



**Diseño y simulación de un gripper suave para el robot KUKA KR-16 del laboratorio de robótica industrial de la ESPE**

González Gutiérrez, Diego Ismael y Nacimba Ñato, Bryan Enrique

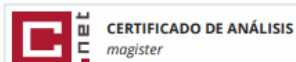
Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Mecatrónica


Trabajo de integración curricular, previo a la obtención del título de Ingeniero en Mecatrónica

Ing. Alejandro Paul Gómez Reyes

16 de febrero del 2022



# Trabajo Escrito DiegoG EnriqueN Revision

< 1% Similitudes  0% Texto entre comillas  
0% similitudes entre comillas  
0% Idioma no reconocido

Nombre del documento: Trabajo Escrito DiegoG EnriqueN  
Revision.pdf  
ID del documento: b9ed348c26c93cff31a47830c1a41b21267a789e  
Tamaño del documento original: 4,69 Mo

Depositante: DAVID CESAR LOZA MATOVELLE  
Fecha de depósito: 21/3/2023  
Tipo de carga: interface  
fecha de fin de análisis: 21/3/2023

Número de palabras: 16.089  
Número de caracteres: 99.269

Ubicación de las similitudes en el documento:



## Fuentes con similitudes fortuitas

| Nº | Descripciones   | Similitudes | Ubicaciones   | Datos adicionales                       |
|----|---|-------------|---|---|
| 1  |  <a href="http://repositorio.espe.edu.ec">repositorio.espe.edu.ec</a>   Digitalización de una celda de manufactura, para la solda...<br><a href="http://repositorio.espe.edu.ec:8080/bitstream/21000/231214/T-EPEL-EMI-0398.pdf.txt">http://repositorio.espe.edu.ec:8080/bitstream/21000/231214/T-EPEL-EMI-0398.pdf.txt</a>                    | < 1%        |   | Palabras idénticas : < 1% (24 palabras) |
| 2  |  <a href="http://repositorio.utn.edu.ec">repositorio.utn.edu.ec</a>   Diseño y construcción del eslabón y articulación de hombro...<br><a href="http://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/7326/7/04 MEC 199 TRABAJO DE GRADO.pdf.txt">http://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/7326/7/04 MEC 199 TRABAJO DE GRADO.pdf.txt</a> | < 1%        |   | Palabras idénticas : < 1% (13 palabras) |
| 3  |  Documento de otro usuario #65e817<br>El documento proviene de otro grupo  | < 1%        |   | Palabras idénticas : < 1% (10 palabras) |
| 4  |  <a href="https://1library.co">1library.co</a>   ALGORITMO DE DENAVIT-HARTENBERG PARA LA - EL PROBLEMA CINEM...<br><a href="https://1library.co/article/algoritmo-denavit-hartenberg-problema-cinematico-directo.zlgwxyoy">https://1library.co/article/algoritmo-denavit-hartenberg-problema-cinematico-directo.zlgwxyoy</a>                   | < 1%        |   | Palabras idénticas : < 1% (10 palabras) |
| 5  |  <a href="http://www.manualslib.es">www.manualslib.es</a>   KUKA KR C2 EDITION05 ESPECIFICACIÓN Descargar en PDF   M...<br><a href="https://www.manualslib.es/manual/361469/Kuka-Kr-C2-Edition05.html">https://www.manualslib.es/manual/361469/Kuka-Kr-C2-Edition05.html</a>   | < 1%        |  | Palabras idénticas : < 1% (10 palabras) |



ALEJANDRO PAUL  
GOMEZ REYES



**Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica**

**Carrera de Mecatrónica**

**Certificación**

Certifico que el trabajo de integración curricular: " **Diseño y simulación de un gripper suave para el robot KUKA KR-16 del laboratorio de robótica industrial de la ESPE** " fue realizado por los señores **González Gutiérrez, Diego Ismael y Nacimba Ñato, Bryan Enrique**, el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además fue revisado y analizada en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 17 de febrero de 2023



Escanea el código QR para  
ALEJANDRO PAUL  
GOMEZ REYES

Ing. Alejandro Paúl Gómez Reyes

C.C.: 1714913637



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Mecatrónica

### Responsabilidad de Autoría

Nosotros, **González Gutiérrez, Diego Ismael y Nacimba Ñato, Bryan Enrique**, con cédulas de ciudadanía n° 0301599080 y n° 723956155, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de integración curricular: **"Diseño y simulación de un gripper suave para el robot KUKA KR-16 del laboratorio de robótica industrial de la ESPE"** es de mi/nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 17 de febrero de 2023

González Gutiérrez, Diego Ismael

C.C.: 0301599080

Nacimba Ñato, Bryan Enrique

C.C.: 1723956155



**Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica  
Carrera de Mecatrónica**

**Autorización de Publicación**

Nosotros **González Gutiérrez, Diego Ismael y Nacimba Ñato, Bryan Enrique**, con cédula/cédulas de ciudadanía n° 0301599080 y n° 723956155, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de integración curricular: **"Diseño y simulación de un gripper suave para el robot KUKA KR-16 del laboratorio de robótica industrial de la ESPE"** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi/nuestra responsabilidad.

Sangolquí, 17 de febrero de 2023

González Gutiérrez, Diego Ismael  
C.C.: 0301599080

Nacimba Ñato, Bryan Enrique  
C.C.: 1723956155

### **Dedicatoria**

El presente trabajo es el resultado de años de estudio en la carrera de pregrado de ingeniería Mecatrónica y está especialmente dedicado a nuestras familias y amigos, quienes han sido el soporte emocional, físico y económico a lo largo de esta importante etapa de crecimiento académico y personal.

## Agradecimientos

Mi agradecimiento en especial va dirigido a mis padres, por sus incontables sacrificios, el apoyo que siempre me brindaron a pesar de los tropiezos y por impulsarme siempre a seguir adelante.

Nacimba Ñato, Bryan Enrique.

Por ser mi guía y mostrarme en el camino las oportunidades que me han conducido hasta aquí y ahora, gracias a Dios. Por estar siempre ahí para impulsarme y compartirme su amor infinito, gracias a mis padres y hermanos. Por demostrarme que la compañía de una buena mujer lo puede todo, por la lealtad y el amor sincero, gracias Brenda<sup>2</sup>.

González Gutiérrez, Diego Ismael.

Agradecemos a la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE por permitirnos formarnos como ingenieros en una de las mejores universidades del país. Un agradecimiento especial al Ingeniero Gabriel Guerrero quien nos apoyó en el inicio de este proyecto, al Ingeniero Alejandro Gómez quien tomo la batuta con profesionalismo y nos brindó su respaldo y apoyo para la finalización de este proyecto.

## Índice de contenidos

|   |    |
|---|----|
| Portada.....  | 1  |
| Dedicatoria .....   | 6  |
| Agradecimientos .....                                       | 7  |
| Resumen.....  | 18 |
| Abstract .....  | 19 |
| CAPITULO I .....  | 20 |
| Generalidades.....  | 20 |
| Introducción.....   | 20 |
| Justificación.....  | 22 |
| Objetivos .....   | 23 |
| Objetivo general.....                                       | 23 |
| Objetivos específicos.....                                  | 23 |
| Alcance .....   | 23 |
| Diagrama de flujo del alcance del proyecto .....            | 24 |
| CAPITULO II .....   | 25 |
| Revisión de Literatura.....                                 | 25 |
| Robótica suave .....  | 25 |
| Sensores .....  | 26 |
| Sensores resistivos.....                                    | 26 |
| Sensores flexibles piezoeléctricos y piezorresistivos ..... | 27 |



|   |    |
|---|----|
| Métodos de Actuación .....                                  | 27 |
| Actuación neumática .....                                   | 28 |
| Aleaciones de memoria de forma (SMAs) .....                 | 28 |
| Polímeros electroactivos.....                               | 29 |
| Otros métodos de actuación.....                             | 29 |
| Materiales.....   | 29 |
| Métodos de fabricación o manufactura .....                  | 30 |
| Fundición y moldeo de materiales.....                       | 30 |
| Litografía blanda .....                                     | 31 |
| Impresión 3D.....   | 31 |
| Manipuladores suaves.....                                   | 32 |
| Pinza blanda universal con el dedo Fin Ray optimizado ..... | 35 |
| Morfología .....  | 35 |
| Efecto Fin-Ray .....  | 36 |
| Robot KUKA Modelo KR-16 .....                               | 37 |
| Datos técnicos de la mecánica del robot modelo KR-16.....   | 38 |
| Ubicación de las articulaciones del robot.....              | 39 |
| Brida de sujeción del robot.....                            | 39 |
| KUKA Control Panel (KCP) .....                              | 40 |
| Modulo X11 .....  | 42 |
| Cinemática directa del robot modelo KR-16 .....             | 44 |

|   |    |
|---|----|
|   | 10 |
| CAPITULO III .....                            | 46 |
| Metodología y Diseño .....                    | 46 |
| Diseño mecánico .....                         | 46 |
| Requerimientos de diseño .....                | 46 |
| Características de ingeniería .....           | 47 |
| Proceso de diseño .....                       | 47 |
| Diseño del dedo basado en efecto FinRay ..... | 49 |
| Eslabón externo .....                         | 50 |
| Corredera central .....                       | 50 |
| Cuerpo del Gripper .....                      | 51 |
| Brida .....                                   | 52 |
| Almohadillas .....                            | 53 |
| Ensamblaje del manipulador suave .....        | 54 |
| Selección del material .....                  | 55 |
| Material seleccionado .....                   | 62 |
| Caracterización del material .....            | 63 |
| Impresión de probetas .....                   | 64 |
| Ensayo a tracción .....                       | 66 |
| Resultados probetas orientación 1 .....       | 68 |
| Resultados probetas orientación 2 .....       | 70 |
| Simulación .....                              | 71 |

|  |     |
|--|-----|
|  | 11  |
| Caracterización del gripper.....                     | 78  |
| Identificación del mecanismo .....                   | 79  |
| Consideraciones para el estudio .....                | 79  |
| Análisis cinemático de posición.....                 | 80  |
| Diseño electrónico del manipulador .....             | 84  |
| Microcontrolador .....                               | 85  |
| Acondicionamiento del sensor.....                    | 85  |
| Actuador.....  | 87  |
| Cálculo aproximado de la fuerza del manipulador..... | 88  |
| Control del motor .....                              | 90  |
| Esquema de conexiones del manipulador .....          | 90  |
| Sistema de control .....                             | 91  |
| Identificación del sistema.....                      | 91  |
| Sintonización del controlador .....                  | 95  |
| CAPITULO IV.....                                     | 100 |
| Presentación y discusión de resultados.....          | 100 |
| Resultados construcción del sistema mecánico .....   | 100 |
| Fabricación del dedo basado en efecto Fin-Ray .....  | 100 |
| Estructura de capas en la impresión .....            | 101 |
| Temperatura de impresión.....                        | 101 |
| Velocidad de impresión .....                         | 102 |

|  |     |
|--|-----|
| Vista previa de la simulación impresa en 3D .....    | 102 |
| Impresión del dedo del manipulador .....             | 103 |
| Eslabón externo del manipulador .....                | 104 |
| Corredera central del manipulador .....              | 105 |
| Base Fija del manipulador .....                      | 107 |
| Brida del manipulador.....                           | 108 |
| Almohadillas de los dedos .....                      | 109 |
| Ensamblaje del manipulador suave .....               | 110 |
| Resultados construcción sistema electrónico .....    | 111 |
| Resultados del sistema de control.....               | 112 |
| Pruebas de agarre de pellizco.....                   | 116 |
| Pruebas de agarre envolvente .....                   | 118 |
| CAPITULO V .....                                     | 120 |
| Conclusiones, recomendaciones y trabajo futuro ..... | 120 |
| Conclusiones.....                                    | 120 |
| Recomendaciones .....                                | 122 |
| Trabajo Futuro .....                                 | 123 |
| Bibliografía .....                                   | 124 |
| Apéndices .....                                      | 129 |

## Índice de Tablas

|   |     |
|---|-----|
| <b>Tabla 1</b> <i>Arquitectura de actuación de mecanismos.....</i>  | 48  |
| <b>Tabla 2</b> <i>Parámetros que serán tomados en cuenta para la primera etapa de filtrado. ..</i>                                | 59  |
| <b>Tabla 3</b> <i>Resumen de propiedades mecánicas de algunos materiales pertenecientes a la familia de los elastómeros .....</i> | 61  |
| <b>Tabla 4</b> <i>Especificación de los parámetros del pre maquinado en la impresora 3D.....</i>                                  | 64  |
| <b>Tabla 5</b> <i>Motor a pasos NEMA 17.....</i>  | 88  |
| <b>Tabla 6</b> <i>Constantes de sintonización. Método Ziegler-Nichols. ....</i>   | 97  |
| <b>Tabla 7</b> <i>Propiedades físicas del material usado en la fabricación del dedo proporcionadas por el fabricante. ....</i>    | 100 |
| <b>Tabla 8</b> <i>Propiedades físicas del material usado en la fabricación del gripper proporcionadas por el fabricante. ....</i> | 106 |
| <b>Tabla 9</b> <i>Especificación de los parámetros del pre maquinado en la impresora 3D para el PLA.....</i>                      | 107 |

## Índice de Figuras

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 1</b> <i>Diagrama de flujo del trabajo propuesto</i> .....   | 24 |
| <b>Figura 2</b> <i>Manipulador suave del tipo PneuNets con actuación neumática</i> .....   | 33 |
| <b>Figura 3</b> <i>Manipulador suave actuado por cuerdas</i> .....   | 34 |
| <b>Figura 4</b> <i>Brazo de pulpo diseñado por actuación por cuerdas</i> .....   | 34 |
| <b>Figura 5</b> <i>a) Dedo de la pinza blanda universal optimizada, fabricada mediante impresión 3D. b) Almohadilla de patrón hexagonal</i> .....  | 35 |
| <b>Figura 6</b> <i>Morfología dedo FinRay a) sin deformar, b) deformado</i> .....  | 37 |
| <b>Figura 7</b> <i>Partes del robot KUKA modelo KR16</i> .....   | 38 |
| <b>Figura 8</b> <i>Articulaciones del robot y su ubicación respecto a la base</i> .....  | 39 |
| <b>Figura 9</b> <i>Brida acople DIN/ISO para muñeca central de 16kg</i> .....  | 40 |
| <b>Figura 10</b> <i>Vista frontal del KCP</i> .....  | 41 |
| <b>Figura 11</b> <i>Vista posterior del KCP</i> .....  | 42 |
| <b>Figura 12</b> <i>Descripción de contactos del módulo X11</i> .....  | 43 |
| <b>Figura 13</b> <i>Modelo CAD del dedo del manipulador suave diseñado</i> .....   | 49 |
| <b>Figura 14</b> <i>Modelo CAD del soporte exterior para el dedo del manipulador</i> .....   | 50 |
| <b>Figura 15</b> <i>Modelo CAD de la corredera del manipulador</i> .....   | 51 |
| <b>Figura 16</b> <i>Modelo CAD del cuerpo de Gripper</i> .....   | 52 |
| <b>Figura 17</b> <i>Modelo CAD de la brida de acople entre el robot y el gripper</i> .....   | 53 |
| <b>Figura 18</b> <i>Modelo CAD de almohadillas para mejorar el agarre del manipulador</i> .....  | 54 |
| <b>Figura 19</b> <i>Modelo CAD del gripper ensamblado. a) Almohadilla. b) Dedo basado en efecto Fin-Ray. c) Corredera central. d) Eslabón externo. e) Cuerpo del manipulador. f) Brida de acople al brazo robótico</i> ..... | 54 |
| <b>Figura 20</b> <i>Familias de materiales para primer filtrado</i> .....  | 57 |

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 21</b> Disposición de materiales según el esfuerzo de tensión y la densidad. ....                    | 58 |
| <b>Figura 22</b> Familia de plásticos y elastómeros que cumplen con los parámetros de la Tabla 2. ....         | 59 |
| <b>Figura 23</b> Familia de elastómeros y plásticos que poseen el índice $C_i$ más elevado según la recta..... | 60 |
| <b>Figura 24</b> Filamento de poliuretano termoplástico (TPU). ....  | 62 |
| <b>Figura 25</b> Diseño de probetas tipo IV para ensayo de tracción.....                                       | 64 |
| <b>Figura 26</b> Detalle de las posiciones de impresión de probetas .....                                      | 65 |
| <b>Figura 27</b> Impresión de probetas.....  | 66 |
| <b>Figura 28</b> Probetas impresas para el ensayo a tracción.....  | 66 |
| <b>Figura 29</b> Ensayo a tracción. ....   | 67 |
| <b>Figura 30</b> Resultados del ensayo a tracción. ....  | 67 |
| <b>Figura 31</b> Resultado esfuerzo vs deformación probeta 1. ....   | 68 |
| <b>Figura 32</b> Resultado esfuerzo vs deformación probeta 2. ....   | 68 |
| <b>Figura 33</b> Resultado esfuerzo vs deformación probeta 3. ....   | 69 |
| <b>Figura 34</b> Resultado esfuerzo vs deformación probeta 4. ....   | 70 |
| <b>Figura 35</b> Resultado esfuerzo vs deformación probeta 5. ....   | 70 |
| <b>Figura 36</b> Resultado esfuerzo vs deformación probeta 6. ....   | 71 |
| <b>Figura 37</b> Deformaciones Unitarias del dedo.....   | 72 |
| <b>Figura 38</b> Desplazamiento máximo del dedo.....   | 73 |
| <b>Figura 39</b> Tensiones que soporta el dedo.....  | 73 |
| <b>Figura 40</b> Vista del mallado a) dedos del manipulador cerrado, b) dedos del manipulador abiertos. ....   | 75 |
| <b>Figura 41</b> Desplazamiento del manipulador en 4 pasos.....  | 76 |
| <b>Figura 42</b> Deformaciones unitarias del manipulador al sujeta una esfera de 0.5[kg]. ...                  | 77 |
| <b>Figura 43</b> Tensiones resultantes en el manipulador. ....   | 78 |

|   |     |
|---|-----|
| <b>Figura 44</b> <i>Esquema simplificado del manipulador usado para el análisis y caracterización del gripper.....</i>          | 80  |
| <b>Figura 45</b> <i>Gráfica de posición angular vs desplazamiento de la corredera del dedo del manipulador.....</i>             | 83  |
| <b>Figura 46</b> <i>Posición angular vs desplazamiento de la corredera del eslabón de soporte del dedo del manipulador.....</i> | 84  |
| <b>Figura 47</b> <i>Circuito de adquisición de señal del sensor. ....</i>   | 87  |
| <b>Figura 48</b> <i>Curva característica para torque del motor NEMA 17.....</i>   | 88  |
| <b>Figura 49</b> <i>Diagrama de conexiones.....</i>   | 90  |
| <b>Figura 50</b> <i>Curva de calibración del número de pasos del motor frente a la deformación del dedo.....</i>                | 92  |
| <b>Figura 51</b> <i>Datos de identificación del sistema.....</i>  | 93  |
| <b>Figura 52</b> <i>Respuesta escalón del sistema identificado (Gripper). ....</i>  | 94  |
| <b>Figura 53</b> <i>Diagrama de bloques del controlador PID.....</i>  | 98  |
| <b>Figura 54</b> .....  | 99  |
| <b>Figura 55</b> <i>Vista previa de la pieza antes de la impresión. ....</i>  | 103 |
| <b>Figura 56</b> <i>Impresión del dedo en filamento flexible (TPU).....</i>   | 104 |
| <b>Figura 57</b> <i>Piezas impresas en 3D con filamento PLA. Eslabones de conexión a cada uno de los dedos blandos.....</i>     | 105 |
| <b>Figura 58</b> <i>Impresión de la corredera del manipulador. ....</i>   | 106 |
| <b>Figura 59</b> <i>Modelo real de la pieza que soporta los dedos del manipulador.....</i>                                      | 108 |
| <b>Figura 60</b> <i>Modelo real de la brida de acople entre el brazo robótico y el gripper. ....</i>                            | 109 |
| <b>Figura 61</b> <i>Modelo real de dos tipos de almohadillas para mejorar el agarre del manipulador.....</i>                    | 110 |
| <b>Figura 62</b> <i>Modelo ensamblado del prototipo de gripper suave.....</i>   | 110 |
| <b>Figura 63</b> <i>Sensor piezorresistivo comercial. ....</i>  | 111 |



|   |     |
|---|-----|
| <b>Figura 64</b> <i>Montaje del sensor sobre el manipulador.</i> .....                          | 112 |
| <b>Figura 65</b> <i>Diagrama de flujo para el control de deformación del manipulador.</i> ..... | 113 |
| <b>Figura 66</b> <i>Prueba de agarre del manipulador.</i> .....                                 | 114 |
| <b>Figura 67</b> <i>Respuesta del controlador a una entrada de deformación del 20%.</i> .....   | 115 |
| <b>Figura 68</b> <i>Agarre de pellizco.</i> .....   | 116 |
| <b>Figura 69</b> <i>Pruebas de agarre de pellizco del manipulador.</i> .....                    | 117 |
| <b>Figura 70</b> <i>Agarre envolvente.</i> .....  | 118 |
| <b>Figura 71</b> <i>Pruebas de agarre envolvente del manipulador.</i> .....                     | 119 |

## Resumen

La robótica suave es un área de investigación enfocado al desarrollo de robots suaves a partir de nuevos materiales altamente deformables y flexible con propiedades similares a los organismos vivos, la necesidad actual de interacción entre los robots y los seres humanos han determinado que no se pueden continuar dependiendo de estructuras rígidas para su construcción. El presente trabajo desarrolla el diseño, simulación y construcción de un prototipo de manipulador suave, los dedos del manipulador están basados en el efecto Fin-Ray, este efecto nace a partir del movimiento de las aletas de los peces capaces de deformarse cuando se aplica una fuerza sobre ellas permitiendo que esta se deforme dependiendo de la fuerza que se aplica sobre ella. El manipulador diseñado es accionado por un motor a pasos NEMA 17 que se conecta con un husillo, este convierte el giro del motor en desplazamiento lineal para abrir y cerrar los dedos que fueron construidos mediante impresión 3D con un filamento flexible (TPU). Finalmente se implementa un sistema de control basado en la deformación producida por los dedos, la señal se toma a través de un sensor piezorresistivo es acondicionada para obtener una señal de voltaje y que pueda ser leída por el microcontrolador, permitiendo controlar el agarre de objetos con formas y estructuras variadas demostrando la funcionalidad del manipulador suave diseñado.

*Palabras clave:* robótica suave, efecto Fin-Ray, deformación, sensor piezorresistivo.

### **Abstract**

Soft robotics is a research area focused on the development of soft robots from new highly deformable and flexible materials with properties similar to living organisms, the current need for interaction between robots and humans have determined that they can no longer depend on rigid structures for their construction. The present work develops the design, simulation and construction of a prototype of soft manipulator, the fingers of the manipulator are based on the Fin-Ray effect, this effect is born from the movement of the fins of the fish capable of deforming when a force is applied on them allowing it to deform depending on the force applied on it. The manipulator designed is driven by a NEMA 17 stepper motor that connects to a spindle, this converts the rotation of the motor into linear displacement to open and close the fingers that were built by 3D printing with a flexible filament (TPU). Finally, a control system is implemented based on the deformation produced by the fingers, the signal is taken through a piezoresistive sensor is conditioned to obtain a voltage signal and that can be read by the microcontroller, allowing to control the grip of objects with varied shapes and structures demonstrating the functionality of the designed soft manipulator.

*Keywords:* soft robotic, Fin-Ray effect, deformation, piezoresistive sensor.

## CAPITULO I

### Generalidades

#### Introducción

En la actualidad, los estudios en el campo de la Mecatrónica están enfocados en la automatización de procesos cotidianos. Un área específica de investigación se concentra en la robótica suave, también conocida como "soft robotics". Los robots suaves, tal y como su nombre lo indica, poseen cuerpos deformables, flexibles y suaves, lo cual les permite adaptarse con facilidad a diversos tipos de entornos.

Partiendo de investigaciones realizadas por autores como (Choi et al., 2005), (Hao et al., 2017), entre otros, se propone en este trabajo, la fabricación de un prototipo de efector final (manipulador) blando cuyo diseño está basado en el efecto Fin-Ray, la fabricación usa como estrategia de manufactura la impresión 3D, El diseño y fabricación de este prototipo se hace en base a los conocimientos, métodos y experiencia adquirida durante los años de estudio en un pregrado de ingeniería Mecatrónica.

En este documento se presenta el diseño, simulación y fabricación de un manipulador suave para ser utilizado como efector final en un brazo robótico. En primer lugar, se realiza una revisión bibliográfica con el fin de establecer una guía de trabajo para el desarrollo del proyecto.

El Capítulo I describe las generalidades del proyecto, mientras que en el Capítulo II se presenta un resumen de la literatura relacionada con conceptos de robótica y manipuladores suaves que han sido construidos y probados. Esta información es relevante para la comprensión del diseño del manipulador propuesto en este proyecto. Además, se describen las características técnicas del robot KUKA modelo KR-16, ya que el efector final está diseñado específicamente para este brazo robótico.

El Capítulo III se enfoca en el diseño del manipulador, el cual consta del conjunto brida-manipulador, la selección de materiales, la simulación de elementos finitos y el subsistema mecánico y electrónico. El subsistema mecánico describe los elementos que conforman el manipulador, incluyendo el proceso de fabricación y la morfología del mismo, así como su respectiva simulación. Por su parte, el sistema electrónico detalla el esquema de conexiones entre los actuadores, sensores y mandos de control.

Finalmente, en el Capítulo IV se presentan los resultados de la construcción del prototipo, con pruebas de agarre del manipulador con diferentes objetos para poner a prueba el lazo de control implementado

## Justificación

La robótica rígida usada en procesos de automatización centra el diseño de sus manipuladores con mira en una aplicación específica, para un determinado problema o proceso de automatización. Por lo que el gripper se diseña en base a las condiciones del proceso limitando el patrón en la forma de los objetos que puede manipular y el número de tareas que puede realizar.

Frente a este problema nace el concepto de robótica blanda del cual emergen los robots suaves que son dispositivos que permiten adaptarse a ambientes o entornos impredecibles (Gudiño Márquez et al., 2019). Los robots suaves son construidos para imitar el movimiento del ser humano, por lo que se requiere emplear material ligero, resistente, flexible y deformable para que tenga una buena adaptabilidad al entorno. Estos robots deben interactuar con el entorno de forma suave y segura para no afectar los procesos en los que trabajan. Estos robots se adaptan al ambiente donde interactúan con el ser humano, son más robustos, adaptables y seguros comparados con los robots rígidos.

El laboratorio de Robótica Industrial de la Universidad de las Fuerzas Armadas "ESPE", cuenta con 2 Robots KUKA modelo KR-16 para actividades de docencia. Estos robots cuentan con la limitante, de tener acoplado un gripper rígido en desuso por falta de mantenimiento, y el otro no posee un efector final lo cual reduce su capacidad de trabajo y limita aún más el aprendizaje dentro del laboratorio. Debido a esto, se planteó en este trabajo el diseño de un prototipo de gripper suave para la manipulación de objetos de diferentes formas y tamaños que pueda ser de fácil montaje y pueda ser permutado con otros efectores finales que se tenga a disposición.

## **Objetivos**

### ***Objetivo general***

Diseñar y simular un prototipo de gripper suave para el robot KUKA KR-16 del laboratorio de robótica industrial de la “ESPE”

### ***Objetivos específicos***

- Estudiar la cinemática, dinámica y control del brazo robótico KUKA KR-16
- Identificar los elementos necesarios del brazo robótico KUKA KR-16 que se utilizarán como parámetros para el diseño del Gripper, como por ejemplo dimensiones de la brida de acople, entradas y salidas digitales/analógicas del armario de control, capacidad de fuerza, etc.
- Diseñar un sistema de control para el agarre de objetos.
- Realizar los planos y diagramas esquemáticos para la futura construcción e implementación del sistema.

