



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE GUAYAQUIL
CARRERA DE MECATRÓNICA

**DESARROLLO DE UN GRIPPER ADAPTATIVO DE
ACCIONAMIENTO NEUMÁTICO BASADO EN ROBÓTICA SUAVE
PARA MANIPULACIÓN ADECUADA DE MANZANAS GRANNY
SMITH DE LA ESPECIE MALUS DOMÉSTICA**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de Ingeniero en Mecatrónica

AUTOR: John Jesús Tumbaco Ruiz
TUTOR: David Mateo Cortez Saravia

Guayaquil - Ecuador

2025

27/08/25
21:00


CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, **John Jesús Tumbaco Ruiz** con documento de identificación N° **0929006179**, manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo.

Guayaquil, 27 de agosto del año 2025

Atentamente,



John Jesús Tumbaco Ruiz
0929006179

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Yo, **John Jesús Tumbaco Ruiz** con documento de identificación N° **0929006179**, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del **Dispositivo Tecnológico: DESARROLLO DE UN GRIPPER ADAPTATIVO DE ACCIONAMIENTO NEUMÁTICO BASADO EN ROBÓTICA SUAVE PARA MANIPULACIÓN ADECUADA DE MANZANAS GRANNY SMITH DE LA ESPECIE MALUS DOMESTICA**, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero en Mecatrónica, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 27 de agosto del año 2025

Atentamente,



John Jesús Tumbaco Ruiz
0929006179

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, **David Mateo Cortez Saravia**, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **DESARROLLO DE UN GRIPPER ADAPTATIVO DE ACCIONAMIENTO NEUMÁTICO BASADO EN ROBÓTICA SUAVE PARA MANIPULACIÓN ADECUADA DE MANZANAS GRANNY SMITH DE LA ESPECIE MALUS DOMÉSTICA**, realizado por **John Jesús Tumbaco Ruiz** con documento de identificación N° **0929006179**, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción **Dispositivo Tecnológico** que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 27 de agosto del año 2025

Atentamente,



Ing. David Mateo Cortez Saravia, Mg.
0963020193

DEDICATORIA

Dedicatoria

Este logro se lo debo, en primer lugar, a mi padre, Félix. Su vida entera ha sido una lección de esfuerzo y dedicación, y su incansable sacrificio ha iluminado constantemente mi camino, sirviéndome de guía e inspiración. Además, tengo un gran profundo agradecimiento es para mi madre, Susy, por brindarme un amor incondicional y apoyarme en cada momento, sin importar los desafíos. Su presencia ha sido el pilar fundamental que me ha sostenido en todo este recorrido.

Extiendo esta dedicatoria a mis hermanos, Samantha y Andrés, cuya compañía y alegría han convertido cada día en una razón para seguir adelante.

Por último, pero no menos importante, un lugar especial es para mi querida mascota, Pepito. Su leal y tranquila compañía fue un consuelo en los instantes de agotamiento y dificultad, recordándome con su cariño silencioso el invaluable valor de la perseverancia y la amistad pura.

John Jesús Tumbaco Ruiz

AGRADECIMIENTO

En primer lugar agradecer a Dios, por ser guía constante en cada paso de mi vida. También, a mi padre y a mi madre, por su amor incondicional, su apoyo permanente y por enseñarme el valor del esfuerzo y la perseverancia para superar los retos que se presentan en el camino.

Quiero dar mi gratitud a mis hermanos, quienes con su compañía y palabras de aliento me motivaron a seguir adelante.

Además, quiero hacer agradecimiento de manera especial a la Universidad Politécnica Salesiana, a sus docentes, compañeros y amigos de la universidad, quienes fueron parte fundamental en mi formación académica y personal, así como en el desarrollo de este proyecto de investigación. Finalmente, no puedo dejar de mencionar a mi mascota, que con su compañía y alegría me brindó tranquilidad en los momentos de mayor esfuerzo.

John Jesús Tumbaco Ruiz

RESUMEN

Este proyecto se enfoca en crear un soft gripper neumático adaptativo, que utiliza principios de robótica suave, con el fin de manipular de manera efectiva las manzanas Granny Smith. Estos nuevos tipos de actuadores son una alternativa a los grippers rígidos tradicionales, ofreciendo una solución más segura para manipular frutas y objetos con formas irregulares, ya que son flexibles y se amoldan a su forma.

Para desarrollar este proyecto, se empleó una metodología que incluyó la selección de materiales elásticos específicos para robótica suave. Se diseñaron los componentes de la estructura mediante un software de diseño asistido por computadora (CAD) y se realizaron simulaciones detalladas en SolidWorks. Posteriormente, se procedió a la fabricación de moldes en caucho Vytaflex y a la construcción de prototipos utilizando resina fotopolimérica y siliconas flexibles. Finalmente, el gripper fue integrado a un brazo robótico KUKA KR 4 R600 y a un sistema de accionamiento neumático.

Finalmente, se realizaron pruebas experimentales con manzanas, mandarinas y naranjas, evaluando la capacidad de agarre y la presión aplicada sobre distintas frutas a las planteadas como objetivos, con el fin de explorar la versatilidad de la solución propuesta. Los resultados demostraron que el prototipo logra manipulaciones repetibles y seguras, con una alta efectividad a velocidades moderadas, sin causar daños visibles en la superficie de las frutas. La integración exitosa con el brazo robótico confirma el potencial del sistema para su aplicación en procesos automatizados de manipulación y empaquetado en la industria alimentaria.

Palabras clave: robótica blanda, gripper blando, cilindro neumático, silicona, manipulación de frutas, KUKA KR 4 R600.

ABSTRACT

This project focuses on creating an adaptive pneumatic soft gripper, which utilizes soft robotics principles, to effectively handle Granny Smith apples. These new types of actuators are an alternative to traditional rigid grippers, offering a safer solution for handling irregularly shaped fruits and objects, as they are flexible and adapt to their shape.

To develop this project, a methodology was used that included the selection of elastic materials specifically for soft robotics. The structural components were designed using computer-aided design (CAD) software, and detailed simulations were performed in SolidWorks. Subsequently, molds were manufactured in Vytaflex rubber, and prototypes were built using photopolymer resin and flexible silicones. Finally, the gripper was integrated into a KUKA KR 4 R600 robotic arm and a pneumatic drive system.

Finally, experimental tests were conducted with apples, mandarins, and oranges, evaluating the gripping capacity and pressure applied to different target fruits in order to explore the versatility of the proposed solution. The results demonstrated that the prototype achieves repeatable and safe handling, with high effectiveness at moderate speeds, without causing visible damage to the fruit surface. Successful integration with the robotic arm confirms the system's potential for application in automated handling and packaging processes in the food industry.

Keywords: soft robotics, soft gripper, pneumatic cylinder, silicone, fruit handling, KUKA KR 4 R600.

ÍNDICE

I. Introducción	1
II. Problema	2
III. Justificación	3
IV. Objetivos	5
IV-A. Objetivo general	5
IV-B. Objetivos específicos	5
V. Fundamentos Teóricos	6
V-A. La robótica	6
V-B. La robótica suave (Soft Robotics)	6
V-C. Bioinspiración de la robótica suave	7
V-C1. Ventajas frente a la robótica rígida	7
V-D. Grippers	7
V-E. Grippers en la industria	8
V-E1. Grippers de accionamiento neumático	8
V-E2. Grippers de accionamiento hidráulico	8
V-E3. Grippers de accionamiento eléctrico	9
V-F. Soft grippers	9
V-G. Producción de manzanas (Granny Smith)	9
V-G1. Características	10
V-G2. Problemas reportados por recolección manual	10
V-G3. Soluciones	10
V-H. Materiales	11
V-H1. SILICONAS DE PLATINO	11
V-I. Dragon Skin 10 NV	11
V-J. Vytaflex 40	12
V-K. Sil-Poxy	14
V-L. Sonite Wax	15
V-M. Componentes neumáticos	16
V-M1. Cilindro Neumático (ADN-20-25-A-P-A)	16
V-M2. Compresor de aire	16
V-M3. Electroválvula	17
V-M4. Tubo neumático	17
V-M5. Racores neumáticos	18
V-M6. Sensor de Fuerza	18
V-N. Brazo robótico	19
V-Ñ. Material de impresión en 3D	20
V-O. Diseño y simulación en CAD	21
V-O1. SolidWorks	21
VI. Marco Metodológico	22
VI-A. Diagrama de flujo	22
VI-B. Selección del material del soft gripper	23
VI-C. Primer Diseño	24
VI-C1. Diseño estructural del soft gripper #1	24
VI-D. Simulación por Elementos Finitos del gripper #1	25

VI-D1.	Determinación de la fuerza del actuador	25
VI-D2.	Preparación de mallas para simulación FEA del gripper #1	28
VI-E.	Análisis estático - Primer Diseño	29
VI-F.	Procedimiento molde experimental de Vytaflex 40 para gripper #1	32
VI-F1.	Diseño e impresión de pieza base para molde	32
VI-F2.	Aplicación de desmoldantes del Primer Diseño	33
VI-G.	Vytaflex 40	34
VI-G1.	Instrumentos de protección personal para manipulación de materiales	34
VI-G2.	Medición y Mezcla	35
VI-H.	Preparación de la mezcla de silicona Dragon Skin 10 NV	37
VI-H1.	Fabricación de la primera réplica del molde	39
VI-I.	Segundo Diseño	40
VI-J.	Fabricación de molde Vytaflex para diseño #2	42
VI-J1.	Aplicación de desmoldantes del Segundo Diseño	42
VI-J2.	Segundo proceso de preparación del Vytaflex 40	42
VI-J3.	Preparación de la pieza de silicona	44
VI-J4.	Pieza de silicona desmoldada – Segundo diseño	45
VI-J5.	Adhesión de componentes de silicona con Sil-Poxy	45
VI-K.	Diseño y fabricación de la base del gripper	48
VI-K1.	Modelado computacional de la base	48
VI-L.	Ensamblaje e instalación del gripper	53
VI-L1.	Montaje del gripper en el brazo robótico	53
VI-M.	Conexión de válvulas y mangueras	53
VI-N.	Calibración e implementación del sensor de fuerza	54
VI-Ñ.	Simulación de Trayectoria para el Brazo Robótico en RoboDK	56
VI-O.	Pruebas de agarre con manzana	58
VI-O1.	Pruebas de manipulación con otras frutas	60
VI-O2.	Pruebas de agarre con brazo robótico a velocidad moderada	61
VI-O3.	Pruebas de agarre a velocidad máxima	62
VII.	Resultados	63
VII-1.	Resultados del molde y pieza - Segundo Diseño	63
VII-2.	Resultado pieza de silicona en molde VYtaflex - Segundo Diseño	63
VII-A.	Resultados análisis estático - Segundo Diseño	64
VII-B.	Resultados de manipulación con frutas a velocidad moderada	66
VII-C.	Resultados de manipulación con frutas a velocidad alta	66
VII-D.	Resultados de la presión con el gripper	67
VIII.	Cronograma	68
IX.	Presupuesto	69
X.	Conclusiones	70
XI.	Recomendaciones	71
Referencias		72
XII.	Anexos	75

ÍNDICE DE FIGURAS

1. Primer robot industrial Unimate [21].	6
2. Tentacle Gripper de FESTO [23].	7
3. Manzana Granny Smith (Malus domestica) [27].	10
4. Tabla técnica silicona de Dragon Skin [30].	11
5. Smooth on - Dragon Skin 10 NV [31].	12
6. Smooth on - Vytaflex 40 [32].	13
7. Sil-Poxy [33].	14
8. Sonite Wax.	15
9. Cilindro neumático Festo ADN-20-25-A-P-A [34].	16
10. Compresor de aire [34].	17
11. Electroválvula FESTO 5/2 [35].	17
12. Manguera FESTO [36].	18
13. Racor roscado tipo codo - FESTO [37].	18
14. Sensor de fuerza B0DD45J4HB. Adaptado del fabricante.	18
15. Espacio de trabajo del Modelo Kuka KR 4 R600 [38].	19
16. Filamento PETG - ELEGOO [39].	20
17. Resina ANYCUBIC Water Wash Resin+ [40].	20
18. Modelación tridimensional de objetos por CAD (SolidWorks) [41].	21
19. Diagrama de flujo por Jesús Tumbaco	22
20. Smooth on - Dragon Skin 10 NV.	23
21. Diagrama de flujo del proceso de fabricación del primer diseño del gripper neumático.	24
22. Vista Isométrica - Primer Diseño.	24
23. Vistas del primer diseño	25
24. Cilindro neumático Festo ADN-20-25-A-P-A.	26
25. Definición de las propiedades del material Dragon Skin NV10 en SolidWorks.	28
26. Generación de Malla para simulación de gripper.	28
27. Análisis Estático - Tensiones del primer diseño.	29
28. Análisis Estático - Deformaciones del Primer diseño.	30
29. Análisis Estático - Deformaciones Unitarias del Primer diseño.	31
30. Diseño e Impresión 3D de la pieza prototipo del gripper	32
31. Aplicación de desmoldantes en la pieza impresa para la fabricación del molde	33
32. Vytaflex 40.	34
33. Equipo de protección personal utilizado para manipulación de silicona y poliuretano líquido.	35
34. Componentes A y B del caucho Vytaflex 40	35
35. Mezcla de los componentes A y B de VytaFlex 40	36
36. Vertido de la mezcla de VytaFlex 40.	36
37. Molde de VytaFlex 40 partido a la mitad, mostrando la pieza vertida en su interior.	37
38. Mezcla de la silicona Dragon Skin 10 NV	38
39. Vertido de la silicona	38
40. Pieza de silicona Dragon Skin NV10 retirada del molde flexible fabricado con VytaFlex 40.	39
41. Diagrama de flujo del proceso de creación del segundo diseño del gripper neumático.	40
42. Vista isométrica del segundo diseño del gripper.	40
43. Vistas del segundo diseño del gripper	41
44. Vista isométrica en sección del segundo diseño del gripper.	41
45. Aplicación de desmoldantes del Segundo Diseño	42
46. Componentes A y B del caucho Vytaflex 40 - Segundo Diseño	42
47. Segundo proceso completo de fabricación del molde con Vytaflex 40	43
48. Proceso de vertido de la silicona Vytaflex 40 en el molde	44
49. Preparación y vertido de la mezcla Vytaflex 40	44

