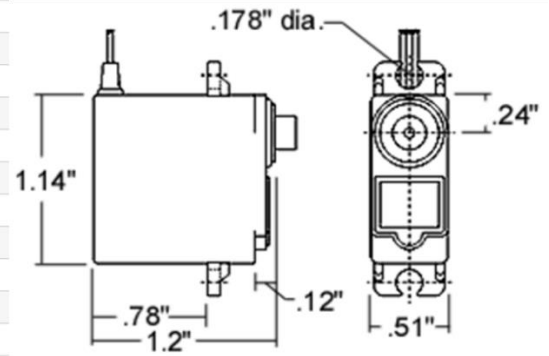
- MCU : ST CORTEX-M3 ( STM32F103C8 @ 72MHZ,32BIT)
- POSITION SENSOR : Contactless absolute encoder (12BIT,360 DEGREE)
  - Maker : ams (www.ams.com), Part No : AS5045
- MOTOR : Maxon
- BAUD RATE : 8000 bps ~ 4.5 Mbps
- CONTROL ALGORITHM : PID CONTROL
- Resolution : 0.088°
- Running Degree
  - 0° ~ 360°
  - Endless Turn
- Weight : 153g
- Dimension : 40.2mm x 65.1mm x 46mm
- Gear Reduction Ratio : 225 : 1
- Stall Torque
  - 8.0N.m (at 11.1V, 4.8A),
  - 8.4N.m (at 12V, 5.2A)
  - 10.0N.m (at 14.8V, 6.3A)
- No load speed
  - 41rpm (at 11.1V)
  - 45rpm (at 12V)
  - 55rpm (at 14.8V)
- Running Temperature : -5°C ~ +80°C
- Voltage : 10 ~ 14.8V (Recommended Voltage 12V)
- Command Signal : Digital Packet
- Protocol Type
  - MX-106T (Half duplex Asynchronous Serial Communication (8bit,1stop, No Parity))
  - MX-106R (RS485 Asynchronous Serial Communication (8bit,1stop, No Parity))
- Link (Physical)
  - MX-106T (TTL Level Multi Drop Bus)
  - MX-106R (RS485 Multi Drop Bus)
- ID : 254 ID (0~253)
- Feedback : Position, Temperature, Load, Input Voltage, etc.
- Material : Full Metal Gear, Metal Body(Front), Engineering Plastic Body(Middle, Back)
- Standby current : 100 mA



Stall torque : Peak stall torque read from transient state  
 Performance graph (N-T Curve) : A graph shows torque measured in stable condition while increasing load  
 \*Normally, stall torque is bigger than maximum torque on performance graph.

## Ficha técnica de Servomotor Hitec HS-85BB

Dimensions	1.14" x 0.51" x 1.18" (29 x 13 x 30mm)
Product Weight	0.67oz (19.2g)
Output Shaft Style	24 tooth (C1) spline
Voltage Range	4.8V - 6.0V
No-Load Speed (4.8V)	0.16sec/60°
No-Load Speed (6.0V)	0.14sec/60°
Stall Torque (4.8V)	41.66 oz/in. (3kg.cm)
Stall Torque (6.0V)	48.6 oz/in. (3.5kg.cm)
Max PWM Signal Range (Standard)	553-2300µsec
Travel per µs (out of box)	.104°/µsec
Max Travel (out of box)	182.5°
Pulse Amplitude	3-5V
Operating Temperature	-20°C to +60°C
Current Drain - idle (4.8V)	8mA
Current Drain - idle (6.0V)	8.6mA
Current Drain - no-load (4.8V)	240mA
Current Drain - no-load (6V)	260mA
Continuous Rotation Modifiable	No
Direction w/ Increasing PWM Signal	Clockwise
Deadband Width	8µs
Motor Type	3 Pole Ferrite
Potentiometer Drive	Direct Drive
Feedback Style	5KΩ Potentiometer
Output Shaft Support	Top Ball Bearing
Gear Type	Straight Cut Spur
Gear Material	Nylon
Wire Length	6.29" (160mm)
Wire Gauge	28AWG



## ANEXO 2

### Hoja técnica de material ABS

#### Material Data Sheet: Z-ABS



Physical Properties	Metric	English	Comments
Density	1.04 g/cm <sup>3</sup>	8.679 lbs/gal	ASTM DATA
Linear Mold Shrinkage	0.0055 cm/cm	0.0055 in/in	
Melt Flow	3.9 g/10 min Load 3.80 kg, Temperature 230 °C	0.0086 lb/10 min Load 8.38 lb, Temperature 446 °F	ASTM DATA

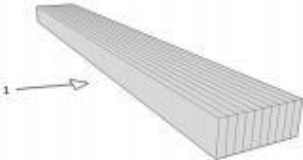
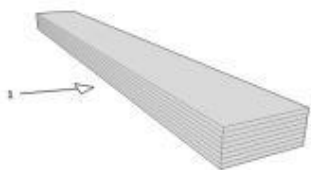
  

Mechanical Properties	Metric	English	Comments
Hardness, Rockwell R	108	108	
Tensile Strength, Yield	30.3 MPa	4390 psi	ASTM DATA
Elongation at Yield	1.8 %	1.8 %	ISO DATA
Tensile Modulus	1.86 GPa	270 ksi	ASTM DATA
Izod Impact, Notched	1.33 J/cm	2.49 ft-lb/in	ASTM DATA
Charpy Impact, Unnotched	NB	NB	ISO DATA
	NB	NB	ISO DATA, Low Temp
Charpy Impact, Notched	0.700 J/cm <sup>2</sup>	3.33 ft-lb/in <sup>2</sup>	ISO DATA, Low Temp
	1.600 J/cm <sup>2</sup>	7.61 ft-lb/in <sup>2</sup>	ISO DATA



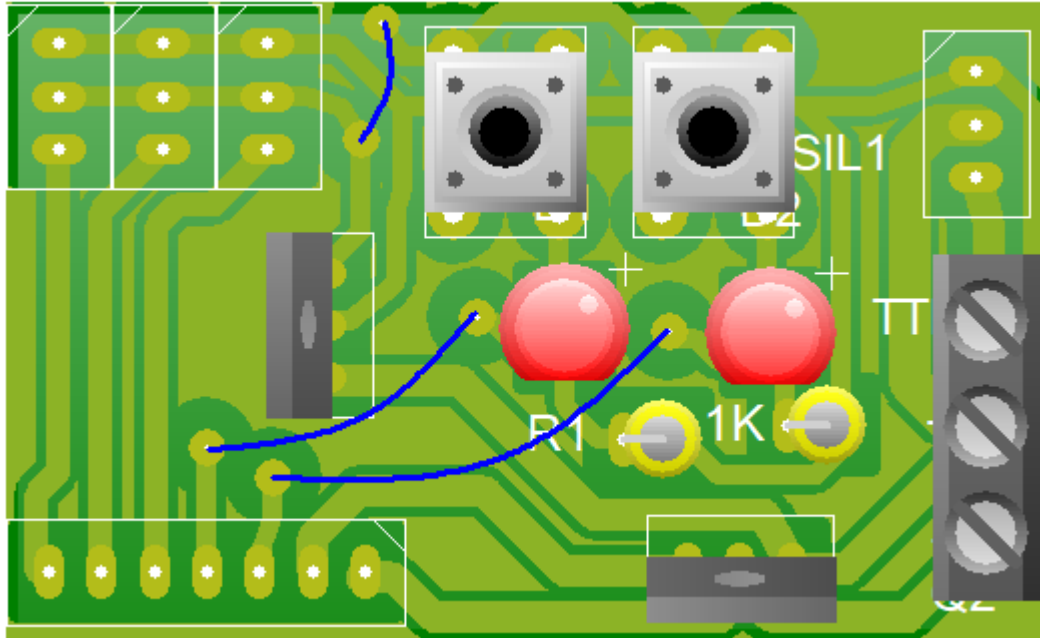
## Hoja técnica de material PLA

MECHANICAL PROPERTIES   TENSILE TEST		Test Method ISO 527		
<p>All test specimens were printed using an Ultimaker 2+ under the following conditions:                      Printing temperature: 210 °C                      Heated bed temperature: 60 °C                      Print speed: 40 mm/s                      Number of shells: 2                      Infill under 45°</p>	 <p>Printed vertical (Z-axis)</p>		 <p>Printed horizontal (X,Y-axis)</p>	
	Infill	50%	100%	50%
Tensile strength (MPa)	13.6 ± 2.6	28.8 ± 4.2	24.1 ± 0.6	38.1 ± 0.9
Force at break (MPa)	13.4 ± 2.5	28.6 ± 4.1	23.9 ± 0.7	36.3 ± 1.2
Elongation at max force (%)	0.7 ± 0.2	1.1 ± 0.3	2.2 ± 0.1	2.1 ± 0.0
Elongation at break (%)	0.7 ± 0.2	1.1 ± 0.3	2.4 ± 0.1	2.8 ± 0.2
Relative tensile strength (MPa/g)	1.5 ± 0.3	2.4 ± 0.4	2.7 ± 0.1	3.3 ± 0.1
E modulus (MPa)	2028 ± 59	3150 ± 54	1760 ± 38	2852 ± 88

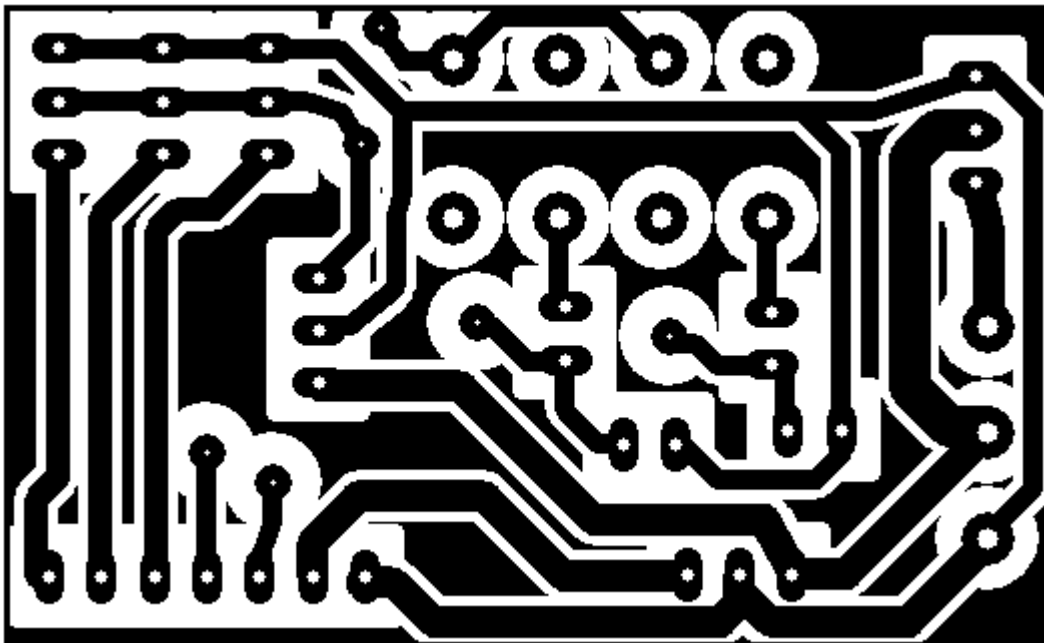
MECHANICAL PROPERTIES   IMPACT TEST		Test Method ISO 179	
<p>All test specimens were printed using an Ultimaker 2+ under the following conditions:                      Printing temperature: 210 °C                      Heated bed temperature: 60 °C                      Print speed: 40 mm/s                      Number of shells: 2                      Infill under 45°                      1→: impact direction</p>	 <p>Charpy (en)</p>		 <p>Charpy (ep)</p>
	Infill	100%	100%
Impact strength (kJ/m <sup>2</sup> )	14.2 ± 0.7	13.1 ± 0.7	13.1 ± 0.7
Impact energy (mJ)	521.5 ± 26.8	501.7 ± 31.1	501.7 ± 31.1

## ANEXO 3

Diseño de PCB (Printed Circuit Board) utilizada en control



Modelo virtual del PCB



Líneas de circuito

## Programa de control (micro-controlador Arduino) para prueba de prototipo de gripper

/\* Configuración y rango para dedos:

Dedo 2 --> Pin 8 Rango 600 - 1200 usec (0 - 45°)

Dedo 3 --> Pin 9 Rango 570 - 1220 usec (0 - 45°)

Dedo 4 --> Pin 10 Rango 600 - 1220 usec (0 - 45°)

Configuración 2 dedos virtuales:

Dedo 2: 600 usec

Dedo 3: 1220 usec

Dedo 4: 600 usec

Configuración 3 dedos virtuales:

Dedo 2: 600 usec

Dedo 3: 800 usec

Dedo 4: 1000 usec

Configuración 4 dedos:

Dedo 2: 1200 usec

Dedo 3: 1220 usec

Dedo 4: 1220 usec

Pin 2 configurado como selector de función.