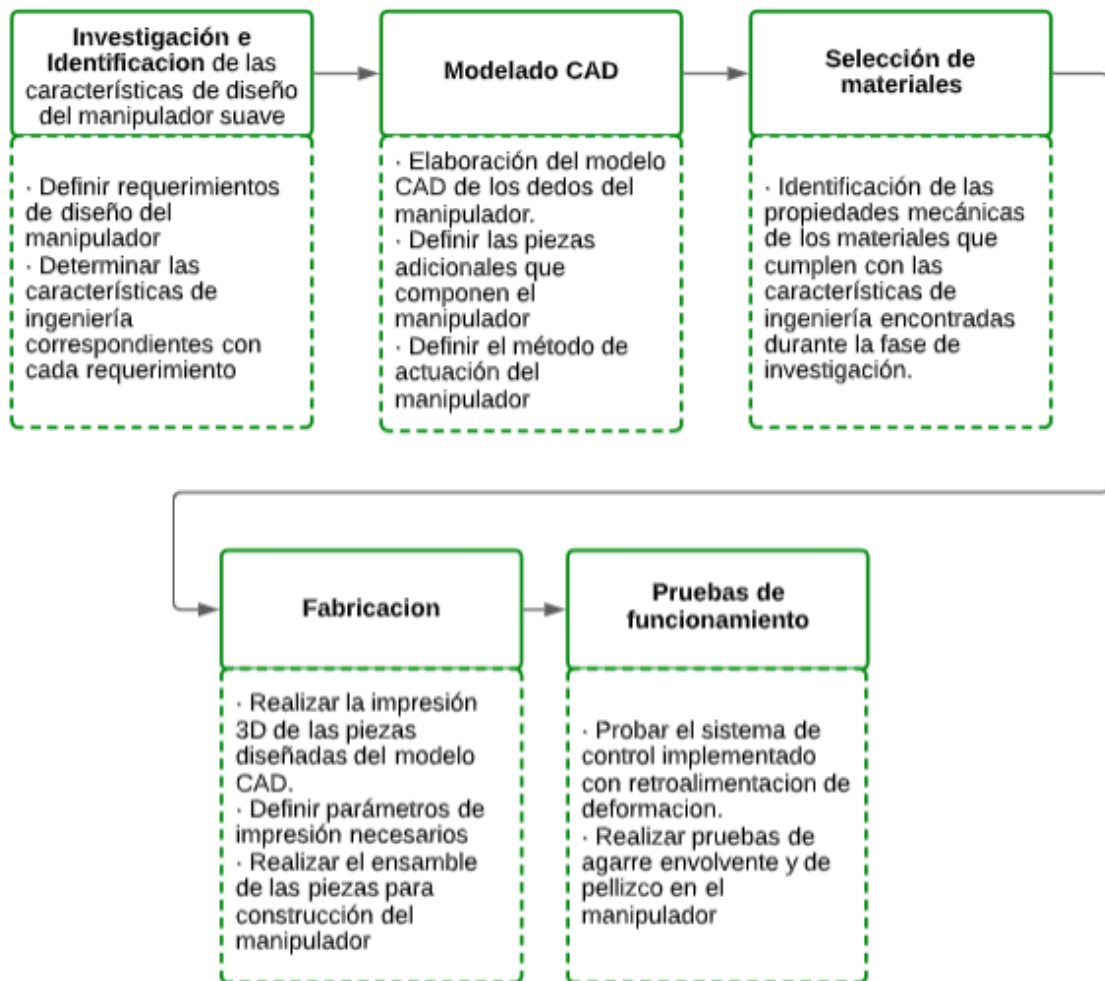
### **Alcance**

- Diseño, simulación y construcción de un prototipo de manipulador suave, para el robot KUKA modelo KR-16 del laboratorio de robótica industrial de la “ESPE”.
- Diseñar el prototipo de manipulador que sea capaz de levantar objetos con un peso máximo de 0.5 [Kg].
- Realizar pruebas de sujeción y deformación para demostrar la funcionalidad del gripper diseñado.

## Diagrama de flujo del alcance del proyecto

**Figura 1**

*Diagrama de flujo del trabajo propuesto*





## CAPITULO II

### Revisión de Literatura

#### Robótica suave

Para entender a cabalidad este tema se hará énfasis en la fabricación, modelación y control de actuadores suaves con diferentes aplicaciones y variedad de materiales.

El principio fundamental de la robótica suave se basa en la capacidad del robot para interactuar con el entorno. La "suavidad" proporciona la adaptabilidad y robustez necesarias, tal como se observa en los organismos naturales, lo que permite llevar a cabo tareas de agarre y manipulación con gran facilidad. Mediante un diseño bioinspirado, los materiales blandos creados pueden permitir la automatización de tareas que actualmente no son factibles mediante las tecnologías y soluciones existentes en la robótica rígida.(Pfeifer et al., 2012). Los manipuladores suaves tienen la capacidad de interactuar de una forma segura dentro de un entorno humano no estructurado y hacer frente a tareas inciertas y dinámicas, permitiendo la manipulación de objetos que poseen superficies y formas irregulares.

Los manipuladores suaves desarrollados hasta la fecha demuestran variedad de diseño, métodos de control y actuación, la morfología y el diseño de los manipuladores suaves se basan en la naturaleza. La robótica suave tiene el potencial de permitir un cambio tecnológico radical, que abarca no solo un cambio en las tecnologías sino también en el enfoque. Estos principios y metodologías de diseño innovadores permiten una nueva generación de robots que pueden convertirse en una parte más integral del entorno humano (Albu-Schaffer et al., 2008).

## **Sensores**

El desarrollo de sensores blandos es esencial para mejorar la detección de variables físicas y el entorno en el que interactúan los robots suaves (Kier & Stella, 2007), por lo que el desarrollo de sensores blandos es enfocado en el mejoramiento de la detección de las variables presentes en el entorno en el que actúa el robot. La detección de estos sensores está enfocada en deformaciones pequeñas o significativas, las cuales serán relacionadas con otra variable física correspondiente con el sistema de actuación, esto presenta un desafío dentro de los sistemas robóticos blandos que tienen un gran número de grados de libertad debido a que no se puede usar un solo sensor para obtener la respuesta de un solo grado de libertad lo que significa que se debe acoplar un sensor por cada grado de libertad.

En la actualidad se buscan enfoques alternativos que permitan reducir el número de sensores por cada grado de libertad, así como también los métodos de actuación, la detección de deformaciones y fuerzas, para que en base a sus interacciones se puedan implementar en potenciales campos de aplicación.

### ***Sensores resistivos***

Se caracterizan por ser flexibles y presentar una variación de la resistencia según la deformación, son fabricados usando metales iónicos y líquidos. La gran mayoría de estos sensores puede llegar a sufrir una deformación del 100% sin sufrir daños en su estructura, además de tener una alta precisión y confiabilidad (Chossat et al., 2013).

Estos sensores son fabricados mediante moldes impresos en 3D formado de polímeros flexibles (PDMS), en los cuales se inyecta un líquido conductor haciendo que la resistencia del líquido varíe conforme se aplique una tensión sobre el mismo, mediante el uso de varias capas

en el sensor y la elección de una morfología específica de los canales del líquido conductor se ha logrado desarrollar sensores de presión y sensores de fuerza flexibles (Vogt et al., 2013).

### ***Sensores flexibles piezoeléctricos y piezorresistivos***

Los sensores piezorresistivos son sensores de presión que utilizan el efecto piezorresistor para medir la presión aplicada sobre ellos. Este efecto hace referencia a la variación de la resistencia eléctrica de un material semiconductor cuando se somete a una carga mecánica (Zhou et al., 2008).

Los sensores piezorresistivos se fabrican utilizando materiales semiconductores, como el silicio o el germanio, que se depositan en una capa delgada sobre un sustrato. Una vez fabricado, se aplica una carga sobre el sensor, lo que provoca un cambio en la resistencia eléctrica del material semiconductor. Esta variación en la resistencia se puede medir utilizando un circuito eléctrico y así, calcular la presión aplicada sobre el sensor (Vogt et al., 2013).

Algunas investigaciones estudian la incorporación de material piezoeléctrico cristalino en combinación con otros materiales, como por ejemplo una malla de celulosa (papel) que permite que el sensor sufra mayores tensiones (Gullapalli et al., 2010).

### **Métodos de Actuación**

En un sistema de control con retroalimentación se debe comprender la respuesta que se obtiene del sensor, para señalar el comportamiento que debe ejecutar el actuador. Las propiedades elásticas de los materiales que se usan en la construcción de los manipuladores suaves requieren de actuadores inteligentes capaces de adaptarse a deformaciones. A continuación, se describe brevemente el uso de varios actuadores que han sido usados en este tipo de manipuladores blandos.

### ***Actuación neumática***

La capacidad de expandir y contraer membranas a través de aire presurizado motivo por el cual se usan estos actuadores en aplicaciones robóticas, en la década de 1950, (Ching-Ping Chou & Hannaford, 1996) desarrolló un tubo estirable rodeado por cuerdas, demostrando la capacidad de compresión y expansión del aire a presión como método de actuación.

Actualmente existe una técnica de actuación basada en cavidades huecas llamadas Pneu-Nets (Marchese & Rus, 2016), son redes neumáticas cerradas por un polímero flexible y este se deforma introduciendo aire por medio de una válvula de control. Una de las ventajas de este método de actuación es la capacidad de intercambio entre actuación neumática e hidráulica ya que esta se usa para tareas de mayor potencia en robots más pesados de dimensiones industriales.

### ***Aleaciones de memoria de forma (SMAs)***

Las aleaciones con memoria de forma tienen la capacidad de recordar su forma inicial a través del cambio de temperatura. Este efecto se puede aprovechar de manera que se diseña el manipulador con una forma inicial contraída, luego el manipulador se puede estirar ejerciendo una fuerza externa que al calentar el material este vuelve a su estado inicial con el cual fue diseñado.

Generalmente los SMAs son usados para crear locomoción en robots suaves, este movimiento es similar al movimiento de un gusano, otro uso que se le ha dado a los SMAs es para lograr locomoción peristáltica, esta propiedad contráctil de los SMAs se aprovechó en el diseño del brazo de pulpo robótico (Cianchetti et al., 2014).

### ***Polímeros electroactivos***

Los polímeros electroactivos (EAPs) son materiales capaces de deformarse cuando se ejerce un campo eléctrico sobre el mismo. La capacidad de deformarse significativamente por medio de un campo eléctrico es una característica que permite usar este material como método de actuación capaz de ejercer fuerzas considerables (Kim & Tadokoro, 2007).

Un ejemplo de (EAPs) son los polímeros dieléctricos sobre los cuales se debe aplicar una tensión eléctrica y debido a la polarización propia del material se induce una deformación. La ventaja de este actuador es su velocidad de actuación, baja densidad y funcionamiento silencioso. Los manipuladores diseñados con este material son usados en aplicaciones que requieren de un agarre suave y de alta precisión. Se han desarrollado pinzas blandas con actuadores de polímero integrados que utilizan la electro adhesión y la activación electrostática con una única señal de control para sujetar objetos frágiles y deformables que tienen formas irregulares (Shintake et al., 2016).

### ***Otros métodos de actuación***

En la robótica blanda existe una amplia gama de métodos de actuación, debido a que no existe una definición precisa acerca de lo que es un mecanismo blando, existen una serie de mecanismos que no son suaves, pero se comportan como si lo fueran ya que dentro de estos tiene acoplado un componente flexible. Se han estudiado varios métodos de actuación en la robótica blanda, algunos de estos transmiten fuerza proveniente de actuadores rígidos a través de cables o canales neumáticos.

### **Materiales**

La robótica blanda explota la capacidad de deformarse de los materiales, la flexibilidad de los materiales permite el desarrollo de manipuladores altamente adaptables y permiten

interacciones seguras con los objetos y el entorno. La elección del material y las técnicas de fabricación utilizadas en la construcción son clave para el desarrollo de manipuladores blandos.

Los robots blandos están compuestos principalmente de materiales con un módulo de Young comparable al de los materiales biológicos blandos, como los músculos, los tendones y la piel, que normalmente se puede considerar de alrededor de 1 GPa (Rus & Tolley, 2015). Esto incluye materiales como silicona, caucho u otros polímeros elastoméricos que se pueden fabricar fácilmente con diferentes factores de forma y propiedades del material (Elango & Faudzi, 2015). La capacidad de deformarse, la flexibilidad y su "suavidad" no dependen intrínsecamente de los materiales, sino también de la morfología y su método de manufactura.

A pesar de las muchas ventajas de los materiales blandos, su uso presenta desafíos como la respuesta no lineal, dificultad en el modelado, rendimiento de fatiga y posibles límites en la fabricación de formas. Se están desarrollando nuevos materiales, como las espumas, para aplicaciones robóticas blandas que tienen un potencial significativo con propiedades innovadoras y la capacidad de ajuste térmico.

### **Métodos de fabricación o manufactura**

La mayor parte de los manipuladores suaves no son escalables, es decir que no tienen la capacidad de adaptarse a los cambios sin perder su forma o funcionalidad. Además, no son fáciles de controlar e implementar un método de actuación. La mayoría de las pinzas blandas tienen formas complejas que dan lugar a procesos de fabricación y montaje sofisticados.

### ***Fundición y moldeo de materiales***

Es uno de los métodos más simples para crear robótica blanda, consiste en usar procesos de fundición o moldeo de materiales blandos. Los moldes que se usan en este

método de fabricación son a menudo impresos en 3D, para moldear materiales como silicona y elastómeros (Marchese et al., 2015).

Los manipuladores creados con este método incluyen manipuladores neumáticos (Ilievski et al., 2011), ya que este método permite una fácil integración de las cámaras neumáticas. Se pueden usar otros métodos de actuación con este método de fabricación, como los robots de locomoción impulsados por tendones. Este es un método extremadamente rápido de creación de prototipos y de bajo costo, pero puede conducir a manipuladores que tienen una estructura de caras planas.

### ***Litografía blanda***

La litografía es un proceso mediante el cual se traza un dibujo o forma sobre piedra caliza, el término litografía es usada como sinónimo de la fotolitografía, esta consiste en transferir un patrón sobre una superficie semiconductor usando luz. Este proceso de la fotolitografía se puede usar de manera similar en la litografía blanda, con el mismo principio, usando materiales flexibles como elastómeros, siliconas u otros cauchos (Marchese et al., 2015).

El proceso usado en la litografía blanda se usa ampliamente en aplicaciones de microfluidos, se crean superficies modeladas con relieve usando fotolitografía para posterior construir capas dando la textura que se necesita, la fotolitografía permite la inclusión de canales que son usados para la actuación como fibras extensibles que facilitan el movimiento del robot.

### ***Impresión 3D***

Usando la técnica de impresión 3D en materiales blandos como se menciona en (Lipson & Kurman, 2013) se ha logrado un rápido desarrollo de los robots blandos con materiales que poseen propiedades suaves y elásticas. Una gran ventaja de la manufactura aditiva en el

desarrollo de los robots blandos es la capacidad de combinar materiales con distintas propiedades para proporcionar rigidez, flexibilidad y elasticidad en los robots suaves. Otra ventaja es la posibilidad de construir un robots suave por completo usando únicamente la técnica de impresión 3D como se demuestra en (Umedachi et al., 2013), el cual detalla la construcción de un robot blando de locomoción de marcha lenta que usa fricción variable en sus patas y accionamiento SMA.

Aunque la impresión 3D permite imprimir materiales flexibles en formas completamente amorfas, los materiales utilizados en la impresión 3D son relativamente frágiles en comparación con los cauchos moldeados y, por lo tanto, a menudo no se adaptan bien a algunos métodos de actuación.

### **Manipuladores suaves**

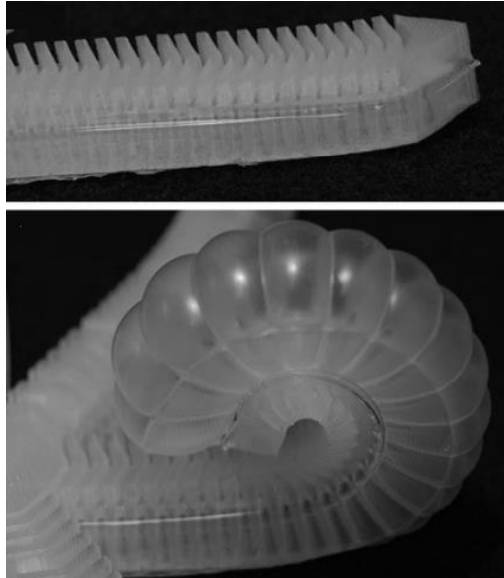
Los primeros trabajos sobre robótica se centraron en el diseño de brazos y grippers que se han utilizado en aplicaciones industriales durante varias décadas (Nguyen & Burgner-Kahrs, 2015). El diseño de estos manipuladores requiere de una alta precisión, con gran esfuerzo y baja flexibilidad mecánica que se compensan con estrategias de control adaptativo (Coulter & Ianakiev, 2015).

Los conocimientos y la experiencia en dinámica del sólido rígido además de cinemática inversa han permitido el desarrollo de los primeros ejemplos de manos robóticas inspiradas en humanos usando enlaces rígidos, articulaciones de un grado de libertad y baja flexibilidad mecánica. Existen ejemplos de manipuladores suaves como la mano Utah/MIT (Ilievski et al., 2011), este manipulador cuenta con canales y cámaras internas que son construidas con un elastómero, con el fin de que al ingresar aire presurizado el actuador se deforme, la deformación producida así como la naturaleza del movimiento depende de la geometría de las cámaras internas y las propiedades del material del cual se los construye.



## Figura 2

*Manipulador suave del tipo PneuNets con actuación neumática.*



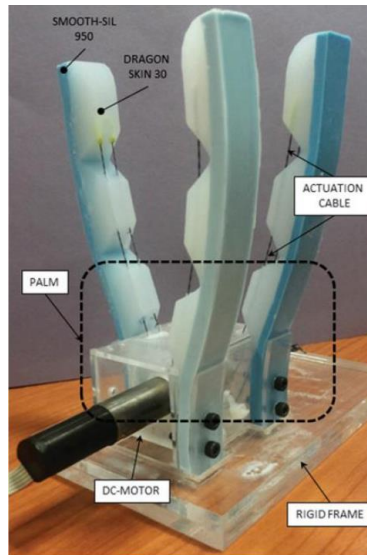
*Nota.* Brazo robótico suave. Tomado de (Ilievski et al., 2011).

La mano de Barret (Tolley et al., 2014), y la mano de Gifu II (Kawasaki et al., 2002), son algunos diseños de manipuladores suaves que tienen el objetivo de demostrar el antropomorfismo a través de cuerpos rígidos.

Cambiando el enfoque en el desarrollo de manipuladores suaves, puede hacerse mediante un método más bioinspirado en su construcción con materiales blandos. Los manipuladores suaves como las pinzas blandas de (Ilievski et al., 2011) y (Manti et al., 2015), hablan del desarrollo de un gripper de propósito general con capacidad de agarre y sujeción habilitada por un esquema de sujeción simple. Se hace énfasis en el uso de materiales suaves y su diseño bioinspirado para las tres versiones diferentes usadas en el análisis de su investigación. Para el diseño de los dedos se usa un enfoque antropomórfico y el método de accionamiento que se basa en el control de tensión de un único cable, garantizando un agarre adaptable a los objetos de diferente forma.

### Figura 3

*Manipulador suave actuado por cuerdas.*



*Nota.* Mano antropomórfica bioinspirada adaptable. Tomado de (Manti et al., 2015)

El Octopus Arm (Laschi et al., 2012) y RBO hand 2 (Deimel & Brock, 2016), son ejemplos exitosos de manipuladores suaves que ejercen grandes deformaciones debido a la gran cantidad de grados de libertad que tienen.

### Figura 4

*Brazo de pulpo diseñado por actuación por cuerdas.*



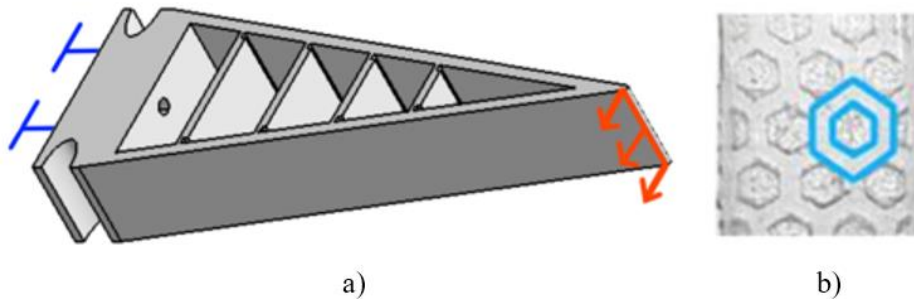
*Nota.* Brazo robótico inspirado en brazos de pulpo. Tomado de (Laschi et al., 2012)

## Pinza blanda universal con el dedo Fin Ray optimizado

Los dedos blandos comerciales suelen adoptar poliamida, silicona y caucho de silicona. En este caso, los dedos se fabricaron con varios materiales mediante el uso de la impresión 3D, pero el proceso de fabricación es más complicado comparado con la impresión de un solo material. Por lo tanto, su objetivo es mejorar la eficacia de los dedos simplemente colocando almohadillas de polidimetilsiloxano (PDMS) en sus superficies, el PDMS es un material adherente relativamente económico y fácil de procesar (Shin et al., 2021).

### Figura 5

a) Dedo de la pinza blanda universal optimizada, fabricada mediante impresión 3D. b) Almohadilla de patrón hexagonal.



*Nota.* Dedo Fin-Ray optimizado. Tomado de (Shin et al., 2021)

## Morfología

Los manipuladores suaves se han diseñado con muchas morfologías diferentes, según la aplicación para la que se requieran y los principios de diseño utilizados en su desarrollo.

## **Efecto Fin-Ray**

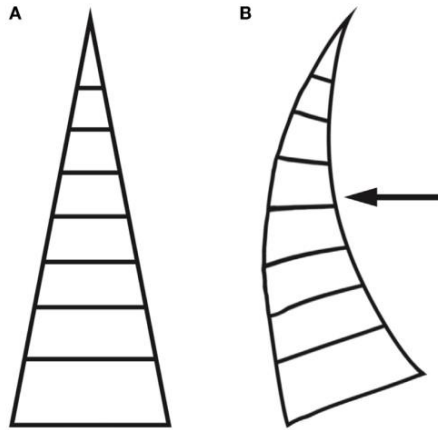
El efecto Fin-Ray inventado en 1997 por Leif Kniese y patentado por EvoLogics GmbH Berlín, se deriva de la fisiología de las aletas de los peces. La aleta de los peces se compone de dos huesos dispuestos en forma de V, al tirar de un lado de la V hace que la aleta se deforme. Basado en esto, Kniese desarrolla una estructura en forma de triángulo isósceles con bandas transversales internas distribuidas uniformemente desde la base hasta la punta, las bandas transversales crean trapecoides a través de la estructura generan presión individual en estos puntos al momento del agarre (Basson et al., 2017)..

El efecto Fin Ray es escalable y versátil. Se ha empleado en manipuladores suaves, como la DHDG y la FinGripper de Festo, que están hechas de capas de polvo de poliamida. Por lo que se ha tomado la decisión de basarse en este efecto para el diseño del manipulador propuesto en este proyecto,

Los dedos suaves con efecto Fin Ray brindan una solución única que facilitan la fabricación y el ensamblaje, tiene un número limitado de actuadores, es escalable en tamaño, es versátil en términos de control y se puede construir a partir de diferentes materiales de impresión 3D (Yang et al., 2021).

## Figura 6

Morfología dedo FinRay a) sin deformar, b) deformado.



Nota. Modelo simplificado del dedo Fin-Ray. Tomado de (Yang et al., 2021)

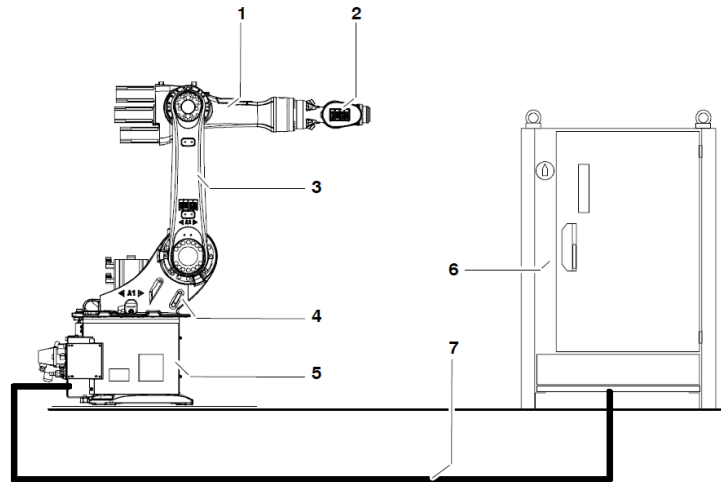
## Robot KUKA Modelo KR-16

El modelo KR-16 se caracteriza por tener seis grados de libertad. Su montaje puede ser anclado al piso, en una pared o el techo y pueden ser usados en cualquier tarea que exija control de puntos de ubicación, donde se plantee una trayectoria de proceso. Sin embargo, en el catálogo del robot se priorizan las siguientes tareas:

- Manipulación
- Montaje
- Aplicación de adhesivos, sellantes y medios de conservación
- Maquinado
- Soldadura MIG/MAG
- Soldadura YAG Laser

## Figura 7

Partes del robot KUKA modelo KR16.



*Nota.* Esquema de partes del brazo robótico KUKA modelo KR-16. Adaptado de (Grijalva & Hazbun, 2012).

1. Brazo
2. Muñeca central
3. Brazo de oscilación
4. Columna giratoria
5. Base
6. Armario de control
7. Cables de unión

### Datos técnicos de la mecánica del robot modelo KR-16

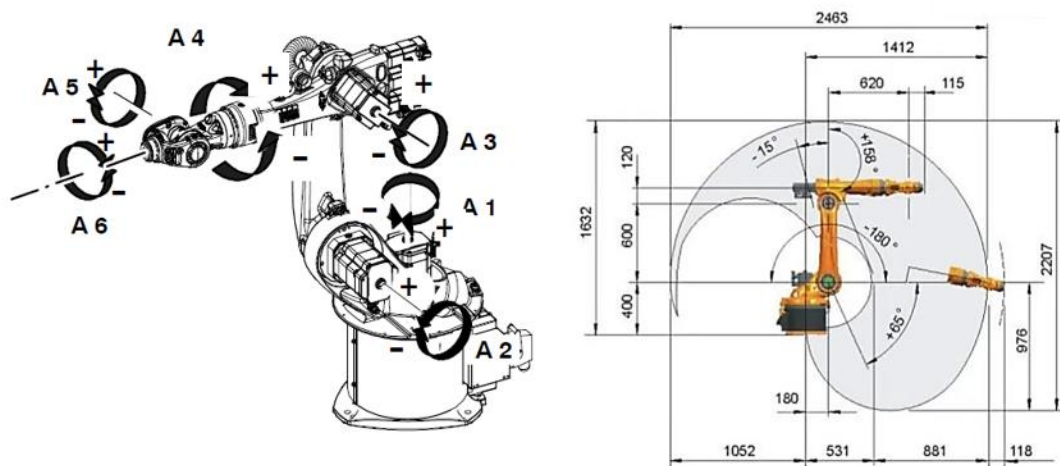
Debido a la precisión de los datos proporcionados en los catálogos y manuales de KUKA, esta información se la transcribirá de manera textual, tanto en tablas como en graficas pertinentes que serán usadas en el desarrollo del proyecto.

## Ubicación de las articulaciones del robot

Cada una de las articulaciones que se describen a continuación están establecidas por el fabricante, así como los nombres asignados a cada articulación y la distancia a la que se ubican respecto al sistema de referencia de la base del robot.

**Figura 8**

*Articulaciones del robot y su ubicación respecto a la base.*



*Nota.* Ubicación de los grados de libertad del brazo robótico KUKA modelo KR-16.