50. Pieza de silicona del segundo diseño desmoldada del molde de Vytaflex.	45
51. Primera aplicación del SIL-POXY.	45
52. Primera unión de las dos secciones del gripper.	46
53. Aplicación de adhesivo SIL-POXY para la unión de piezas de silicona	46
54. Ensamblaje del gripper con adhesivo SIL-POXY	47
55. Base 1 — Placa inferior de acoplamiento del gripper.	48
56. Base 2 — Placa de acople al pistón	49
57. Base 3 — Placa de conexión principal	49
58. Base 4 — Pieza de enlace al pistón	50
59. Base 5 — Soportes laterales del gripper	50
60. Ensamble final del gripper modelado en SolidWorks.	51
61. Vista explosionada de la base en el ensamble final del gripper.	52
62. Acoplamiento del gripper a la base adaptadora según el diseño previsto.	53
63. Elementos neumáticos principales y conexión al pistón	53
64. Activación eléctrica del sistema neumático	54
65. Tabla de lecturas obtenidas durante la calibración del sensor de fuerza y la correspondiente fuerza aplicada.	54
66. Comparación entre curvas polinómicas ajustada en MATLAB.	55
67. Prueba de funcionamiento del código de estimación de fuerza en MATLAB y su correspondencia con la lectura en tiempo real.	56
68. Simulación en RoboDK del brazo KUKA KR 4 R600 con el soft gripper y la manzana <i>Granny Smith</i> .	56
69. Definición de targets en RoboDK.	57
70. Simulación de la rutina de movimiento para pruebas de agarre con el robot KUKA KR 4 R600 en RoboDK.	58
71. Secuencia de la rutina de agarre con manzana (Granny Smith).	59
72. Ensayos de manipulación de frutas utilizando el gripper neumático acoplado al brazo robótico.	60
73. Pieza de silicona NV10 obtenida con el molde de VytaFlex 40 del segundo diseño.	63
74. Pieza de silicona NV10 con molde Vytaflex	63
75. Distribución de tensiones de Von Mises en el segundo diseño del gripper.	64
76. Distribución de desplazamientos en el segundo diseño del gripper.	65
77. Distribución de deformaciones unitarias en el segundo diseño del gripper.	65
78. Plano acotado de la Base 1 del ensamble, por J. Tumbaco, SolidWorks	75
79. Plano acotado de la Base 2 del ensamble, por J. Tumbaco, SolidWorks	76
80. Plano acotado de la Base 3 del ensamble, por J. Tumbaco, SolidWorks	77
81. Plano acotado de la Base 4 unión del ensamble, por J. Tumbaco, SolidWorks	78
82. Plano acotado de la Base 5 soporte del gripper del ensamble, por J. Tumbaco, SolidWorks	79
83. Plano del ensamble final, por J. Tumbaco, SolidWorks	80
84. Vista explosionada del ensamble final del gripper, por J. Tumbaco, SolidWorks	81

ÍNDICE DE TABLAS

I.	Principales ventajas de la robótica blanda frente a la robótica rígida	8
II.	Características técnicas de la manzana Granny Smith (Malus domestica)	10
III.	Propiedades técnicas del adhesivo Síl-Poxy por Smooth-On [33].	15
IV.	Propiedades comparativas Dragon Skin [43].	27
V.	Pruebas experimentales de 30 intentos de agarre con el gripper neumático sobre diversas frutas, operando a velocidad moderada.	61
VI.	Pruebas experimentales de 30 intentos de agarre con el gripper neumático sobre diversas frutas, operando a velocidad máxima.	62
VII.	Resultados de 30 intentos de agarre a velocidad moderada.	66
VIII.	Resultados de 30 intentos de agarre a velocidad alta.	67
IX.	Resultado de presión del gripper	67
X.	Cronograma	68
XI.	Presupuesto actualizado para la fabricación del sistema de gripper neumático	69

I. INTRODUCCIÓN

El presente estudio tiene como objetivo desarrollar un mecanismo de agarre adaptativo de accionamiento neumático basado en robótica suave, diseñado para manipular de manera segura manzanas Granny Smith de la especie *Malus domestica*. Este mecanismo busca imitar la capacidad de adaptación de la mano humana, permitiendo que su estructura flexible se ajuste a la morfología irregular de las frutas y garantizando un agarre firme sin dañarlas.

El cierre del mecanismo de agarre se logra mediante la implementación de un cilindro neumático, que proporciona la tracción necesaria para que la garra se cierre sobre la fruta. Su estructura flexible combina elasticidad y resistencia, asegurando un agarre preciso y seguro. Los moldes, elaborados en caucho flexible y utilizando impresión 3D para las piezas maestras, permiten una fabricación precisa y un correcto acoplamiento con el brazo robótico, mientras que la pieza final se fabricó en resina fotopolimérica.

Para su integración y validación, el mecanismo se acopló al brazo robótico mediante bases de sujeción, permitiendo realizar las pruebas experimentales correspondientes. Estos movimientos se realizaron en RoboDK, para garantizar una simulación más eficiente y segura. Además, se incorporó un sensor para determinar la fuerza de agarre, asegurando un manejo controlado y seguro de las frutas durante la manipulación.

II. PROBLEMA

En el año 2023, Ecuador exportó aproximadamente \$200 millones en frutas tropicales, lo que evidencia una creciente demanda en la producción de alimentos como las manzanas, tanto para el mercado internacional como para el consumo interno [1].

En este contexto, la demanda por procesos automatizados, que puedan garantizar homogeneidad en la manipulación de los productos es evidente. En el sector agro-industrial, muchos de los sistemas actuales de recolección presentan baja eficiencia operativa, ya sea por la dependencia del trabajo manual o por la utilización de herramientas tradicionales [2]. Estas herramientas convencionales presentan limitaciones para sujetar de forma segura frutas con diferentes formas y tamaños, lo que conlleva a caídas, fallos en el agarre y, en consecuencia, una disminución en la calidad del producto [3].

En ausencia de herramientas especializadas para la manipulación de productos agrícolas, muchas empresas se ven en la necesidad de incrementar su dependencia en mano de obra humana para llevar a cabo la recolección de frutas. Esta situación conlleva un aumento en el consumo de tiempo y recursos operativos, lo que se traduce en una menor eficiencia del proceso productivo [4]. Además, uno de los principales inconvenientes asociados es el daño físico causado por una presión excesiva o un agarre inadecuado durante el proceso de recolección y transporte al uso de mano de obra. Estos factores pueden provocar cortes, magulladuras o defectos superficiales que comprometen la integridad del producto. Dichas imperfecciones afectan negativamente la percepción del consumidor, disminuyen la calidad comercial del fruto y reducen su competitividad en mercados internacionales [5].

Así también, el daño físico mencionado no es el único riesgo asociado a la manipulación manual de frutas. Este tipo de intervención también puede inducir contaminación biológica, ya sea por residuos de suciedad, bacterias o microorganismos presentes en las manos o herramientas del operario [6]. Estas formas de contaminación son responsables de la transmisión de diversas enfermedades que afectan la salud humana. La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), advierte que la simple presencia de ciertos patógenos puede representar un riesgo significativo, incluso si no son perceptibles a simple vista por el consumidor [7].

Cabe considerar, por otra parte, que si bien en Ecuador ya se han incorporado algunos brazos robóticos, su aplicación con soft gripper integrados en el sector agrícola continúa siendo escasa. Esta limitación se acentúa particularmente en la manipulación de las manzanas, cuya estructura es delicada y susceptible a daños [8]. La baja inversión en tecnologías de automatización agrícola ha mantenido a la mano de obra como el principal recurso para estas tareas, a pesar de sus desventajas. Además, muchos de los sistemas robóticos convencionales no presentan una compatibilidad adecuada con la morfología irregular de la dicha fruta con los requerimientos específicos de presión y adaptabilidad durante el proceso de agarre, lo que resulta en una manipulación deficiente [9]. En este contexto, la incorporación de tecnologías como los grippers suaves es una alternativa más viable, ya que brindan una solución más flexible y segura para la recolección automatizada de frutas delicadas [10].

III. JUSTIFICACIÓN

A nivel mundial, se proyecta que la población alcanzará un crecimiento exponencial hasta el año 2050, lo cual generará importantes transformaciones en los patrones de consumo alimentario. Este fenómeno conllevará un incremento considerable en la demanda de productos agrícolas, como las manzanas. Así lo indica un análisis realizado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA), que destaca la necesidad de optimizar los procesos productivos para satisfacer dicha demanda de manera sostenible. [11].

Ante estos tipos de escenario, resulta imprescindible incorporar soluciones tecnológicas avanzadas que permitan una manipulación eficiente y cuidadosa de los productos agrícolas. Por ese motivo, el uso de soft grippers desempeña un papel fundamental en la implementación de procesos industriales para la manipulación de productos delicados, como las manzanas, en el sector [12]. A pesar de su escasa adopción en el Ecuador, existen empresas con la capacidad de invertir en este tipo de tecnologías industriales que podrían optar por su implementación con el fin de automatizar procesos y aumentar la eficiencia productiva con el fin de automatizar procesos y aumentar la eficiencia productiva [13].

La incorporación de dispositivos basados en robótica suave representa una oportunidad significativa para optimizar la manipulación de frutas delicadas como las manzanas, garantizando su integridad durante la recolección gracias a la conformabilidad del material y su capacidad de ejercer presiones suaves y uniformes [14]. Esto contribuye directamente a mejorar la calidad del producto, incrementando su valor comercial tanto en mercados nacionales como internacionales, al reducir el índice de daño físico causado por la manipulación manual. Además, esta tecnología permite optimizar el uso de recursos y elevar los estándares de producción dentro de la cadena agroindustrial dentro de la cadena agroindustrial [15].

En un estudio previo, se implementó un brazo robótico equipado con un soft gripper con el objetivo de automatizar la recolección de manzanas. En un huerto experimental, se evaluaron dos tipos de grippers: uno rígido y otro blando. El gripper rígido logró una tasa de efectividad del 100 % en la recolección, pero causó un daño físico del 16 % en las frutas, lo cual lo descalifica como una opción viable para productos delicados. En contraste, el soft gripper blando alcanzó una efectividad del 96 % y redujo el daño al 8 %, demostrando su superioridad en la manipulación cuidadosa de frutas [16].

Aunque la tasa de daño se redujo significativamente con el uso del gripper blando, los resultados también evidencian que un diseño optimizado podría mejorar aún más su adaptabilidad a la morfología irregular de las manzanas. Esto permitiría mantener una alta eficiencia de manipulación al mismo tiempo que se garantiza una adecuada distribución de fuerzas de sujeción, factor esencial para aplicaciones en el ámbito agrícola [17].

De manera complementaria, un estudio llevado a cabo por investigadores de la Universidad Estatal de Washington desarrolló e integró un soft gripper en un sistema robótico automatizado para la recolección de manzanas. Los resultados evidenciaron una recolección precisa, sin daños visibles, y con una tasa de efectividad del 87,5 %, sin necesidad de intervención humana. Se destacó la suavidad, flexibilidad y adaptabilidad del dispositivo a la geometría de las frutas, resaltando su potencial para un uso efectivo en el sector agrícola. Este enfoque no solo mejora la eficiencia de recolección, sino que también garantiza un mejor cuidado de los productos, que al igual del estudio

anterior el diseño optimizado para la manipulación cuidadosa de la fruta, es aspecto clave en la prevención de enfermedades y la conservación en cosecha y poscosecha [18].