Pin 3 configurado como ejecutor o start.

\*/

```
#include <Servo.h>
```

```
Servo myservo;
```

```
int ServoPulso1=600;
```

```
int ServoPulso2=570;
```

```
int ServoPulso3=600;
```

```
int buttonState=0;
```

```
int contador=0;
```

```

int movState=0;

void setup() {

pinMode(2,INPUT);
pinMode(4,INPUT);
Serial.begin(9600);
}

void loop() {
inicio:
buttonState = digitalRead(2);
movState = digitalRead(4);
Serial.println(contador);
if (buttonState == HIGH) {
contador=contador+1;
if (contador==4){
contador =1;
}
delay(1000);
goto estado;
}
if (movState == HIGH){
myservo.attach(6,600,1200);
myservo.writeMicroseconds(ServoPulso1);
delay(1500);
myservo.attach(9,570,1220);
myservo.writeMicroseconds(ServoPulso2);
delay(1500);
myservo.attach(10,600,1220);
myservo.writeMicroseconds(ServoPulso3);
delay(1500);
}
}

```

```
myservo.attach(3);
}
else {
goto inicio;
}

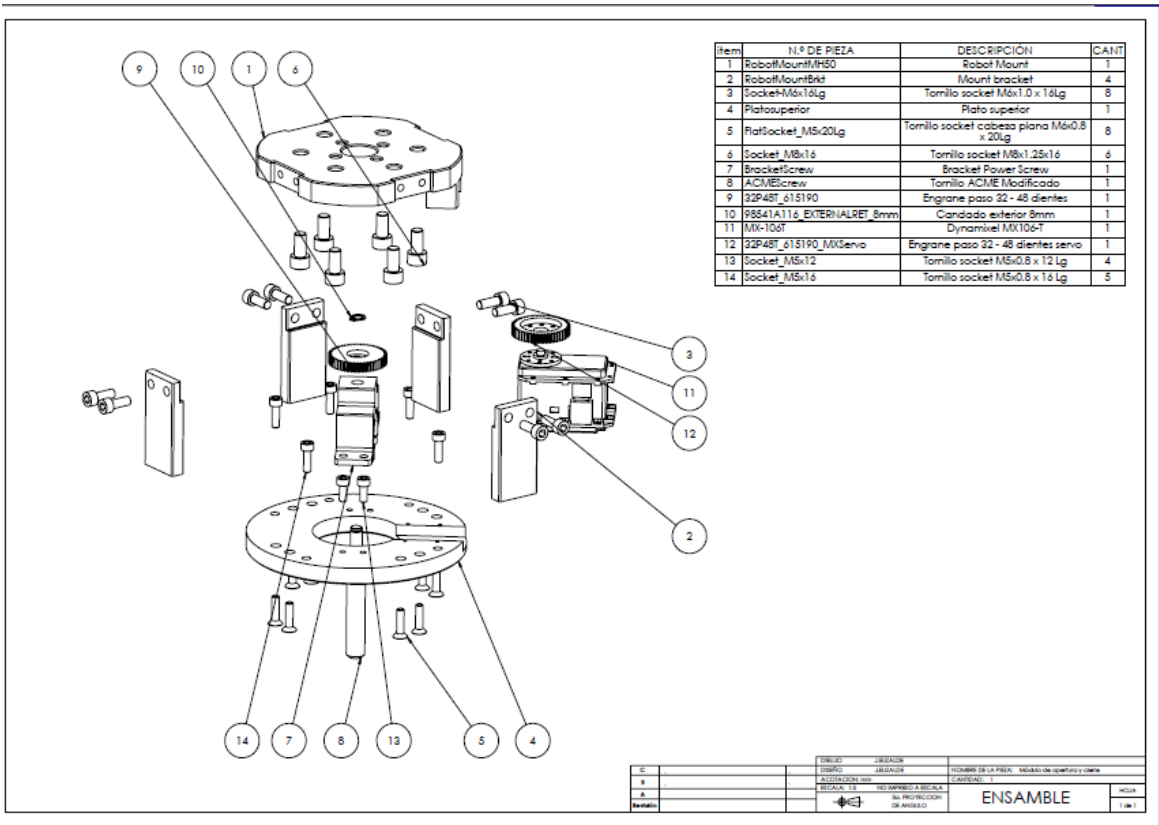
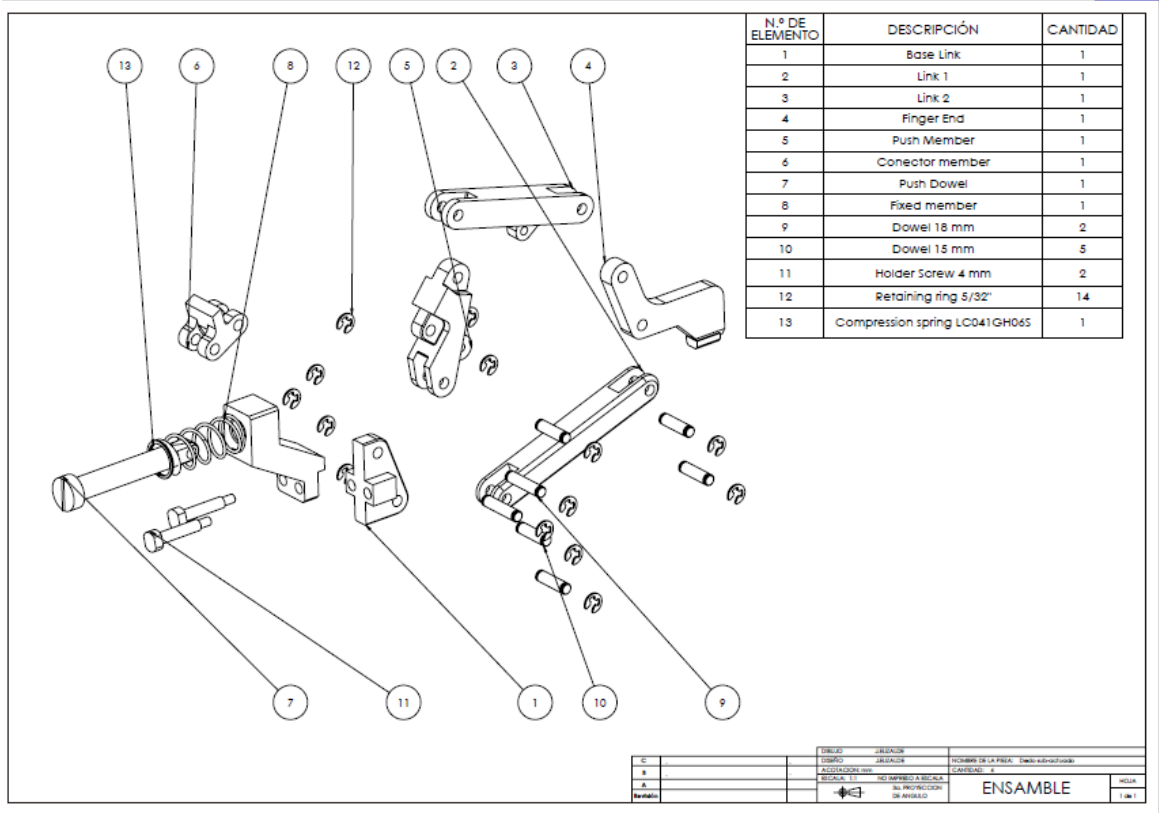
estado:
switch (contador) {
case 0:
ServoPulso1=600;
ServoPulso2=570;
ServoPulso3=600;
break;
case 1:
ServoPulso1=600;
ServoPulso2=1220;
ServoPulso3=600;
break;
case 2:
ServoPulso1=600;
ServoPulso2=800;
ServoPulso3=1000;
break;
case 3:
ServoPulso1=1200;
ServoPulso2=1220;
ServoPulso3=1220;
break;
default:
break;
}
}
```

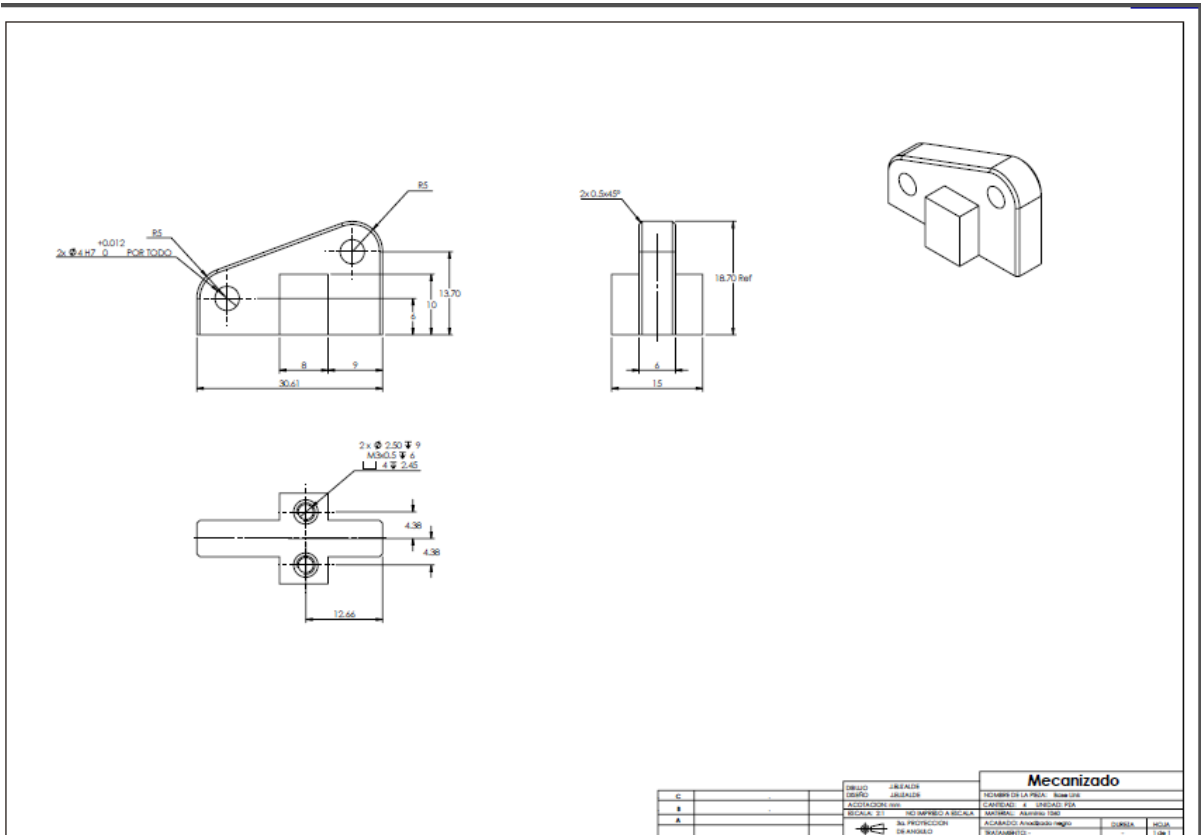
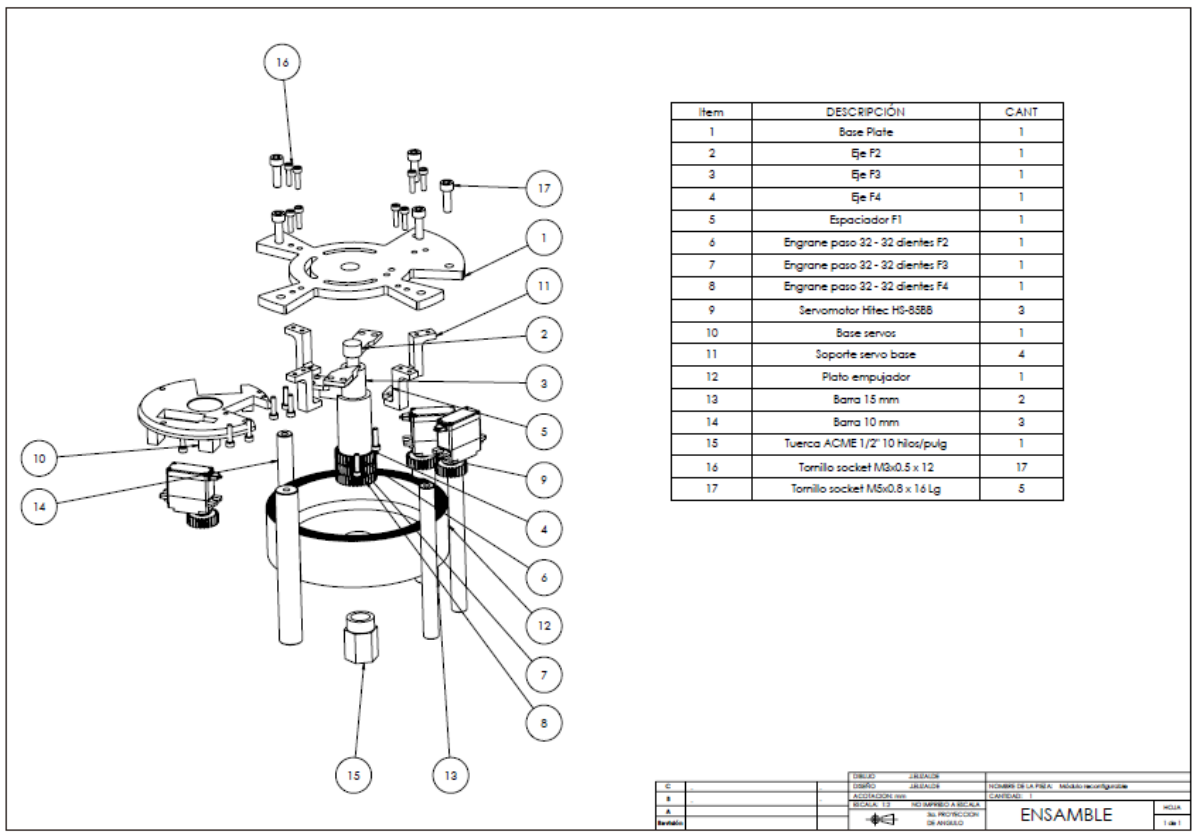
# ANEXO 4