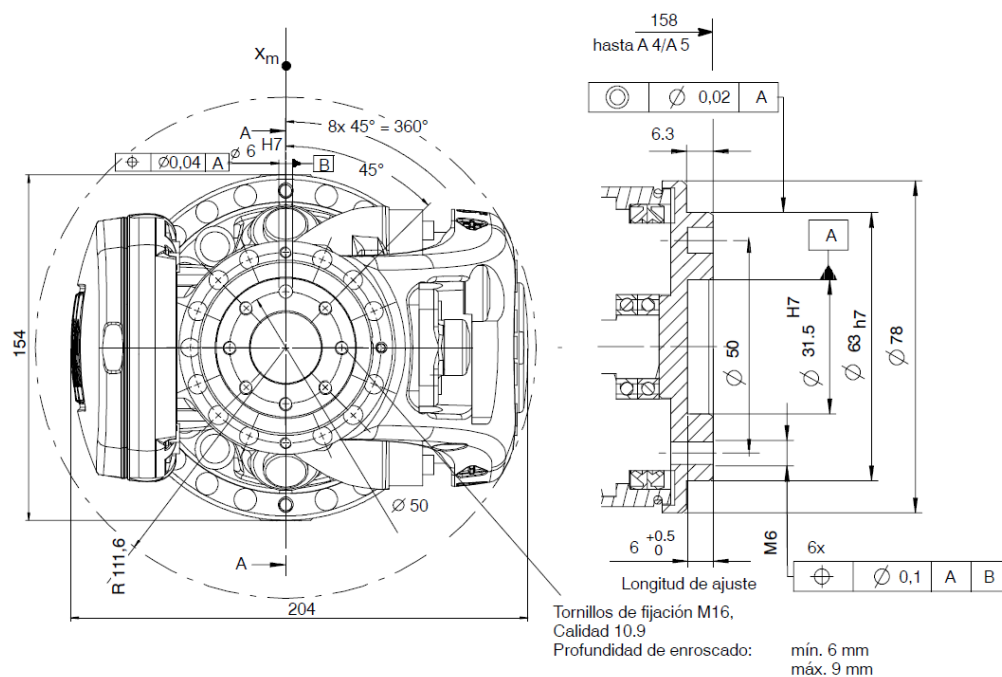
Adaptado de (Grijalva & Hazbun, 2012).

## Brida de sujeción del robot

El diseño del manipulador se basa en la brida de acople del robot, motivo por el cual se debe conocer sus medidas constructivas, ya que este elemento será el principal punto de contacto entre el robot y el gripper. A continuación, se describe las medidas de la brida del KR-16.

**Figura 9**

*Brida acople DIN/ISO para muñeca central de 16kg.*



*Nota.* Plano de tolerancias geométricas y dimensionales de la brida de acople del brazo robótico KUKA modelo KR-16. Adaptado de (Grijalva & Hazbun, 2012).

En base a estas dimensiones se iniciará con el diseño mecánico del gripper respetando las medidas y tolerancias establecidas. Además, el manual establece que el momento máximo que puede soportar la muñeca es de  $0.18 [kg m^2]$  un dato de vital importancia para el diseño del manipulador.

### **KUKA Control Panel (KCP)**

El KCP es el elemento de enlace entre el usuario y el robot, ya que permite realizar una programación manual del robot para así efectuar todas las funciones necesarias y cumplir con el objetivo del programador siempre que estén dentro de las posibilidades tanto en el software como en el hardware del robot. Además, nos permite realizar acciones de seguridad como una



parada de emergencia y la garantía de que el operador se encuentra capacitado para operar el robot, pues se debe accionar correctamente el botón del hombre muerto, en caso de no hacerlo el robot no permitirá ningún movimiento posterior al accionamiento de este.

A continuación, se muestra como está conformado el KCP:

### Figura 10

*Vista frontal del KCP.*



*Nota.* Listado de partes del panel de control del brazo robótico KUKA modelo KR-16.

Adaptado de (KUKA Roboter GmbH, 2013).

- |                                  |                                   |
|----------------------------------|-----------------------------------|
| 1. Selector de modos de servicio | 10. Bloque numérico               |
| 2. Accionamientos CON            | 11. Teclas de función             |
| 3. Accionamientos DESC.          | 12. Tecla de arranque hacia atrás |
| 4. Parada de emergencia          | 13. Tecla de arranque             |
| 5. Space Mouse                   | 14. Tecla de STOP                 |
| 6. Teclas de estado derecha      | 15. Tecla de selección de ventana |
| 7. Tecla de entrada              | 16. Tecla de ESC                  |

8. Teclas del cursor

17. Teclas de estado izquierda

9. Teclado

18. Teclas de menú

### Figura 11

*Vista posterior del KCP*



*Nota.* . Listado de partes del panel de control del brazo robótico KUKA modelo KR-16.

Adaptado de (KUKA Roboter GmbH, 2013)

1. Placa de características

2. Tecla de arranque

3,4,5. Pulsador de hombre muerto

### Modulo X11

El módulo de la interfaz X11 permite conectar dispositivos externos, en nuestro caso será conectado mediante pulsadores de accionamiento que permitirán la manipulación del gripper.

El conector de puente X11 es un conector Harting con clavijas macho, tipo: Han 108 DD, tamaño de carcasa: 24B. A continuación, se describe la asignación de contactos que es clave para una correcta conexión.

## Figura 12

### Descripción de contactos del módulo X11



*Nota.* Listado de entradas y salidas de conexión del módulo de control X11. Adaptado de (Grijalva & Hazbun, 2012)

## Cinemática directa del robot modelo KR-16

Es imprescindible obtener el modelo matemático del robot para determinar tanto la posición como la orientación del efector final. La cinemática directa es una técnica que implica el uso de variables articulares del robot para ubicar el manipulador. A pesar de esto, en temas de automatización del proceso, no es la técnica más adecuada, ya que se utilizan puntos en el espacio de trabajo como datos de entrada para el controlador del robot. Por consiguiente, la cinemática inversa es una solución alternativa a este problema.

Para determinar la relación de movimiento de cada articulación del robot y el punto donde se desea acoplar el efector final, es necesario ubicar los sistemas de coordenadas de cada articulación siguiendo el algoritmo de Denavit-Hartenberg (D-H). Este algoritmo es útil para relacionar cada eslabón con respecto al anterior, basándose en cuatro parámetros.

1.  $Rotz(\theta_i)$ : rotación alrededor de eje  $(z_{i-1})$  un ángulo  $\theta_i$
2.  $Tz(0,0, d_i)$ : traslación a lo largo del eje  $(z_{i-1})$  una distancia  $d_i$ .
3.  $Tx(a_i, 0,0)$ : traslación a lo largo del eje  $(x_i)$  una distancia  $a_i$ .
4.  $Rotx(\alpha_i)$ : rotación alrededor de eje  $(x_i)$  un ángulo  $\alpha_i$

Las transformaciones homogéneas usadas son una serie de rotaciones y traslaciones que relacionan los sistemas de referencia de cada articulación ( $i$ ) con la anterior ( $i - 1$ ), siguiendo la siguiente ecuación.

### Ecuación 1

$$H_i^{i-1} = Rotz(\theta_i)Tz(0,0, d_i) Tx(a_i, 0,0)Rotx(\alpha_i)$$

Para obtener los parámetros mencionados se debe identificar cada articulación además de las dimensiones constructivas del robot. Considerando esto se elabora una tabla con los

parámetros de (D-H) de cada una de las articulaciones de la cadena cinemática para encontrar la transformación homogénea de cada uno de los elementos.

La multiplicación final de las matrices de transformación encontradas dan como resultado la cinemática del efector final con respecto al sistema de referencia base, y de esta matriz final se puede obtener la posición  $(x,y,z)$  del efector final y su cinemática inversa.

## CAPITULO III

### Metodología y Diseño

#### Diseño mecánico

El diseño comienza con la identificación de necesidades y requisitos para definir las pautas a seguir. A partir de la identificación de estos requisitos, se traducen en características de ingeniería que permiten identificar las funciones y características técnicas que debe cumplir el manipulador. Este proceso se realiza para asegurar que el diseño del manipulador cumpla con los requisitos específicos y las necesidades identificadas al principio del proyecto.

#### Requerimientos de diseño

En el proceso de elaboración de este proyecto, es fundamental analizar los requisitos de diseño relacionados con la fabricación del manipulador suave. Por lo tanto, es necesario contar con información que contribuya al diseño, (H & N, 2014), en su publicación sobre manipuladores suaves, presentan algunas propuestas sobre las características que deben cumplir los manipuladores suaves, las cuales serán consideradas en el diseño de este proyecto. Esta información será valiosa para garantizar que el manipulador suave cumpla con los requisitos y características necesarios para su correcto funcionamiento.

A continuación, se enlistan los requerimientos de diseño para este proyecto:

- Debe ser flexible
- Debe ser blando
- Debe ser ligero
- Debe ser un sistema posible de controlar
- Debe soportar deformaciones repetitivas

- Bajo costo

### **Características de ingeniería**

Cada uno de los requerimientos de diseño mencionados anteriormente tiene una o varias características de ingeniería que se considerarán en el desarrollo del plan.

Posteriormente, se identificarán aquellas que tengan mayor relevancia en el proyecto propuesto. A continuación, se enumeran estas características:

- Peso (g)
- Dimensiones (mm)
- Grados de libertad
- Fuerza del actuador (N)
- Geometría del manipulador
- Esfuerzo de compresión (Pa)
- Densidad del material ( $\text{kg/m}^3$ )

Después de identificar estas características, se determinará cuáles son las más importantes para el proyecto y se dará prioridad a su cumplimiento en el diseño del manipulador suave.

### **Proceso de diseño**

El proceso de diseño se inicia con la elaboración de los dibujos de las piezas que conforman el gripper. El diseño se enfoca principalmente en la brida que servirá como soporte para el robot KUKA. Esta brida sostendrá el motor a pasos que acciona el husillo para subir y bajar la plataforma que se encuentra unida a los dedos del gripper. En la arquitectura de manipulación utilizada comúnmente en los robots, se consideran dos variables muy

importantes: "N", el número de eslabones, y "M", el número de actuadores. (Siciliano & Khatib, 2008), (Kragten, 2011).

Estas variables son fundamentales para determinar la complejidad y la capacidad de movimiento del manipulador robótico. En este caso, se enfocará en la configuración de un gripper para cumplir con los requisitos del proyecto. Por lo tanto, se diseñarán las piezas necesarias para la construcción del gripper y se integrarán con el robot KUKA. Este diseño debe cumplir con los requerimientos y características de ingeniería identificados en etapas anteriores.

**Tabla 1**

*Arquitectura de actuación de mecanismos.*

| <b>Relación entre N y M</b> | <b>Características</b>   |
|-----------------------------|--|
| $M < N$                     | Algunos eslabones son considerados pasivos, acoplados o subactuados                          |
| $M = N$                     | Cada eslabón tiene su propio actuador, no existen eslabones pasivos, acoplados o subactuados |
| $M > N$                     | Un eslabón usa más de un actuador para ser operado.  |

*Nota.* Resumen de los modos de actuación de un mecanismo. Adaptado de (Silva Plata & Gallardo Arancibia, 2019)

A partir de esta tabla, el gripper que se presenta en el presente documento es un mecanismo sub actuado ya que un solo actuador acciona todos los dedos del manipulador. El gripper diseñado tiene una estructura de trípode. Los dedos están distribuidos en un arreglo circular a 120° de separación entre cada dedo con el objetivo de sujetar correctamente los objetos con caras uniformes y deformes.



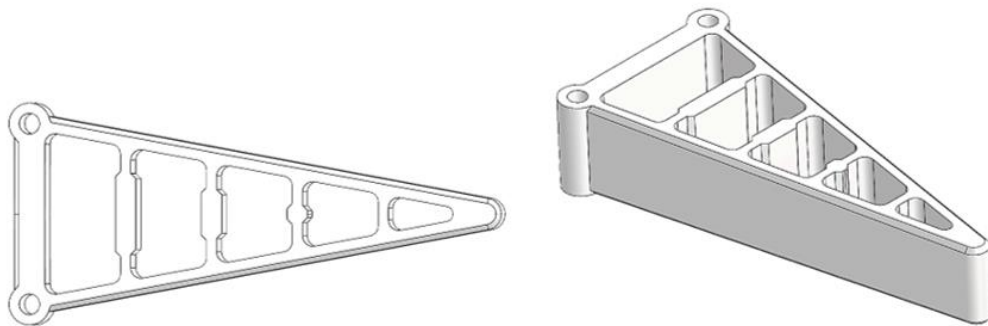
### ***Diseño del dedo basado en efecto FinRay***

El dedo con efecto Fin-Ray ilustrado en la Figura 13 tiene una estructura similar a la presentada por la empresa Festo, ya que cumple con eficacia el efecto deseado y proporciona una buena adaptabilidad al momento de agarrar objetos de distintas formas y tamaños. Sin embargo, se han realizado modificaciones en el eslabón base del dedo para mejorar su resistencia al momento de sostener un objeto.

En comparación con el resto del dedo, el eslabón base tiene un espesor significativamente mayor. Esto se debe a que al aumentar la rigidez de esta parte, se aumenta la resistencia del dedo al momento de sujetar un objeto. Además, esto contribuye a mantener la forma del dedo y a mejorar la rigidez en la unión. A diferencia del modelo de Festo, estas modificaciones aseguran un agarre más fuerte y estable del objeto.

#### **Figura 13**

*Modelo CAD del dedo del manipulador suave diseñado.*



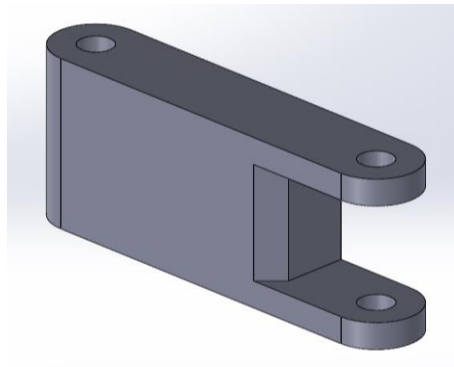
Como se puede observar en la Figura 13, el sólido en tres dimensiones muestra una variación en el espesor de la pieza lo cual es favorable para mantener la resistencia de esta y también para no perder la flexibilidad en el momento que exista contacto con el objeto. Mas adelante se podrá corroborar mediante el análisis estructural por elementos finitos realizado en la simulación que el diseño puede deformarse sin afectar su funcionamiento.

### Eslabón externo

Esta pieza está diseñada para conectar el dedo con el cuerpo del manipulador, actuando como eslabón de conexión entre el dedo y el mecanismo de actuación. Se diseñó la pieza acorde a la funcionalidad que requiere el manipulador para poder abrir y cerrar los dedos blandos al momento de atrapar o soltar los objetos.

#### Figura 14

*Modelo CAD del soporte exterior para el dedo del manipulador.*



### Corredera central

Esta pieza está diseñada para efectuar un movimiento lineal dentro de un cilindro hueco que es parte del cuerpo del manipulador. Este elemento está enlazado con el eslabón externo y el dedo blando. En su interior posee una cavidad donde se ubica el husillo redondo roscado que se mueve verticalmente dentro de un tornillo sin fin, mismo que está conectado directamente con el motor a pasos que será el actuador principal. Este husillo juntamente con el tornillo sin fin son los elementos encargados de transformar el movimiento giratorio del motor en un movimiento lineal.

De acuerdo con el mecanismo de accionamiento del gripper suave se requiere que las piezas en cuestión sean rígidas para el correcto funcionamiento del mecanismo. Es por esta

razón que se optó por usar el PLA que es un polímero lo suficientemente rígido y adaptable al diseño de este elemento.

### **Figura 15**

*Modelo CAD de la corredera del manipulador.*



### **Cuerpo del Gripper**

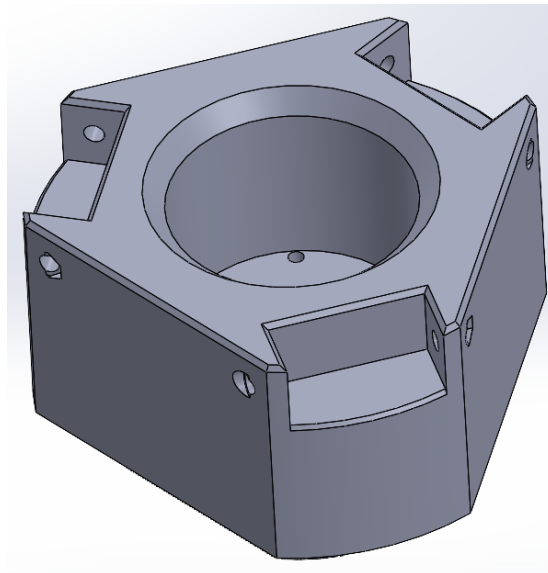
El diseño de esta pieza está basado específicamente en el número de dedos blandos que posee la pinza suave desarrollada. Como se puede ver en la Figura 16 se notan tres cavidades rectangulares con agujeros pasantes en donde van ensamblados los dedos mencionados anteriormente.

Visto desde arriba se puede observar que en el centro posee un cilindro hueco, cavidad por donde recorre la corredera central. Visto desde abajo se puede notar un espacio en el que va ubicado el motor a pasos. El diseño de esta pieza fue optimizado después de varias pruebas en las cuales se realizaron cambios en su forma y densidad para optimizar recursos y sobre todo cumplir con los requerimientos de agarre evitando superar el límite elástico en donde podría fisurarse algún lado de la pieza.

La Figura 16 muestra la vista en perspectiva de lo que será el cuerpo del gripper, por su forma es evidente que los tres dedos se acoplarán en cada lado unidos por pasadores a los eslabones externos y por cuestiones de diseño se estableció realizar por partes separadas para ejecutar un ensamblaje adecuado de las piezas.

### **Figura 16**

*Modelo CAD del cuerpo de Gripper.*



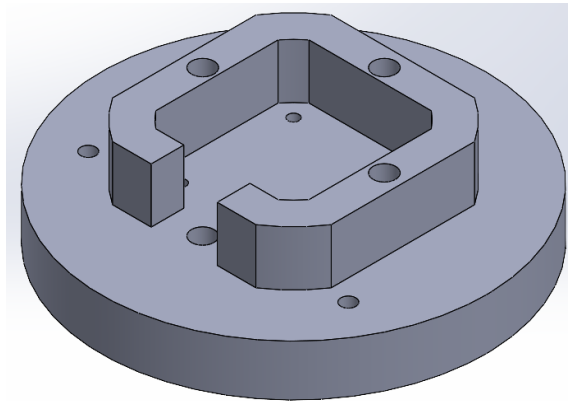
### **Brida**

Este elemento es una de las partes más importantes que conforman el ensamblaje debido a que su diseño está basado en el efector final del robot KUKA KR-16 que se encuentra en el laboratorio de robótica de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE. Esta parte irá enlazada a la parte final del brazo robótico mediante pernos M6 y también será ensamblado al resto de componentes de la pinza suave. El prototipo final de la pieza está diseñado para que el motor a pasos nema 17 encaje en la parte central y a su vez sea ensamblado mediante pernos a la base fija descrita anteriormente. Como se puede observar en la Figura 17 la forma de la brida es circular debido a que de este modo será más adecuado ensamblarla al brazo

robótico, esta pieza debe ser más rígida para resistir el peso total de los elementos que conforman el manipulador y el movimiento que se da por la manipulación de los objetos

### Figura 17

*Modelo CAD de la brida de acople entre el robot y el gripper.*



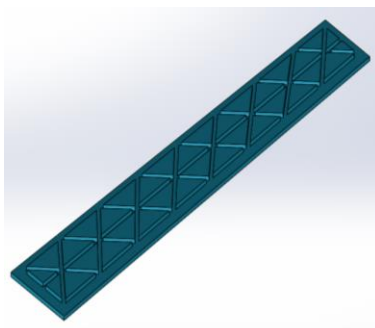
### Almohadillas

El elemento mostrado en la Figura 18, se diseñó con el objeto de proporcionar un mayor agarre a los dedos blandos, debido a que el material con el que está fabricado el dedo es un elastómero (TPU) cuyo acabado superficial es liso, por lo que no es adecuado para sostener objetos que presenten una característica similar.

Se diseñan almohadillas con patrones triangulares que permiten un mejor agarre en diferentes puntos de contacto facilitando el agarre de cualquier objeto de diferente forma y material. Las almohadillas fueron fabricadas mediante un molde impreso en 3D en el que se vertió silicona líquida (Smooth-On), esta silicona después del tiempo de secado necesario posee características flexibles por lo que es un material perfecto para mejorar el agarre del manipulador.

**Figura 18**

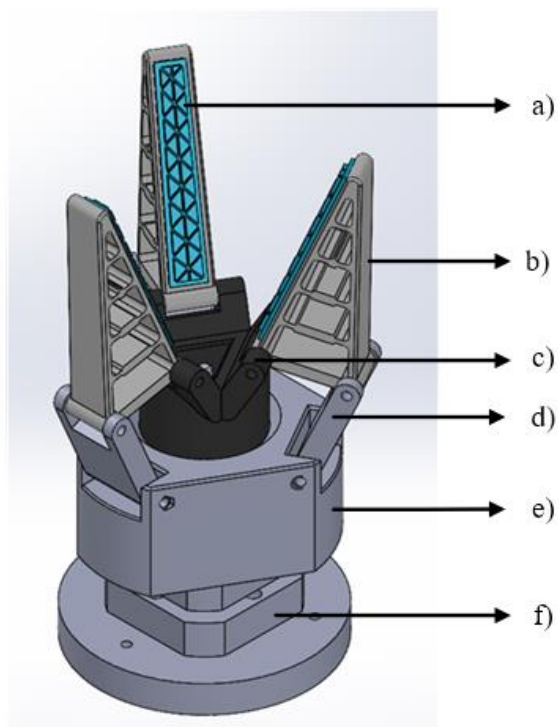
*Modelo CAD de almohadillas para mejorar el agarre del manipulador.*



### Ensamblaje del manipulador suave

**Figura 19**

*Modelo CAD del gripper ensamblado. a) Almohadilla. b) Dedo basado en efecto Fin-Ray. c) Corredera central. d) Eslabón externo. e) Cuerpo del manipulador. f) Brida de acople al brazo robótico.*



## Selección del material

La selección del material para construir la parte de una máquina o un elemento estructural es una de las decisiones más importantes que se deben tomar en el diseño. La decisión de inclinarse por un material se debe hacer en base a las propiedades físicas que los materiales disponen según sea el requerimiento. La selección real de un material para una aplicación en específico se puede considerar basándose en aplicaciones previas ya desarrolladas en otros proyectos de investigación.

Existen enfoques sistemáticos y de optimización para seleccionar el material. Una técnica básica consiste en enlistar todas las propiedades importantes de los materiales asociadas con el diseño, por ejemplo, resistencia, rigidez, densidad y costo.

En este caso vamos a seguir la metodología propuesta por M. F. Ashby, su método se basa en el empleo de gráficas de selección de materiales en base a la maximización o minimización del índice de desempeño que el material presenta en base a las propiedades que se deseen optimizar. Este método es implementado en un paquete de software llamado CES Edupack del cual se hará uso para la selección del material.

Para el desarrollo de los dedos del manipulador se requiere que este sea capaz de sufrir deformaciones grandes y repetitivas sin llegar a la zona plástica del mismo además de ser lo más ligero posible. La deformación de un material es directamente proporcional con el esfuerzo aplicado sobre el mismo, así como lo indica la siguiente ecuación.

### Ecuación 2

$$\sigma = E\varepsilon$$

$\sigma$ : Esfuerzo de tensión, [Pa]

$E$ : Modulo de Young, [Pa]

$\varepsilon$ : Deformación unitaria

El esfuerzo depende de la fuerza que se aplica sobre el material y también de su geometría, ambas variables están dadas por la siguiente ecuación.

### Ecuación 3

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

$F$ : Fuerza [N]

$A$ : Área [m<sup>2</sup>]

El peso del dedo esta dado por la siguiente ecuación.

### Ecuación 4

$$W = AL\rho g$$

$W$ : Peso [N]

$L$ : Longitud, [m]

$\rho$ : Densidad [kg/m<sup>3</sup>]

$g$ : Aceleración de la gravedad [m/s<sup>2</sup>]

Al dividir la ecuación 3 para la ecuación 4 y reordenar, se obtiene la siguiente relación

### Ecuación 5

$$\frac{F}{W} = \frac{A\sigma}{AL\rho g} = \left(\frac{\sigma}{\rho}\right) \cdot \frac{1}{Lg}$$

$$\text{índice: } C_i = \frac{\sigma}{\rho}$$

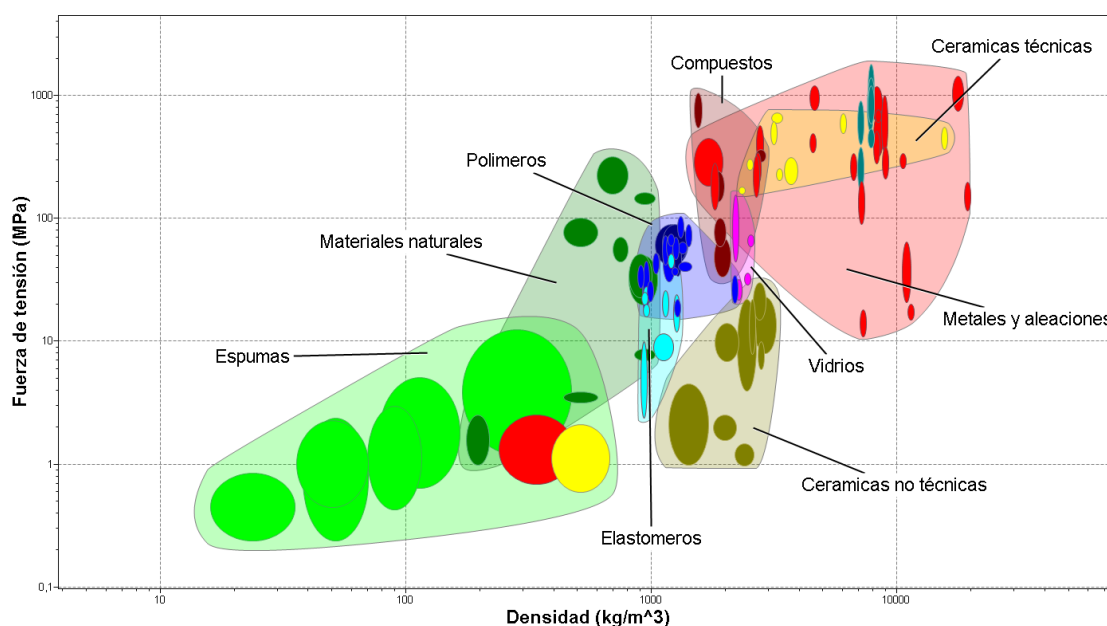


El termino resultante que relaciona el esfuerzo de tracción y la densidad del material será el índice que se utiliza para la selección del material, para la selección del material se busca maximizar el esfuerzo y reducir el peso de la pieza a través del índice mencionado.

Mediante el software CES Edupack se filtrarán de las grandes familias de materiales que existen hasta encontrar el material que ofrezca las propiedades más adecuadas que sean convenientes para el diseño del dedo, como se puede visualizar en la Figura 20 se encuentran seleccionadas el grupo de familias de materiales que nos proporciona el software. La disposición de estos materiales está basadas respecto a la densidad y la fuerza de tensión.