El objetivo principal de este estudio es el diseño de un soft gripper que será acoplado a un brazo robótico, con el propósito de evaluar su desempeño en la manipulación de frutas. Este sistema permitirá validar experimentalmente la eficiencia del gripper en escenarios reales dentro de la industria agroalimentaria [19]. El diseño estará orientado a adaptarse de manera óptima a la geometría asimétrica de frutas como las manzanas, mejorando la distribución uniforme de fuerzas y evitando la aplicación de presiones desiguales que puedan comprometer la integridad del producto. El uso de esta tecnología no solo busca mejorar la eficiencia de los procesos agrícolas automatizados, sino también minimizar el desperdicio poscosecha provocado por daños mecánicos durante la manipulación [20].

IV. OBJETIVOS

IV-A. Objetivo general

Desarrollar un soft gripper adaptativo de accionamiento neumático basado en robótica suave para manipulación adecuada de manzanas Granny Smith de la especie *Malus doméstica*.

IV-B. Objetivos específicos

- Diseñar los componentes estructurales del soft gripper utilizando software de modelado y simulación.
- Fabricar los eslabones del soft gripper en resina, considerando materiales con propiedades flexibles que permitan una adecuada adaptabilidad a la forma irregular de las manzanas durante su manipulación.
- Validar el desempeño funcional del soft gripper a través de pruebas experimentales de manipulación de manzanas.

V. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

V-A. La robótica

La robótica surgió a mediados del siglo XX como respuesta a la necesidad de desarrollar dispositivos capaces de realizar tareas funcionales similares a las del ser humano o incluso de ciertos animales. Estos sistemas buscaban imitar movimientos útiles mediante mecanismos con buena precisión, velocidad y fuerza. En sus primeras etapas, el desarrollo de robots industriales estuvo enfocado principalmente en actividades repetitivas como la soldadura y la manipulación de materiales, especialmente en la industria automotriz, donde se implementaron los primeros modelos como Unimate.

El Unimate, considerado el primer robot industrial, fue inicialmente concebido como un brazo mecánico cuya patente fue solicitada en 1954 y concedida en 1961 al inventor George Devol. Su desarrollo y posterior implementación en la industria se logró gracias a la colaboración con Joseph Engelberger, reconocido como el padre de la robótica, quien, mediante su visión empresarial y enfoque innovador, convirtió este invento en un pilar fundamental para los sistemas de automatización industrial [21].



Figura 1: Primer robot industrial Unimate [21].

Actualmente, los robots son esenciales en la manufactura y otras industrias. La mayoría de estos sistemas usan estructuras rígidas y son impulsados por actuadores eléctricos (motores, solenoides) o por sistemas de fluidos a alta presión, como los neumáticos o hidráulicos. La robótica industrial ha impulsado la productividad, garantizando precisión, uniformidad y reduciendo errores significativamente en comparación con el trabajo manual.

Además, los robots industriales son una gran ventaja porque pueden operar sin interrupciones ni fatiga, lo que reduce los costos a largo plazo y mejora la eficiencia general de la producción. Por estas razones, la robótica ha cumplido su objetivo principal de reemplazar, parcial o totalmente, el trabajo humano en tareas que son repetitivas, exigentes o peligrosas, lo que permite optimizar los recursos y elevar la calidad del producto final.

V-B. La robótica suave (Soft Robotics)

La robótica blanda se consolidó a inicio de los años 90 como una subárea con gran potencial dentro de la robótica convencional, impulsada por la necesidad de desarrollar sistemas más seguros, morfológicamente adaptativos y

funcionalmente versátiles para operar en entornos no estructurados o sensibles [22].

V-C. *Bioinspiración de la robótica suave*

Esta disciplina se basa en gran parte en los seres biológicos, sobresaltando las características mecánicas y funciones de la estructuras biológicas de los mismos, ya sean músculos, tentáculos o tejidos blandos, cuyo objetivo final es poder replicar sus comportamientos. Para lograr esta funcionalidad, los robots suave suelen ser fabricados mayormente con materiales con alta capacidad de deformación, como siliconas, elastómeros, polímeros electroconductores y nanocompuestos flexibles, ya que estos permiten integrar mecanismos de actuación y sensado sin necesidad de emplear articulaciones rígidas ni componentes mecánicos convencionales.



Figura 2: Tentacle Gripper de FESTO) [23].

V-C1. *Ventajas frente a la robótica rígida:* A diferencia de los sistemas pertenecientes a la robótica convencional, caracterizados por estructuras rígidas y articulaciones mecánicas, los sistemas de robótica blanda están completamente inspirados en organismos biológicos, al tratar de replicar sus comportamientos y funcionalidades, les confiere una alta capacidad de adaptabilidad morfológica.

Esta característica les permite operar de manera eficiente en entornos no estructurados y manipular objetos con geometrías irregulares o delicadas, como frutas, tejidos biológicos o dispositivos médicos, minimizando el riesgo de daño. Además, su bajo costo de fabricación, junto con la reducción significativa de riesgos laborales, posiciona a la robótica suave como una alternativa viable y ventajosa frente a los sistemas robóticos tradicionales [24].

V-D. *Grippers*

Desde la aparición de los primeros robots industriales como el unimate, los grippers o EOAT (End-of-Arm Tooling), conocida como Herramientas de Fin de Brazo, es el término utilizado para describir los dispositivos que se montan al final del brazo de un robot industrial, y por la cual se han consolidado en la robótica industrial como herramientas mecánicas fundamentales, cuya función principal función es permitir que los robots realicen tareas de

Tabla I: Principales ventajas de la robótica blanda frente a la robótica rígida

Ventaja Técnica	Descripción
Composición del material	Los robots blandos emplean elastómeros, hidrogeles y polímeros flexibles, a diferencia de los materiales rígidos (metales/plásticos estructurales) de la robótica tradicional, lo que mejora su adaptabilidad en entornos no estructurados.
Comportamiento deformable	Exhiben flexión, elongación y compresión controladas, optimizando la manipulación de objetos con geometrías variables y reduciendo daños durante interacciones.
Seguridad en interacción humana	Su conformabilidad estructural y materiales flexibles minimizan riesgos de lesión, permitiendo contacto seguro en entornos colaborativos (índice de seguridad de 90 % frente a 60 % en sistemas rígidos).
Adaptabilidad	Morfología dinámica que responde a entornos complejos sin requerir reconfiguración mecánica, a diferencia de los robots rígidos que necesitan adaptaciones específicas para cada escenario.

manipulación, sujeción o agarre de objetos para la producciones a gran escala, montadas sobre una superficie fija que les permiten elaborar procesos y ciclos automatizados [25].

V-E. Grippers en la industria

Existen numerosos tipos de grippers, cada uno diseñado y fabricado para adaptarse a diferentes aplicaciones, formas, tamaños de objetos y requisitos operativos dentro del entorno de la automatización industrial. Su correcta selección es crucial para garantizar la eficiencia, precisión y seguridad del sistema robótico.

Los sistemas de accionamiento más empleados en el entorno industrial son principalmente los siguientes:

V-E1. Grippers de accionamiento neumático: El accionamiento neumático es muy común en la industria debido a su eficiencia energética y su rápida respuesta. Este sistema utiliza aire comprimido para generar un movimiento mecánico que es preciso y fácil de controlar.

Las pinzas neumáticas se diferencian de otros sistemas por ser ligeras y compactas, gracias a que utilizan actuadores que funcionan con aire comprimido. Estos actuadores (como los cilindros y pistones) convierten la presión del aire en movimiento mecánico. Estas pinzas son ideales para tareas que necesitan ciclos rápidos, ofreciendo una sujeción segura con aperturas y cierres muy veloces. Además, su integración en sistemas automatizados es sencilla, ya que son compatibles con válvulas, mangueras y controladores estándar.

V-E2. Grippers de accionamiento hidráulico: El sistema hidráulico se destaca por su capacidad para accionar componentes mecánicos y proporcionar la potencia necesaria para operar maquinaria de gran tamaño, gracias al uso de fluidos a presión, como los aceites hidráulicos, que permiten transmitir fuerzas elevadas y generar movimiento en sistemas pesados. Los grippers que emplean este tipo de accionamiento se benefician de esta tecnología , la

cual utiliza la inyección de fluido en cavidades o cámaras internas, lo que conlleva al desplazamientos controlados y una gran facilidad para levantar objetos de gran peso. Aunque el uso de estos equipos puede resultar más compleja por su instalación, debido a su requerimiento a circuitos hidráulicos, bombas de presión, electroválvulas y controladores como PLCs, su alta fiabilidad en trabajos a largo plazo los convierten en una solución eficaz y robusta para aplicaciones industriales.

V-E3. Grippers de accionamiento eléctrico: Los grippers eléctricos utilizan motores para convertir la energía eléctrica en movimiento mecánico. Estos dispositivos, que suelen funcionar con servomotores o motores paso a paso, ofrecen un control muy preciso y repetible, y no necesitan de equipos externos como compresores o bombas. Se regulan a través de unidades de control programables que permiten ajustar fácilmente su comportamiento para diferentes tareas de manipulación.

Los grippers eléctricos destacan por su gran exactitud de movimiento, el poco mantenimiento que necesitan y la facilidad para añadir sensores que miden la fuerza y la posición en tiempo real. Son silenciosos y limpios, perfectos para entornos que requieren higiene estricta, como la industria alimentaria, médica o de electrónica. Su bajo consumo de energía, su fácil integración y su diseño compacto los hacen una opción eficiente y versátil en comparación con los sistemas neumáticos e hidráulicos.

V-F. Soft grippers

Un soft gripper o actuador blando es un tipo de herramienta robótica diseñada como efector final, fabricada con materiales flexibles como la silicona e hidrogeles, los cuales se caracterizan en gran parte por su capacidad de deformarse y adaptarse a la forma de los objetos mediante la elasticidad de sus materiales. Este tipo de diseño permite incorporar principios como la subactuación, donde se utilizan menos actuadores que grados de libertad, y una estructura deformable, lo cual facilita un contacto más seguro y delicado. Gracias a estas propiedades, son especialmente adecuados para manipular elementos frágiles, irregulares o blandos, sin necesidad de un sistema de control sofisticado, minimizando el riesgo de daño en el proceso de agarre [26].

V-G. Producción de manzanas (Granny Smith)

La manzana se cultiva en las tierras altas de la Sierra ecuatoriana, especialmente en provincias como Tungurahua, Cotopaxi, Chimborazo, Azuay y Loja. Estas áreas, que se encuentran entre los 2,650 y 3,200 metros sobre el nivel del mar, tienen un clima perfecto para que los manzanos crezcan.

La variedad Granny Smith es muy popular allí por su resistencia y se cosecha entre mayo y junio, cuando el clima es ideal. Además de su cultivo, la manzana es una de las frutas más exportadas globalmente debido a sus propiedades nutricionales, su sabor y su excelente conservación, lo que la hace muy valorada por los consumidores.



Figura 3: Manzana Granny Smith (*Malus domestica*) [27].

V-G1. *Características:* A continuación, se detallan las características físicas principales de la manzana Granny Smith.

Tabla II: Características técnicas de la manzana Granny Smith (*Malus domestica*)

Parámetro	Descripción	Peso [g]	Diámetro [cm]	Densidad [g/cm ³]
Manzana Granny Smith	Fruta pomácea	50–200	7.0–8.5	0.8–0.9

Las manzanas Granny Smith presentan una maduración que ocurre normalmente entre los 170 y 180 días posteriores a la floración, lo que permite predecir con antelación el momento de la cosecha. En su estado maduro, la fruta mantiene un característico color verde brillante que puede adquirir ligeros tonos amarillentos, con una pulpa firme, jugosa y crujiente. Su sabor se caracteriza por un marcado nivel de acidez equilibrado con un ligero dulzor, lo que las hace especialmente apreciadas tanto para consumo en fresco como para aplicaciones en repostería e industria alimentaria [28].

V-G2. *Problemas reportados por recolección manual:* Durante la recolección y el manejo de las manzanas, se presentan diversos inconvenientes que comprometen la calidad del fruto:

- **Desgarros y contusiones:** Provocados por el roce con ramas, el uso de herramientas inapropiadas o una manipulación brusca.
- **Carencia de herramientas adecuadas** En el transporte, una proporción considerable de manzanas puede sufrir golpes que disminuyen su valor comercial.

V-G3. *Soluciones:* Para mitigar los daños durante la manipulación de manzanas, se han implementado diversas soluciones:

- **Manipulación manual capacitada** La capacitación del personal en técnicas adecuadas de recolección y manejo contribuye a reducir los daños mecánicos. Sin embargo, la falta de control y medición precisa de la fuerza de agarre aplicada por el operario puede ocasionar un esfuerzo excesivo sobre el fruto.