## Planos 2D para manufactura de gripper

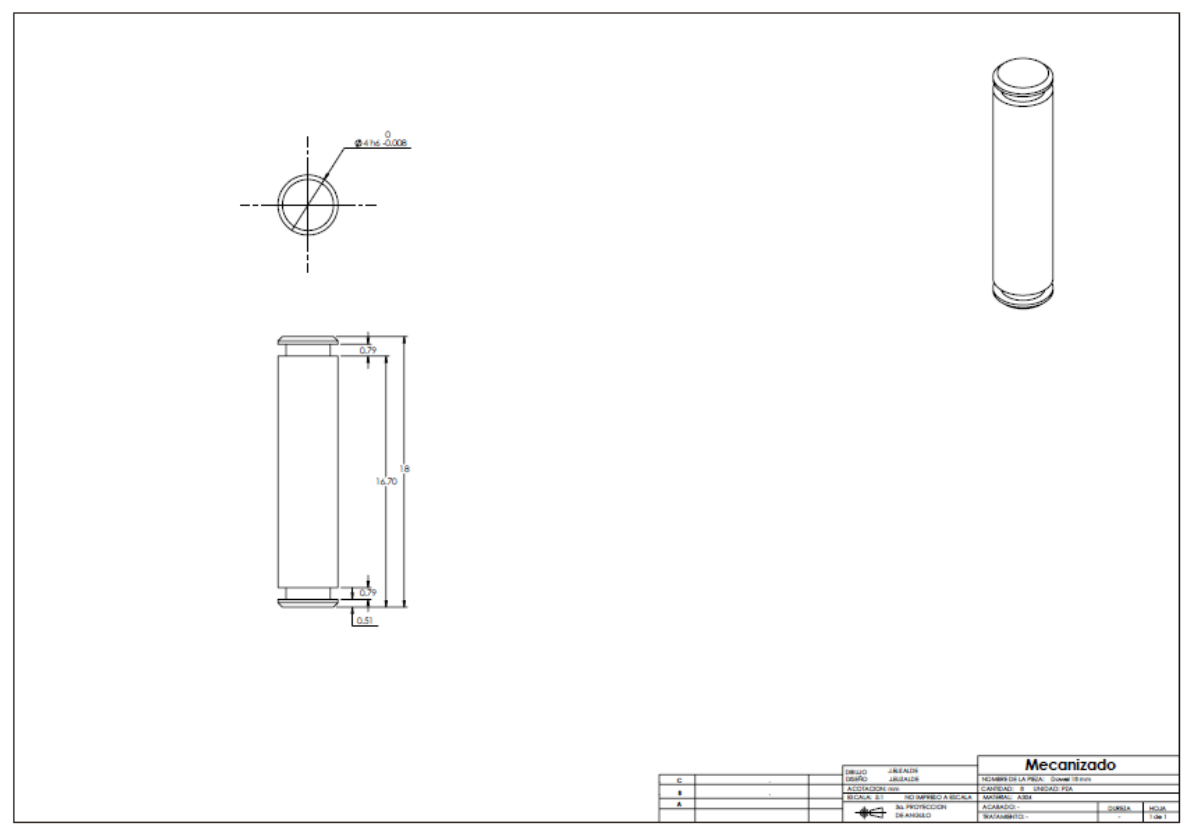
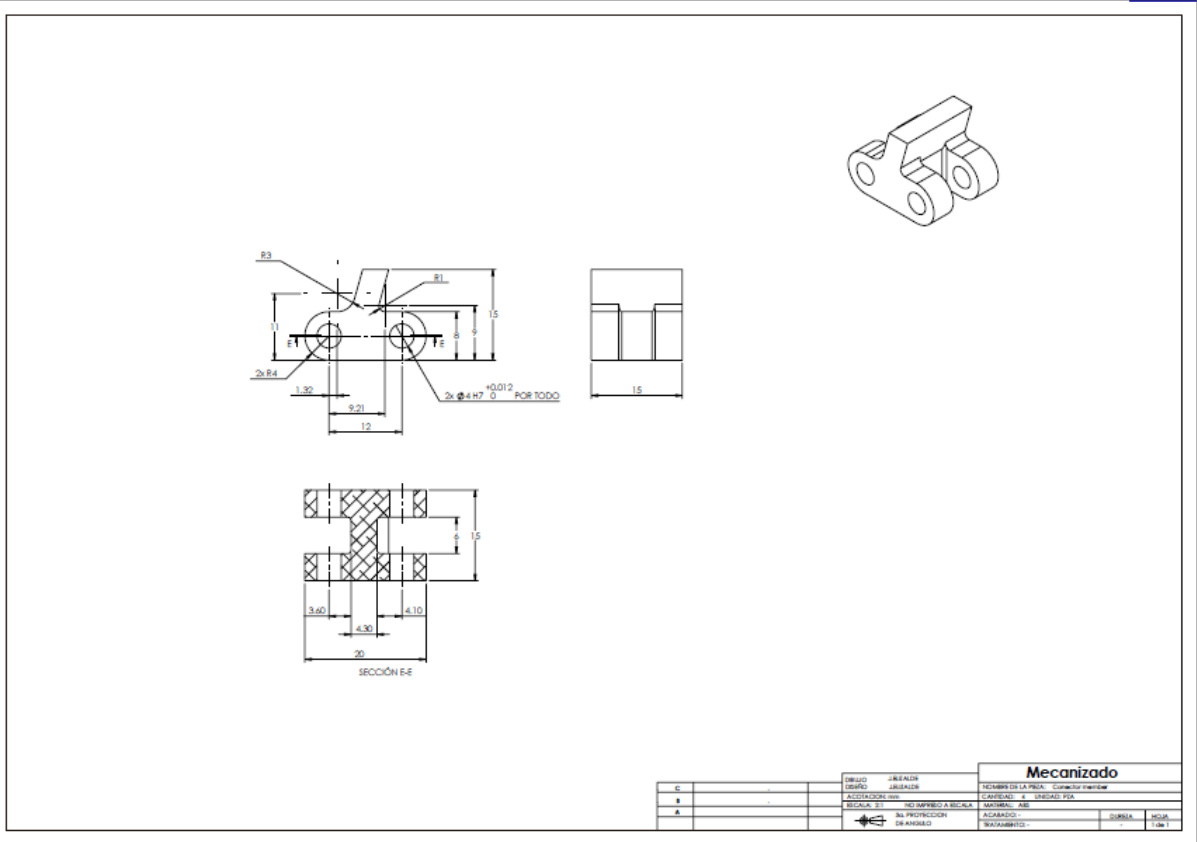
N.º DE ELEMENTO	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	Módulo de apertura y cierre	1
2	Módulo reconfigurable	1
3	Dedo sub-actuado	4
4	Montaje para PCB y arduino	1
5	Arduino Nano	1

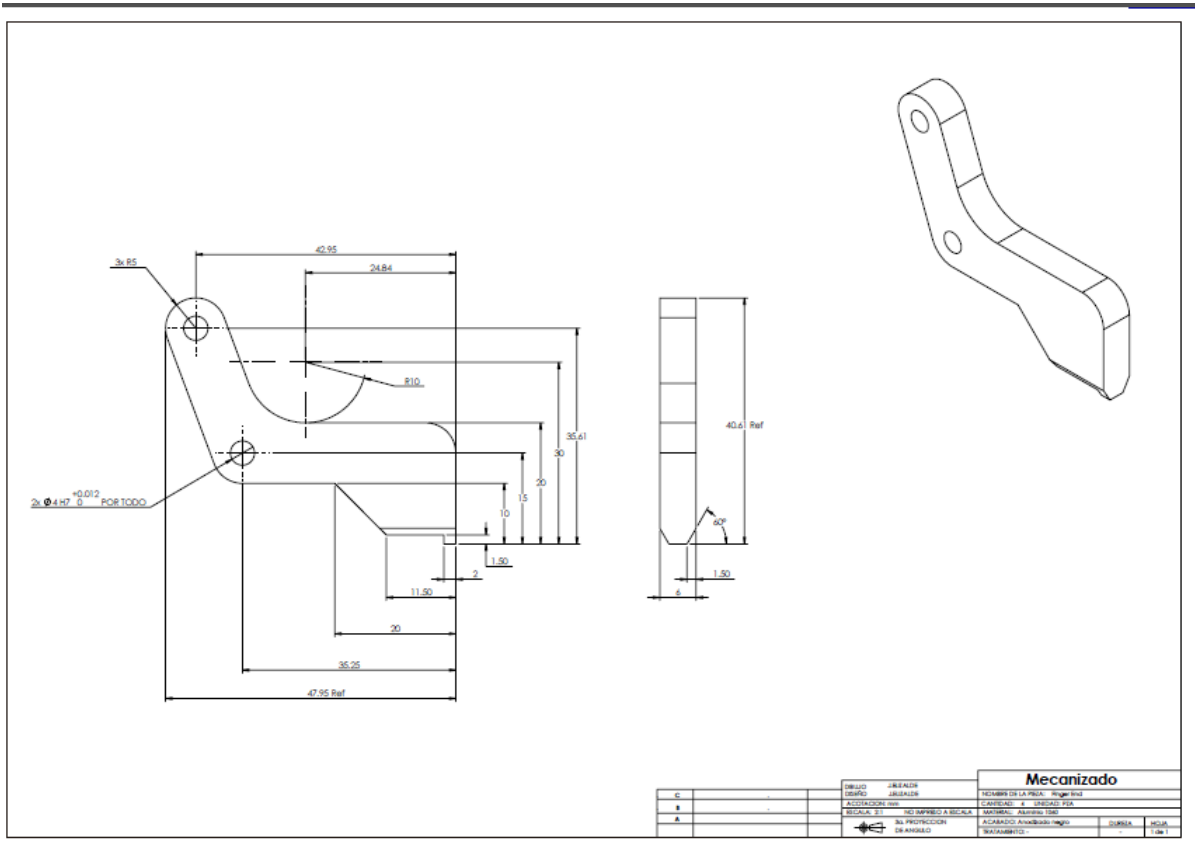
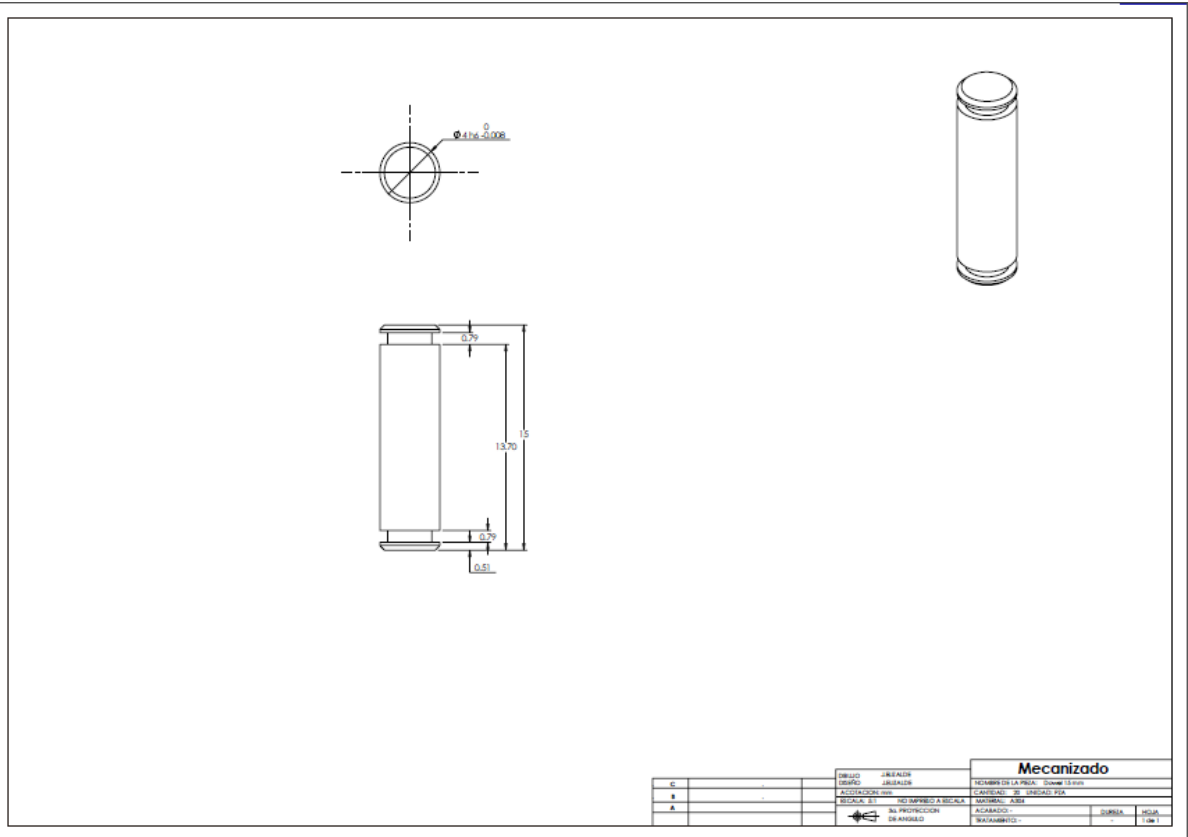
E		UNIVERSIDAD	NOMBRE DE LA FERIA: <i>Exposic. Nacional Agrícola</i>	
S		INSTITUTO	CATEGORÍA: 1	
A		ACREDITACIÓN		
A		REVISIÓN: 01	AL PROYECTO DE INGENIERÍA	
A		AL PROYECTO DE INGENIERÍA	ENSAMBLE	
A		DE ARQUITECTURA	PÁGINA	
A			1 DE 1	