**Figura 20**

*Familias de materiales para primer filtrado.*



Según la metodología de Ashby, la Figura 21 mostrada se utiliza para diseñar estructuras ligeras y fuertes. Para polímeros, la resistencia viene dada por la tensión a la que la curva tensión-deformación se vuelve marcadamente no lineal, visualmente, una deformación alrededor del 1%. Para elastómeros es la resistencia al desgarro. El gráfico es una guía para la

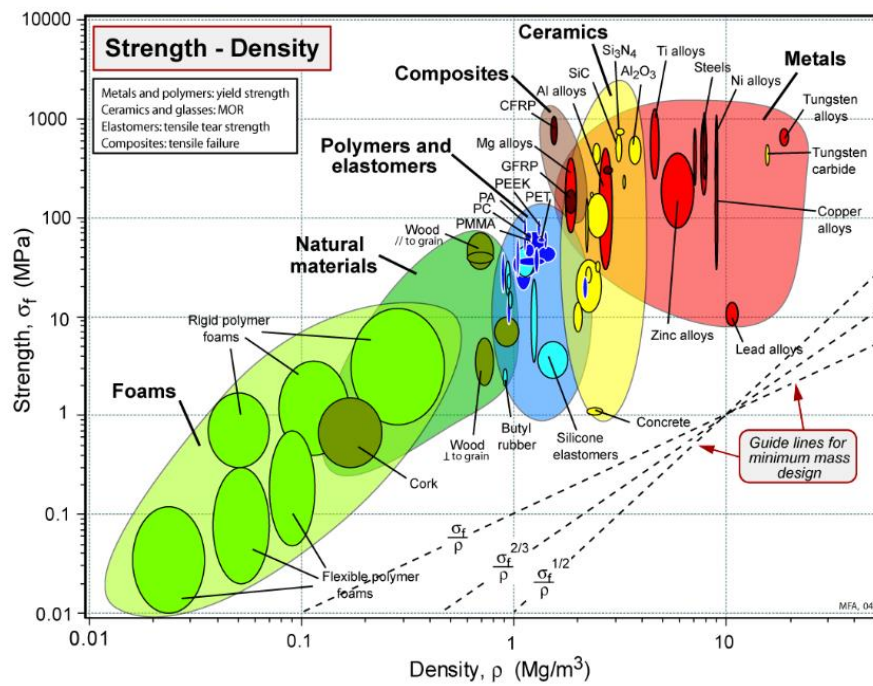
selección de materiales para componentes ligeros y resistentes. Las líneas guía muestran los lugares geométricos de los puntos para los cuales.

### Ecuación 6

$$\frac{\sigma^{2/3}}{\rho} = C_i$$

### Figura 21

Disposición de materiales según el esfuerzo de tensión y la densidad.



Este índice se utiliza para el diseño de un elemento fuerte y con peso mínimo. El valor de la constante  $C_i$  aumenta a medida que las líneas se desplazan hacia arriba y hacia la izquierda. Los materiales que ofrecen la mayor relación resistencia-peso se encuentran hacia la esquina superior izquierda.

En primer lugar, se disminuyen las opciones de materiales especificando parámetros iniciales que se requieren cumplir de acuerdo la aplicación para la que están diseñados los dedos. Los parámetros se detallan en la Tabla 2

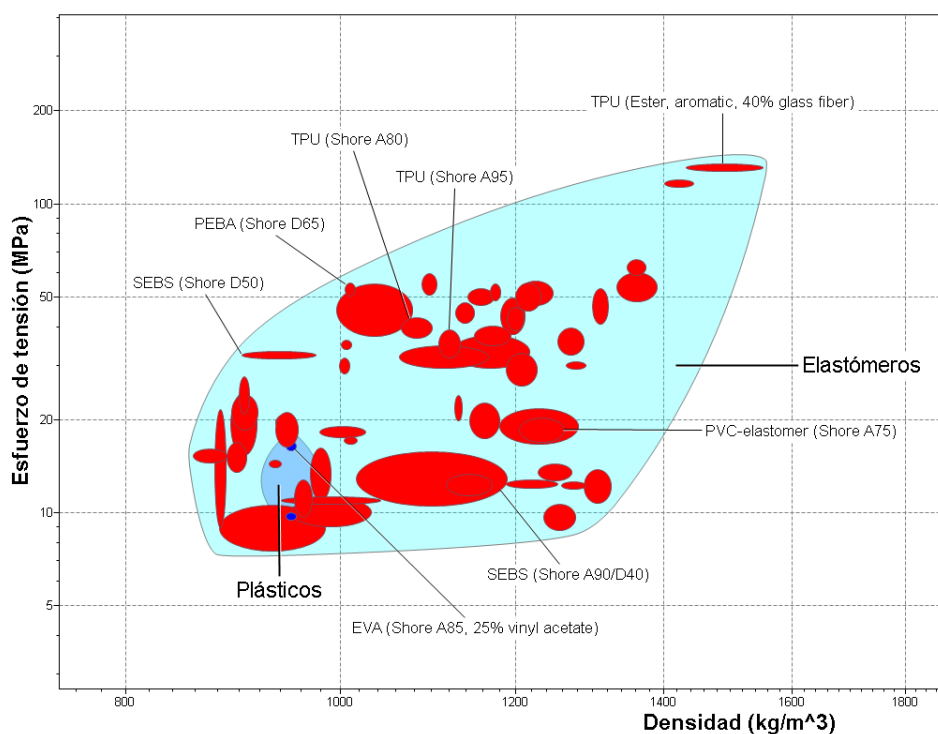
**Tabla 2**

*Parámetros que serán tomados en cuenta para la primera etapa de filtrado.*

|                             |                                 |
|-----------------------------|---------------------------------|
| <b>Familia del material</b> | Elastómero (Termoplástico, TPE) |
| <b>Precio</b>               | 0 – 30 [USD/kg]                 |
| <b>Fuerza de tensión</b>    | 10 – 150 [MPa]                  |

**Figura 22**

*Familia de plásticos y elastómeros que cumplen con los parámetros de la Tabla 2.*

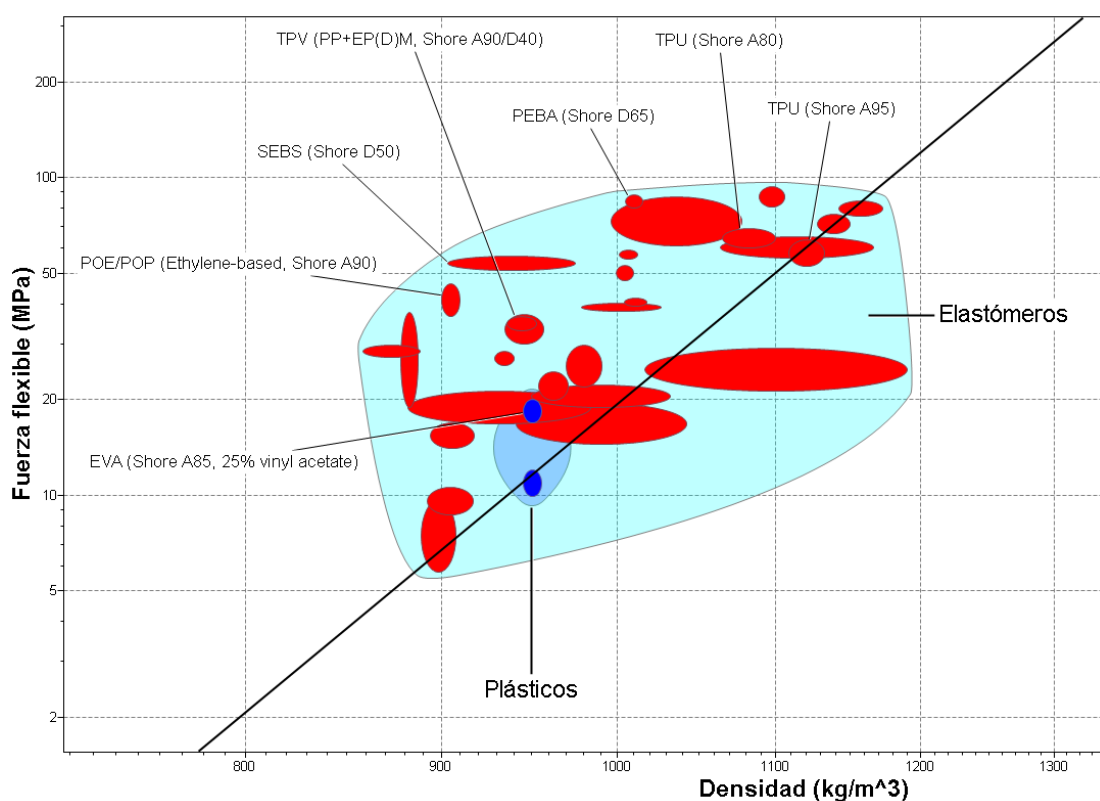


*Nota. Los materiales que han sido preseleccionados son los que poseen un valor más elevado del índice de rendimiento que depende del esfuerzo de tensión y la densidad.*

Seguido de esto se procede a graficar la recta que relaciona la resistencia y el peso del material para preseleccionar los materiales que estén dentro de este rango. Mediante el índice de desempeño del material el software nos permite simplificar a fondo para encontrar materiales que cumplan con las características que se necesitan para el diseño, como resultado de la recta que proporciona el índice de desempeño se puede observar en la Figura 23 una disminución considerable de los materiales.

**Figura 23**

*Familia de elastómeros y plásticos que poseen el índice  $C_i$  más elevado según la recta.*



En la Figura 23, se hace referencia a la familia de materiales elastómeros, dentro de los cuales se pueden encontrar varios materiales compuestos que cumplen con los requerimientos de diseño que se deben satisfacer para la fabricación de los dedos blandos.

Mediante la información que proporciona el software se elaboró la Tabla 3 que contiene las propiedades mecánicas más relevantes que influyen directamente en la aplicación que tendrán los dedos blandos. También se calcula la relación que existe entre el esfuerzo de tensión y la densidad, que será el índice que considerará para la decisión final.

**Tabla 3**

*Resumen de propiedades mecánicas de algunos materiales pertenecientes a la familia de los elastómeros*

| <b>Material</b>        | <b>Densidad</b><br>$\rho$<br><b>(kg/m<sup>3</sup>)</b> | <b>Esfuerzo</b><br><b>de tensión</b><br>$\sigma$<br><b>(MPa)</b> | <b>Módulo de</b><br><b>Young</b><br>$E$<br><b>(GPa)</b> | <b>Módulo</b><br><b>de flexión</b><br>$E_f$<br><b>(GPa)</b> | <b>Índice</b><br>$\left(\frac{\sigma}{\rho}\right)$ |
|------------------------|--|--|---|---|---|
| EVA (Shore A85)        | 945 – 955  | 16 – 17  | 0,02 – 0,03   | 0,02 –<br>0,03  | 0,017   |
| POE/POP (Shore<br>A90) | 900 – 909  | 21 – 27,4  | 0,071 –<br>0,083  | 0,07 –<br>0,083   | 0,027   |
| TPV (Shore A90)        | 935 – 956  | 16,4 – 21,1  | 0,123 –<br>0,127  | 0,137 –<br>0,144  | 0,020   |
| PEBA (Shore D65)       | 1000 – 1020  | 50,6 – 55,4  | 0,409 –<br>0,419  | 0,361 –<br>0,379  | 0,052   |
| TPU (Shore A80)        | 1060 – 1170  | 29,6 – 34,6  | 0,01 – 0,012  | 0,0119 –<br>0,0171  | 0,030   |
| <b>TPU (Shore A95)</b> | <b>1110 – 1130</b>                                     | <b>31,9 – 38,9</b>   | <b>0,0204 –<br/>0,021</b>                               | <b>0,0272 –<br/>0,0398</b>                                  | <b>0,032</b>  |

De acuerdo con la comparación del valor resultante para el índice de rendimiento de cada material enlistado en la Tabla 3, resulta que el material que tiene uno de los mayores índices de desempeño es el elastómero TPU 95 A. Se debe considerar que también hay otros materiales que cumplen con un índice elevado, pero es importante reconocer que este material sea asequible y por lo tanto el TPU resulta ser opción más adecuada para el caso.

### ***Material seleccionado***

El material seleccionado es el poliuretano termoplástico (TPU). Es uno de los materiales más utilizados debido a que es de los filamentos flexibles más fáciles de imprimir mediante la manufactura aditiva. El termino flexible es subjetivo ya que TPU tiene diferentes niveles de flexibilidad, el más común es TPU 95A y el 98A, estos valores se refieren a la dureza Shore. Por referencia 100A se refiere a un bloque de ABS que tiene la misma dureza que un bloque de Lego. Los filamentos flexibles son más complicados de imprimir debido a que la flexibilidad causa problemas con la extrusión y la flacidez al momento de crear un soporte de impresión. El TPU usado en este caso de estudio pertenece a la empresa Overture3D y según el fabricante fue creado de acuerdo los estándares de control de calidad ISO 9001:2015.

### **Figura 24**

*Filamento de poliuretano termoplástico (TPU).*



## Caracterización del material

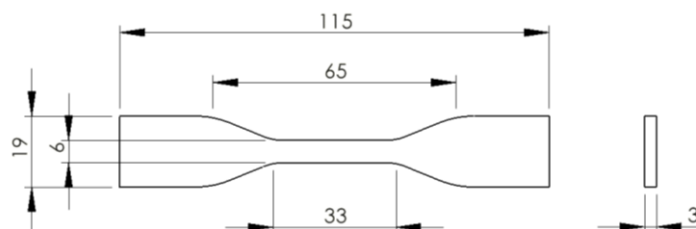
La impresión 3D es un tipo de manufactura que está basada en la deposición continua de capas de un material comúnmente conocido como filamento. Debido a que la calidad de la pieza impresa depende de varios factores y parámetros se produce un cambio en las propiedades del material después de la impresión por lo que se pretende realizar un ensayo a tracción enfocado a definir las propiedades mecánicas del mismo.

El ensayo de tracción se realizó de acuerdo con la norma ASTM D638-14 con referencia a las normas D883 y F2971. D638 es el estándar más alto dentro de las pruebas de tracción y se ha utilizado en una innumerable cantidad de documentos que involucran muestras impresas en 3D. Este estándar de calidad describe varios tipos de muestras diferentes, siendo la muestra Tipo IV la más recomendada debido a que permite la comparación entre muestras rígidas y no rígidas. El estándar D883 especifica que un plástico rígido es un plástico con un módulo de elasticidad superior a 700 MPa y un plástico no rígido como un plástico con un módulo de elasticidad inferior a 70 MPa.

El estándar para pruebas de manufactura aditiva es ASTM D638-14 con ASTM D883-00 y ASTM F2971 utilizado como referencia. El estándar D638-14 especifica la muestra tipo IV para comparar muestras rígidas y no rígidas, a continuación, se indican las medidas de la probeta usada.

## Figura 25

*Diseño de probetas tipo IV para ensayo de tracción.*



### Impresión de probetas

Se realizó el diseño de la probeta en el software SolidWorks con las dimensiones correspondientes conforme establece la norma y luego se procedió a exportar el archivo CAD en formato STL tomando en consideración una tolerancia máxima de desviación de 0,02 [mm]. Luego, el archivo obtenido fue procesado mediante el software Ultimaker Cura, en el cual se especificaron los parámetros adecuados para la impresión descritos en la Tabla 4. En esta etapa de preprocesado se generó el código máquina que posee las trayectorias que debe seguir la impresora 3D para fabricar la pieza.

**Tabla 4**

*Especificación de los parámetros del pre maquinado en la impresora 3D*

| Altura de capa | Densidad de relleno | T. impresión | Velocidad de impresión | Número de capas |
|----------------|---------------------|--------------|------------------------|-----------------|
| 0.16 mm        | 25%                 | 235 °C       | 50 mm/s                | 5               |

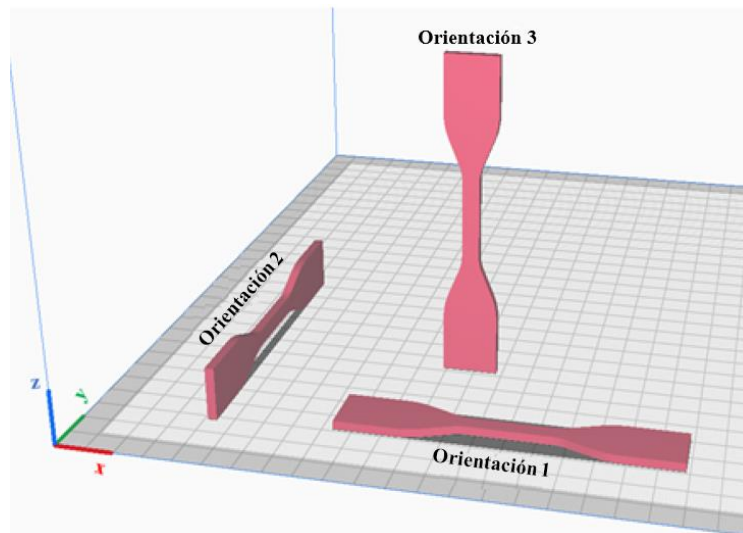
Las impresiones fueron efectuadas mediante la impresora 3D Creality CR-10, la cual ofrece una resolución de 250 [µm] y una exactitud de  $\pm 0.1$  mm. Se realizaron 6 impresiones, de las cuales se varió su orientación respecto a la mesa de impresión para determinar en qué



disposición ofrece un mayor desempeño el material. De la orientación 1 y 2 se imprimieron 3 probetas respectivamente, mientras que la orientación 3 no se pudo efectuar ninguna probeta debido a que, por la flexibilidad del material y por las dimensiones de la probeta, al momento de depositar el material caliente sobre la mesa no logra adherirse capa sobre capa lo que llevo al descarte esta orientación para la prueba. En la Figura 25 detalla las orientaciones usadas para la impresión de probetas para el ensayo de tracción.

### Figura 26

*Detalle de las posiciones de impresión de probetas*



La Figura 27, se muestra una sección transversal del patrón de relleno que comúnmente se conoce como giroide. Este tipo de forma es estructuralmente isotrópica mientras que la estructura cristalográfica es levemente anisotrópica. Esto es importante ya que teóricamente significa que la estructura debería tener propiedades similares en todas sus direcciones.

**Figura 27**

*Impresión de probetas*

**Ensayo a tracción**

El ensayo consiste en elongar la probeta hasta que esta falle (Figura 29), de este ensayo se pudieron obtener datos de fuerza y desplazamiento los cuales se procesan para encontrar la gráfica de esfuerzo vs deformación y así obtener el módulo de elasticidad del material post impresión.

**Figura 28**

*Probetas impresas para el ensayo a tracción.*



**Figura 29**

*Ensayo a tracción.*

**Figura 30**

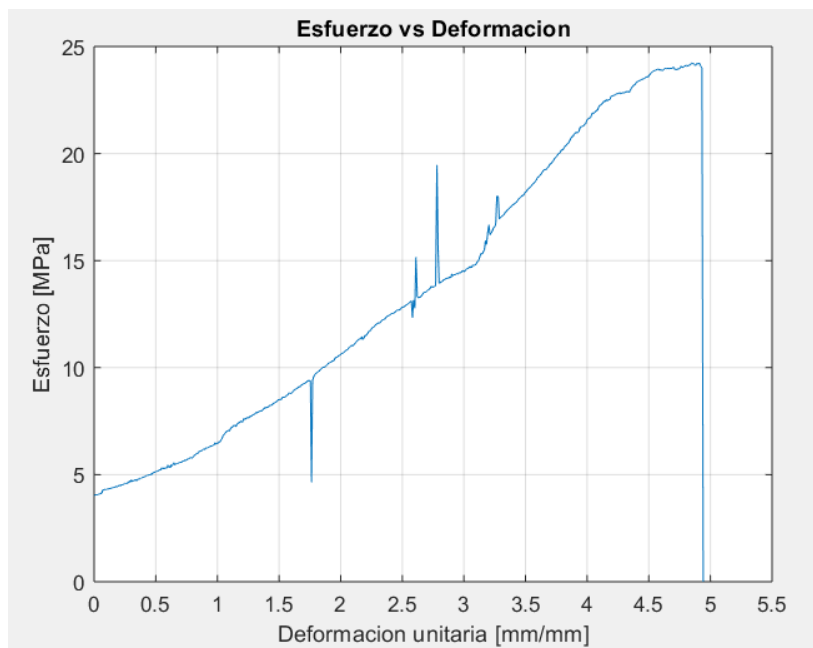
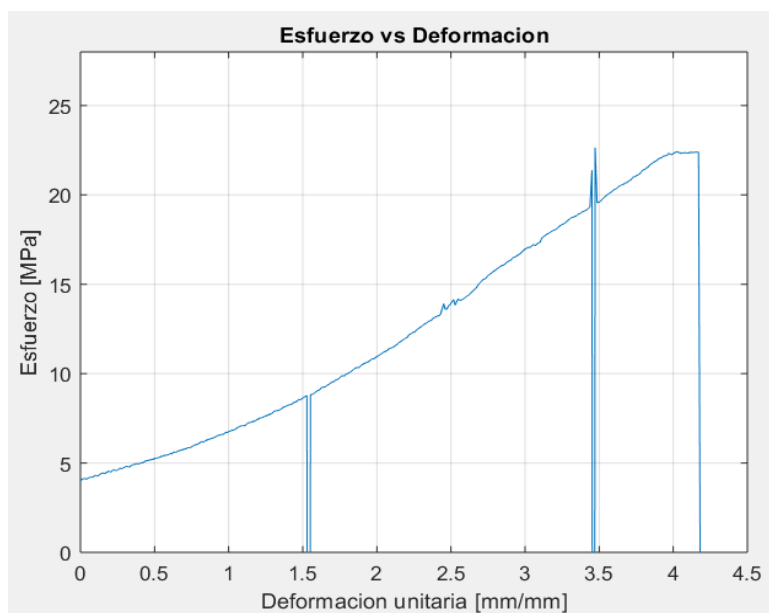
*Resultados del ensayo a tracción.*



a)

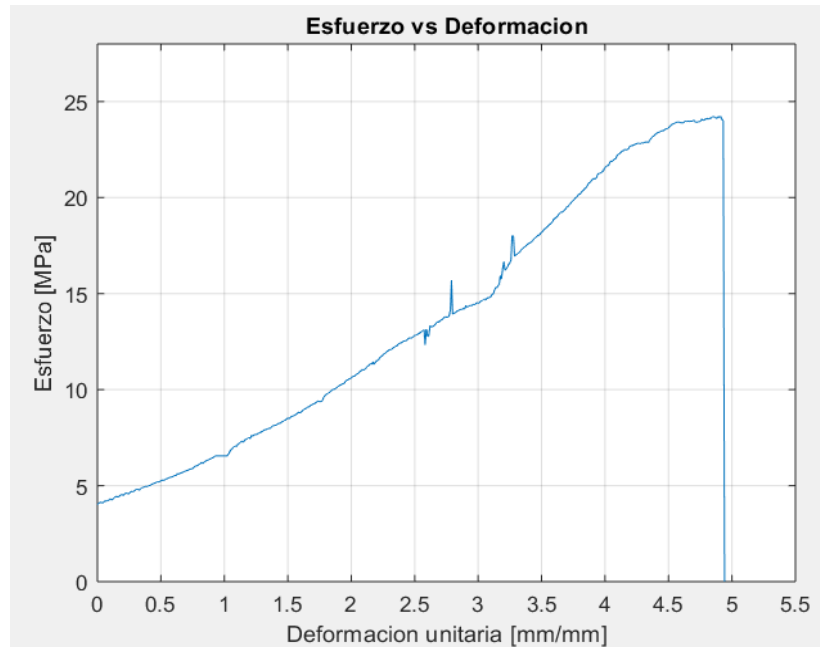
b)

*Nota. Las probetas en la figura muestran los resultados del ensayo de tracción para probetas impresas en diferentes orientaciones de posición respecto a la mesa de impresión. a) orientación 1. b) orientación 2.*

**Resultados probetas orientación 1****Figura 31***Resultado esfuerzo vs deformación probeta 1.***Figura 32***Resultado esfuerzo vs deformación probeta 2.*

**Figura 33**

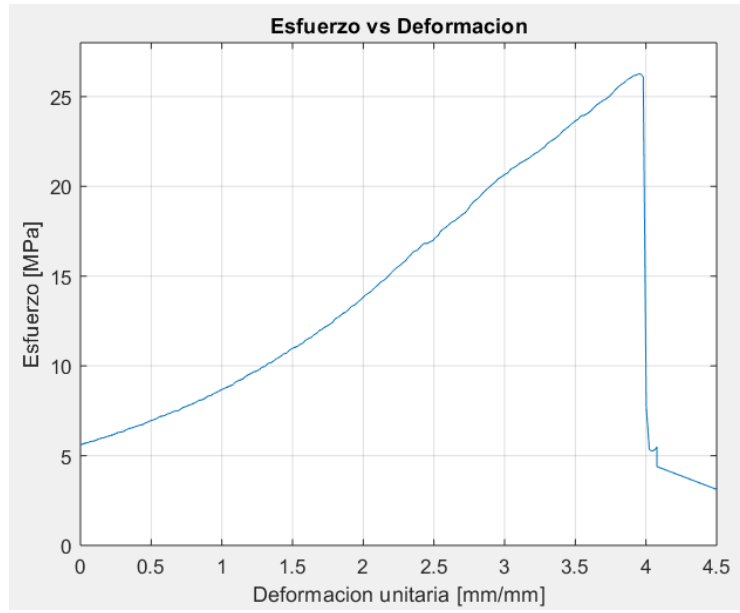
*Resultado esfuerzo vs deformación probeta 3.*



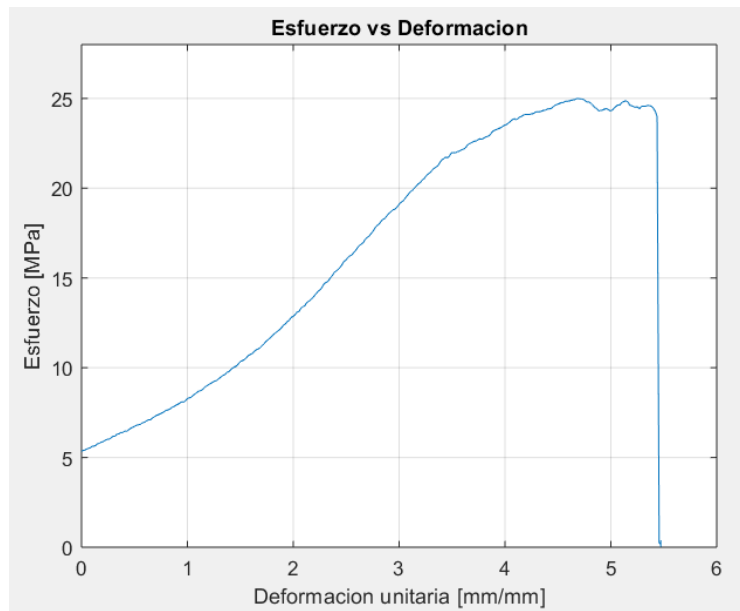
Los resultados del ensayo muestran que el mayor esfuerzo que resistió la probeta fue en promedio de 24 [MPa], el módulo de elasticidad experimental encontrado es de 3.57 [MPa], además de ser capaz de deformarse alrededor del 500%, en comparación con el módulo de elasticidad del material propuesto en la Tabla 2, se observa que es mucho menor esto debido a los parámetros de impresión propuestos ya que el relleno de la impresión afecta la rigidez de este.

**Resultados probetas orientación 2****Figura 34**

Resultado esfuerzo vs deformación probeta 4.

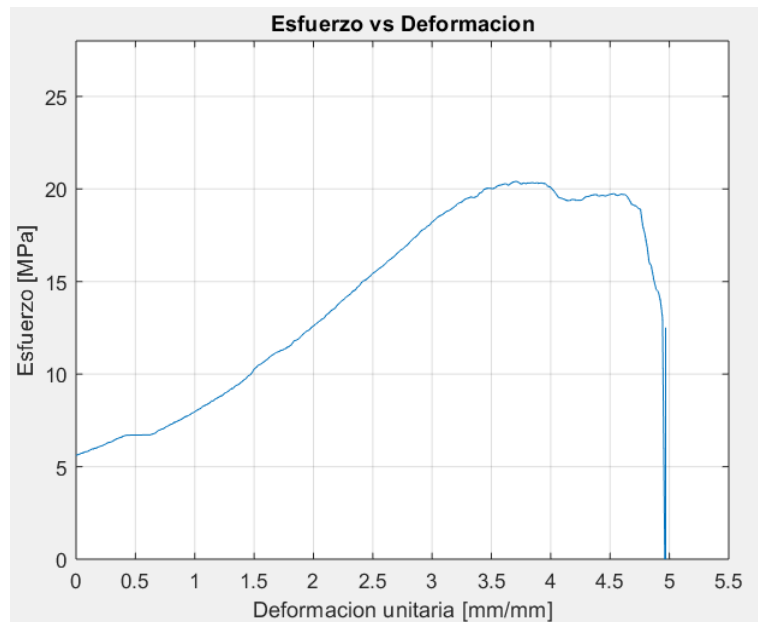
**Figura 35**

Resultado esfuerzo vs deformación probeta 5.