- **Uso de grippers mecánicos tradicionales** Estos dispositivos, fabricados con materiales rígidos, permiten una manipulación más precisa. Sin embargo, su falta de adaptabilidad a la forma del fruto puede incrementar el riesgo de daños si no se ajustan correctamente.

V-H. *Materiales*

V-H1. **SILICONAS DE PLATINO:** Las siliconas de platino son un tipo de elastómero de silicona que no tienen olor ni color. Se fabrican a través de un proceso químico llamado curado por adición, en el cual se usa un catalizador de platino para que se endurezcan.

Este método de curado por adición ofrece ventajas importantes en comparación con otros procesos, ya sean catalizadores de estaño o curación por UV (radiación ultravioleta), incluyendo la ausencia de subproductos durante la reacción, lo que contribuye a una mayor estabilidad dimensional, reducción de la contracción y una pureza superior del material final. En consecuencia, las siliconas de platino garantizan una reproducción detallada con alta fidelidad y una durabilidad sobresaliente, lo que nos conlleva a un material con propiedades excepcionales. Entre ellas, destaca su gran flexibilidad, que le permite adaptarse con facilidad a geometrías complejas sin comprometer su integridad estructural, siendo ideal para aplicaciones exigentes en ingeniería, prototipado y robótica blanda [29].

TECHNICAL OVERVIEW

	Viscosidad Mixta (ASTM D-2393)	Densidad Relativa (g/cc) (ASTM D-1475)	Volumen Específico (cu. in./lb.) (ASTM D-1475)	Tiempo de empleo Útil (ASTM D-2471)	Tiempo de Endurecimiento	Dureza Shore A (ASTM D-2240)	Resistencia a tracción (ASTM D-412)	Módulo 100% (ASTM D-412)	Alargamiento a la rotura (ASTM D-412)	Resistencia al desgarro Matriz B (ASTM D-624)	Contracción (in./in.) (ASTM -2566)
Dragon Skin® 10 Very Fast	23,000 cps	1.07	25.8	4 min.	30 min.	10A	475 psi	22 psi	1000%	102 pli	< .001 in./in.
Dragon Skin® 10 Fast	23,000 cps	1.07	25.8	8 min.	75 min.	10A	475 psi	22 psi	1000%	102 pli	< .001 in./in.
Dragon Skin® 10 Medium	23,000 cps	1.07	25.8	20 min.	5 horas	10A	475 psi	22 psi	1000%	102 pli	< .001 in./in.
Dragon Skin® 10 Slow	23,000 cps	1.07	25.8	45 min.	7 horas	10A	475 psi	22 psi	1000%	102 pli	< .001 in./in.
Dragon Skin® 20	20,000 cps	1.08	25.6	25 min.	4 horas	20A	550 psi	49 psi	620%	120 pli	< .001 in./in.
Dragon Skin® 30	30,000 cps	1.08	25.7	45 min.	16 horas	30A	500 psi	86 psi	364%	108 pli	< .001 in./in.

Proporción de Mezcla: 1A:1B
Color: Translúcido

Rango de temperatura útil: -65°F a +450°F (-53°C a +232°C)
Rigidez dieléctrica (ASTM D-147-97a): >350 V/mil

*Todos los valores medidos a los 7 días a 73°F/23°C

Figura 4: Tabla técnica silicona de Dragon Skin [30].

V-I. *Dragon Skin 10 NV*

Dentro de las siliconas de la serie Dragon Skin® de Smooth-On, el producto 10 NV se caracteriza por su excelente balance entre resistencia mecánica y flexibilidad, además de estar formulado con baja viscosidad para facilitar el vertido sin necesidad de degasificación al vacío [31].



Figura 5: Smooth on - Dragon Skin 10 NV [31].

■ **Propiedades generales y dureza de Dragon Skin 10 NV**

Este elastómero de silicona bicomponente, curado por adición, presenta una dureza de 10 en la escala Shore A, lo que le otorga mayor rigidez respecto al modelo 10 NV, sin perder flexibilidad. Se caracteriza por su buena resistencia al desgarro y alta elongación, lo que lo hace adecuado para aplicaciones que requieren un material más firme.

■ **Aplicaciones típicas**

Debido a su resistencia, estabilidad dimensional y baja viscosidad, la silicona Dragon Skin 10 NV es empleada en la creación de prótesis y aplicaciones de efectos especiales. Además, resulta útil en la fabricación de moldes donde se requiere mayor firmeza estructural, manteniendo propiedades de flexibilidad y biocompatibilidad.

■ **Preparación**

La preparación de Dragon Skin 10 NV requiere la mezcla de dos componentes en una proporción 1A:1B, preferentemente por volumen. Dado que este modelo está formulado con baja viscosidad, puede ser vertido directamente sin necesidad estricta de desgasificación, aunque este proceso siempre mejora la calidad final del material. El tiempo de curado aproximado es de 45 minutos a una temperatura de 73 °F (23 °C).

En este proyecto, se utilizará la silicona Dragon Skin 10 NV como alternativa a la FX-Pro en la fabricación de prototipos del gripper neumático blando. Gracias a su mayor dureza relativa (Shore A10), permite comparar el desempeño del agarre en términos de rigidez, capacidad de deformación y adaptación a la geometría de la fruta. Esto aporta datos relevantes sobre cómo diferentes durezas afectan la manipulación de manzanas Granny Smith y otros productos agrícolas sensibles.

V-J. Vytaflex 40

VytaFlex® 40 forma parte de la serie de cauchos de uretano fabricados por Smooth-On, caracterizados por sus destacadas propiedades físicas y un rendimiento superior en la elaboración de moldes flexibles. Gracias a la tecnología exclusiva V-Polymer, este material permite una reproducción de detalles de alta precisión, al mismo tiempo que ofrece una excelente resistencia al desgarro y una notable durabilidad.



Figura 6: Smooth on - Vytaflex 40 [32].

■ **Propiedades generales y dureza de Vytaflex 40**

Este material se clasifica con una dureza de 40 en la escala Shore A, lo que señala una rigidez intermedia combinada con una flexibilidad equilibrada, haciéndolo un gran candidato para desarrollar moldes que requieren cierto nivel de elasticidad controlada. Gracias a sus características de resistencia y durabilidad, permite obtener moldes con una prolongada vida útil y posibilidad de ser reutilizados. Su elongación, cercana al 400 %, le otorga la capacidad de doblarse sin dañarse durante el proceso de extracción, lo que resulta especialmente útil al trabajar con piezas de geometría compleja.

■ **Aplicaciones típicas**

Como se mencionó anteriormente, este caucho de uretano se utiliza con frecuencia en la fabricación de moldes, cuyo objetivo principal es el vaciado de hormigón pigmentado, ya que permite obtener piezas uniformes y precisas. Además, presenta una gran compatibilidad para la creación de piezas en yeso, ceras, resinas epóxicas y, especialmente, siliconas, gracias a su resistencia química y térmica moderada.

■ **Preparación**

Al igual que en la preparación de las siliconas mencionadas anteriormente, la elaboración de VytaFlex® 40 se basa en la mezcla de dos componentes (A y B) en una proporción 1:1 por volumen, durante aproximadamente 3 minutos. Debido a que su viscosidad es menor que la de las siliconas, la formación de burbujas es reducida, por lo que el uso de una desgasificadora resulta innecesario. El tiempo de curado es de aproximadamente 40 minutos a temperatura ambiente (23 °C). Finalmente, para garantizar un desmoldeo sin deformaciones y obtener propiedades mecánicas óptimas, Smooth-On recomienda esperar entre 16 y 24 horas antes de utilizar el molde.

■ Aplicación

Este uretano es perfecto para crear moldes para siliconas como Dragon Skin®, ya que son totalmente compatibles. A menudo, ni siquiera necesitas usar un agente desmoldante, lo que hace el proceso de desmoldeo más fácil y limpio. Esta compatibilidad asegura que los moldes sean de alta calidad, reutilizables y sirvan para muchas aplicaciones técnicas y artísticas [32].

Para este estudio, se eligió el uretano VytaFlex® 40 para fabricar los moldes del soft gripper neumático porque funciona muy bien con siliconas especiales. Como el actuador blando se fabricará con materiales como Dragon Skin FX-Pro y NV10, se necesitan moldes que sean compatibles, reproduzcan fielmente los detalles y sean muy duraderos. El VytaFlex® 40 cumple con todos estos requisitos, ofreciendo la combinación perfecta de resistencia y capacidad de reproducción.

V-K. Sil-Poxy

El Sil-Poxy es un adhesivo de un solo componente, así que no necesitas mezclarlo antes de usarlo. Aunque está diseñado principalmente para reparar silicona ya curada, también funciona muy bien para pegar piezas de silicona entre sí o con otros materiales compatibles. Su mayor ventaja es que ofrece una adhesión fuerte y flexible, lo que lo hace ideal tanto para reparaciones como para el ensamblaje de piezas blandas en proyectos experimentales o funcionales [33].



Figura 7: Sil-Poxy [33].

Tabla III: Propiedades técnicas del adhesivo Sil-Poxy por Smooth-On [33].

Propiedad	Valor
Tiempo de trabajo (gel time)	5 [min]
Tiempo de curado total	12 [min] (mínimo)
Dureza (Shore A)	40 [A]
Color	Transparente
Resistencia a tracción (Tensile Strength)	200 [psi] (1.38 [MPa])
Elongación a la rotura	250 %
Temperatura de servicio	-54 [°C] a 204 [°C]
Compatibilidad de materiales	Siliconas curadas, algunos plásticos y telas

En el desarrollo del soft gripper, se empleará Sil-Poxy como adhesivo para unir secciones moldeadas por separado, principalmente en áreas donde la estructura del actuador requiera continuidad sin comprometer su flexibilidad ni su funcionalidad final. Gracias a su rápido tiempo de curado y su capacidad de conservar propiedades mecánicas compatibles con el resto del cuerpo, se considera una opción eficiente para la unión de componentes en robótica blanda. A diferencia del uso de la misma silicona como medio de unión que implica tiempos de curado más prolongados y menor capacidad de adhesión estructural, Sil-Poxy ofrece una solución más práctica y robusta para ensamblajes localizados.

V-L. Sonite Wax

El Sonite Wax es un material ceroso especializado utilizado principalmente en la fabricación de moldes y prototipos dentro de procesos de fundición y replicado de piezas. Su consistencia y facilidad de modelado permiten generar formas precisas y superficies lisas, siendo ideal como material base para crear moldes flexibles de silicona. Además, su baja adhesión a ciertos elastómeros y facilidad de desmolde lo hacen muy útil en procesos donde se requiere preservar detalles geométricos finos.



Figura 8: Sonite Wax.

Como se muestra en la Figura 8, el Sonite Wax será empleado en este proyecto como desmoldante para las piezas 3D, facilitando la obtención de moldes de silicona Vytalex sin que se adhieran al prototipo.

V-M. Componentes neumáticos

V-M1. *Cilindro Neumático (ADN-20-25-A-P-A)*: El cilindro neumático Festo ADN-20-25-A-P-A constituye el componente principal de accionamiento dentro del sistema, encargado de suministrar la fuerza lineal necesaria para inflar los canales del soft gripper. Su diseño compacto lo hace adecuado para integrarse en mecanismos donde el espacio es limitado, garantizando al mismo tiempo un control preciso de movimiento y repetibilidad en las pruebas de manipulación.

Las principales características técnicas son las siguientes:

- Diámetro del émbolo: 20 [mm].
- Carrera útil: 25 [mm].
- Tipo: cilindro compacto, de doble efecto.
- Presión de trabajo: hasta 10 [bar].
- Fabricante: Festo.



Figura 9: Cilindro neumático Festo ADN-20-25-A-P-A [34].

En el desarrollo del soft gripper, este cilindro será el encargado de ejercer la presión necesaria para accionar el sistema neumático que provoca el cierre del actuador blando. Su carrera de 25 mm permite un desplazamiento eficiente para deformar la silicona sin dañar su estructura, asegurando un agarre firme y controlado sobre objetos delicados como manzanas.

V-M2. *Compresor de aire*: Un compresor de aire es un equipo que produce y entrega aire a presión para hacer las tareas más rápidas, eficientes y económicas. Convierte el aire que respiramos en aire comprimido para que funcionen herramientas y sistemas industriales con mayor precisión y menos esfuerzo. Es vital en sectores como la manufactura, la alimentación, la salud, la electrónica y el petróleo, donde se necesita un suministro constante y fiable de energía neumática [34].



Figura 10: Compresor de aire [34].