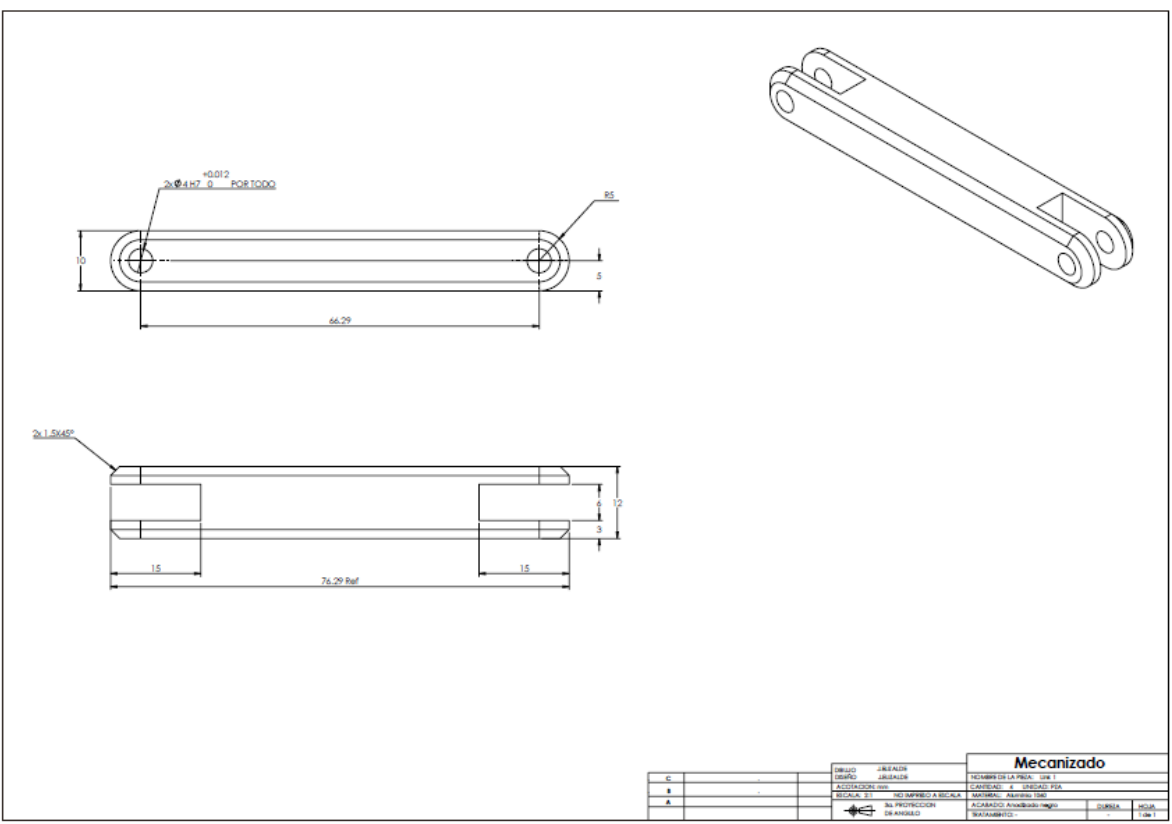
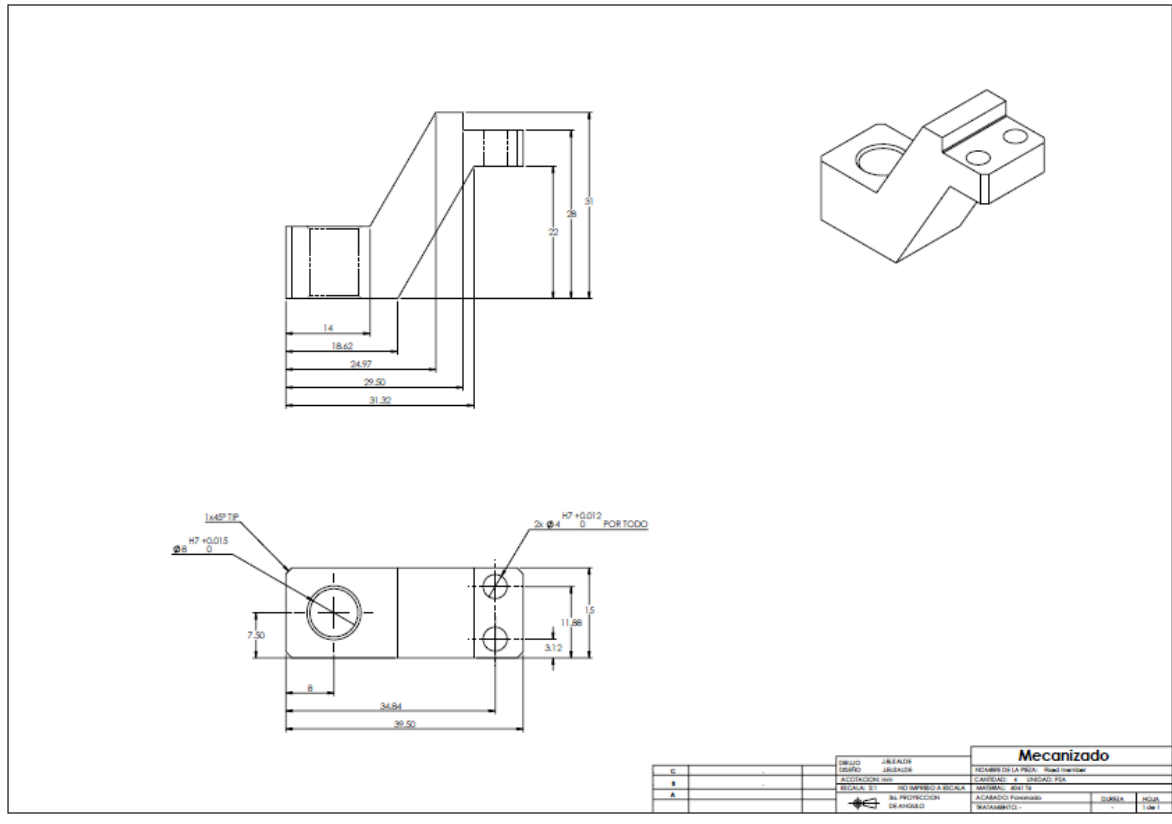