### Figura 36

*Resultado esfuerzo vs deformación probeta 6.*



El resultado obtenido del ensayo para las probetas impresas con la posición 2 nos dice que las probetas en promedio resisten un esfuerzo máximo de 26 [MPa] y el módulo de elasticidad experimental es de 1.35 [MPa], lo que indica que es menor a las probetas impresas con la posición 1, entonces la mejor forma de imprimir los dedos suaves del manipulador es en la posición 1.

### Simulación

Las medidas de cada una de las piezas que componen el manipulador se encuentran en los anexos .

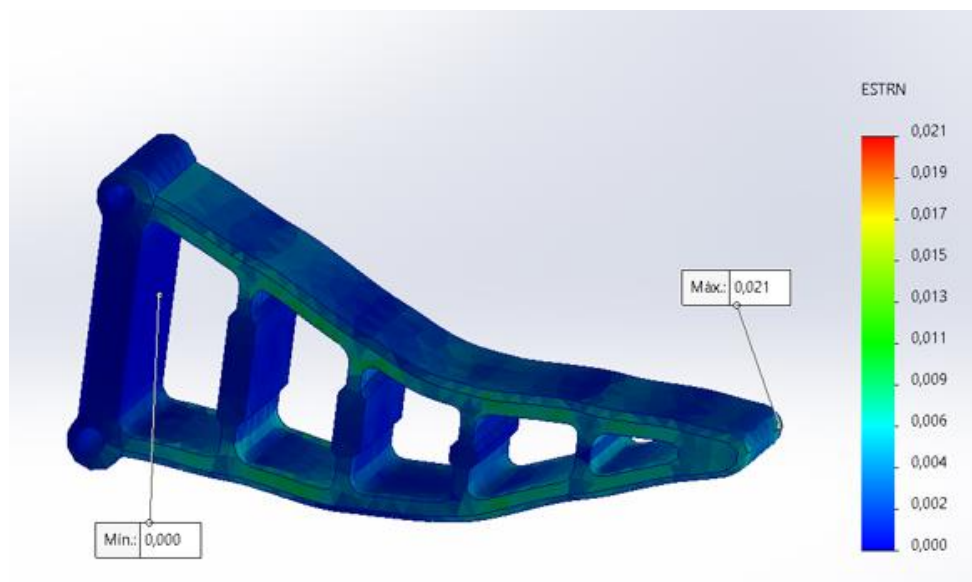
Con el modelo digital del gripper se procede a realizar un análisis de elementos finitos con la herramienta que proporciona el software SolidWorks. Dentro de las consideraciones para el estudio se debe tener en cuenta que dentro de la biblioteca de materiales que dispone el programa no existen los materiales que se usan en este caso de estudio por lo que se debe

crear un nuevo material especificando las propiedades mecánicas obtenidas en la selección de materiales, todo esto con el fin de que la simulación sea lo más parecido a lo real.

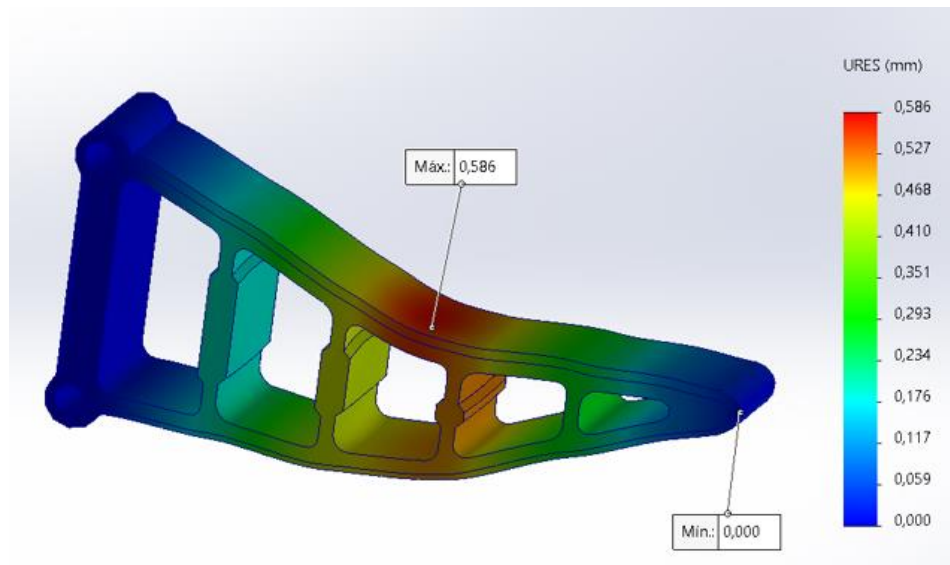
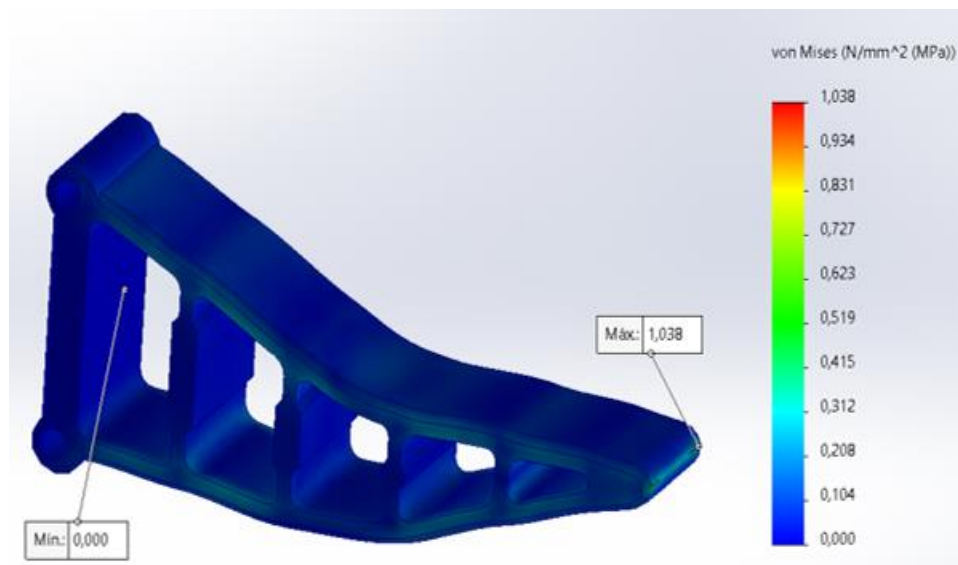
El análisis de elementos finitos del dedo se hace para comprobar la funcionalidad del material seleccionado, a través de la deformación que sufre el dedo y los esfuerzos que soporta, para ello se usa una carga de 5[N] lo cual equivale a 0.5[Kg] de peso el cual se estableció dentro del alcance de este proyecto. El análisis es realizado sobre un solo dedo y la fuerza se aplica sobre la superficie central del dedo, los resultados de la simulación se muestran a continuación.

### Figura 37

*Deformaciones Unitarias del dedo.*





**Figura 38***Desplazamiento máximo del dedo***Figura 39***Tensiones que soporta el dedo*

La Figura 37 muestra las deformaciones que sufre el dedo al soportar la carga de 0.5 [Kg], como se muestra la cara que entra en contacto con el objeto es la que mas se deforma llegando a un valor maximo del 21%, este valor está dentro de las propiedades del material

caracterizado ya que tras la prueba de tracción se encontró que el material después de la impresión puede deformarse hasta un 500%.

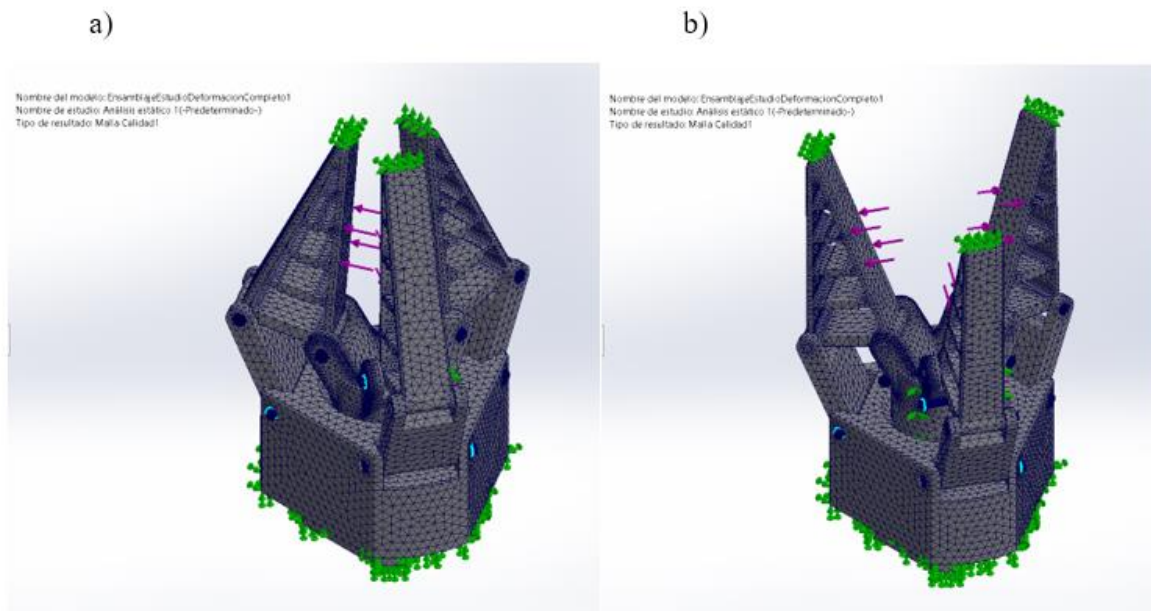
La Figura 38 muestra el desplazamiento máximo que sufre el dedo, como se observa se concentra en el centro del dedo esto debido a que en un agarre envolvente el dedo empieza a tomar la forma del objeto y por lo tanto presenta el mayor desplazamiento.

Finalmente la Figura 39, muestra la tensión máxima que soporta el dedo, se observa que las tensiones máximas se encuentran en los cambios de sección llegando a un valor máximo de 1.038 [MPa], de la caracterización del material se logró encontrar que el módulo de elasticidad del material después de la impresión llega a un valor de 3.57 [MPa] por lo que se determina que el dedo no va a fallar.

Posterior al análisis de elementos finitos del dedo se realiza un análisis conjunto del manipulador ya que este al poseer juntas de tipo pasador se determinará si resisten las juntas en los cambios de sección, el mallado para esta simulación se realiza de manera que este aproxime de forma adecuada al movimiento real del manipulador, para esto el tamaño de la malla se reduce en los cambios de sección de la geometría en los dedos, en las juntas de pasador que tienen los dedos con los eslabones y la corredera central como se muestra en la Figura 40. El valor aproximado de malla es de 2 [mm], esto se hace con el objetivo de obtener un resultado más preciso

**Figura 40**

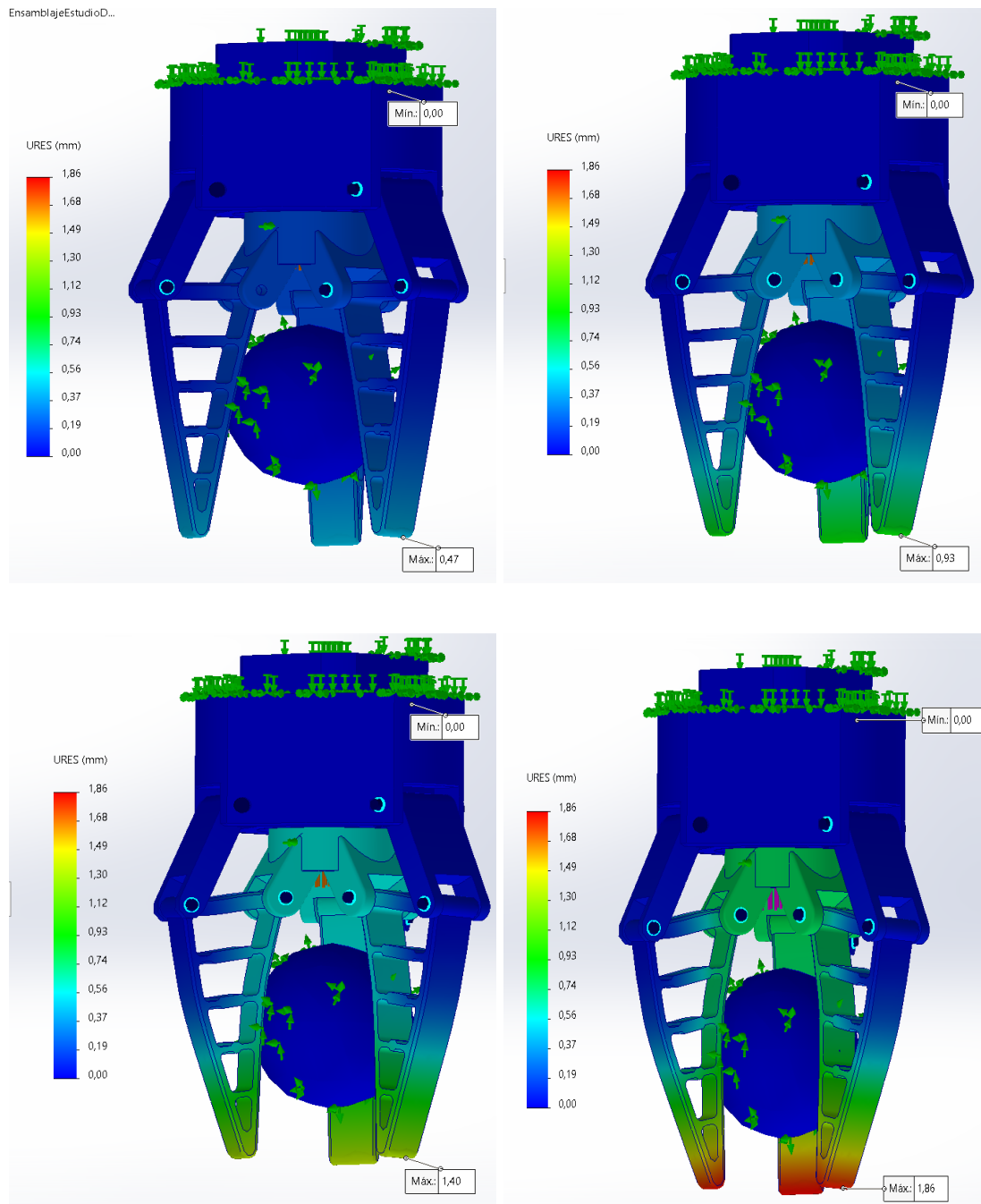
*Vista del mallado a) dedos del manipulador cerrado, b) dedos del manipulador abiertos.*



Las condiciones para la simulación se realiza en base a la deformación de los dedos al sujetar un objeto, debido a ello se usan sujeciones fijas en el cuerpo del manipulador, juntas de tipo pasador en los dedos y la corredera central, finalmente se simula una carga en la corredera para que simule el movimiento real del mecanismo.

**Figura 41**

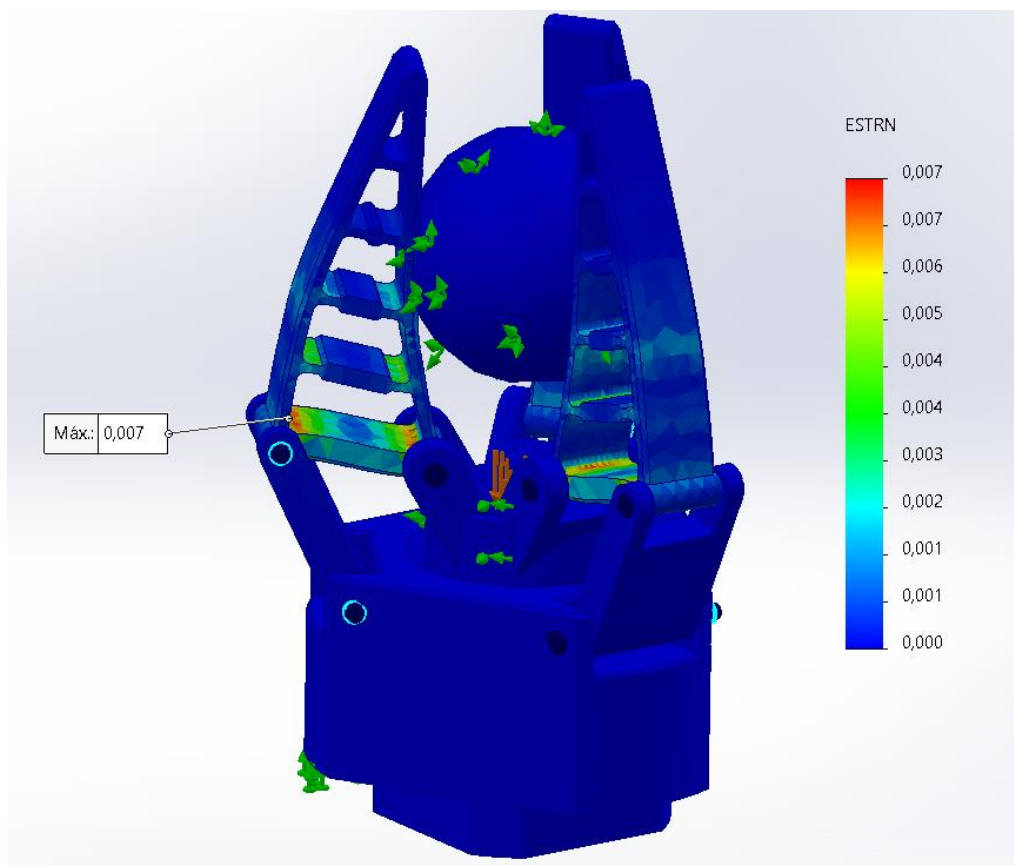
*Desplazamiento del manipulador en 4 pasos.*



La Figura 41, muestra cómo el desplazamiento aumenta conforme los dedos se mueven para acoplarse con la esfera central, es por esto que el desplazamiento máximo se encuentra en la punta de los dedos.

### Figura 42

*Deformaciones unitarias del manipulador al sujeta una esfera de 0.5[kg].*

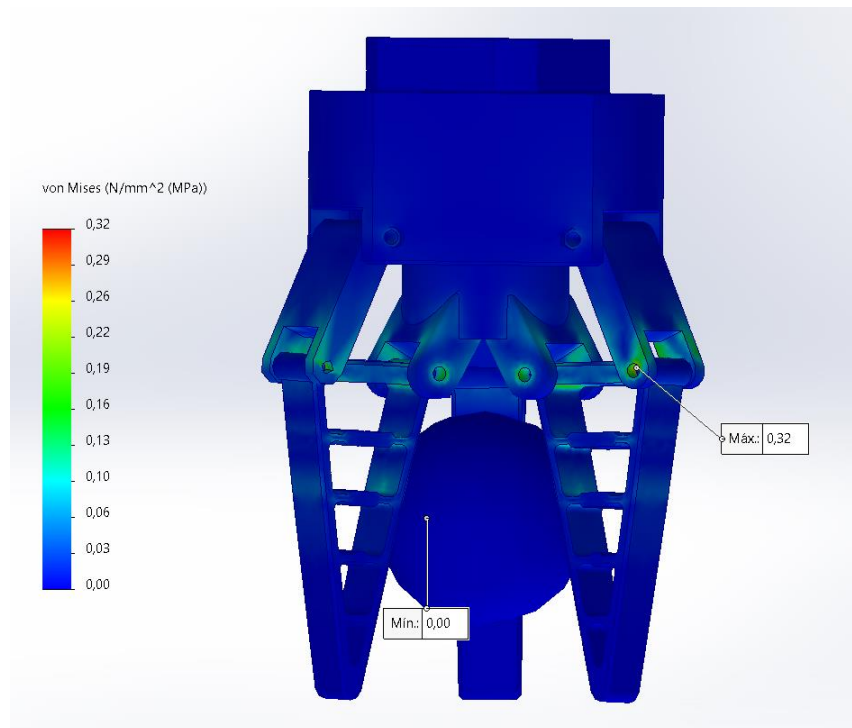


La Figura 42, muestra cómo cambian las deformaciones en la estructura del dedo al momento de sujetar un objeto, el valor máximo de deformación se encuentra en la base, las deformaciones se van reduciendo a lo largo del dedo, un detalle a tomar en cuenta es que las deformaciones se concentran las bandas transversales del dedos ya que estas son las que ayudan al dedo a acoplarse con la forma del objeto, otro detalle es que el valor máximo de deformación en este caso es del 7% si se compara con la Figura 37 que el valor de

deformación máximo es del 21%, las cargas se distribuyen en los 3 dedos reduciendo las deformaciones totales cuando el conjunto esta ensamblado.

### Figura 43

*Tensiones resultantes en el manipulador.*



El resultado de las tensiones que se muestran en la Figura 43, revelan que los esfuerzos máximos se concentran en las juntas de la corredera y los dedos, también que las tensiones resultantes son pequeñas comparadas con el límite elástico de los materiales por lo que se concluye que el diseño del manipulador funcionará correctamente para el peso a levantar planteado en el alcance del proyecto.

### Caracterización del gripper

Para caracterizar el manipulador, es necesario investigar la relación entre el desplazamiento angular del dedo con respecto al desplazamiento de la corredera como se

muestra en la Figura 44, la longitud de avance de la corredera es proporcional al número de pasos que da el motor para alcanzar la posición deseada. El número de pasos dado por el motor será usado como variable de control más adelante.

La relación entre el dedo, el eslabón exterior y la corredera se realiza mediante el análisis cinemático de posición, posterior a la identificación del mecanismo con sus respectivas consideraciones para el estudio obteniendo una curva de relación entre ambas variables.

### ***Identificación del mecanismo***

En el diseño del gripper se optó por el mecanismo de corredera balancín, en este mecanismo la entrada de movimiento lo realiza la corredera a través de la transformación del movimiento giratorio del motor a un desplazamiento lineal haciendo puntos de apoyo en los eslabones externos y el cuerpo del manipulador.

### ***Consideraciones para el estudio***

La entrada de movimiento del mecanismo se lo realiza por medio del desplazamiento lineal de la corredera ( $\Delta r_4$ ), que es la distancia lineal que esta recorre hacia sus posiciones extremas, el movimiento de la corredera se realiza mediante un motor NEMA 17 unido a un husillo y su tuerca.

Mediante el movimiento de la corredera ( $r_2$ ) variable que representa el soporte exterior del dedo, ( $r_3$ ) es la variable que representa el dedo del gripper, ambos eslabones realizan un movimiento angular.

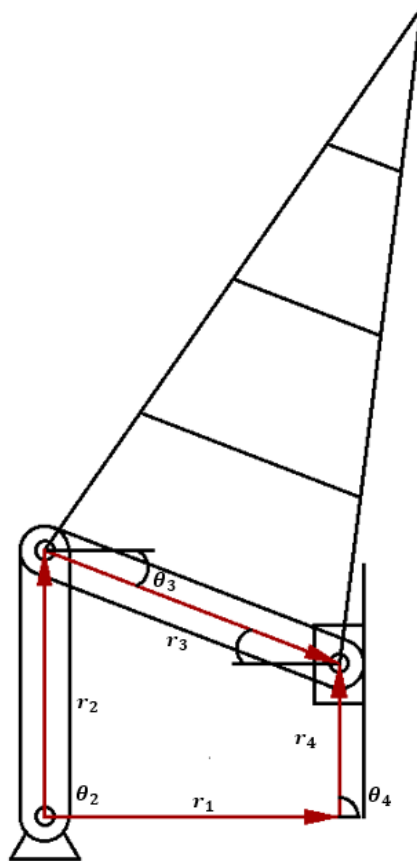
Mediante el estudio de este mecanismo podremos obtener la posición que describirá el dedo del gripper, así como la trayectoria que esta describe este estudio nos permite encontrar el máximo desplazamiento de la corredera y el ángulo máximo de apertura del manipulador.

## Análisis cinemático de posición

Como se mencionó anteriormente, el mecanismo seleccionado para el diseño del manipulador es un mecanismo de corredera balancín, el análisis del mecanismo se lo realiza a través de la ecuación vectorial de un mecanismo de 4 barras que se muestra en la siguiente figura.

**Figura 44**

*Esquema simplificado del manipulador usado para el análisis y caracterización del gripper.*



Usando algebra compleja, siguiendo el procedimiento de Raven obtenemos la siguiente ecuación.



**Ecuación 7**

$$r_1 e^{i\theta_1} + r_4 e^{i\theta_4} = r_2 e^{i\theta_2} + r_3 e^{i\theta_3}$$

De acuerdo con el mecanismo  $r_1$ ,  $r_2$  y  $r_3$  son constantes, los ángulos  $\theta_1 = 0$  y  $\theta_4 = 90$  se mantienen constantes, finalmente  $r_4$  es la variable independiente de la cual depende el movimiento del mecanismo donde  $\theta_2$  y  $\theta_3$  son las incógnitas.

Igualando la parte real y la parte imaginaria se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones no lineales.

**Ecuación 8**

$$r_1 = r_2 \cos(\theta_2) + r_3 \cos(\theta_3)$$

**Ecuación 9**

$$r_4 = r_2 \sin(\theta_2) + r_3 \sin(\theta_3)$$

Reordenamos las ecuaciones, elevamos al cuadrado y sumamos las ecuaciones para despejar  $\theta_3$

**Ecuación 10**

$$r_1^2 + r_4^2 + r_3^2 - r_2^2 = 2r_3r_4 \sin(\theta_3) + 2r_1r_3 \cos(\theta_3)$$

Usando nuevas constantes para compactar la ecuación, y también identidades trigonométricas conocidas se encuentra el valor de  $\theta_3$

**Ecuación 11**

$$\tan\left(\frac{\theta_3}{2}\right) = x$$

**Ecuación 12**

$$\sin(\theta_3) = \frac{2 \tan(\theta_3/2)}{1 + [\tan(\theta_3/2)]^2} = \frac{2x}{1 + x^2}$$

**Ecuación 13**

$$\cos(\theta_3) = \frac{1 - [\tan(\theta_3/2)]^2}{1 + [\tan(\theta_3/2)]^2} = \frac{1 - x^2}{1 + x^2}$$

Remplazando las identidades anteriores se obtiene una ecuación de segundo grado del tipo.

**Ecuación 14**

$$(k_1 + k_3)x^2 - 2k_2x + k_1 - k_3 = 0$$

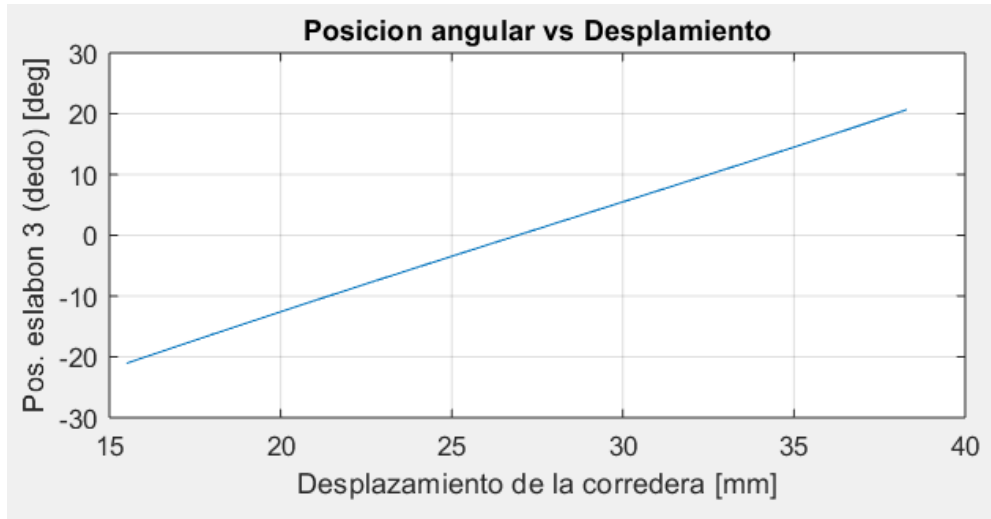
La solución para x se lo hace mediante la formula general la cual al despejar de la identidad se obtiene  $\theta_3$  que es la variación del ángulo respecto al desplazamiento de la corredera, y la que nos interesa dentro del diseño de nuestro manipulador.