V-M3. Electroválvula: Las válvulas solenoides son dispositivos electromecánicos que usan señales eléctricas para controlar el flujo de líquidos o gases. Un solenoide activa un núcleo móvil que abre o cierra el paso del fluido. Estas válvulas son muy populares en la industria porque permiten un control preciso y automatizado. Son fáciles de integrar con sistemas de control por software y pueden funcionar en condiciones extremas de presión y temperatura, lo que las hace perfectas para aplicaciones exigentes en muchos sectores [35].



Figura 11: Electroválvula FESTO 5/2 [35].

V-M4. Tubo neumático: Los tubos neumáticos, también llamados mangueras de aire, son conductos flexibles hechos de materiales como el poliuretano, nylon, polietileno y caucho. Estos materiales les dan gran flexibilidad, durabilidad y resistencia a altas presiones y condiciones extremas. Se usan en sistemas neumáticos para transportar aire comprimido, garantizando que los equipos que funcionan con este aire operen de forma eficiente y segura [36].



Figura 12: Manguera FESTO [36].

V-M5. *Racores neumáticos*: Los conectores son componentes cruciales en los sistemas neumáticos. Se usan para unir los circuitos de aire comprimido de manera rápida y eficiente, optimizando el flujo de aire. Están diseñados para soportar altas presiones y condiciones extremas. Además, vienen en diferentes formas, como racores rectos, en codo, en T y en estrella, lo que les permite adaptarse a las necesidades de cada aplicación [37].



Figura 13: Racor roscado tipo codo - FESTO [37].

V-M6. *Sensor de Fuerza*: El sensor B0DD45J4HB es un dispositivo pequeño y confiable, ideal para medir fuerzas en la robótica suave. Puede detectar fuerzas entre 0.71 onzas y 13.2 libras, lo que lo hace perfecto para probar el agarre de frutas pequeñas y medianas.



Figura 14: Sensor de fuerza B0DD45J4HB. Adaptado del fabricante.

En este proyecto, usamos este sensor para medir la fuerza con la que los "dedos" del soft gripper sujetan las frutas. Esto nos ayuda a asegurar que el agarre sea firme pero delicado, sin causar daños ni deformaciones en la superficie de los frutos.

V-N. Brazo robótico

Un manipulador robótico, también conocido como brazo robótico, es un sistema mecatrónico que tiene varios grados de libertad y una estructura con articulaciones y actuadores. Estos componentes le permiten mover cada sección de forma controlada. Su principal función es imitar los movimientos de un brazo humano de manera precisa, realizando tareas a través de trayectorias programadas, y controlando su posición, velocidad y fuerza. Los robots articulados son uno de los tipos más comunes, ya que son muy versátiles y pueden maniobrar en espacios 3D complejos, manteniendo un alto rendimiento en tareas repetitivas y difíciles [38].

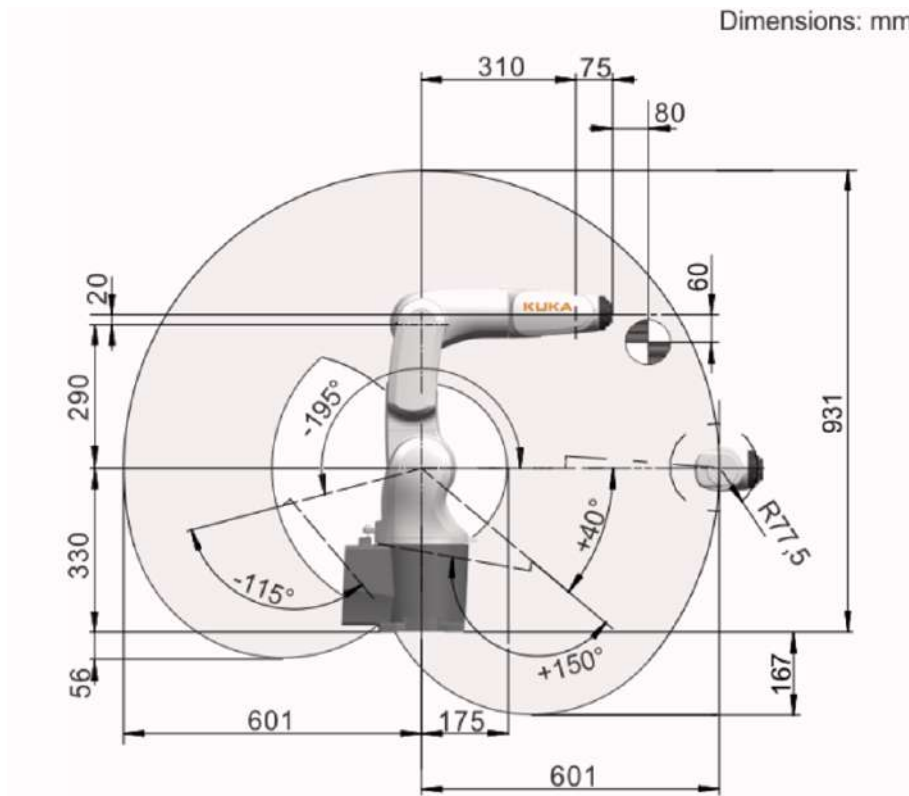


Figura 15: Espacio de trabajo del Modelo Kuka KR 4 R600 [38].

- **Filamento PETG**

El PETG es un material termoplástico que se usa para crear piezas resistentes y duraderas con impresoras 3D que utilizan la tecnología de modelado por deposición fundida (FDM). En este proceso, el filamento de PETG se funde y se deposita capa por capa hasta que se forma el objeto deseado [39].



Figura 16: Filamento PETG - ELEGOO [39].

- **Water-Washable Resin +**

La resina Water-Washable es un material para impresoras 3D de resina que usan tecnología LCD. Se caracteriza por su buena resistencia mecánica y durabilidad, por lo que es ideal para fabricar piezas funcionales que necesitan un nivel moderado de resistencia.



Figura 17: Resina ANYCUBIC Water Wash Resin+ [40].

Este tipo de resina tiene una ventaja clave: puedes limpiar las piezas impresas solo con agua, en lugar de usar químicos tóxicos como el alcohol isopropílico. Esto hace que el proceso de post-impresión sea mucho más seguro para las personas y también reduce los costos, permitiendo que se trabaje en un ambiente más limpio y seguro [40].

V-O. Diseño y simulación en CAD

V-O1. *SolidWorks*: Se trata de un software de diseño asistido por computadora (CAD) que facilita la creación de modelos tridimensionales de piezas y ensamblajes. Gracias a sus múltiples módulos y herramientas especializadas, esta plataforma se adapta a una amplia gama de requerimientos en el ámbito industrial, permitiendo a los ingenieros y diseñadores desarrollar componentes con mayor precisión, eficiencia y control dimensional [41]. En el presente estudio, dicho software será fundamental para el modelado de los componentes estructurales y el diseño de moldes necesarios para la fabricación del soft gripper.

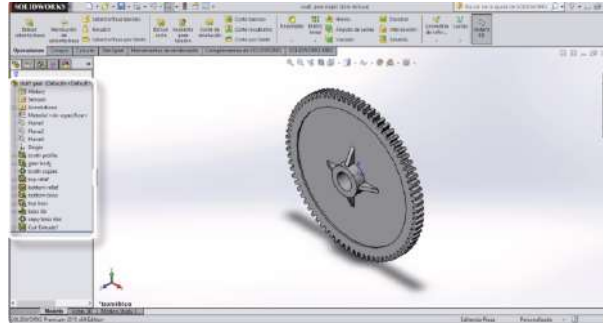


Figura 18: Modelación tridimensional de objetos por CAD (*SolidWorks*) [41].

VI. MARCO METODOLÓGICO

VI-A. Diagrama de flujo

El siguiente diagrama de flujo describe de manera secuencial las actividades involucradas en el desarrollo de un gripper adaptativo orientado a la manipulación de manzanas. Este gripper estará diseñado para integrarse a un brazo robótico mediante un sistema neumático controlado, priorizando la adaptabilidad morfológica, la eficiencia operativa y la facilidad de fabricación con materiales accesibles.

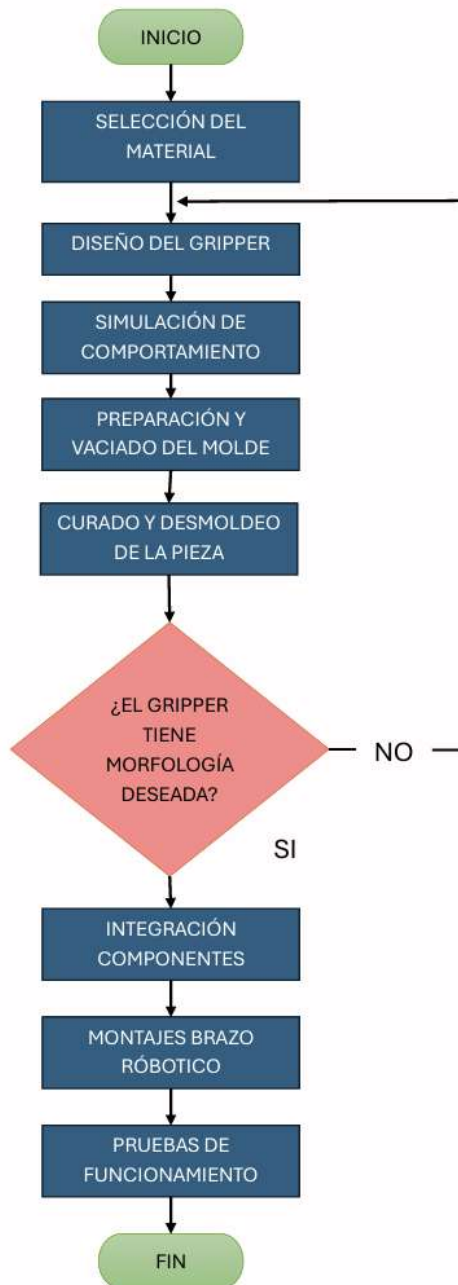


Figura 19: Diagrama de flujo por Jesús Tumbaco

VI-B. Selección del material del soft gripper

Para la fabricación del soft gripper, fue fundamental que su rendimiento estuviera estrechamente relacionado con las propiedades mecánicas del material utilizado. La selección del material se basó en la investigación realizada por [42], en la cual se empleó la silicona Dragon Skin NV10 para la construcción de un soft gripper con un accionamiento neumático eficiente. Este material demostró ser adecuado debido a su elasticidad, capacidad de recuperación y resistencia al desgarramiento. En base a estos antecedentes y a sus propiedades favorables, se optó por utilizar Dragon Skin NV10 en el presente proyecto, lo cual condicionó directamente las decisiones relacionadas con las dimensiones, refuerzos y geometría del diseño final.



Figura 20: Smooth on - Dragon Skin 10 NV.

En el contexto del presente proyecto, estas propiedades permiten al soft gripper adaptarse a geometrías irregulares como la de una manzana Granny Smith, reduciendo significativamente el riesgo de daño superficial durante la manipulación. Además, su bajo módulo de elasticidad y excelente comportamiento frente a cargas cíclicas favorecen su uso en sistemas que requieren alta deformabilidad con un retorno eficiente a la forma original, lo que puede garantizar una operación precisa y repetible.

VI-C. Primer Diseño

Una vez seleccionado el material NV10, los pasos para la creación del gripper se presentan en la Figura 21.

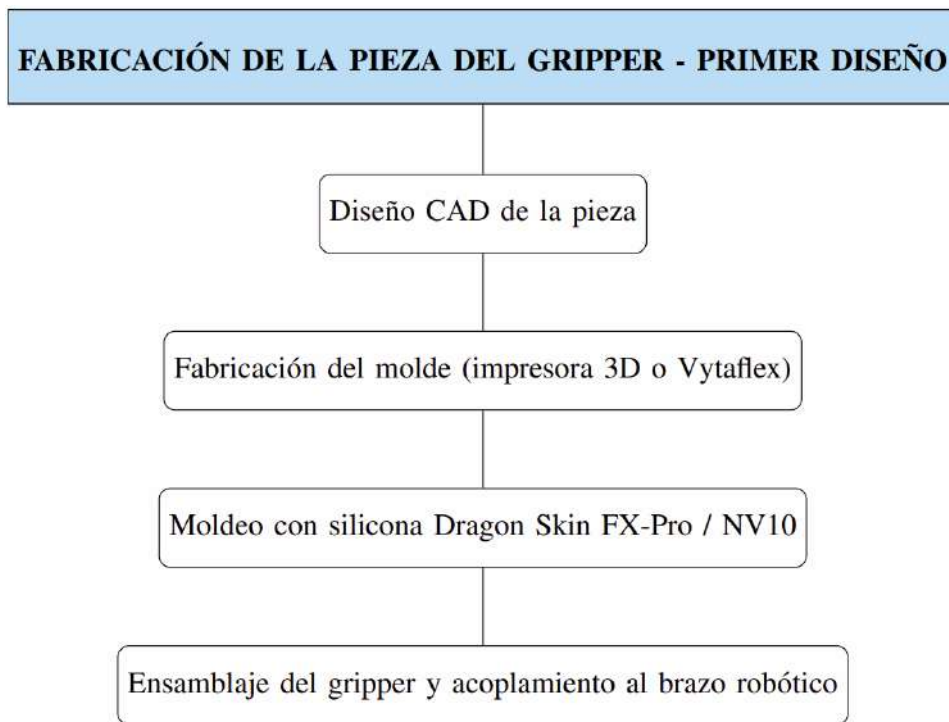


Figura 21: Diagrama de flujo del proceso de fabricación del primer diseño del gripper neumático.