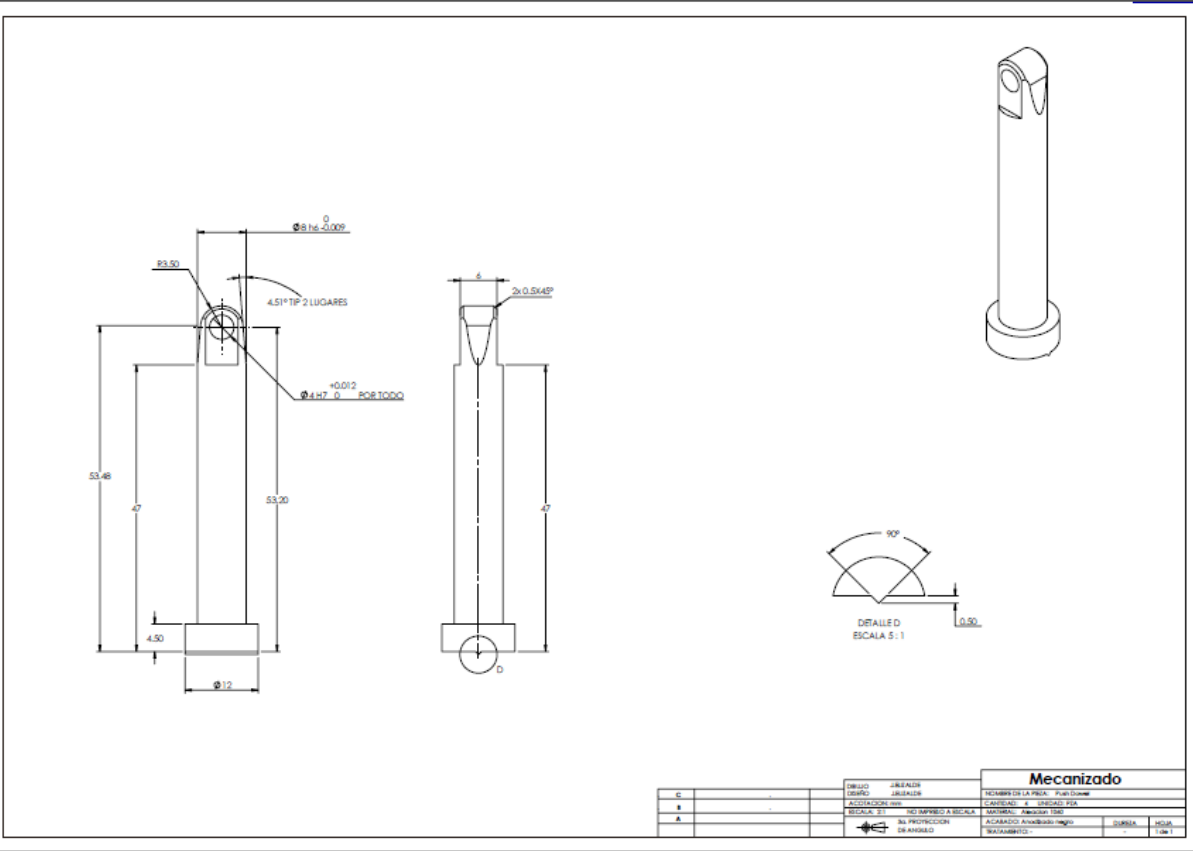
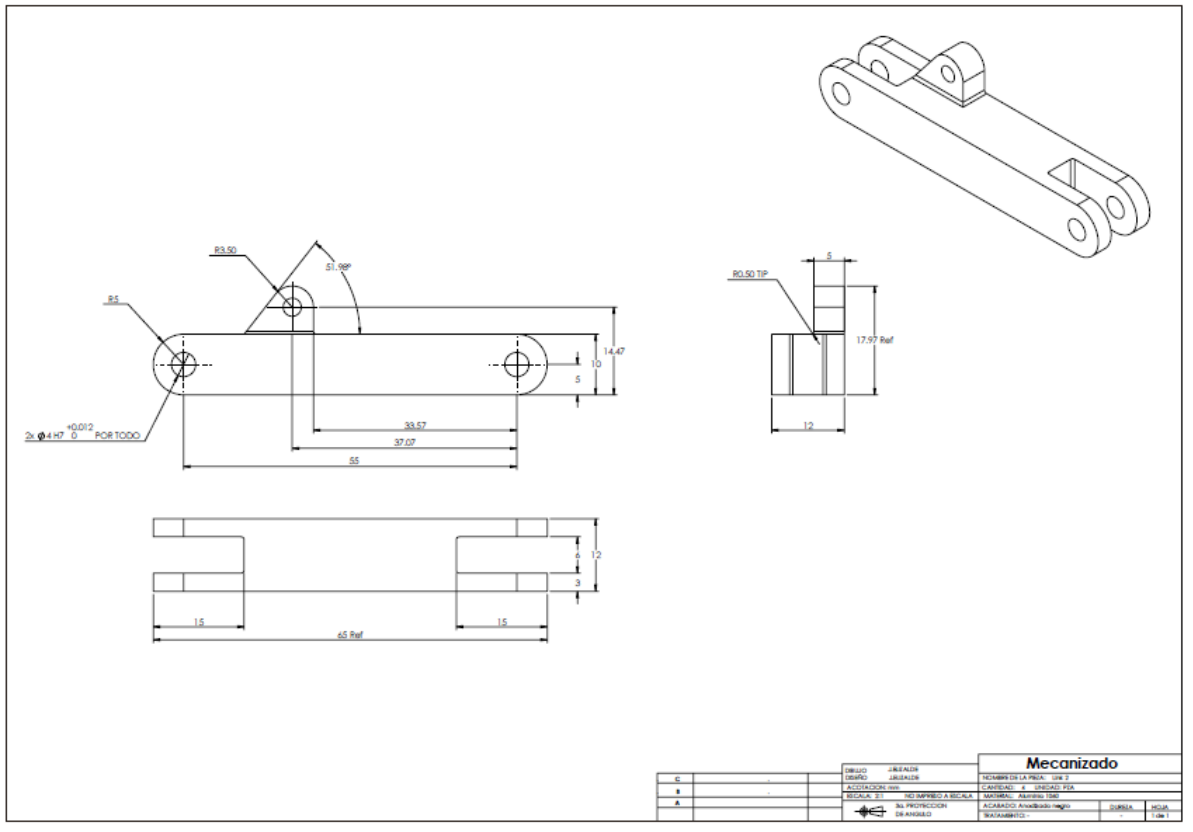


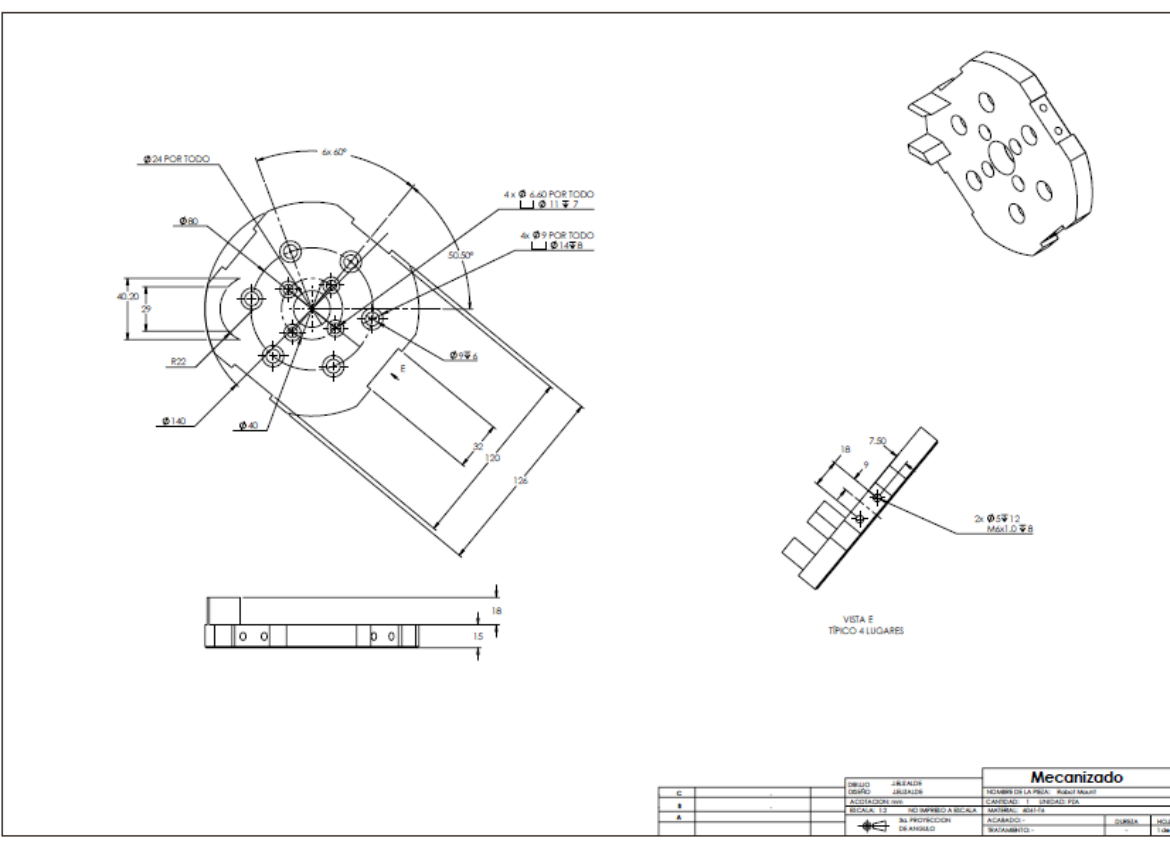
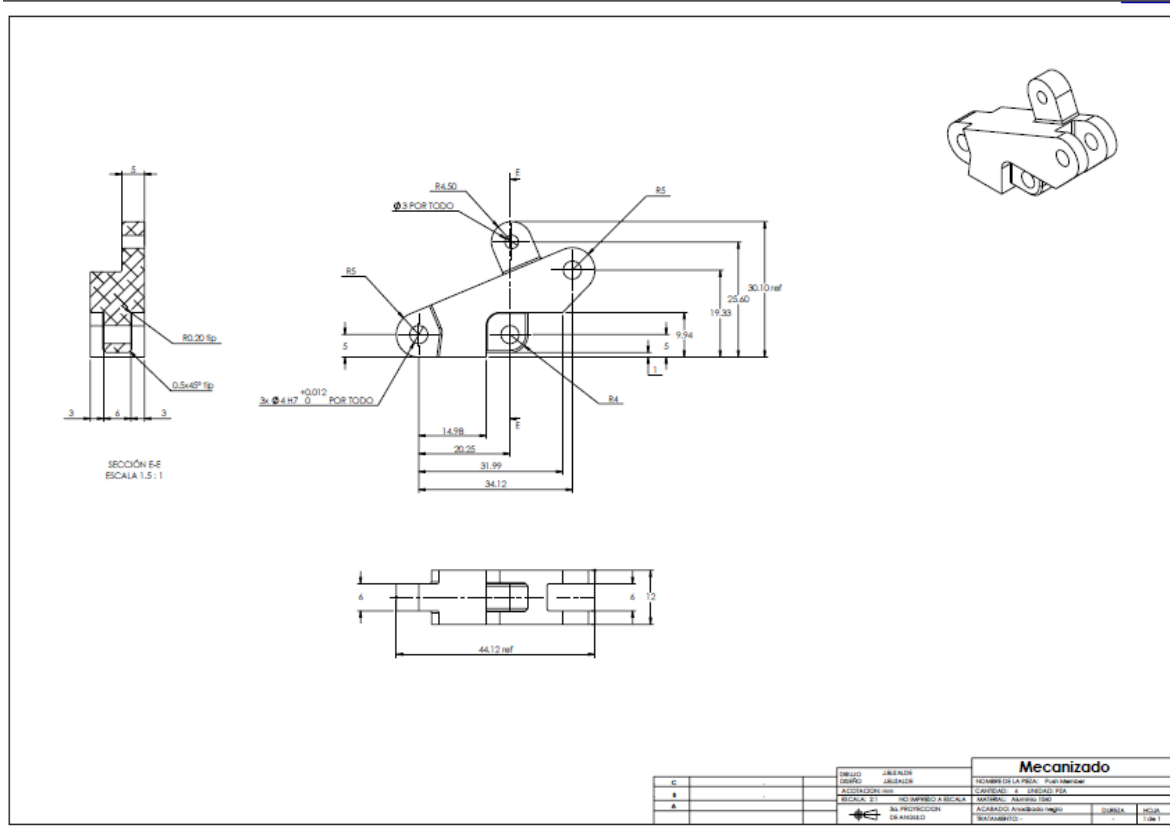