**Ecuación 15**

$$\theta_3 = 2 \operatorname{atan} \left[ \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \right]$$

**Figura 45**

Gráfica de posición angular vs desplazamiento de la corredera del dedo del manipulador.



Como se puede observar en la gráfica la relación entre el desplazamiento de la corredera y la posición angular del dedo se relacionan de manera lineal, el desplazamiento del dedo es de 40° mientras que la corredera alcanza un valor máximo en su desplazamiento de 38 [mm] cuando manipulador está completamente abierto, su posición base marca un valor de 15[mm] esto es debido a la necesidad de dejar un espacio entre las uniones para evitar choques mientras funciona el mecanismo.

La posición angular del soporte exterior se relaciona con el ángulo  $\theta_2$ , representado en las siguientes ecuaciones.

**Ecuación 16**

$$\sin(\theta_2) = \frac{r_4 - r_3 \sin(\theta_3)}{r_2}$$

**Ecuación 17**

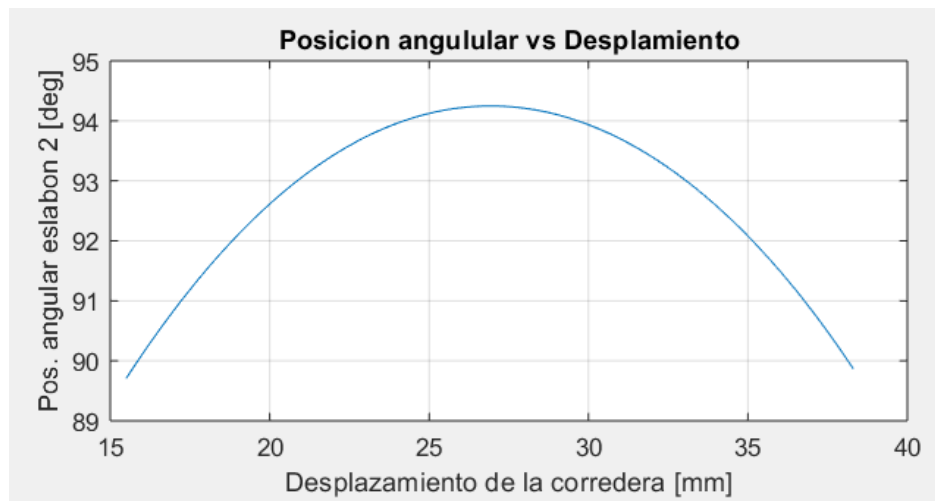
$$\cos(\theta_2) = \frac{r_1 - r_3 \cos(\theta_3)}{r_2}$$

**Ecuación 18**

$$\theta_2 = \text{atan2}\left(\frac{\sin(\theta_2)}{\cos(\theta_2)}\right)$$

**Figura 46**

Posición angular vs desplazamiento de la corredera del eslabón de soporte del dedo del manipulador



El movimiento del soporte exterior muestra una oscilación en donde el valor máximo de desplazamiento angular es de 4° desde su posición inicial.

**Diseño electrónico del manipulador**

En el proceso de control de deformación del prototipo de manipulador suave, es necesario el uso de un sensor que proporciona una señal de acuerdo con la deformación de los dedos del manipulador al momento de sujetar objetos. Como se explicó en la revisión

bibliográfica, los sensores piezorresistivos son una excelente opción al ser uno de los más usados en el desarrollo de robots suaves.

El sensor piezorresistivo seleccionado varía su resistencia de manera proporcional a la deformación aplicada. El sensor FS-L-95-20 del tipo lámina se lo coloca en la parte exterior del dedo buscando que se adapte a su forma y obtener una medida en su totalidad, las características técnicas del sensor se muestran a detalle en los anexos.

### **Microcontrolador**

El microcontrolador elegido para el desarrollo del manipulador fue la placa de Arduino UNO, debido a la gran compatibilidad con diversos módulos y sensores diseñados para esta tarjeta, siendo estos de muy bajo costo. Arduino UNO es una placa basada en el microcontrolador ATmega328P, la cual posee 14 pines digitales y 6 pines analógicos con una velocidad de reloj de 16 [MHz] y una memoria Flash de 32 [KB] facilitando el control de varias entradas y salidas.

### ***Acondicionamiento del sensor***

El sensor al proporcionar una salida resistiva es necesario realizar la conversión en una señal de voltaje o corriente. Para este caso se realiza un divisor de voltaje que consiste en una resistencia fija conectada en serie con el sensor, el divisor de tensión funciona de tal manera que al variar la resistencia del sensor también varía la salida de voltaje y a su vez pueda ser leído por el pin analógico de Arduino. La señal de voltaje proporcionada por la lectura del sensor se obtiene mediante la siguiente ecuación.

#### **Ecuación 19**

$$V_{out} = \frac{R_s}{R_1 + R_s} * V_{cc}$$

$V_{out}$ : Voltaje de salida [V].

$R_s$ : Resistencia del sensor [ $\Omega$ ].

$R_1$ : Resistencia Fija [ $\Omega$ ].

$V_{cc}$ : Voltaje de alimentación [V].

Se debe tener en cuenta que la señal adquirida por los sensores piezorresistivos poseen ruido blanco que afecta la medición cuando se procede con la identificación dinámica del actuador, lo que es necesario realizar el filtrado de la señal, como primera fase del filtrado se conecta un capacitor de  $3.3nF$  en paralelo con la salida de la resistencia fija, y posterior a ello se realiza un filtro digital programado en Arduino el cual corresponde con la siguiente ecuación.

### **Ecuación 20**

Para  $n \geq 0$ , y el valor de  $A_{n-1} = 0$

$$A_n = \alpha M + (1 - \alpha) * A_{n-1}$$

$A_n$ : Valor actual.

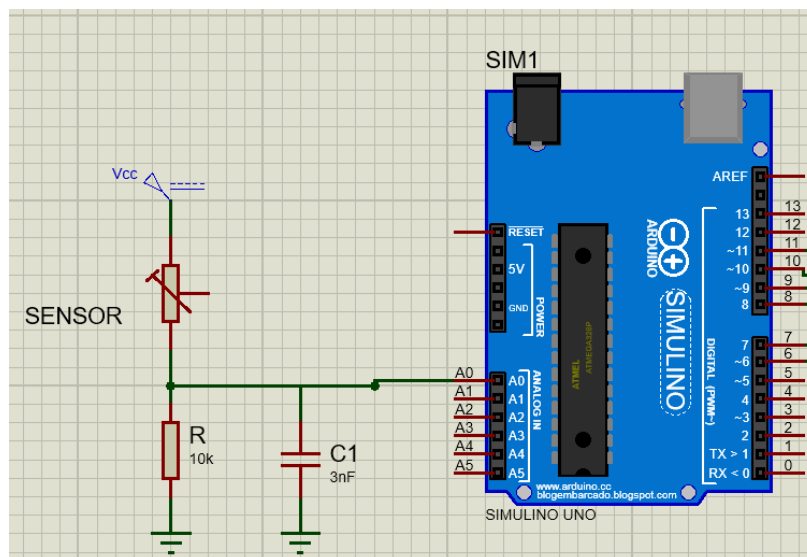
$A_{n-1}$ : Valor anterior.

$M$ : Valor medido por el sensor.

$\alpha$ : Constante de filtrado de la señal.

**Figura 47**

*Circuito de adquisición de señal del sensor.*



## Actuador

El movimiento de los dedos del gripper se lo hace a través de un motor a pasos NEMA 17. La ventaja de este actuador es la precisión en la posición, el eje del motor se conecta con un husillo y su respectiva tuerca que está sujeta a la corredera central mostrada en la (Figura 15), esto permite convertir movimiento de rotación del motor en desplazamiento lineal, abriendo y cerrando los dedos del manipulador.

La velocidad del motor se selecciona de manera constante ya que esta no es la variable que se usa en el lazo de control, la variable usada para el control es el número de pasos dados por el motor para cerrar la pinza relacionando la deformación de los dedos con los pasos dados por el motor, el control del motor se realiza a través del software de Arduino IDE. Las características del motor se resumen en la Tabla 2.

Tabla 5

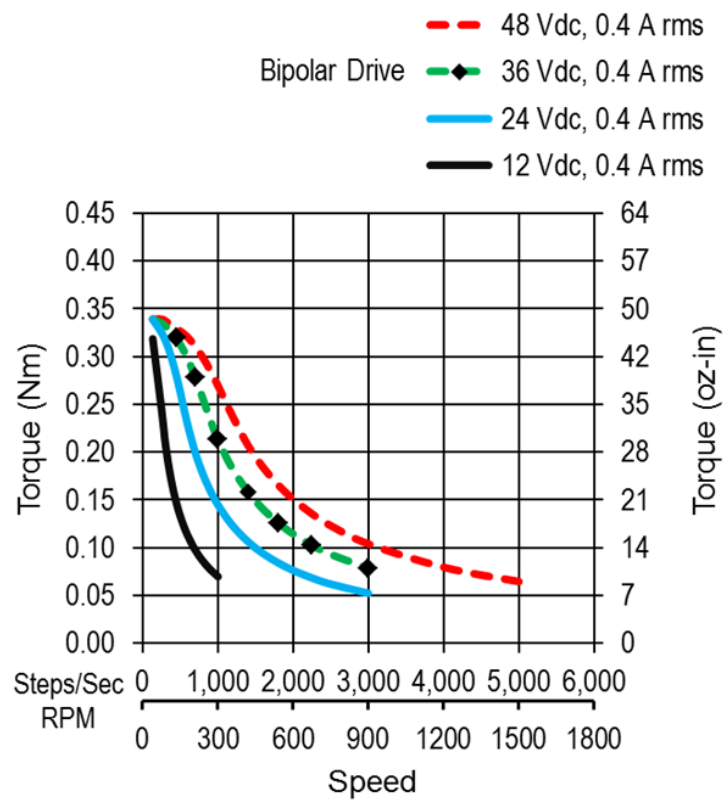
*Motor a pasos NEMA 17.*

| Tipo de conexión | Voltaje [V] | Corriente de fase [A] | Longitud del eje [mm] | Par desarrollado [Nm] |
|------------------|-------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Bipolar          | 12-24       | 0.4                   | 40                    | 0.22                  |

### Cálculo aproximado de la fuerza del manipulador

Figura 48

*Curva característica para torque del motor NEMA 17*





De acuerdo con la Tabla 2 que resume las características del motor y la Figura 48, se observa la curva cuando el motor se alimenta a 12[V] y puesto que la velocidad con la que trabaja el motor es a 60 [rpm], el torque que produce el motor a pasos es de 0.2 [Nm], por ser un mecanismo de tornillo y tuerca se pierde energía debido a la fricción por que se calcula la eficiencia del tornillo y así saber cuál es la fuerza con la que actúan los dedos del manipulador.

### Ecuación 21

$$\eta = \frac{100 \cdot \text{avance}}{2\pi T} = \frac{100 * 0.008}{2\pi(0.2)} = 0.63$$

Se calcula la carga que debe mover el motor, para el uso del manipulador se debe mover la corredera central y los dedos del manipulador.

### Ecuación 22

$$W = (m_c + m_d) \cdot g = (0.024 + 0.042) \cdot 9.81 = 0.648[N]$$

$m_c$ : masa corredera, [kg].

$m_d$ : masa de los dedos, [kg].

$g$ : aceleración de la gravedad, [m/s<sup>2</sup>].

$W$ : Carga a mover por el motor, [N].

Se calcula la fuerza aproximada producida por el manipulador al cerrar los dedos, considerando la eficiencia del mecanismo de husillo-tuerca y la carga que debe mover el motor.

### Ecuación 23

$$F = \frac{T \cdot 2000 \cdot \pi \cdot \eta}{p} - W = 395.19 [N]$$

$F$ : Fuerza capaz de realizar el manipulador al cerrar los dedos, [N].

$T$ : Torque producido por el motor a pasos, [Nm].

$\eta$ : Eficiencia del mecanismo tornillo-tuerca.

$p$ : paso del husillo, [mm].

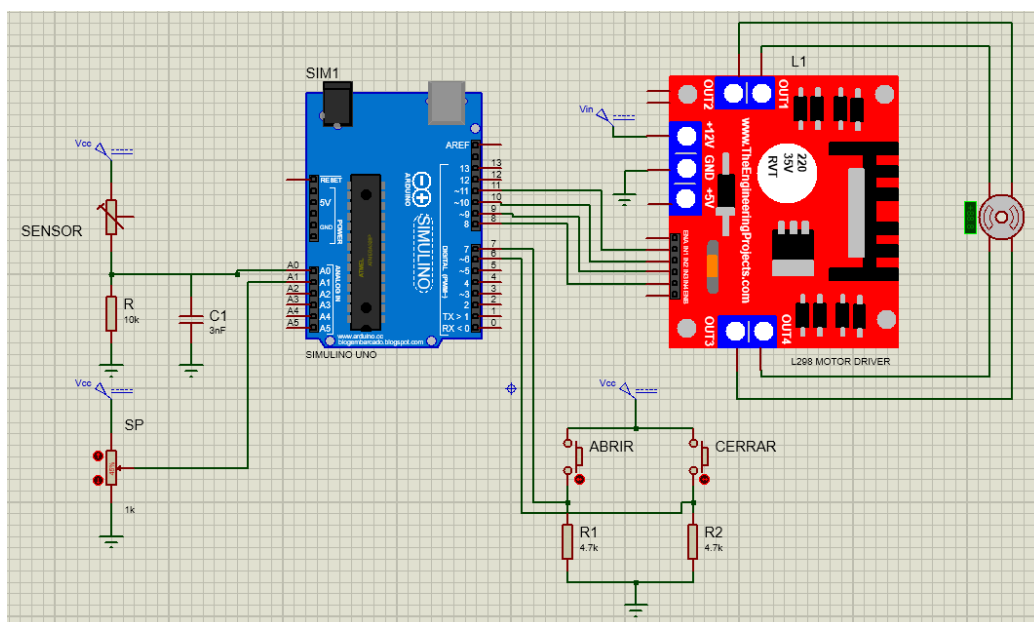
## Control del motor

El control del movimiento del motor se realiza mediante la programación en Arduino IDE, la etapa de potencia que conecta el microcontrolador de Arduino con el motor a pasos es el driver L298N, este controlador proporciona las señales de trabajo para controlar la dirección y la velocidad del motor con las respectivas librerías de control proporcionadas por el IDE de Arduino.

## Esquema de conexiones del manipulador

**Figura 49**

*Diagrama de conexiones.*



Se muestran todas las conexiones necesarias para el control del gripper, en la parte izquierda tenemos dos señales de entrada una es la que proporciona el sensor y permite saber el porcentaje de deformación del dedo cuando sujeta los objetos, la otra señal de entrada es el SetPoint que sirve para encontrar el error en el lazo de control, en la parte derecha se encuentra la conexión al controlador del motor y 2 pulsadores que permiten abrir y cerrar los dedos del gripper de manera independiente.

## **Sistema de control**

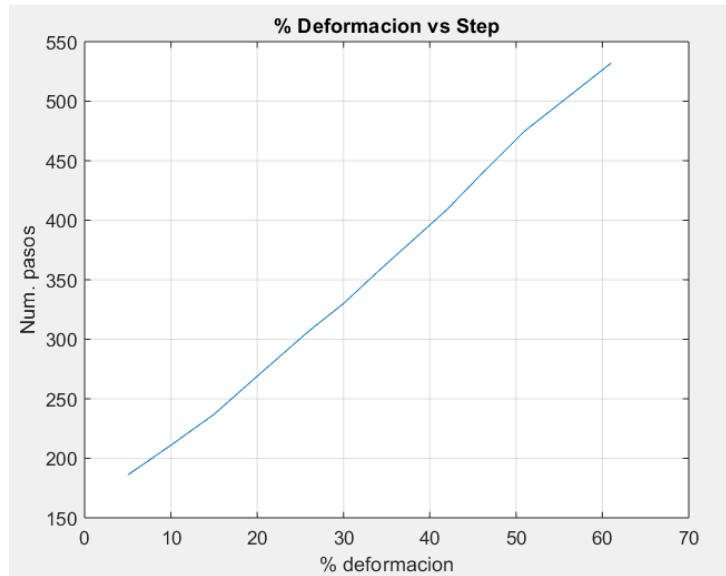
### ***Identificación del sistema***

Para la identificación del sistema que deseamos controlar, en este caso del manipulador suave, primero identificamos las variables de entrada y salida del gripper, la señal de entrada al motor a pasos usado como actuador del gripper es la que se manipula para diseñar el controlador, la variable de salida que va a ser sensada y retroalimentada es la deformación ocasionada por los dedos del manipulador al momento de sujetar objetos.

Primero obtenemos la recta que relaciona el número de pasos y la deformación del dedo del gripper cuando se cierra al momento de sujetar un objeto, con estos datos obtenidos se observa que se relacionan de manera lineal, y esto dentro de la programación, permite programar un algoritmo en el que motor gire hasta llegar al número de pasos definido.

**Figura 50**

*Curva de calibración del número de pasos del motor frente a la deformación del dedo.*



De los datos resultantes de la medición se obtiene la ecuación de la recta que relaciona ambas variables.

**Ecuación 24**

$$y = 6.32x + 145.67$$

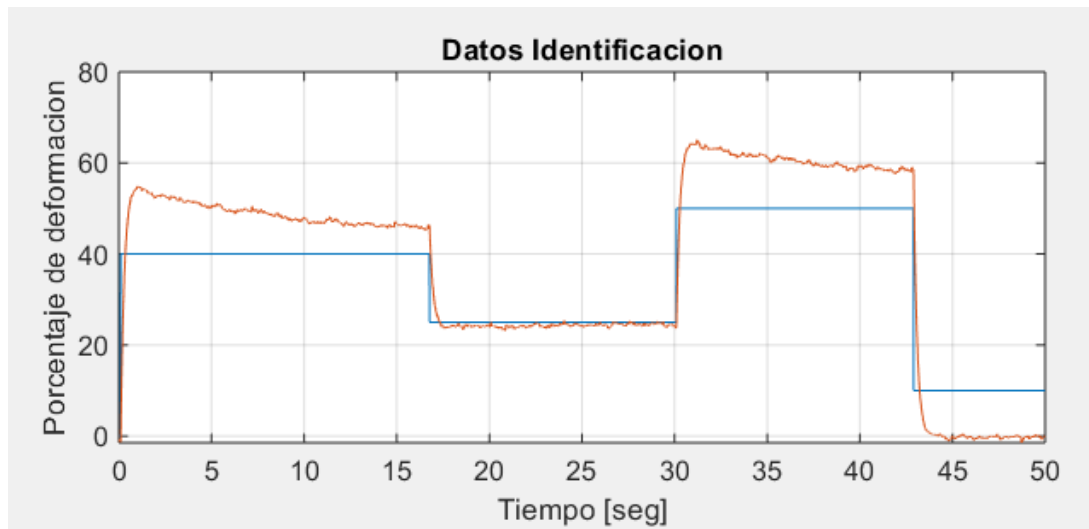
$y$ : Num. pasos.

$x$ : % de deformación.

Una vez obtenida la relación entre el número de pasos y el porcentaje de deformación, se realiza la adquisición de datos de la curva de reacción del motor a una entrada escalón.

**Figura 51**

*Datos de identificación del sistema.*



Del proceso de identificación se observa que el sistema se comporta como un sistema subamortiguado ya que esta presenta un sobreimpulso antes de estabilizarse, por lo que se puede decir que la función de transferencia del sistema tendrá 2 polos, también se observa que sobrepasa la referencia de la entrada escalón es decir que el sistema tiene una ganancia mayor a uno.

Realizamos un recorte de los datos tomados para la identificación del sistema en la aplicación de SystemIdentification de Matlab, dentro de los parámetros de ajuste para la identificación del sistema colocamos que el periodo de muestreo es de  $T = 0.01 s$ , procedemos colocando que estime el modelo en principio con 2 polos y ningún cero, y también se realizó la aproximación como un sistema de primer orden, ambas aproximaciones dan como resultado un ajuste de la curva de alrededor del 73% por lo que es preferible trabajar con el sistema de primer orden para reducir el coste computacional al momento de la programación.

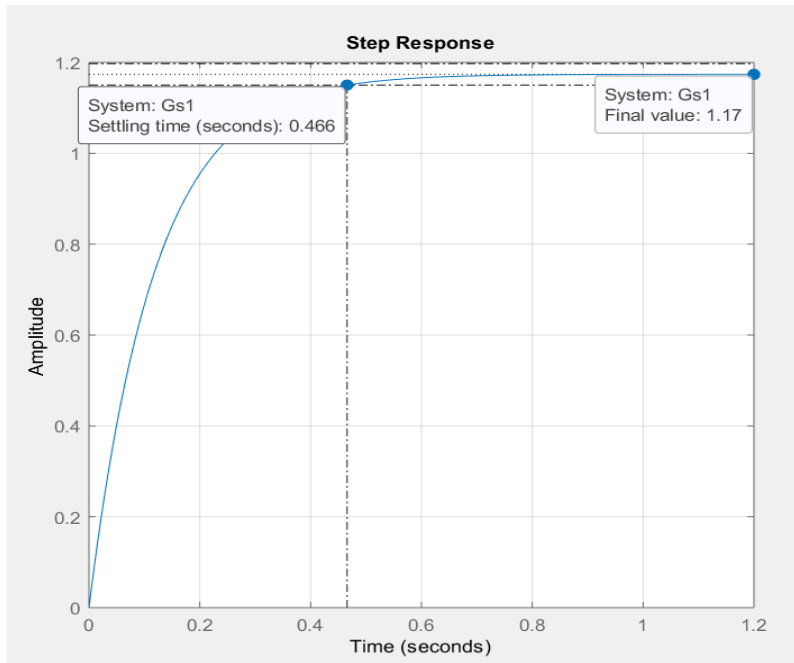
Del resultado de la identificación del sistema obtenemos la siguiente función de transferencia y su respuesta al escalón.

**Ecuación 25**

$$G(s) = \frac{9.857}{s + 8.398}$$

**Figura 52**

*Respuesta escalón del sistema identificado (Gripper).*



Como se puede observar el tiempo de estabilización del sistema es de 0.46 s, no es malo, pero se va a mejorar con la sintonización del controlador, además vemos que la ganancia es mayor a uno por lo que necesita de un controlador, para este caso se va a sintonizar un controlador PID y el primer paso es digitalizar la función de transferencia de la planta, se lo hace mediante la transformada Z y la fórmula de retenedor de orden cero.

**Ecuación 26**

$$G(z) = (1 - z^{-1}) Z \left[ \frac{G(s)}{s} \right]$$

**Ecuación 27**

$$G(z) = (1 - z^{-1}) Z \left[ \frac{9.857}{s(s + 8.398)} \right]$$

Separando en fracciones parciales la función de transferencia y obteniendo la transformada Z a la función de transferencia se obtiene la función de transferencia discretizada para sintonizar el controlador.

**Ecuación 28**

$$G(z) = \frac{0.0943}{z - 0.9194}$$

***Sintonización del controlador***

Para sintonizar el controlador usaremos el criterio de última ganancia, se extrae el polinomio característico de la función de transferencia y realizamos el análisis de estabilidad de Jury para encontrar la ganancia crítica del sistema, el polinomio característico de sistema es el siguiente:

**Ecuación 29**

$$p(z) = z - 0.9194 + 0.0943K_{cr}$$

Los tres criterios del análisis de estabilidad de Jury son los siguientes:

**Ecuación 30**

$$1: \quad p(1) > 0$$

$$2: \quad (-1)p(-1) > 0$$

$$3: \quad p(1) < 1$$

Del análisis de estabilidad de Jury se obtiene que la ganancia crítica del sistema se encuentra entre los siguientes valores:

**Ecuación 31**

$$-0.854 < K_{cr} < 20.35$$

El valor máximo de la ganancia crítica del sistema se usa para obtener la respuesta en lazo cerrado, se producen oscilaciones constantes en el transcurso del tiempo, el periodo de esas oscilaciones es el usado para calcular las constantes necesarias para sintonizar el controlador. La ecuación necesaria para calcular el periodo de las oscilaciones es la siguiente:

**Ecuación 32**

$$T_u = \frac{2\pi T_s}{\alpha} = \frac{2\pi T_s}{0.9194} = 0.06 \text{ s}$$

$T_u$ : periodo de oscilaciones crítico. [s]

$T_s$ : tiempo de muestreo. [s]

$\alpha$ : cero de la función de transferencia. [rad]

Con estos valores de la ganancia crítica y el periodo de oscilaciones recurrimos a la tabla de sintonización de Ziegler-Nichols para encontrar los valores de las constantes proporcional, integral y derivativa del controlador.



**Tabla 6**

*Constantes de sintonización. Método Ziegler-Nichols.*

|               | <b><math>K_p</math></b> | <b><math>T_i</math></b> | <b><math>T_d</math></b> | <b><math>K_i</math></b> | <b><math>K_d</math></b> |
|---------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| <b>P</b>      | $0.5K_{cr}$             | –                       | –                       | –                       | –                       |
| <b>PI</b>     | $0.45K_{cr}$            | $0.8T_u$                | –                       | $0.5K_{cr}/T_u$         | –                       |
| <b>PD</b>     | $0.8K_{cr}$             | –                       | $0.125T_u$              | –                       | $0.1K_{cr}T_u$          |
| <b>PID</b>    | $0.6K_{cr}$             | $0.5T_u$                | $0.125T_u$              | $1.2K_{cr}/T_u$         | $0.075K_{cr}T_u$        |
| <b>P.I.R.</b> | $0.7K_{cr}$             | $0.4T_u$                | $0.15T_u$               | $1.75K_{cr}/T_u$        | $0.105K_{cr}T_u$        |
| <b>S. OS.</b> | $0.33K_{cr}$            | $0.5T_u$                | $0.33T_u$               | $0.66K_{cr}/T_u$        | $0.11K_{cr}T_u$         |
| <b>N. OS.</b> | $0.2K_{cr}$             | $0.5T_u$                | $0.33T_u$               | $0.4K_{cr}/T_u$         | $0.066K_{cr}T_u$        |

Se elige las constantes en la que el controlador tienen el menor sobreimpulso en su respuesta dando como resultado los valores de  $K_p, K_i, K_d$ , son los siguientes:

$$K_p = 0.2K_{cr} = 4.074$$

$$K_i = 0.4K_{cr}/T_u = 135.6$$

$$K_d = 0.066K_{cr}T_u = 0.08$$

El PID posee una función de transferencia propia la cual relaciona la señal de error con la señal que sale del controlador hacia la planta, de la ecuación que representa la función de transferencia se procede con la digitalización para obtener la ecuación a diferencias que será programada en el microcontrolador. A continuación, se muestra la función de transferencia del controlador y su digitalización.

**Ecuación 33**

$$C_v(s) = \left( K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \right) E(s)$$

$C_v(s)$ : Señal de control

$E(s)$ : Señal de error entre la referencia y la salida

$K_p$ : Constante proporcional del sistema.