VI-C1. Diseño estructural del soft gripper #1: Una vez seleccionado un material con propiedades adecuadas a los requerimientos del soft gripper, se procedía a modelar la geometría deseada utilizando el software de diseño CAD SolidWorks basado en grippers que son utilizados para recolección de frutas.

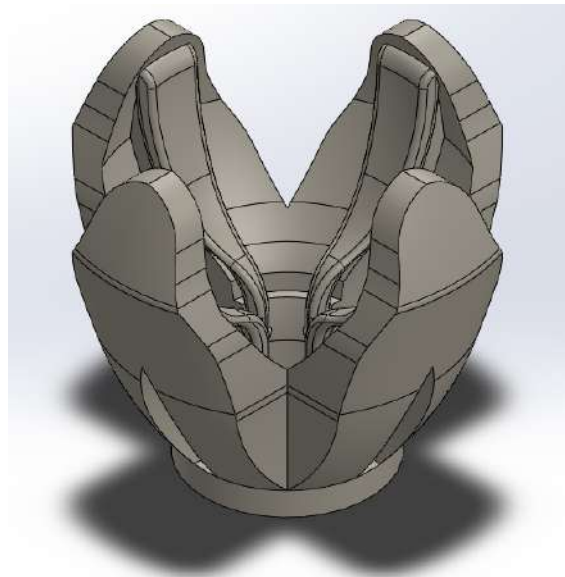


Figura 22: Vista Isométrica - Primer Diseño.

Esta etapa representa una parte esencial del proyecto, en la cual se consideran los principios de adaptabilidad y flexibilidad morfológica necesarios para la manipulación de la fruta.

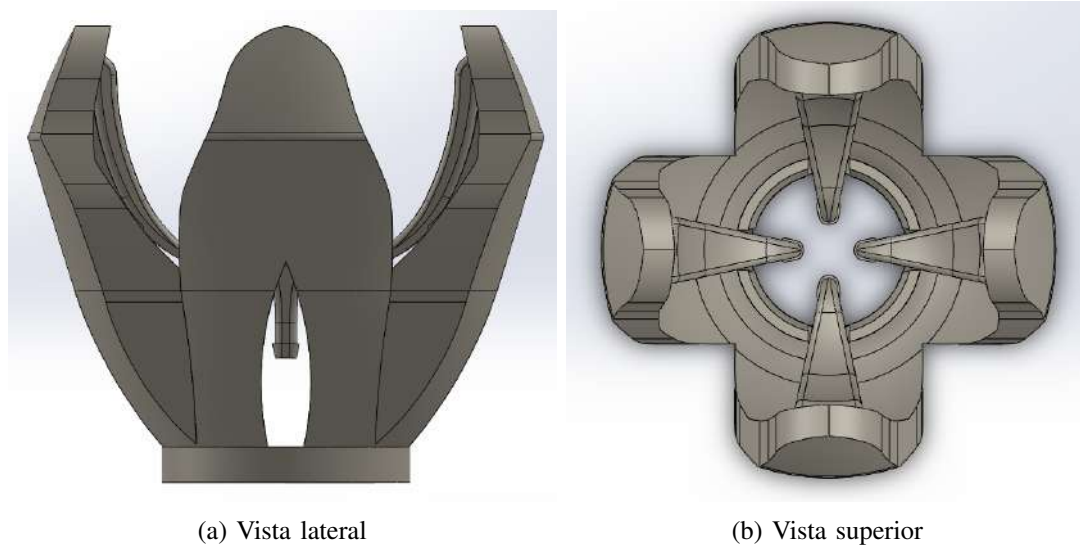


Figura 23: Vistas del primer diseño

El diseño incorpora un mecanismo de tracción accionado para ser accionado por un cilindro neumático (véase Fig. 23), el cual transmite el movimiento mediante un conjunto de extremos de acople, los cuales se encuentran directamente vinculados al pistón. Esta configuración permite transformar la fuerza neumática en un cierre coordinado de los dedos del gripper, generando una deformación controlada del elastómero. Gracias a ello, se logra una sujeción segura de las manzanas, ya que las zonas de contacto, con geometría adaptativa, se ajustan a la morfología irregular del fruto y reducen el riesgo de daños superficiales durante la manipulación.

VI-D. Simulación por Elementos Finitos del gripper #1

Para garantizar el funcionamiento seguro del gripper neumático, se evaluaron las fuerzas que actúan sobre su estructura durante la operación. Dado que el sistema depende de un cilindro neumático para su apertura y cierre, resultó esencial analizar cómo la fuerza del actuador influye en el material de silicona, caracterizado por su flexibilidad pero también por su sensibilidad a cargas elevadas.

VI-D1. Determinación de la fuerza del actuador: En esta etapa se calcula la fuerza suministrada por el cilindro neumático, con el fin de establecer el esfuerzo transmitido al gripper. Este análisis permitió obtener un valor de referencia para emplearlo en la simulación por elementos finitos y verificar el comportamiento del material bajo condiciones reales de operación.



Figura 24: Cilindro neumático Festo ADN-20-25-A-P-A.

$$F_{\text{retroceso}} = P \cdot (A_{\text{pistón}} - A_{\text{vástago}}) \quad (1)$$

- $F_{\text{retroceso}}$: fuerza de retroceso en [N]
- P : presión aplicada en [Pa]
- $A_{\text{pistón}}$: área del pistón en [m²]
- $A_{\text{vástago}}$: área del vástago en [m²]
- Diámetro del pistón: $D_p = 20$ [mm]
- Diámetro del vástago: $D_v = 8$ [mm]
- Presión de trabajo: $P = 6$ [bar] = 600000 [Pa]

$$A_p = \pi \cdot \left(\frac{D_p}{2}\right)^2 = \pi \cdot \left(\frac{20}{2}\right)^2 = \pi \cdot 10^2 = 314,16 \text{ [mm}^2\text{]} \quad (2)$$

CÁLCULO DEL ÁREA DEL VÁSTAGO

$$A_v = \pi \cdot \left(\frac{D_v}{2}\right)^2 = \pi \cdot \left(\frac{8}{2}\right)^2 = \pi \cdot 4^2 = 50,27 \text{ [mm}^2\text{]} \quad (3)$$

ÁREA EFECTIVA PARA EL RETROCESO

$$A_{\text{retroceso}} = A_p - A_v = 314,16 \text{ [mm}^2\text{]} - 50,27 \text{ [mm}^2\text{]} = 263,89 \text{ [mm}^2\text{]} \quad (4)$$

Se convierte a [m²]:

$$A_{\text{retroceso}} = 263,89 \times 10^{-6} \text{ [m}^2\text{]} \quad (5)$$

CÁLCULO DE LA FUERZA DE RETROCESO

$$F = P \cdot A = 600000 \text{ [Pa]} \cdot 263,89 \times 10^{-6} \text{ [m}^2\text{]} = 158,33 \text{ [N]} \quad (6)$$

VALOR OBTENIDO

La fuerza de retroceso del cilindro Festo ADN-20-25-A-P-A, operando a 6 [bar], es aproximadamente:

$$F_{\text{retroceso}} \approx 158,33 \text{ [N]} \quad (7)$$

Limitaciones de Datos y Fuentes Alternativas : Debido a que el fabricante Smooth-On no facilita los datos completos de las propiedades mecánicas (como el módulo de elasticidad o el límite elástico) de sus materiales, se consultó el artículo científico de referencia (s20216020). Este estudio presenta datos experimentales de ensayos uniaxiales estandarizados que caracterizan el material. Los parámetros más importantes para el análisis computacional del gripper se resumen en la siguiente tabla:

Tabla IV: Propiedades comparativas Dragon Skin [43].

Propiedad	Dragon Skin FX-Pro	Dragon Skin 10 NV
Módulo de elasticidad ($E_{100\%}$)	90.9 [kPa]	185.5 [kPa]
Relación de Poisson (μ)	0.51	0.48
Densidad (ρ)	1120 [kg/m ³]	1030 [kg/m ³]

Ingreso de datos del material en SolidWorks: Para la simulación estructural por elementos finitos, se asignaron las propiedades mecánicas correspondientes a la silicona Dragon Skin NV10, incluyendo módulo de elasticidad, densidad y coeficiente de Poisson.

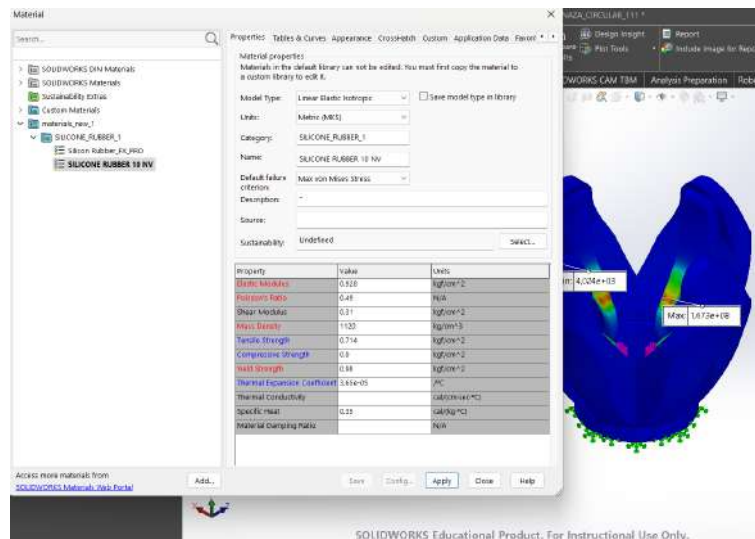


Figura 25: Definición de las propiedades del material Dragon Skin NV10 en SolidWorks.

VI-D2. Preparación de mallas para simulación FEA del gripper #1: Una vez que se escogido el material Dragon Skin NV10, se definieron sus propiedades mecánicas para el análisis estructural. Luego, se creó la malla del modelo del gripper para poder hacer la simulación por elementos finitos (FEA).

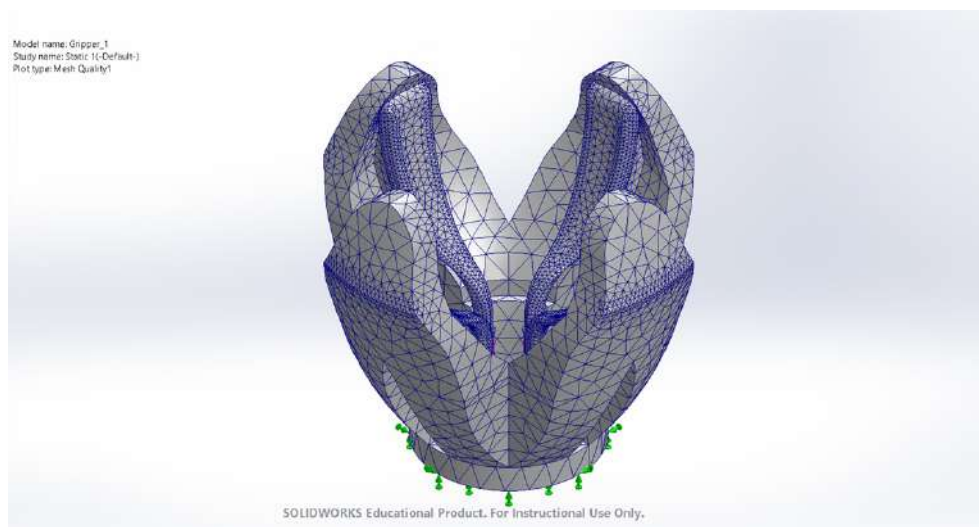


Figura 26: Generación de Malla para simulación de gripper.

La Figura 26 se muestra el modelo con la malla ya aplicada es un paso crucial para que el software pueda dividir la geometría en piezas más pequeñas. Esto le permite calcular con precisión las tensiones, deformaciones y desplazamientos, y así asegurar que los resultados sean confiables.

VI-E. Análisis estático - Primer Diseño

Para evaluar cómo se comporta estructuralmente el gripper hecho con silicona Dragon Skin 10 NV, se realizó un análisis de tensiones utilizando el método de elementos finitos (FEA). Este tipo de estudio ayuda a entender cómo reacciona el material ante fuerzas aplicadas, sin tomar en cuenta movimientos o efectos dinámicos.