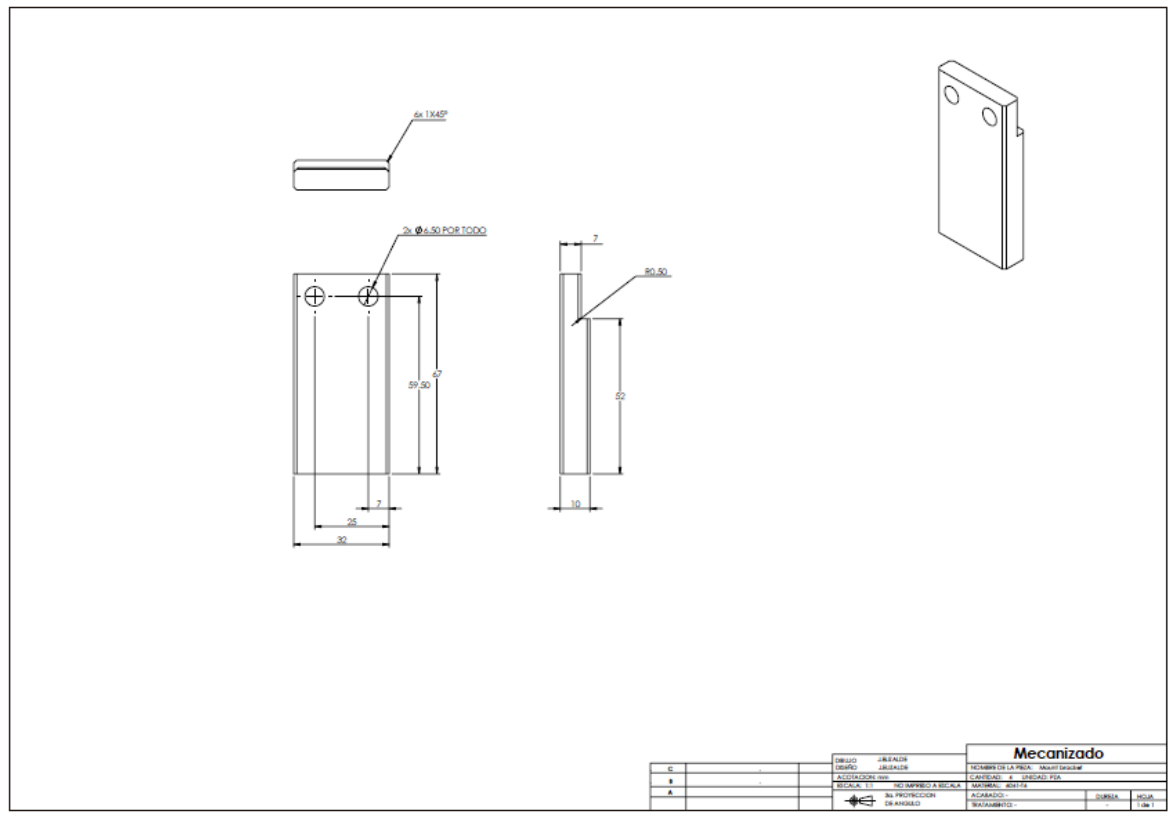
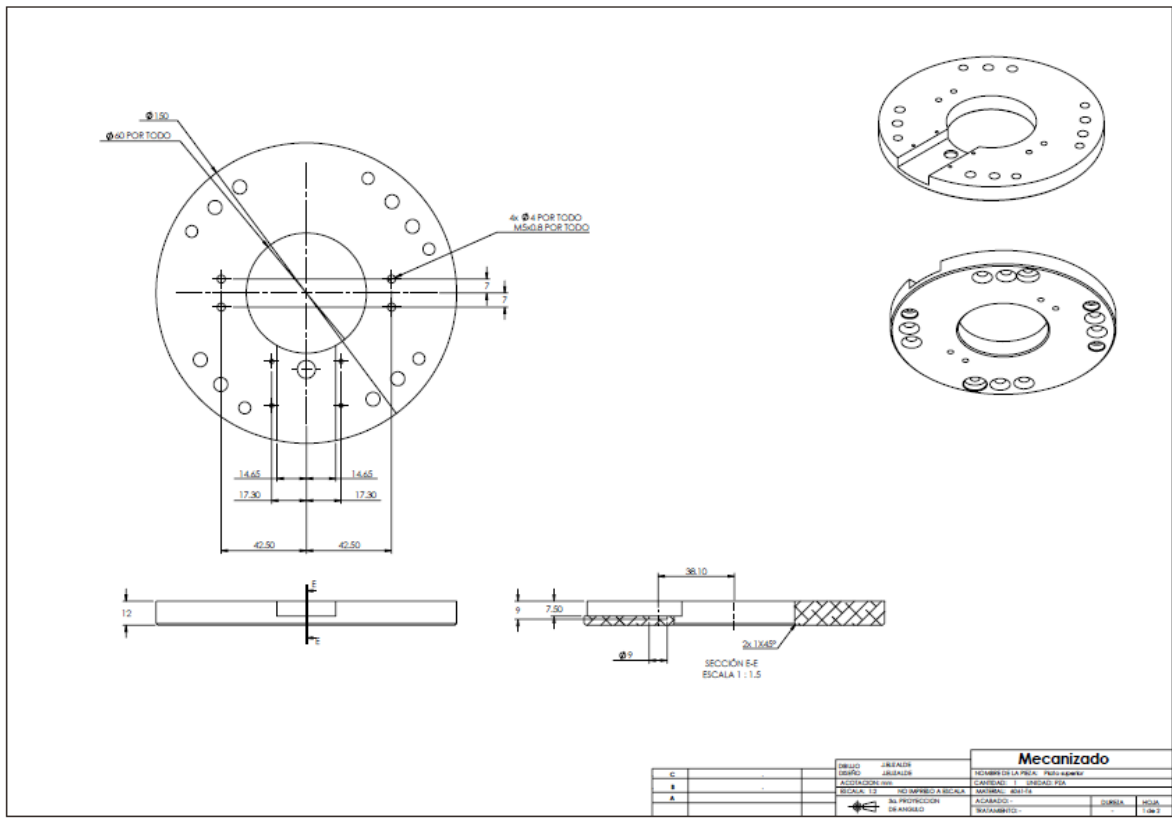


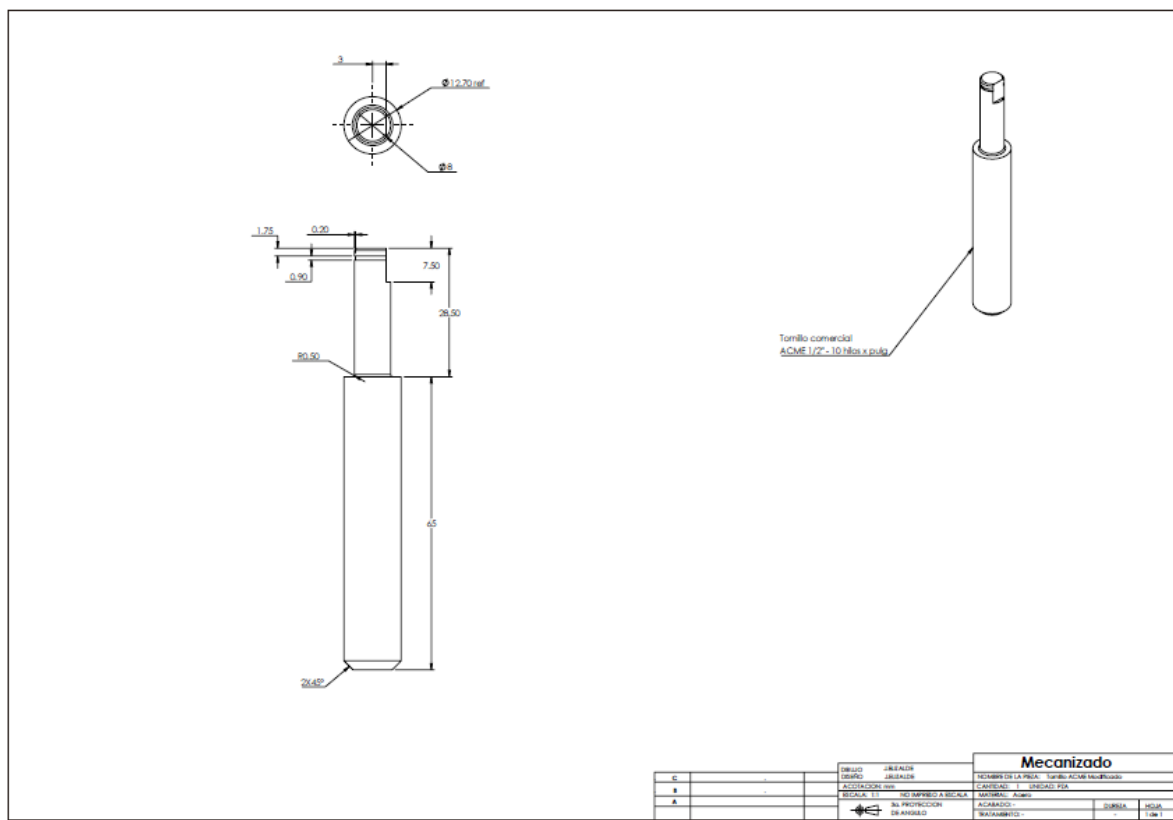
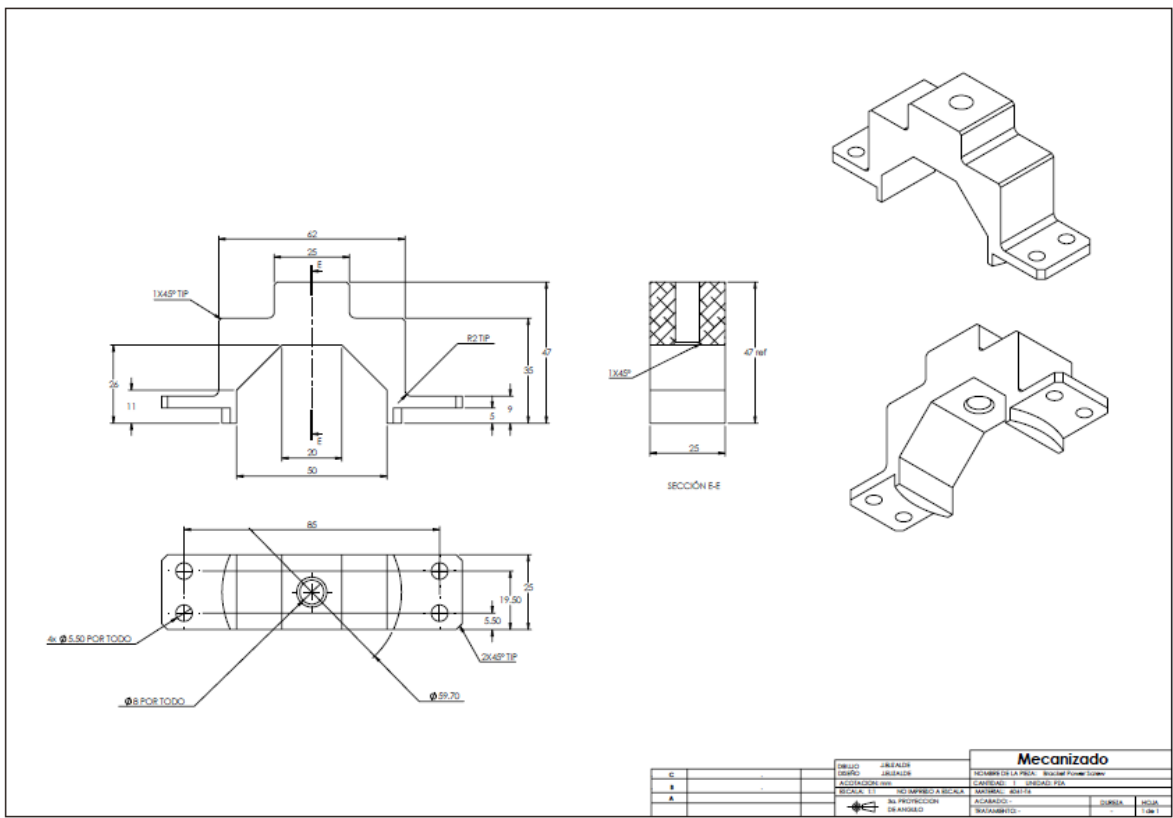