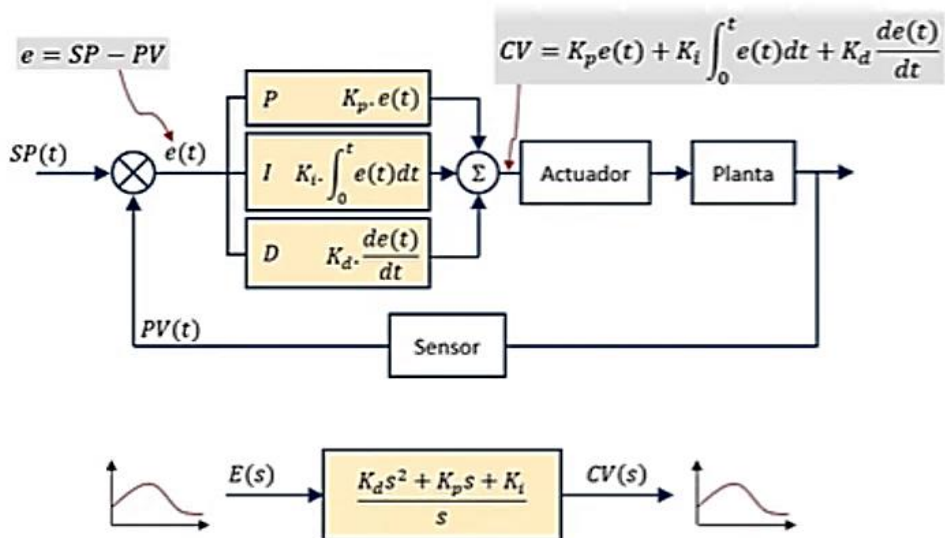
$K_i$ : Constante integral del sistema

$K_d$ : Constante derivativa del sistema

La ecuación anterior corresponde con el siguiente diagrama de bloques.

**Figura 53**

Diagrama de bloques del controlador PID.



Para la digitalización del controlador y pasar del dominio en tiempo continuo al dominio discreto se usa herramientas de aproximación como Euler “adelanto” para la constante integrativa, y Euler “retraso” para la constante derivativas para obtener la equivalencia entre la transformada de Laplace “s” y la transformada Z “z”.

#### Ecuación 34

$$C_v(z) = \left[ Kp + Ki \left( \frac{T_s}{z-1} \right) + \frac{Kd}{T_s} \left( \frac{z-1}{z} \right) \right] E(z)$$

$T_s$ : Tiempo de muestreo.

Operando la ecuación anterior y usando la transformada Z inversa se obtiene la ecuación a diferencias que será programada en Arduino.

#### Figura 54

$$c_v(n) = c_v(n-1) + Kp[e(n) - e(n-1)] - KiT_s e(n-1) + \frac{Kd}{T_s} [e(n) - 2e(n-1) + e(n-2)]$$

Para  $n \geq 0$ , y el valor de  $n = 0$

$c_v(n)$ : Valor actual del controlador.

$C_v(n-1)$ : Valor anterior del controlador.

$e(n)$ : Error actual.

$e(n-1)$ : Error anterior.

$e(n-2)$ : Error anterior-anterior.

## CAPITULO IV

### Presentación y discusión de resultados

#### Resultados construcción del sistema mecánico

##### *Fabricación del dedo basado en efecto Fin-Ray*

Para que el dedo fabricado cumpla con el efecto Fin-Ray en la etapa de pre maquinado se deben configurar varios parámetros tanto en la impresora como en la pieza que se desea imprimir en 3D, se debe convertir a formato STL la pieza realizada en el software de diseño 3D SolidWorks, se hace esto con el objetivo de obtener una pieza sólida y que se unifiquen todas las operaciones que se realizaron previamente para obtener el resultado final del diseño de la parte. Una vez que se obtiene el archivo en el formato especificado, se procede a insertar este archivo en el software de pre maquinado, en donde se deben manipular varios parámetros para la fabricación que se relacionan con las variables que intervienen directamente en la calidad, dureza y estructura de la pieza. Después de ajustar bien los parámetros, basándose en impresiones previas y las recomendaciones que el fabricante del material especifica, se pudo obtener un buen resultado tomando en cuenta la rigidez, elasticidad y adaptabilidad que posee la pieza fabricada.

#### **Tabla 7**

*Propiedades físicas del material usado en la fabricación del dedo proporcionadas por el fabricante.*

| <b>Material</b> | <b>Densidad</b>        | <b>Diámetro de filamento</b> | <b>Peso del filamento</b> |
|-----------------|------------------------|------------------------------|---------------------------|
| TPU – 95A       | 1.16 g/cm <sup>3</sup> | 1.75 mm                      | 1 kg                      |

La Tabla 3 descrita anteriormente resume los parámetros de impresión que se configuran en el software Ultimaker Cura para obtener un resultado conforme a las especificaciones de diseño y a la selección del material para la pieza. En este caso, se imprimió el dedo blando con un material del tipo de poliuretano termoplástico (TPU) en una impresora Creality CR-10. En la etapa de pre maquinado se deben especificar algunos de los parámetros más relevantes para obtener un resultado adecuado, se usa una boquilla de 4 mm de diámetro y según este se puede especificar la calidad que se desea obtener en la pieza impresa, se eligió una calidad de 0,16 mm, valor que es menor comparado con el diámetro de la boquilla, lo que significa que se deposita menos material por cada capa impresa, esto mejora la calidad de la pieza en cuanto a precisión, resistencia y el efecto visual.

### ***Estructura de capas en la impresión***

Para las paredes de la pieza, se eligieron 2 paredes de 0,8 mm cada una lo que permite que ingrese mayor relleno entre cada espacio vacío entre paredes facilitando la adherencia entre las paredes y así obtener una pieza más sólida. Para las capas superiores e inferiores, se eligieron 5 para ambas, esto ayuda a que las tapas superior e inferior de la pieza sean más rígidas lo que permite compactar mejor el relleno de la pieza. Con respecto al relleno de la pieza, se estableció un 25% de relleno debido a que es un material elástico y no puede ser completamente sólido en su interior para cumplir con su flexibilidad y adaptabilidad. Antes de iniciar con la primera capa de impresión, se recomienda realizar una base sobre la cual será impresa la pieza diseñada, en el programa utilizado se puede elegir una base tipo balsa de 5 capas de 0,16 mm de espesor cada una misma que facilitará la adherencia de la pieza.

### ***Temperatura de impresión***

El material que se usó para la impresión de esta pieza es una clase de poliuretano termoplástico (TPU 95-A) el mismo que, según el fabricante, tiene buen rendimiento a una

temperatura de 235 °C; la impresora 3D debería ser configurada para que el extrusor se caliente hasta la temperatura antes mencionada cumpliéndose así una de las principales variables que se deben manejar en este tipo de métodos de manufactura aditiva. Para obtener una buena adición de la base de la pieza con la mesa de trabajo se sugiere adecuar la temperatura de la placa de impresión en 60 °C.

### ***Velocidad de impresión***

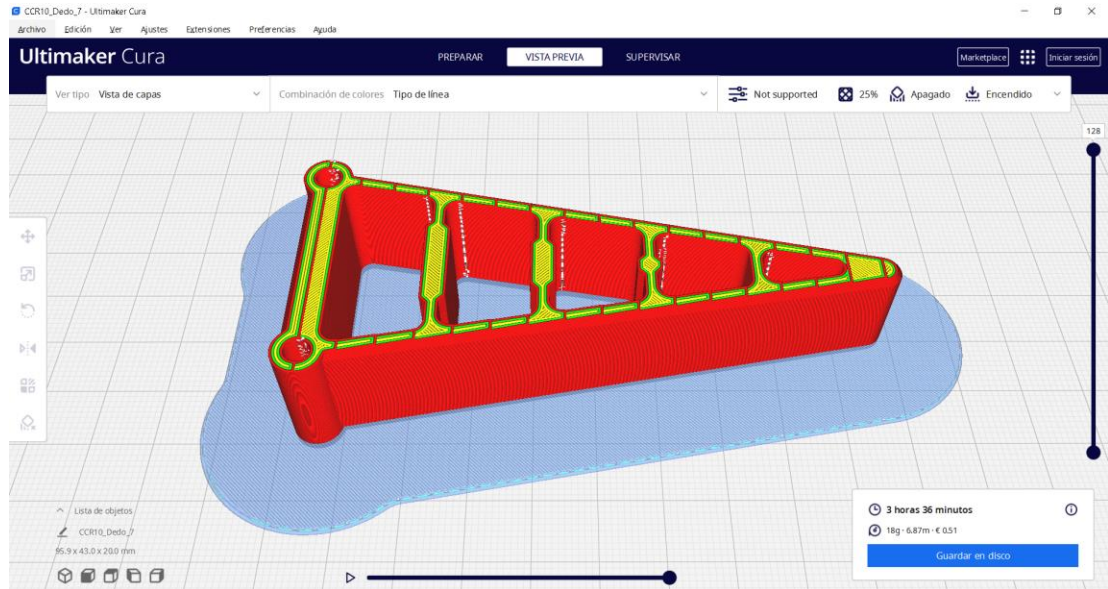
Para iniciar el movimiento del extrusor sobre la mesa de impresión se establece una velocidad de 20 mm/s, esto permite que la base de la pieza se adhiera bien a la mesa conforme se vaya depositando el material. Una vez que se haya ejecutado la primera instrucción de coordenadas para que la primera capa se realice, se aumenta la velocidad de movimiento a 50 mm/s para continuar con el resto de las trayectorias hasta finalmente obtener la pieza diseñada. Esta velocidad está dentro del rango recomendado si se desea cumplir con las especificaciones necesarias en cada una de las variables que se deben controlar si se desea cumplir con la calidad que debe tener el dedo blando para satisfacer los requerimientos necesarios que se necesitan cumplir para que el efecto Fin-Ray® se manifieste al momento que se esté sujetando un objeto.

### ***Vista previa de la simulación impresa en 3D***

En la Figura 54 mostrada a continuación, se puede observar el momento en que se han completado todas las capas de impresión preestablecido de la pieza, las líneas exteriores de color verde denotan las paredes de la pieza, estas se deben especificar previamente a la impresión, en este caso se ajustaron 2 paredes de 0,8 mm de espesor cada una para que el resto que queda por fabricar de la pieza sea de un relleno específico, tanto en su forma como en su distribución para que se cumplan con los parámetros que requiere el filamento de TPU y así la pieza adopte una buena elasticidad al momento de ser sometida a una fuerza externa.

**Figura 55**

*Vista previa de la pieza antes de la impresión.*

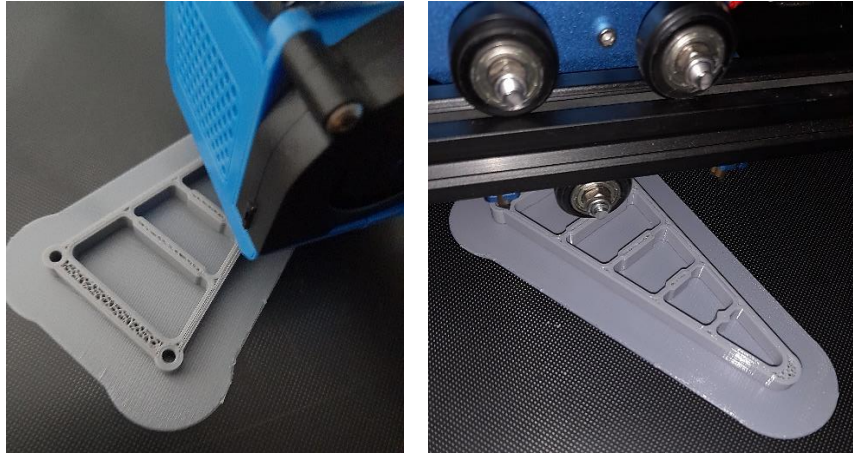


### ***Impresión del dedo del manipulador***

Después de configurar cada parámetro que se debe establecer en la parte del pre maquinado de la pieza, se procede a convertir el diseño gráfico de la pieza a código máquina (código G) mediante el software de simulación, esto quiere decir que se obtendrán magnitudes de desplazamiento en cada dirección de movimiento de los 3 ejes coordenados. Conforme se mueven los motores a pasos y se convierte el movimiento rotación en traslacional en los ejes x, y, z el material poco a poco ingresa en el extrusor para ser depositado según previa configuración del motor que traslada el filamento TPU.

**Figura 56**

*Impresión del dedo en filamento flexible (TPU)*



### ***Eslabón externo del manipulador***

Según el diseño preestablecido para esta pieza se ha propuesto utilizar un polímero que cumple con los requerimientos de diseño para satisfacer las funciones que se deben realizar con el gripper suave. El filamento PLA es un material comúnmente usado en la manufactura aditiva por lo que es de fácil adquisición.



**Figura 57**

*Piezas impresas en 3D con filamento PLA. Eslabones de conexión a cada uno de los dedos blandos.*

***Corredera central del manipulador***

Después de un análisis por elementos finitos en el diseño de esta pieza se pudo notar que hay secciones que podrían ser críticas conforma la fuerza de apriete aumente por lo que se rediseño la pieza varias veces de acuerdo con las pruebas de agarre que se hicieron para esta pieza, es una parte importante del mecanismo debido a que es la que sostiene la base de los dedos blandos y es la pieza que está conectada directamente al husillo que se traslada sobre el tornillo sin fin. Por ende, la calidad y el relleno son dos variables que se deben tomar a consideración en la parte del pre maquinado de la pieza. Las propiedades del material y los parámetros de impresión usados en las demás piezas del gripper se resumen en las Tablas 8 y 9.

**Figura 58**

*Impresión de la corredera del manipulador.*

**Tabla 8**

*Propiedades físicas del material usado en la fabricación del gripper proporcionadas por el fabricante.*

| <b>Material</b> | <b>Densidad</b>        | <b>Diámetro de filamento</b> | <b>Peso del filamento</b> |
|-----------------|------------------------|------------------------------|---------------------------|
| PLA             | 1.16 g/cm <sup>3</sup> | 1.75 mm                      | 1 kg                      |

**Tabla 9**

*Especificación de los parámetros del pre maquinado en la impresora 3D para el PLA.*

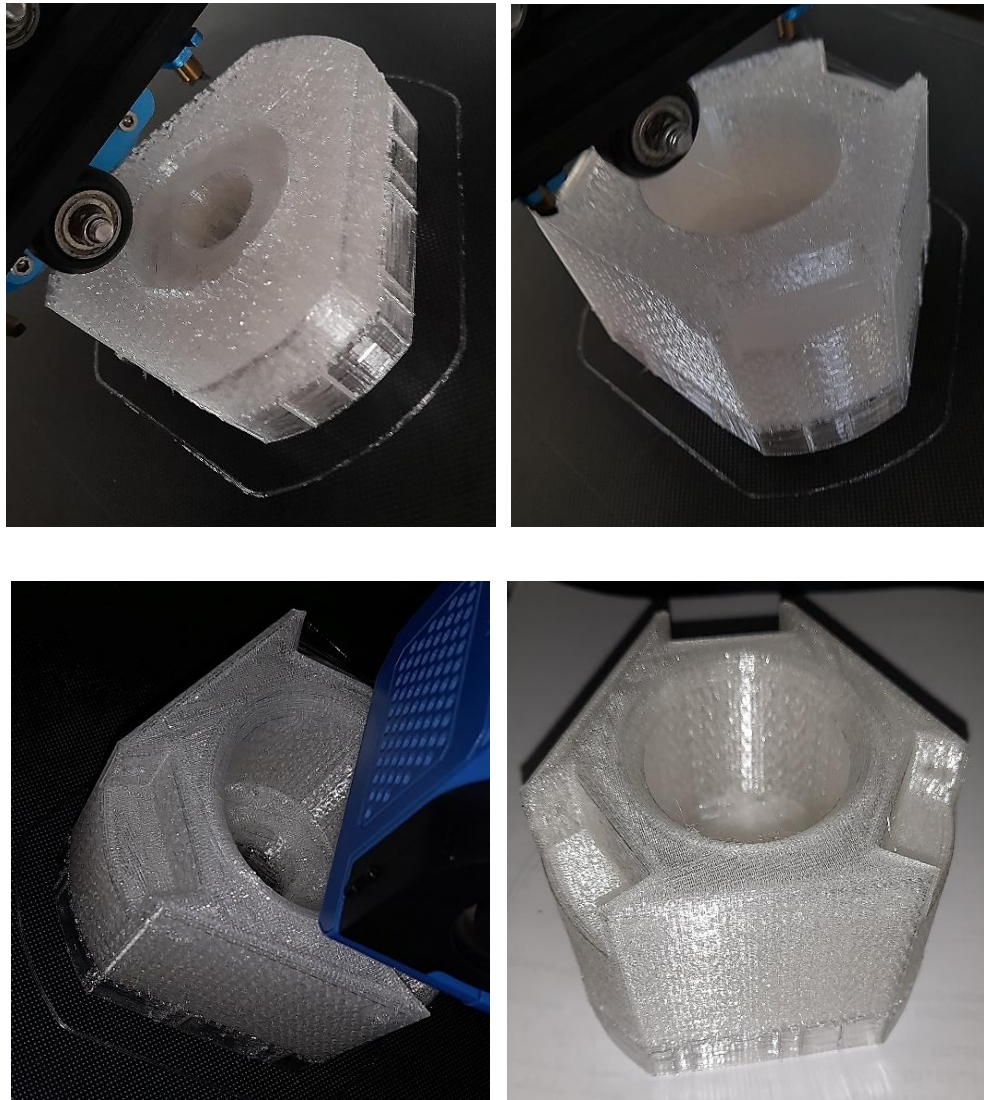
| <b>Altura de capa</b> | <b>Densidad de relleno</b> | <b>T. impresión</b> | <b>Velocidad de impresión</b> | <b>Número de capas</b> |
|-----------------------|----------------------------|---------------------|-------------------------------|------------------------|
| 0.16 mm               | 40%                        | 230 °C              | 50 mm/s                       | 5                      |

### ***Base Fija del manipulador***

Esta pieza es la base del gripper, conecta el eslabón principal con la corredera central por lo que debe ser resistente al desgaste y con una estructura de relleno más rígida para que pueda cumplir con los requerimientos de funcionamiento de la pinza suave. El polímero que se utilizó para la fabricación de esta pieza fue un filamento de PLA, el mismo que cumple con los parámetros de resistencia y dureza para la elaboración de la pieza.

**Figura 59**

*Modelo real de la pieza que soporta los dedos del manipulador.*



### ***Brida del manipulador***

Para la fabricación de este elemento se sugiere un material con mayor rigidez del que ofrece el filamento PLA usado en la impresión 3D por lo que se insista el uso de un polímero con mejores especificaciones en cuanto a resistencia y dureza, todo esto debido a que este elemento estará en contacto directo con el efector final del brazo robótico y será la pieza que

sostenga toda la pinza blanda fabricada. Para la construcción del prototipo, se usó el filamento PLA. En la parte del pre maquinado de la pieza, se ajustaron varios parámetros a tal punto que se obtenga una pieza con la mejor calidad posible para que sea más compacta, rígida y resistente. Como se puede observar en la siguiente figura, se observa el elemento brida con un acabado superficial adecuado y se nota que posee mayor relleno comparado con las piezas mencionadas anteriormente.

### **Figura 60**

*Modelo real de la brida de acople entre el brazo robótico y el gripper.*

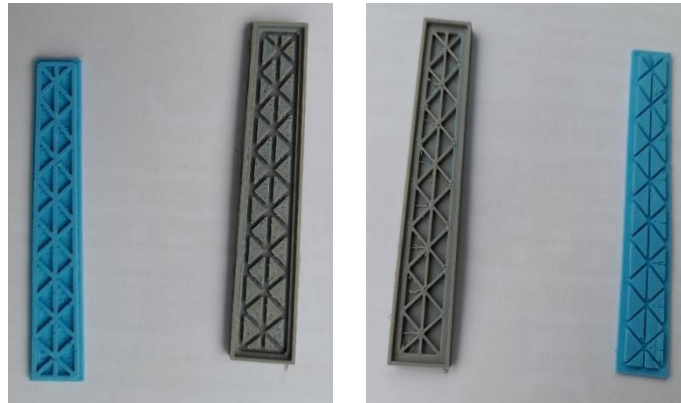


### ***Almohadillas de los dedos***

En el momento que la pinza suave se cierra y entra en contacto con el objeto que se desea agarrar, se presenta fricción entre los dedos suaves y el objeto por lo que se debe tener en cuenta que el agarre debe ser firme para evitar que el objeto se deslice y pueda caerse. Es ahí en donde esta parte juega un papel importante para facilitar a la pinza el sostener cualquier objeto. Esta pieza fue fabricada mediante un molde impreso en 3D en TPU en el cual se vertió un líquido de silicona blanda.

**Figura 61**

*Modelo real de dos tipos de almohadillas para mejorar el agarre del manipulador.*



### Ensamblaje del manipulador suave

**Figura 62**

*Modelo ensamblado del prototipo de gripper suave.*



## Resultados construcción sistema electrónico

Para la medir la deformación producida por los dedos se adquirió un sensor piezorresistivo comercial (Figura 62) del tipo FS (Flex Sensor), el cual tiene un comportamiento lineal, la ventaja de este sensor es la capacidad de deformarse sin perder sus propiedades físicas, el sensor adquirido tiene una resistencia inicial (sin deformación) de  $26.5 [k\Omega]$ , con una tolerancia de  $1 [k\Omega]$ , se realiza el montaje del circuito como se planteó en el diagrama de conexiones de la Figura 47.

### Figura 63

*Sensor piezorresistivo comercial.*



El montaje del sensor sobre el dedo del manipulador se muestra en la Figura 63, se lo hace en la parte exterior al dedo ya que el cambio de resistencia debido a la deformación que sufre el sensor lo hace cuando este se tracciona por ello se decidió colocarlo de esa manera.

**Figura 64**

*Montaje del sensor sobre el manipulador.*

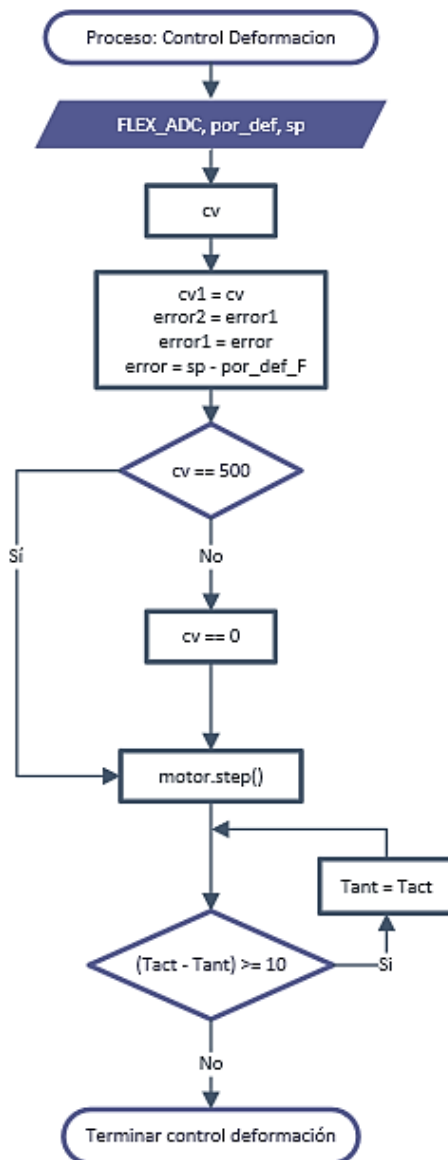
**Resultados del sistema de control**

El controlador ya sintonizado en el capítulo III, se programa en el IDE de Arduino de acuerdo con la lógica de programación la cual se presenta en el diagrama de flujo de la Figura 64, el diagrama de flujo detalla el algoritmo que sigue el controlador para alcanzar la referencia indicada.



**Figura 65**

*Diagrama de flujo para el control de deformación del manipulador.*

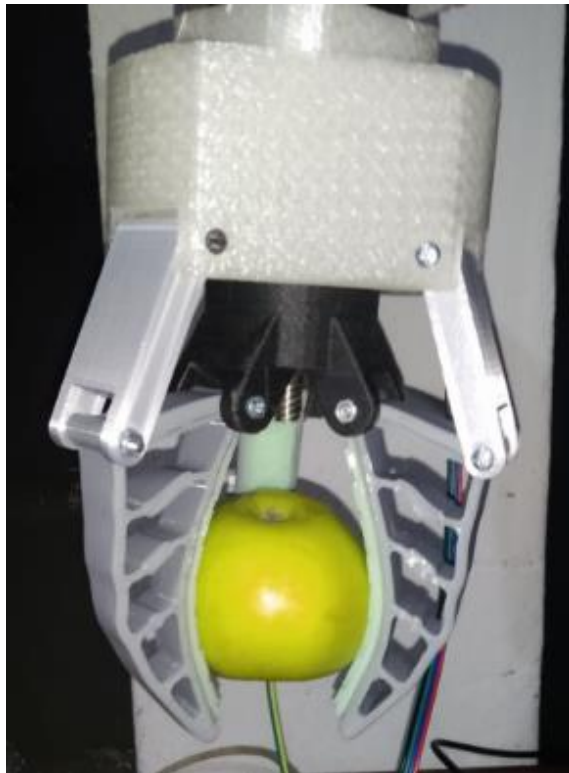


Al momento de realizar las pruebas del controlador sintonizado se notó que no se obtuvo la respuesta esperada debido a que oscilaba demasiado antes de llegar al SetPoint, debido a este problema presentado se realiza un ajuste en las constantes encontradas, la constante principal que se va a variar es la integral ya que esta presenta un valor elevado así

que se procede a reducir el valor en un factor de una cuarta parte de su valor inicial, al realizar las pruebas correspondientes con este nuevo valor de la constante integral se observa que el sistema actúa de manera correcta siguiendo la referencia de manera adecuada como se presentaran los resultados a continuación.