Tensiones: Uno de los aspectos más importantes del análisis es la tensión de Von Mises, que permite identificar qué tan cerca está el material de deformarse de forma permanente cuando se somete a diferentes tipos de carga al mismo tiempo. Si este valor es alto en ciertas zonas, podría significar que allí es más probable que ocurra una falla.

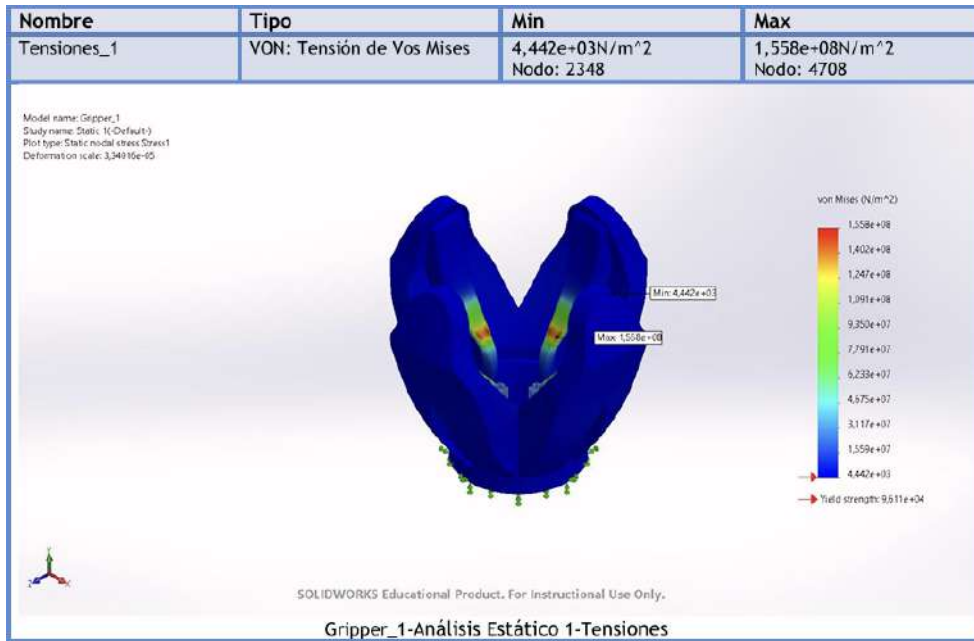


Figura 27: Análisis Estático - Tensiones del primer diseño.

Los resultados de la simulación estática muestran que la tensión máxima de Von Mises alcanza un valor de $1,558 \times 10^8$ [N m⁻²] en el nodo 4708, lo cual identifica la zona crítica donde el material se encuentra más próximo a su límite elástico. Esta información se observa claramente en la Figura 27, que representa la distribución de tensiones en toda la geometría del gripper. Aunque el valor es elevado, indica que la pieza puede soportar cargas considerables; sin embargo, el diseño actual no es completamente óptimo, ya que estas tensiones representan aproximadamente el 80 % de la capacidad máxima del material Dragon Skin NV10.

La distribución de tensiones revela un gradiente claro: las zonas de color rojo (mayor concentración de esfuerzos) coinciden con los puntos de contacto mecánico y las secciones más delgadas del diseño. Esto podría derivar en fatiga prematura o fallas por acumulación de esfuerzos. Por otro lado, la tensión mínima registrada es de $4,442 \times 10^3$ [N m⁻²] en el nodo 2348, localizada en regiones que no participan activamente en la carga, lo cual confirma la existencia de oportunidades para optimizar la geometría y mejorar el balance estructural, reduciendo así las concentraciones de tensión en las áreas más críticas.

Desplazamiento: El análisis de deformaciones por elementos finitos nos ayuda a predecir cómo se doblará el gripper cuando aplique fuerza. Esto nos permite encontrar las áreas críticas, las zonas más rígidas y cómo se reparte la deformación. Esta información es crucial para mejorar el diseño y garantizar que el agarre sea preciso y el dispositivo, duradero.

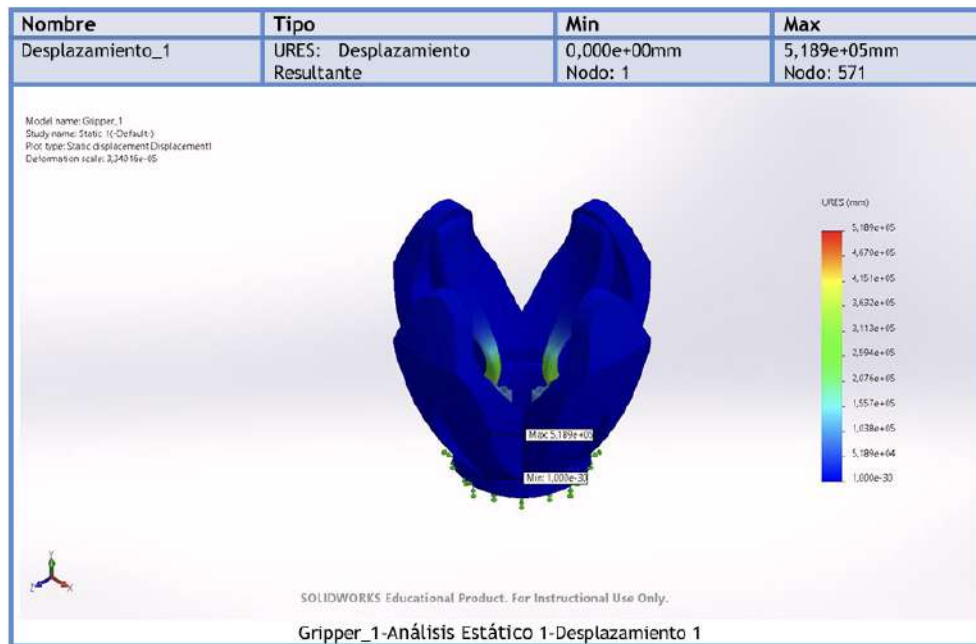


Figura 28: Análisis Estático - Deformaciones del Primer diseño.

El desplazamiento en un análisis por elementos finitos representa cuánto se deforma un punto del modelo frente a una carga aplicada. En este caso particular, el desplazamiento máximo registrado fue de $5,189 \times 10^5$ [mm] en el nodo 57, lo que señala la zona más flexible del gripper. Este valor considerable indica que ciertas partes del diseño podrían doblarse en exceso durante su funcionamiento, comprometiendo así la precisión del agarre y la estabilidad estructural del dispositivo.

Deformaciones Unitarias: La deformación unitaria mide cuánto se estira o comprime un material al ser sometido a una carga. Este análisis nos ayuda a entender cómo se distribuyen los esfuerzos dentro del gripper. En este caso, es muy útil para saber si la silicona está cerca de su límite elástico, si hay zonas que podrían fatigarse o agrietarse, y cómo se comporta el diseño con diferentes cargas. Esta información es clave para asegurar que el gripper sea duradero y funcione bien en la práctica.

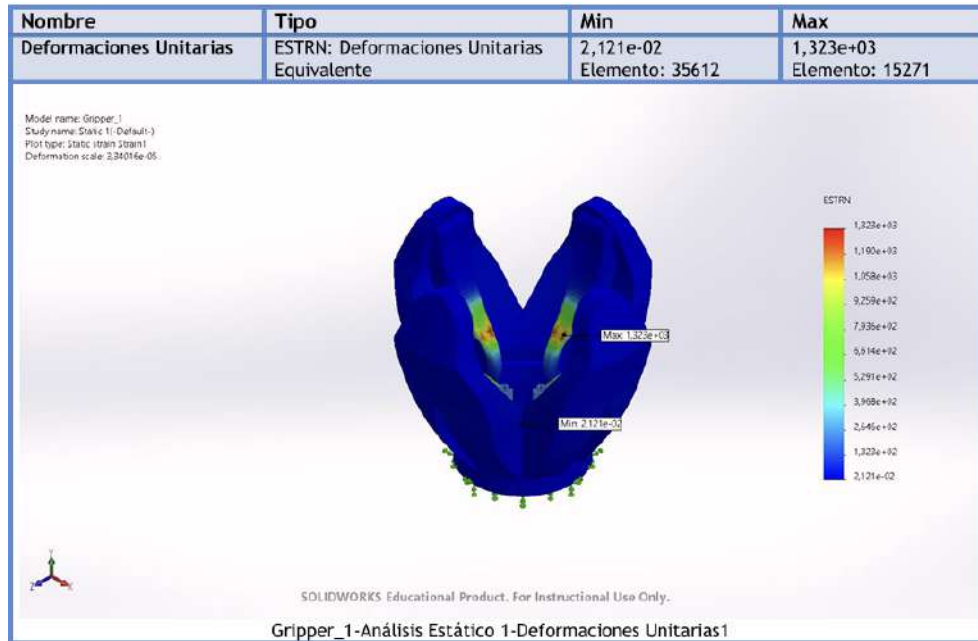


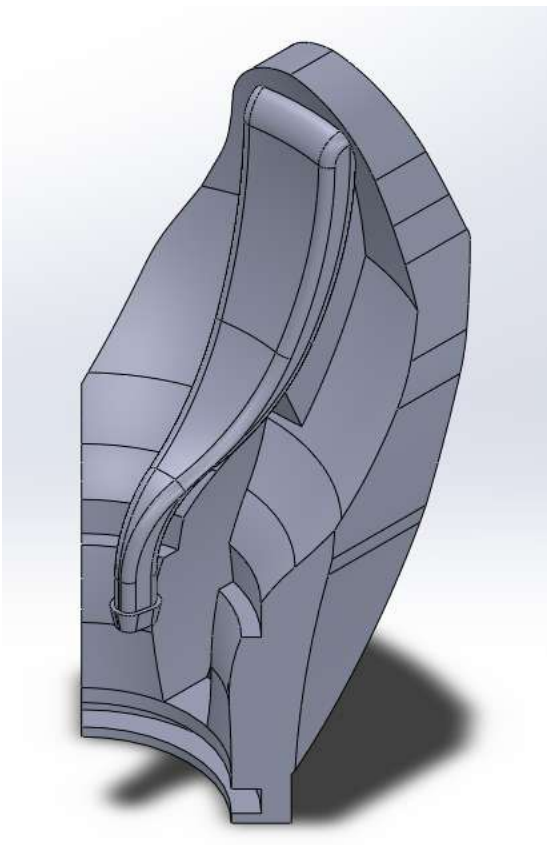
Figura 29: Análisis Estático - Deformaciones Unitarias del Primer diseño.

La deformación unitaria máxima registrada fue de $1,323 \times 10^3$ en el elemento 15271, lo que señala una zona crítica del diseño. Este valor corresponde a una relación entre la longitud deformada y la longitud inicial, por lo que se expresa como un número puro sin unidades. Indica que el material en esa región se encuentra muy cercano a su límite de deformación permisible, lo que podría provocar daños permanentes tras varios ciclos de carga y descarga. Este tipo de concentración de deformación sugiere la necesidad de revisar el diseño local, ya sea reforzando la geometría, redistribuyendo esfuerzos o utilizando un material de mayor resistencia en esa área para evitar fallas prematuras y alargar la vida útil del gripper.

VI-F. Procedimiento molde experimental de Vytaflex 40 para gripper #1

A pesar de las limitaciones propias del diseño preliminar, se procedió con la fabricación del molde experimental en Vytaflex, con el propósito de evaluar el comportamiento del material y la viabilidad del proceso. Esta etapa permitió obtener información útil para futuras optimizaciones del gripper.

VI-F1. Diseño e impresión de pieza base para molde : Una vez completado el diseño CAD del actuador blando, se realizaron ajustes estratégicos con el objetivo de facilitar su fabricación experimental. Para optimizar el uso de material y reducir el tamaño del molde, se modificó el diseño dividiéndolo en un cuarto de circunferencia, obteniendo así una geometría en forma de sector. Esta modificación permitió disminuir costos y tiempos de fabricación, al mismo tiempo que simplificó el proceso de vaciado, posibilitando la obtención de resultados preliminares sin la necesidad de fabricar un molde completo desde el inicio.



(a) Modelado en SolidWorks



(b) Fabricación mediante impresión 3D

Figura 30: Diseño e Impresión 3D de la pieza prototipo del gripper

La Figura 30 muestra el modelado CAD del prototipo del gripper (subfigura a) y la pieza fabricada mediante impresión 3D en resina (subfigura b). Estas imágenes permiten observar la geometría final del diseño y la correspondencia entre el modelo digital y la pieza física.

Además, se incorporaron orificios adicionales para los pines, con el fin de asegurar una unión más firme y estable entre las piezas que conforman el gripper, mejorando así la integridad estructural del conjunto durante su operación.