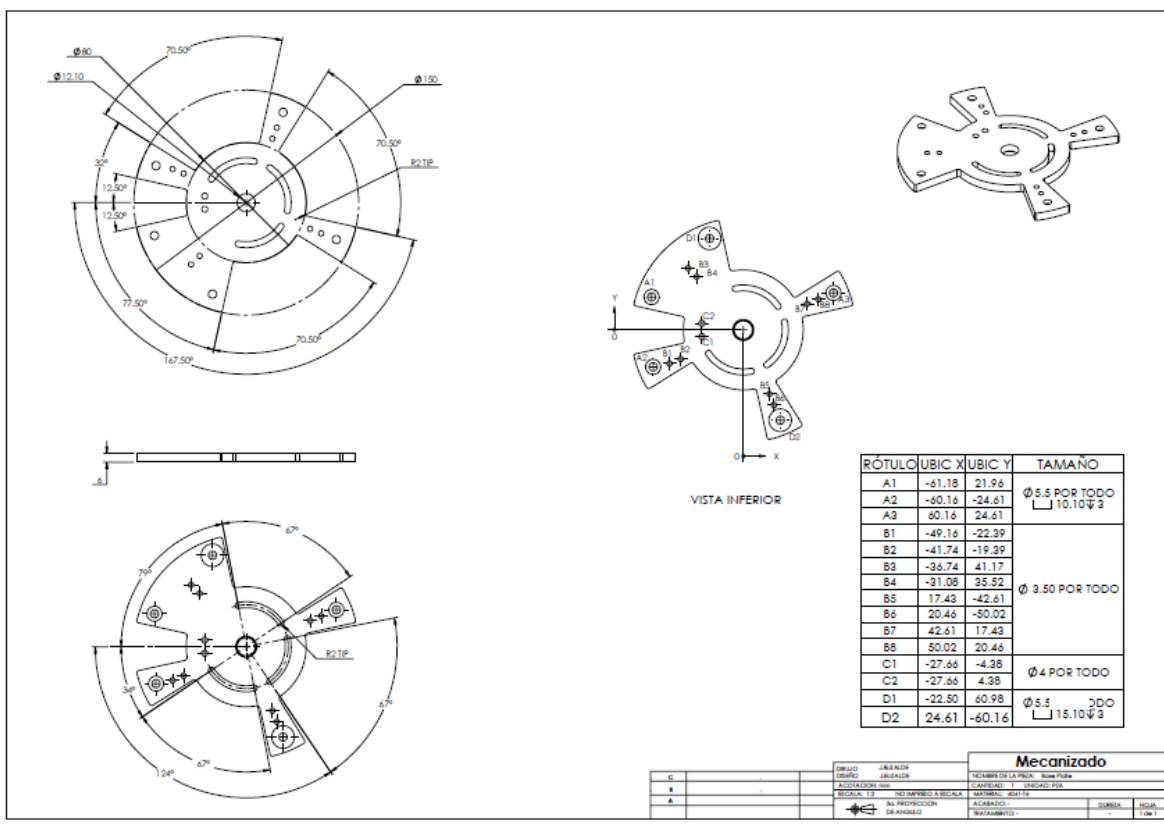
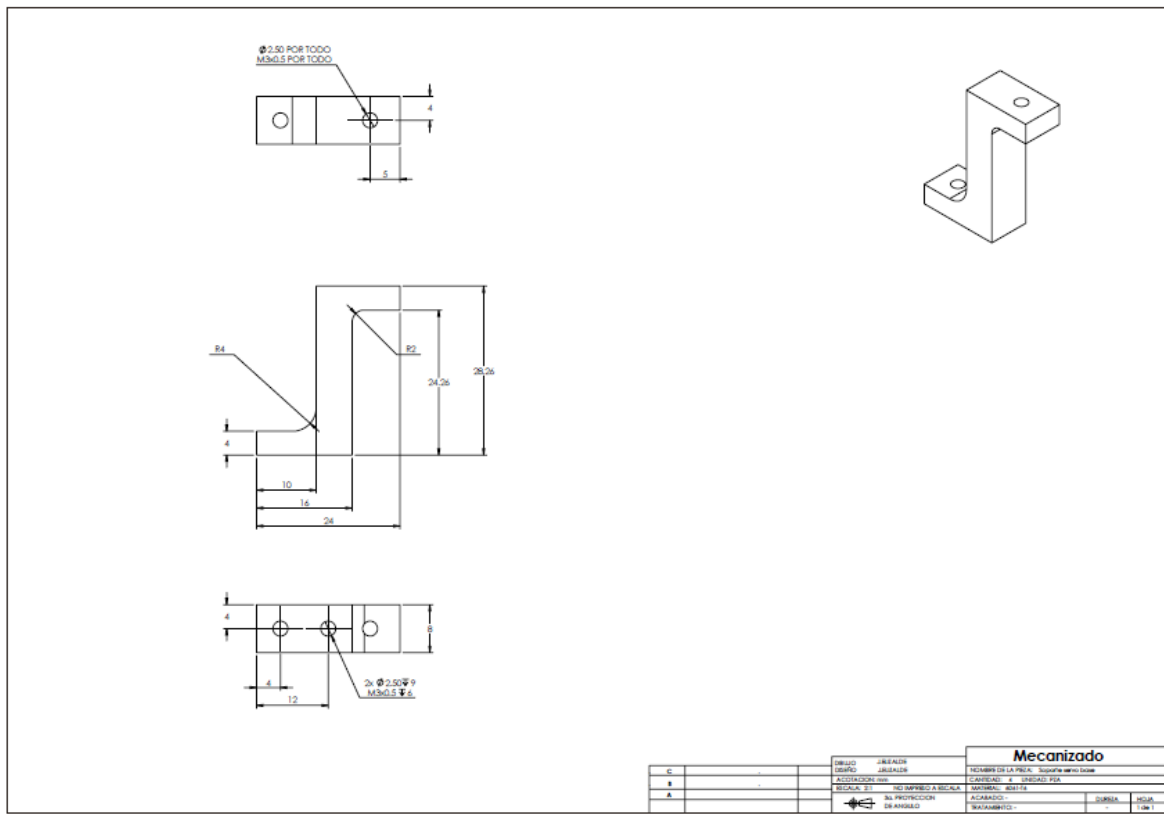




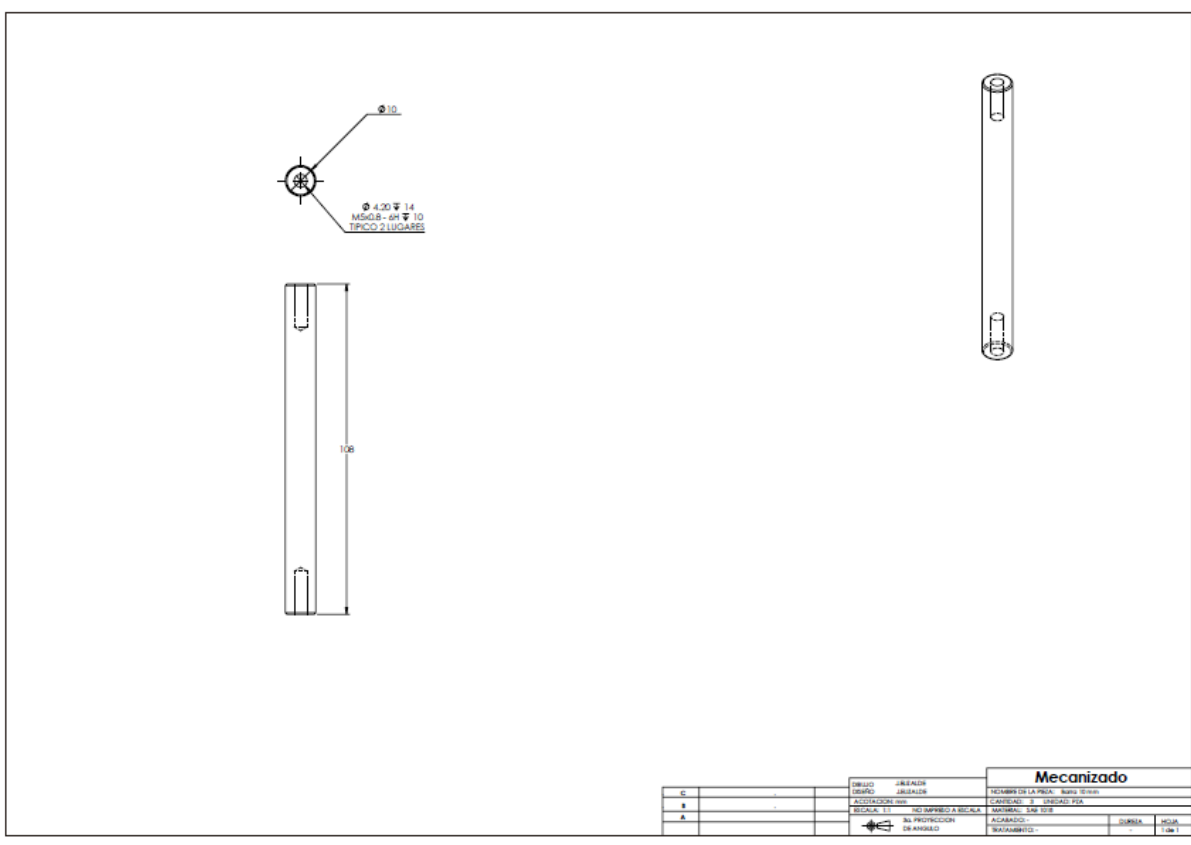
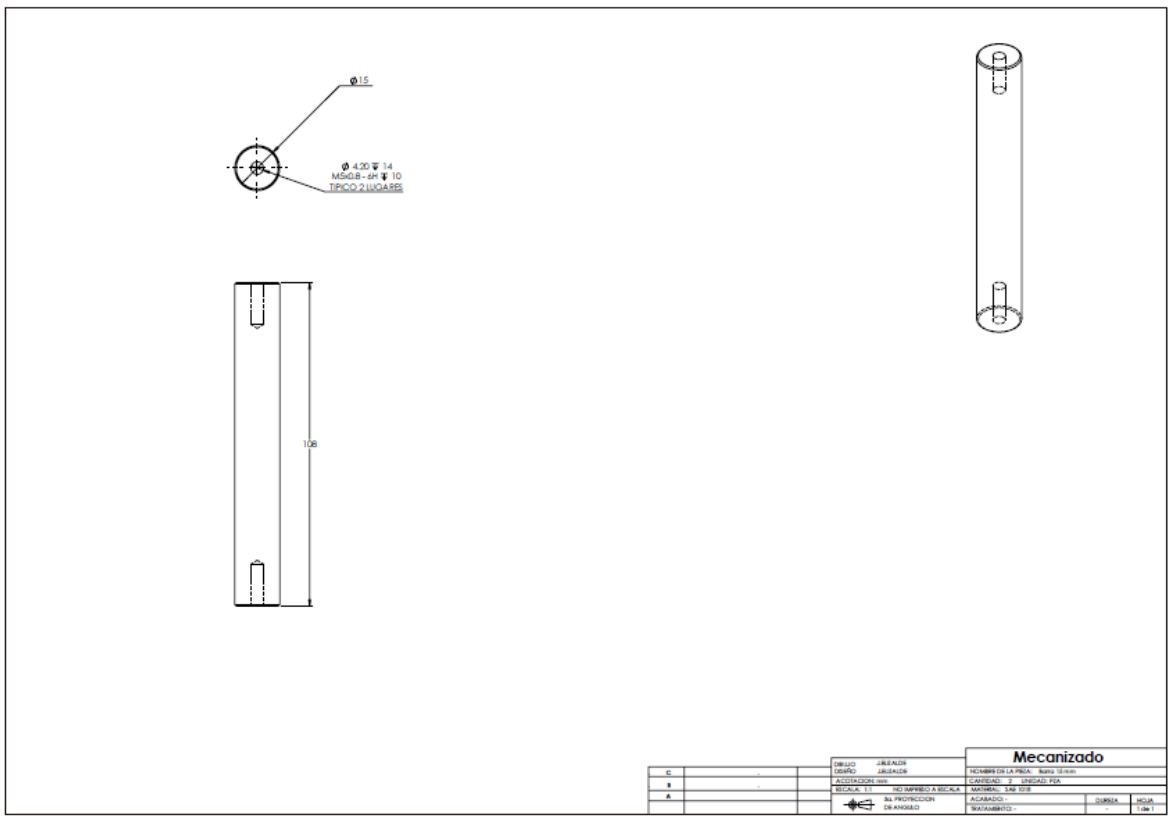








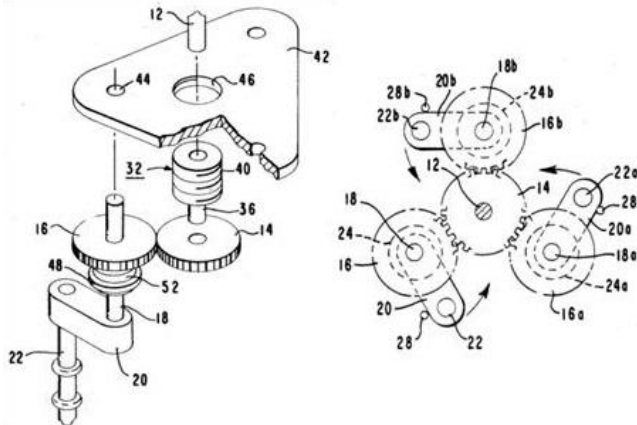




## ANEXO 5

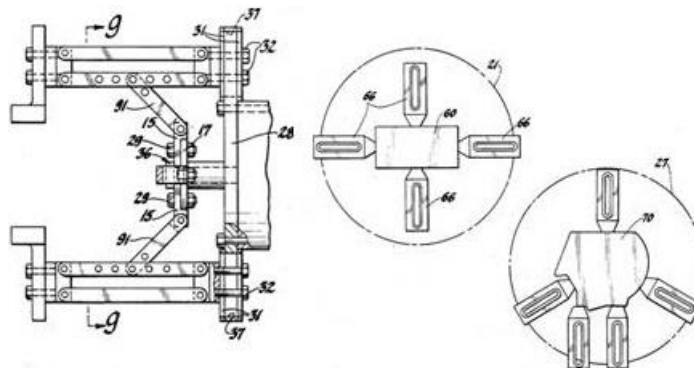
### Patentes más relevantes consultadas en la revisión de literatura

US4598942 – Force-controlled gripper with adaptive accommodation (Jul 8, 1986) [56]



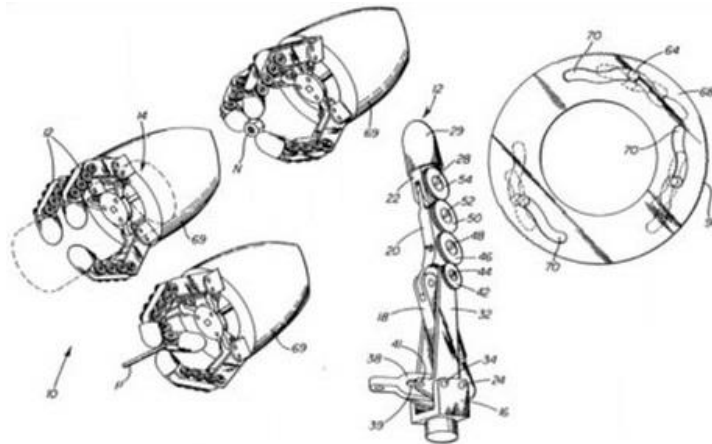
**Abstract:** In a gripper device including a power frame of a motor 10, shaft 12, sun gear 14, planetary gear 16, gripper assembly shaft 18, gripper lever 20, gripper finger 22, a clutch 24 is interposed in the power train to each gripper finger and is controlled to provide a low force coupling transmittal when the fingers are moved in a position to contact the object 26 to be gripped, and after all fingers have contacted the object, the clutch provides for the transmittal of a relatively higher force adequate to permit handling the object without slipping.