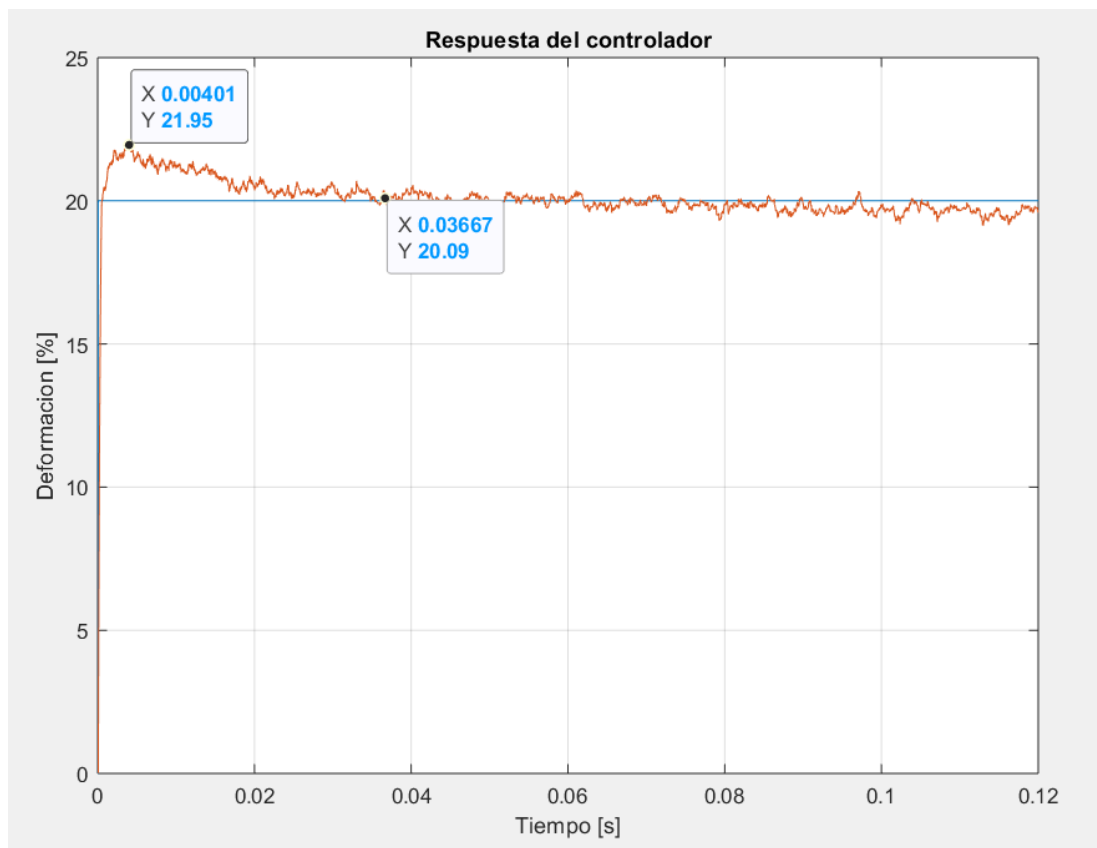
**Figura 66**

*Prueba de agarre del manipulador.*



**Figura 67**

*Respuesta del controlador a una entrada de deformación del 20%.*



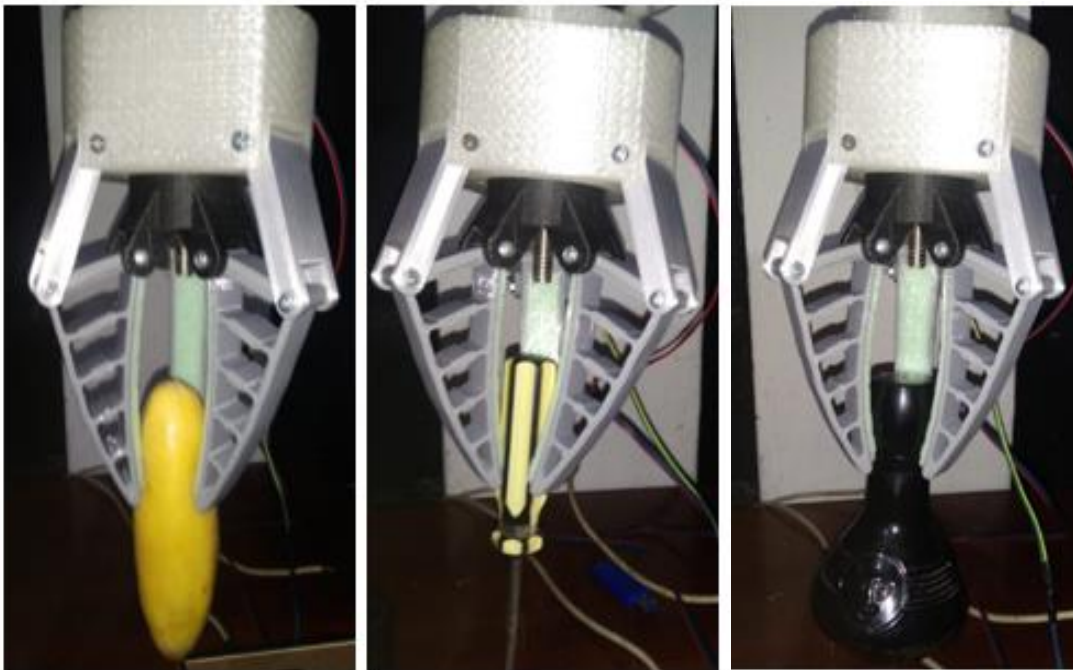
Como se observa en la figura 66 se obtiene una buena respuesta del controlador, el tiempo de establecimiento está alrededor de 0.036 segundos mejorando la respuesta que se tenía en lazo abierto, la respuesta presenta un valor máximo de 21.95% de deformación, sabiendo que el SetPoint es del 20% de la deformación total del manipulador esto equivale a que el controlador presenta un sobreimpulso del 9.75%, el sobreimpulso de la respuesta depende de la respuesta del sensor ya que en la simulación y sintonización del controlador con las constantes adecuadas, la respuesta no presenta sobreimpulso, finalmente se concluye que el sobreimpulso en la respuesta no afecta el desempeño del manipulador ya que el tiempo del sobrepico no es prolongado alcanzando la referencia rápidamente.

### Pruebas de agarre de pellizco.

Existen algunos objetos que tiene forma alargada y delgada, por lo que no es posible realizar un agarre envolvente, debido a ello se presentan a continuación resultados del agarre de pellizco demostrando la efectividad de este agarre que nos proporciona el manipulador para este tipo de objetos.

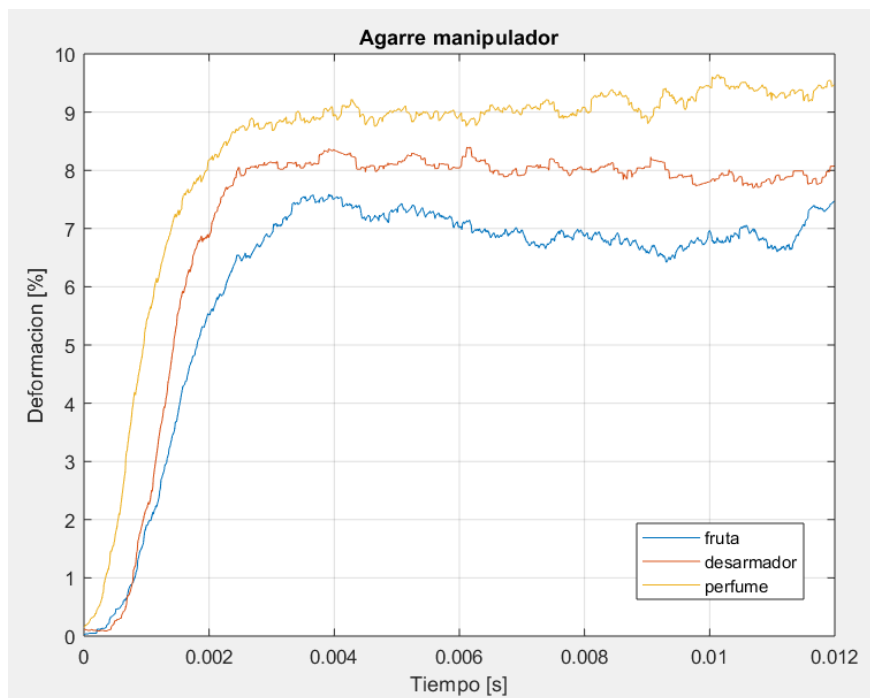
**Figura 68**

*Agarre de pellizco.*



**Figura 69**

*Pruebas de agarre de pellizco del manipulador.*



A partir de las gráficas obtenidas como resultados de las pruebas, los objetos como la fruta se benefician de la adaptación a la forma del objeto por parte del dedo Fin Ray, lo que demuestra la capacidad de deformación del manipulador al momento de sujetar objetos que poseen formas variadas.

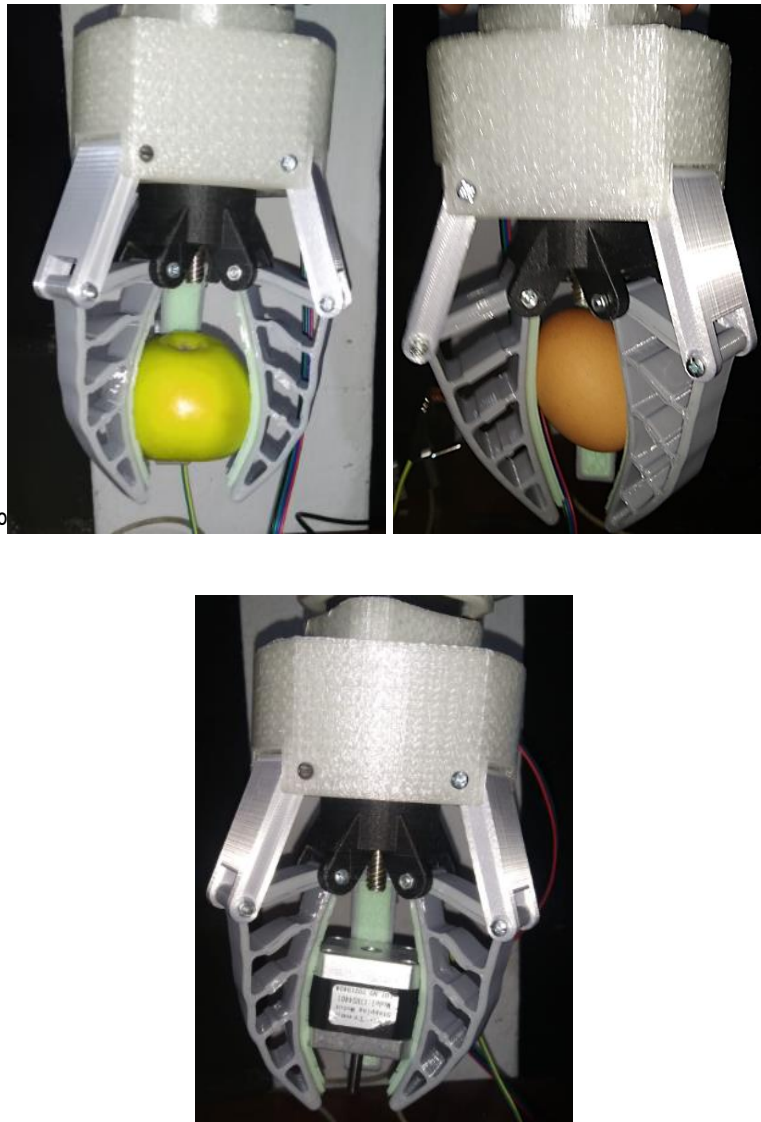
Las pruebas también demostraron claramente que una vez que el objeto es sujetado correctamente, el cambio en la deformación del dedo tiende a estabilizarse en un valor específico, incluso si el motor es accionado el manipulador no variaba la deformación de los dedos. El valor máximo alcanzado de deformación por el manipulador al agarrar un objeto depende estrictamente de la forma del objeto por lo que no es un valor estándar para todos los objetos que se pueda agarrar, por lo tanto, encontrar un valor de deformación para cada objeto ayuda a establecer el SetPoint en el lazo de control y con ello automatizar el agarre de objetos del manipulador.

## Pruebas de agarre envolvente

De igual manera que en el uso de agarre de pellizco las pruebas de agarre envolvente son para demostrar la capacidad de deformación del gripper al momento de sujetar objetos que tienen forma esférica y rectangular, este agarre se hace usando en su totalidad el contacto de los dedos con el objeto siendo este un agarre más seguro.

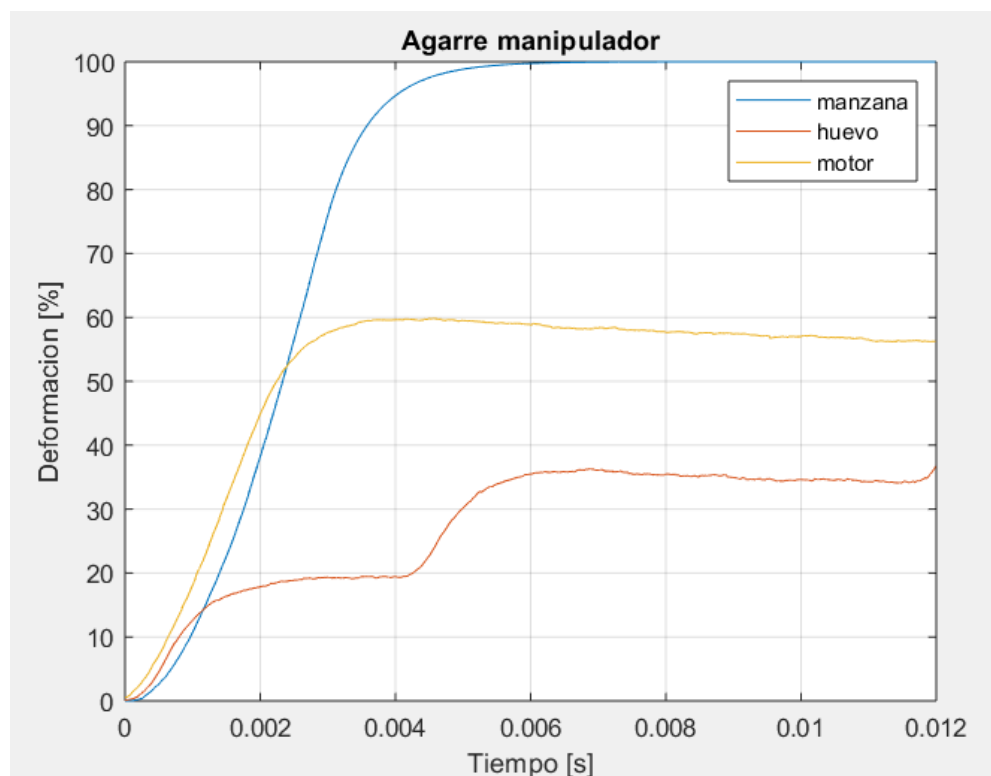
**Figura 70**

*Agarre envolvente.*



**Figura 71**

*Pruebas de agarre envolvente del manipulador.*



Se observa que el agarre envolvente puede trabajar en un rango más amplio de las deformaciones del dedo del manipulador que en el agarre de pellizco, debido a esto el agarre es mejor y por lo tanto la señal del sensor es más limpia y sin ruido que en el caso del agarre de pellizco. La curva referente al agarre del huevo crudo presenta 2 escalones esto debido a que se trabajó con un rango progresivo de la deformación hasta alcanzar el máximo posible sin que el huevo sufra un daño permanente. Finalmente se concluye que este tipo de agarre es mejor ya que produce una señal más limpia de la deformación del dedo y al establecer una referencia en la deformación para el agarre el control funcionara mejor.

## CAPITULO V

### Conclusiones, recomendaciones y trabajo futuro

#### Conclusiones

La mecatrónica es una rama de la ingeniería muy importante para el desarrollo de tecnología permitiendo la sinergia entre la ingeniería mecánica, electrónica y computación, como se presenta en el desarrollo de este trabajo el ingenio mecánico para el desarrollo de un manipulador suave, la correcta selección de los materiales y el control aplicado sobre el manipulador para que este pueda moverse siguiendo un programa establecido, esto demuestra la contribución de la mecatrónica al perfeccionamiento y optimización del diseño de nuevos productos útiles para el ser humano y la industria.

Los parámetros de impresión y la orientación afectan directamente las propiedades mecánicas de las partes impresas en 3D, como se observa en el ensayo de tracción, los resultados del esfuerzo de tracción último y porcentaje de elongación del material cambian, la Tabla 3 que resume las propiedades mecánicas del TPU muestra que el módulo de elasticidad se encuentra entre (20-21) [MPa], tras el ensayo a tracción se comprueba que el módulo de elasticidad se reduce a 3.57 [MPa] cuando se imprime en la orientación 1 y se reduce a un más cuando se imprime en la orientación 2. La Tabla 4 que resume los parámetros de impresión usados para la fabricación del dedo Fin-Ray muestra que la densidad del relleno está al 25% este parámetro de impresión es el más importante en la determinación de la flexibilidad del dedo ya que si se eleva la densidad del relleno el dedo se vuelve más rígido limitando su capacidad de deformación. El tipo de forma giroide que se utilizó para el relleno de la pieza es estructuralmente isotrópica lo que significa que las características del esfuerzo y deformación son muy similares ir respectivamente de la dirección de las cargas.



El lazo de control con retroalimentación de deformación implementado en el Gripper determina que cada objeto puede ser sujetado a un porcentaje de deformación diferente, usando el agarre envolvente los objetos pueden ser sujetados hasta con el 100% de la deformación de los dedos mientras que con el agarre de pellizco solo se puede llegar a usar el 10% de la deformación de los dedos, el método de agarre y el porcentaje de deformación usados en el gripper es único de cada objeto por lo que para procesos de automatización del manipulador es necesario realizar un estudio previo de las propiedades geométricas del objeto para poder establecer la referencia en el lazo de control y su respectivo método de agarre.

Los dedos cumplen con el criterio de deformación planteada, pero este puede variar de acuerdo al número de bandas transversales internas, un número mayor de bandas trasversales vuelve el dedo más rígido impidiendo su deformación, mientras que un número menor de bandas ocasiona que el dedo no tenga la suficiente fuerza para agarrar los objetos, en el diseño planteado las nervaduras son construidas del mismo material que el dedo, aunque no necesariamente debe ser siempre así, una alternativa es usar pequeños ejes de acero que son más rígidos lo cual ofrece una mayor fuerza de compresión pero en contra la deformación de los dedos no se acopla a la perfección con el objeto que sujeta, otro punto importante es el espesor en el dimensionamiento del dedo, ya que se está usando como filamento para la impresión 3D el TPU 95A y este tiene la capacidad de deformarse entonces se puede trabajar con espesores un altos, mientras que si se usara como filamento el PLA el espesor tiene que ser el menor posible.

El dedo Fin-Ray cuando está en contacto con el objeto es capaz de adaptarse pasivamente al perfil del mismo, haciéndolo seguro para la interacción del manipulador con el ser humano en un entorno educativo y aplicaciones industriales, el material blando usado permite el agarre de los objetos sin dañarlos, también permite el agarre de objetos con distintas formas lo que representa una ventaja en aplicaciones industriales de líneas de producción

usando una sola pinza para adaptarse a diversas formas sin la necesidad de cambiar o reprogramar el manipulador.

El diseño del prototipo del manipulador se hizo en base a las características del robot KUKA modelo KR-16 considerando que el uso de esta pinza suave es para el entorno educativo, pese a esto no limita su aplicación industrial del manipulador ya que se puede incorporar al robot por medio de la brida de acople es decir que si se desea cambiar el manipulador a un entorno industrial el cambio sería únicamente sobre la brida y el módulo de conexiones del robot.

### **Recomendaciones**

Realizar un perfeccionamiento en las piezas que componen el manipulador (cuerpo, eslabones, corredera y brida), ya que el manipulador diseñado al ser un prototipo se construyó al 100% por impresión 3D para reducir los costos de fabricación, el fin del perfeccionamiento es mejorar los acabados superficiales de las piezas, eliminación de aristas vivas, el control de tolerancias geométricas y superficiales mejorando el rendimiento del manipulador.

Incorporar un sensor de fuerza flexible de alta repetibilidad, buena resolución y alta sensibilidad con el fin de relacionar el porcentaje de deformación de los dedos con la fuerza que ejercen sobre el objeto que sujeta y así implementar un sistema de control más robusto con ambas variables (deformación y fuerza).

Ejecutar un estudio experimental sobre el diseño del dedo FinRay para optimizar el diseño del dedo, dentro de los parámetros del diseño experimental se sugiere las siguientes variables para el estudio, el número de bandas transversales dentro del dedo, el porcentaje en la densidad del relleno al momento de la impresión y la posición de las bandas transversales internas.

## **Trabajo Futuro**

El diseño, simulación y construcción del prototipo de manipulador suave de este trabajo propone la posterior integración completa del manipulador diseñado con el robot KUKA KR-16 para que este pueda funcionar en tareas de automatización en el agarre de objetos, además de que pueda ser controlado desde el KCP (KUKA Control Panel) del robot, dentro del módulo de entradas y salidas del robot se puede realizar la conexión de los pulsadores que abren y cierran los dedos del manipulador de manera independiente, también existe una entrada análoga para el sensor usado en el lazo de control, la nueva integración del manipulador se tendrá que hacer mediante el PLC Wago que posee el robot optimizando el desempeño dentro de las tareas para las cuales se diseñó el manipulador.

## Bibliografía

- Albu-Schaffer, A., Eiberger, O., Grebenstein, M., Haddadin, S., Ott, C., Wimbock, T., Wolf, S., & Hirzinger, G. (2008). Soft robotics. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 15(3), 20–30. <https://doi.org/10.1109/MRA.2008.927979>
- Basson, C. I., Bright, G., & Walker, A. J. (2017). Validating object conformity through geometric considerations of gripper mechanisms. *2017 24th International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice (M2VIP)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/M2VIP.2017.8211497>
- Ching-Ping Chou, & Hannaford, B. (1996). Measurement and modeling of McKibben pneumatic artificial muscles. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 12(1), 90–102. <https://doi.org/10.1109/70.481753>
- Choi, H. R., Jung, K., Ryew, S., Nam, J.-D., Jeon, J., Koo, J. C., & Tanie, K. (2005). Biomimetic Soft Actuator: Design, Modeling, Control, and Applications. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 10(5), 581–593. <https://doi.org/10.1109/TMECH.2005.856108>
- Chossat, J.-B., Park, Y.-L., Wood, R. J., & Duchaine, V. (2013). A Soft Strain Sensor Based on Ionic and Metal Liquids. *IEEE Sensors Journal*, 13(9), 3405–3414. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2013.2263797>
- Cianchetti, M., Ranzani, T., Gerboni, G., Nanayakkara, T., Althoefer, K., Dasgupta, P., & Menciassi, A. (2014). Soft Robotics Technologies to Address Shortcomings in Today's Minimally Invasive Surgery: The STIFF-FLOP Approach. *Soft Robotics*, 1(2), 122–131. <https://doi.org/10.1089/soro.2014.0001>
- Coulter, F. B., & Ianakiev, A. (2015). 4D Printing Inflatable Silicone Structures. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 2(3), 140–144. <https://doi.org/10.1089/3dp.2015.0017>

- Deimel, R., & Brock, O. (2016). A novel type of compliant and underactuated robotic hand for dexterous grasping. *The International Journal of Robotics Research*, 35(1–3), 161–185. <https://doi.org/10.1177/0278364915592961>
- Elango, N., & Faudzi, A. A. M. (2015). A review article: Investigations on soft materials for soft robot manipulations. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 80(5–8), 1027–1037. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7085-3>
- Grijalva, J. G. G., & Hazbun, J. S. A. (2012). *DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN GRIPPER MULTIFUNCIONAL PARA EL LABORATORIO DE ROBOTICA INDUSTRIAL DE LA ESPE*. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.
- Gudiño Márquez, J. W.-H., Gudiño Lau, J., Chávez Montejano, F., Charre Ibarra, S., Alcalá Rodríguez, J., & López Luiz, N. L. L. (2019). Robótica suave: Diseño y construcción. *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, 7(Especial), 42–49. <https://doi.org/10.29057/icbi.v7iEspecial.4168>
- Gullapalli, H., Vemuru, V. S. M., Kumar, A., Botello-Mendez, A., Vajtai, R., Terrones, M., Nagarajaiah, S., & Ajayan, P. M. (2010). Flexible Piezoelectric ZnO-Paper Nanocomposite Strain Sensor. *Small*, 6(15), 1641–1646. <https://doi.org/10.1002/sml.201000254>
- H, J. M., & N, P. V. (2014). “Soft Robotic”: Una nueva generación de robots. *Maskana*, 5, 109–118.
- Hao, Y., Wang, T., Ren, Z., Gong, Z., Wang, H., Yang, X., Guan, S., & Wen, L. (2017). Modeling and experiments of a soft robotic gripper in amphibious environments. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 14(3), 172988141770714. <https://doi.org/10.1177/1729881417707148>
- Ilievski, F., Mazzeo, A. D., Shepherd, R. F., Chen, X., & Whitesides, G. M. (2011). Soft Robotics for Chemists. *Angewandte Chemie International Edition*, 50(8), 1890–1895. <https://doi.org/10.1002/anie.201006464>

- Kawasaki, H., Komatsu, T., & Uchiyama, K. (2002). Dexterous anthropomorphic robot hand with distributed tactile sensor: Gifu hand II. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 7(3), 296–303. <https://doi.org/10.1109/TMECH.2002.802720>
- Kier, W. M., & Stella, M. P. (2007). The arrangement and function of octopus arm musculature and connective tissue. *Journal of Morphology*, 268(10), 831–843. <https://doi.org/10.1002/jmor.10548>
- Kim, K. J., & Tadokoro, S. (Eds.). (2007). *Electroactive polymers for robotic applications: Artificial muscles and sensors*. Springer.
- Kragten, G. A. (2011). *Underactuated hands: Fundamentals, performance analysis and design*. s.n.
- KUKA Roboter GmbH. (2013). *Manual de Usuario de Robot KUKA*.
- Laschi, C., Cianchetti, M., Mazzolai, B., Margheri, L., Follador, M., & Dario, P. (2012). Soft Robot Arm Inspired by the Octopus. *Advanced Robotics*, 26(7), 709–727. <https://doi.org/10.1163/156855312X626343>
- Lipson, H., & Kurman, M. (2013). *Fabricated: The new world of 3D printing; [the promise and peril of a machine that can make (almost) anything]*. Wiley.
- Liu, X., Mwangi, M., Li, X., O'Brien, M., & Whitesides, G. M. (2011). Paper-based piezoresistive MEMS sensors. *Lab on a Chip*, 11(13), 2189. <https://doi.org/10.1039/c1lc20161a>
- Manti, M., Hassan, T., Passetti, G., D'Elia, N., Laschi, C., & Cianchetti, M. (2015). A Bioinspired Soft Robotic Gripper for Adaptable and Effective Grasping. *Soft Robotics*, 2(3), 107–116. <https://doi.org/10.1089/soro.2015.0009>
- Marchese, A. D., Katzschmann, R. K., & Rus, D. (2015). A Recipe for Soft Fluidic Elastomer Robots. *Soft Robotics*, 2(1), 7–25. <https://doi.org/10.1089/soro.2014.0022>
- Marchese, A. D., & Rus, D. (2016). Design, kinematics, and control of a soft spatial fluidic elastomer manipulator. *The International Journal of Robotics Research*, 35(7), 840–869. <https://doi.org/10.1177/0278364915587925>

- Nguyen, T.-D., & Burgner-Kahrs, J. (2015). A tendon-driven continuum robot with extensible sections. *2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2130–2135. <https://doi.org/10.1109/IROS.2015.7353661>
- Pfeifer, R., Lungarella, M., & Iida, F. (2012). The challenges ahead for bio-inspired “soft” robotics. *Communications of the ACM*, 55(11), 76–87. <https://doi.org/10.1145/2366316.2366335>
- Rus, D., & Tolley, M. T. (2015). Design, fabrication and control of soft robots. *Nature*, 521(7553), 467–475. <https://doi.org/10.1038/nature14543>
- Shin, J. H., Park, J. G., Kim, D. I., & Yoon, H. S. (2021). A Universal Soft Gripper with the Optimized Fin Ray Finger. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 8(3), 889–899. <https://doi.org/10.1007/s40684-021-00348-1>
- Shintake, J., Rosset, S., Schubert, B., Floreano, D., & Shea, H. (2016). Versatile Soft Grippers with Intrinsic Electroadhesion Based on Multifunctional Polymer Actuators. *Advanced Materials*, 28(2), 231–238. <https://doi.org/10.1002/adma.201504264>
- Siciliano, B., & Khatib, O. (2008). *Springer handbook of robotics*. Springer.
- Silva Plata, C., & Gallardo Arancibia, J. (2019). Diseño e implementación de prototipo de una pinza robótica adaptativa de tres dedos basada en estructura FinRay®. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 18(34), 103–121. <https://doi.org/10.22395/rium.v18n34a7>
- Tolley, M. T., Shepherd, R. F., Karpelson, M., Bartlett, N. W., Galloway, K. C., Wehner, M., Nunes, R., Whitesides, G. M., & Wood, R. J. (2014). An untethered jumping soft robot. *2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 561–566. <https://doi.org/10.1109/IROS.2014.6942615>
- Umedachi, T., Vikas, V., & Trimmer, B. A. (2013). Highly deformable 3-D printed soft robot generating inching and crawling locomotions with variable friction legs. *2013 IEEE/RSJ*

*International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 4590–4595.

<https://doi.org/10.1109/IROS.2013.6697016>

Vogt, D. M., Park, Y.-L., & Wood, R. J. (2013). Design and Characterization of a Soft Multi-Axis Force Sensor Using Embedded Microfluidic Channels. *IEEE Sensors Journal*, 13(10), 4056–4064. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2013.2272320>

Yang, Y., Jin, K., Zhu, H., Song, G., Lu, H., & Kang, L. (2021). A 3D-Printed Fin Ray Effect Inspired Soft Robotic Gripper with Force Feedback. *Micromachines*, 12(10), 1141. <https://doi.org/10.3390/mi12101141>

Zhou, J., Gu, Y., Fei, P., Mai, W., Gao, Y., Yang, R., Bao, G., & Wang, Z. L. (2008). Flexible Piezotronic Strain Sensor. *Nano Letters*, 8(9), 3035–3040. <https://doi.org/10.1021/nl802367t>



## Apéndices