US4697839 – Flexible part-centering pneumatic gripper (Oct 6, 1987) [57]



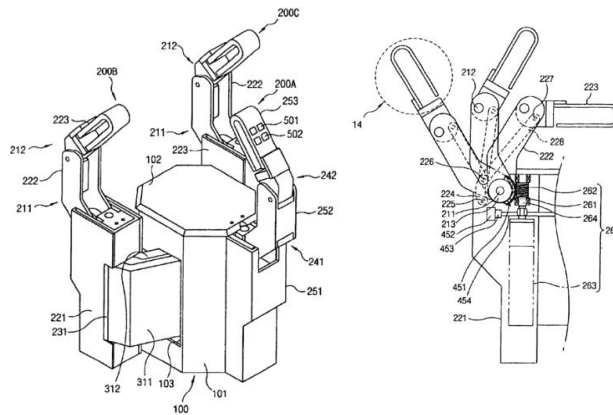
**Abstract:** The present invention provides an end of arm tooling device (EOAT) for a robotic arm. The present invention may be adjusted to modify the gripping force exerted by the EOAT without a change of force by the actuator. The present invention also provides an EOAT which can be adjusted to handle workpieces of various dimensions and shapes.

**US5378033 – Multi-function mechanical hand with shape adaptation (Jan 3 1995) [58]**



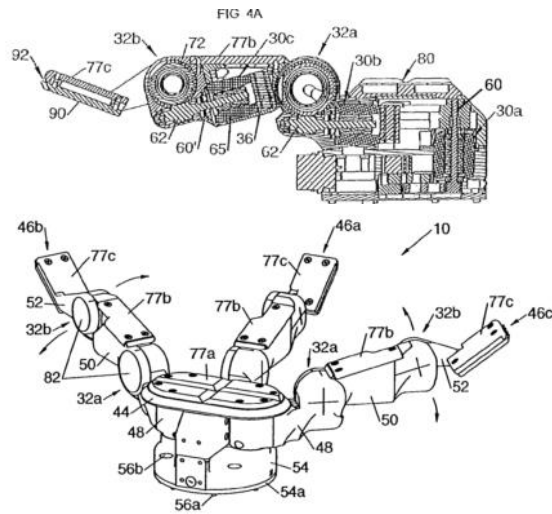
**Abstract:** A mechanical hand assembly for use in prosthetic and robotic applications includes multiple fingers pivotally attached to a palm subassembly. The fingers are operatively attached to a central actuating plate so that movement of the actuating plate in opposed directions causes the fingers to bend and straighten. An electric motor drives the actuating plate through a pivotable or tiltable linkage so that when one of the fingers engages an object to be manipulated, the plate tilts and continues to move any opposed fingers toward engagement. Each finger includes a base, a lever arm and multiple phalanges operatively interconnected by gears. Pivotal motion of the lever arm is transmitted to the phalanges through the interconnected phalanges and lever arm and rotation of the gears. The palm subassembly also includes a finger-spacing plate that fixes the relative positions of the fingers and the planes through which they bend. This makes it possible to selectively converge the tips of only two of the fingers, three of the fingers or to bend all of the fingers in an interdigitating manner.

**US6918622B2 – Robot hand and robot hand finger (Jul 19, 2005) [59]**



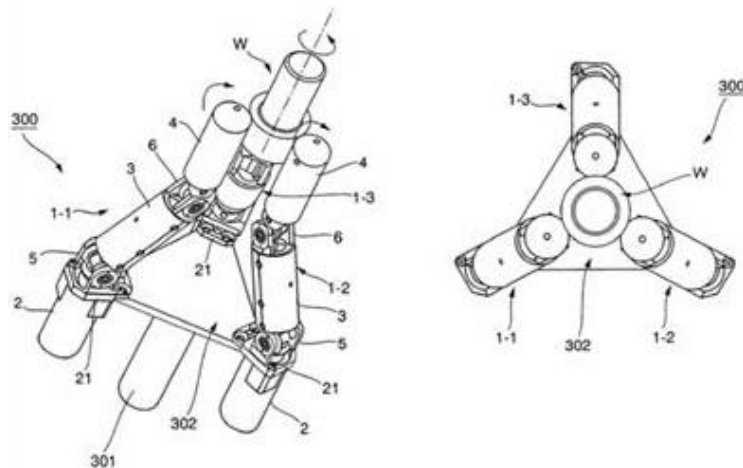
**Abstract:** A robot hand finger makes a hooking movement similar to that of the human fingers with less number of driving units by installing a 4-joint link. A robot hand includes several fingers and 4-joint link in order to implement a horizontal movement of the fingers. A robot hand selectively drives a hooking movement and a horizontal movement of fingers with less number of driving units by having a clutch unit. A robot hand includes fingers with a strain gage and is able to control a grasping force  $y$  using a value measured by the strain gage.

**US7168748B2 – Intelligent, self-contained robotic hand (Jan 30, 2007) [60]**



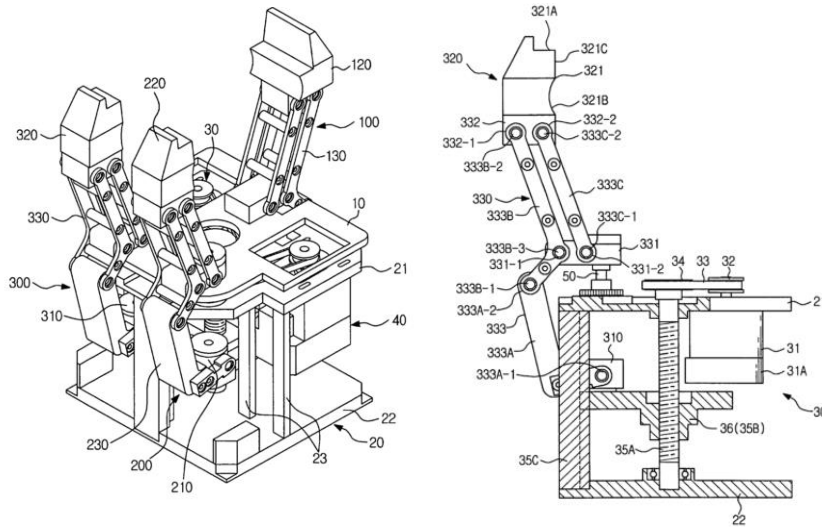
**Abstract:** A robotic device has a base and at least one finger having at least two links that are connected in series on rotary joints with at least two degrees of freedom. A brushless motor and an associated controller are located at each joint to produce a rotational movement of a link. Wires for electrical power and communication serially connect the controllers in a distributed control network. A network operating controller coordinates the operation of the network, including power distribution. At least one, but more typically two to five, wires interconnect all the controllers through one or more joints. Motor sensors and external world sensors monitor operating parameters of the robotic hand. The electrical signal output of the sensors can be input anywhere on the distributed control network. V-grooves on the robotic hand locate objects precisely and assist in gripping. The hand is sealed, immersible and has electrical connections through the rotary joints for anodizing in a single dunk without masking. In various forms, this intelligent, self-contained, dexterous hand, or combinations of such hands, can perform a wide variety of object gripping and manipulating tasks, as well as locomotion and combinations of locomotion and gripping.

**US7556299B2 – Finger unit and multi-finger grasping mechanism (Jul 7, 2009) [61]**



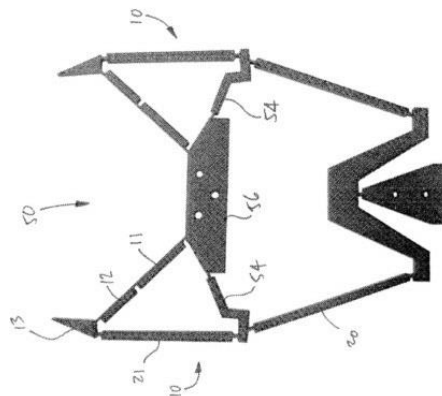
**Abstract:** A multi-finger grasping mechanism (300), comprising three two-joint finger units (1-1 to 1-3). Each two-joint finger unit further comprises a finger root part (2), a finger root side joint part (5), a finger intermediate part (3), a finger tip side joint part (6), and a finger tip part (4). The finger intermediate part (3) can be swung about the joint axis (5 a) of the finger root side joint part (5), and the finger tip part (4) can be swung about the joint axis (6 a) of the finger tip side joint part (6). The finger tip part (4) can be swung about the center axis thereof. When a bolt (W) is held by the finger tip part (4) and the finger part (4) is rotated, the tightening operation of the bolt (W) can be performed.

**US8424942B2 – Industrial gripper with multiple degrees of freedom (Apr 23, 2013) [62]**



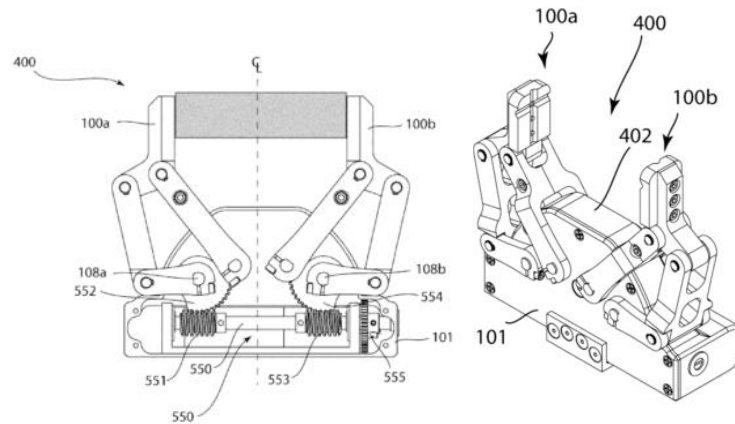
**Abstract:** An industrial gripper includes a base plate, at least three finger units to be moved relative to the base plate, a supporting unit to support the finger units, a first drive unit coupled to the supporting unit to allow simultaneous angular displacement of the finger units toward an object, and a second drive unit coupled to the supporting unit to adjust orientation angles between the finger units. Each of the finger units includes an intermediation member to be moved in a first direction by the first drive unit, a grip member to grip the object by being moved in a second direction different from the first direction as a movement direction of the intermediation member, and a connection member to convert the first direction movement of the intermediation member into the second direction movement of the grip member.

**US8720964B2 –Self-adaptive mechanical finger and method (May 13, 2014) [63]**



**Abstract:** A mechanical finger comprises at least three phalanges, with a base phalanx pivotally connected at a proximal end to a base. At least one intermediate phalanx is pivotally connected at a proximal end to a distal end of the base phalanx. An end phalanx is pivotally connected at a proximal end to a distal end of a distal-most one of the at least one intermediate phalanx. The phalanges pivot about parallel pivot axes. A transmission linkage is between the base and the end phalanx. The transmission linkage has links and joints unconnected to any of the phalanges other than the end phalanx, the transmission linkage being configured so as not to constrain the degrees of freedom of the mechanical finger.

**US8973958B2 – Gripper having a two degree of freedom underactuated mechanical finger for encompassing and pinch grasping (Mar 10, 2015) [64]**



**Abstract:** A mechanical gripper being adapted to automatically perform a stable pinch grasp and an encompassing grasp and a method of determining a system geometry thereof. The gripper comprising at least one mechanical finger comprising. The at least one mechanical finger comprising a first phalanx and a second phalanx that are pivotally connected. When a load is applied on a stable pinch grasp region, an actuation mechanism is adapted to allow the second phalanx to translate and allow its contact surface to maintain a constant orientation in order to automatically perform a pinch grasp, when a load is applied on the first phalanx or below the stable pinch grasp region, the actuation mechanism is adapted to allow the second phalanx to pivot and automatically perform an encompassing grasp.