VI-F2. *Aplicación de desmoldantes del Primer Diseño:* La geometría modificada se fabricó utilizando una impresora 3D de resina mediante tecnología SLA. Aunque en otros proyectos se emplea con frecuencia la impresión por filamento (FDM), este método puede generar superficies rugosas y acabados irregulares, complicando el desmoldeo y afectando potencialmente la calidad del prototipo final. En contraste, la resina proporcionó un acabado más liso y preciso, aspecto esencial para la fabricación de moldes de silicona.

No obstante, se consideró que ciertas siliconas, especialmente las de platino, no curan adecuadamente sobre resina sin un tratamiento previo. Por ello, se seleccionó VytaFlex 40 como material de moldeo y se aplicó un preparado especial sobre la superficie del molde para asegurar resultados satisfactorios.



(a) Aplicación de SONITE WAX



(b) Aplicación de UNIVERSAL MOLD RELEASE

Figura 31: Aplicación de desmoldantes en la pieza impresa para la fabricación del molde

Antes de verter el VytaFlex 40, se preparó cuidadosamente el modelo maestro con el fin de evitar la adhesión del caucho a la superficie. Dado que se trabajó con una pieza impresa en resina 3D, se consideró la posible presencia de microporos o zonas ligeramente adhesivas debido a un curado no completamente uniforme. Para prevenir problemas durante el desmoldeo, se aplicó inicialmente una capa uniforme de Sonite™ Wax, una cera especializada que actúa como barrera física entre la resina y el caucho.

Se aplicaron tres capas delgadas de cera, dejando secar aproximadamente 15 minutos entre cada una, y posteriormente se pulió suavemente la superficie para garantizar una cobertura uniforme en toda la pieza.

Para reforzar esta protección, se añadió una capa adicional de Universal Mold Release mediante pulverización a una distancia aproximada de 30 cm, asegurando que el desmoldante alcanzara los detalles más finos donde la cera podría no haber cubierto completamente. Esta combinación de cera y spray proporcionó la seguridad de que el molde podría retirarse sin dañar el patrón ni dejar residuos, garantizando un acabado limpio y profesional.

VI-G. Vytaflex 40

La fabricación de moldes con resina no resultó óptima para este proyecto, ya que las siliconas de la serie Dragon Skin presentan incompatibilidad con algunas resinas. La textura superficial y la composición química de ciertas resinas pueden inhibir el curado de la silicona, provocando que permanezca pegajosa o sin solidificar en las áreas de contacto debido a la presencia de inhibidores que interfieren con la reacción de reticulación del polímero.



Figura 32: Vytaflex 40.

Por estas razones, se optó por el uso de VytaFlex 40, un caucho de uretano flexible completamente compatible con siliconas de curado por adición. Este material ofrece mayor durabilidad, resistencia a la abrasión y excelente capacidad de reproducción de detalles, asegurando que el molde mantenga su integridad durante múltiples ciclos de colada.

VI-G1. Instrumentos de protección personal para manipulación de materiales: Es fundamental usar equipo de protección personal (EPP) al manipular la silicona Dragon Skin y el caucho de poliuretano VytaFlex 40 para proteger al operador. Aunque el VytaFlex 40 no es muy tóxico, una exposición prolongada a la silicona líquida o a los vapores del poliuretano puede causar irritación en la piel y los ojos, y en espacios cerrados, dolores de cabeza o problemas respiratorios. Por esta razón, se utilizó un protocolo de seguridad que incluyó el uso de mascarillas con filtro y guantes de nitrilo.



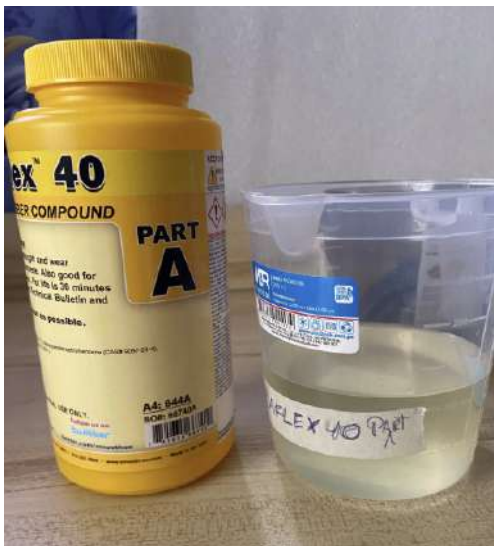
(a) Mascarilla con filtro.

(b) Guantes de nitrilo.

Figura 33: Equipo de protección personal utilizado para manipulación de silicona y poliuretano líquido.

Como se observa en la Figura 33, el uso de mascarilla con filtro previene la inhalación de vapores o partículas durante el vertido y mezcla, mientras que los guantes de nitrilo protegen la piel del contacto directo y evitan la contaminación de los materiales, garantizando un curado adecuado y la integridad del molde.

VI-G2. Medición y Mezcla: Una vez protegida correctamente la superficie de la pieza original con desmoldantes, se procedió a preparar la mezcla de VytaFlex 40, un caucho de uretano flexible ideal para fabricar moldes que requieren buena resistencia al desgaste y una alta precisión en la reproducción de detalles. Este material se compone de dos partes: la Parte A, que contiene el prepolímero de uretano, y la Parte B, que actúa como curador o endurecedor. Ambos deben mezclarse en proporción 1:1, ya sea en volumen o en peso, lo que facilita su manejo en aplicaciones prácticas.



(a) VYTAFLEX PART A



(b) VYTAFLEX PART B

Figura 34: Componentes A y B del caucho Vytaflex 40

El proceso de mezclado se realizó durante aproximadamente 2 a 3 minutos, dentro del tiempo de trabajo recomendado por el fabricante, que es de 30 minutos a temperatura ambiente (23 °C o 73 °F). La mezcla se agitó de forma lenta y uniforme, raspando bien las paredes y el fondo del recipiente para evitar zonas mal integradas. Es importante destacar que VytaFlex 40 tiene una viscosidad media-baja, lo que permite que las burbujas de aire suban fácilmente a la superficie y escapen con rapidez. Esto reduce considerablemente el riesgo de atrapamiento de aire que pudiera causar defectos o imperfecciones en el molde final.



Figura 35: Mezcla de los componentes A y B de VytaFlex 40

En la Figura 35 se utilizó una paleta de silicona para el mezclado, debido a que este material no reacciona con los componentes y permite una manipulación más limpia. Además, su flexibilidad facilita el raspado completo de las paredes y el fondo del recipiente, asegurando una integración uniforme sin dejar residuos sólidos adheridos.

Una vez preparada la mezcla, se vertió cuidadosamente el caucho sobre la pieza impresa en 3D, contenida dentro del recipiente adecuado, procurando que el material fluyera por toda la geometría del modelo sin atrapar aire. Para minimizar la formación de burbujas, se realizó el vertido en forma de hilo delgado desde un único punto de aplicación.



Figura 36: Vertido de la mezcla de VytaFlex 40

Debido a la baja viscosidad del VytaFlex 40, el material fluyó fácilmente por toda la geometría del molde, lo que permitió un llenado uniforme y minimizó la formación de burbujas de aire durante el vertido. Además, el vertido se realizó en forma de hilo delgado desde un único punto de aplicación, reforzando esta acción y asegurando la completa impregnación de los detalles de la pieza.



Figura 37: Molde de VytaFlex 40 partido a la mitad, mostrando la pieza vertida en su interior.

El curado del material puede realizarse en un mínimo de 16 horas; sin embargo, el fabricante recomienda un curado completo de 48 horas. En este proyecto se adoptó este tiempo recomendado, con el propósito de garantizar la estabilidad dimensional y la resistencia mecánica del molde, evitando posibles deformaciones o fallas durante las coladas posteriores.

Cabe recalcar que después de realizar un corte cuidadoso del molde, se retiró la pieza impresa en 3D, dejando listo el molde final para futuras coladas. Es importante notar que, si bien el VytaFlex 40 en estado líquido y sus vapores pueden presentar cierta toxicidad, una vez que el material ha curado completamente, su manipulación resulta segura e inofensiva.

VI-H. Preparación de la mezcla de silicona Dragon Skin 10 NV

Después de tener el molde hecho con VytaFlex 40, se preparó la silicona Dragon Skin 10 NV mezclando sus dos partes (A y B) en una proporción 1:1. La mezcla se hizo a mano durante unos tres minutos, con movimientos suaves y constantes para evitar burbujas. Este paso es importante porque la silicona es muy espesa y puede atrapar aire fácilmente, lo que podría afectar el acabado y la calidad final de la pieza.



(a) Silicona 10 NV

(b) Preparación de la mezcla 10 NV

Figura 38: Mezcla de la silicona Dragon Skin 10 NV

Durante su tiempo de trabajo, estimado entre 25 y 30 minutos a temperatura ambiente, se mantuvo la mezcla en condiciones estables para asegurar una correcta homogeneización.

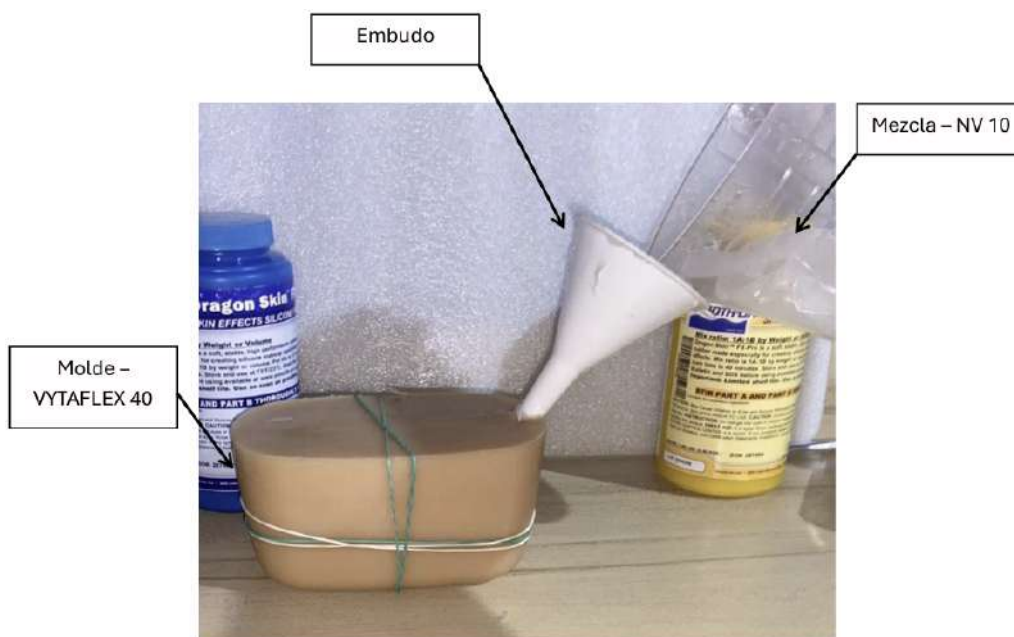


Figura 39: Vertido de la silicona

Una vez bien integrada, se vertió con cuidado en el molde. Sin embargo, debido a lo espeso del material, el aire no lograba escapar fácilmente mientras se vaciaba, lo que hacía que el proceso fuera más lento. Para ayudar con esto, se utilizó un embudo, lo que permitió guiar mejor la silicona hacia la cavidad del molde y facilitar un flujo más continuo.

VI-H1. *Fabricación de la primera réplica del molde:* En la Figura 40 se presenta la pieza fabricada con Dragon Skin 10-NV, tras un curado de 24 horas y su posterior extracción del molde de VytaFlex 40. Aunque esta pieza no formó parte del gripper definitivo, resultó fundamental durante la fase experimental, al permitir la identificación de errores en el diseño inicial y la detección de zonas susceptibles de mejora. Funcionó como una prueba piloto eficaz para evaluar tanto el comportamiento del material como la calidad del molde.



Figura 40: Pieza de silicona Dragon Skin NV10 retirada del molde flexible fabricado con VytaFlex 40.

Cabe destacar que, a pesar de no haberse aplicado desmoldante, la pieza se desprendió correctamente del molde. Esta condición se atribuye a la compatibilidad entre Dragon Skin 10 NV y VytaFlex 40, los cuales presentan una baja adhesión mutua, constituyendo una combinación adecuada para moldes flexibles de silicona. Asimismo, el acabado superficial de la pieza alcanzó un nivel de detalle elevado, demostrando que el molde reprodujo fielmente la geometría del diseño original. Estas pruebas fueron esenciales para ajustar y validar los parámetros del proceso antes de la fabricación final del gripper.

VI-I. Segundo Diseño

Una vez identificadas las áreas de mejora del primer diseño, se procedió a desarrollar un segundo diseño del gripper. Para este rediseño, se siguieron nuevamente los mismos pasos de fabricación y validación que en el diseño inicial, los cuales se muestran de manera resumida en el diagrama de flujo de la Figura 41.

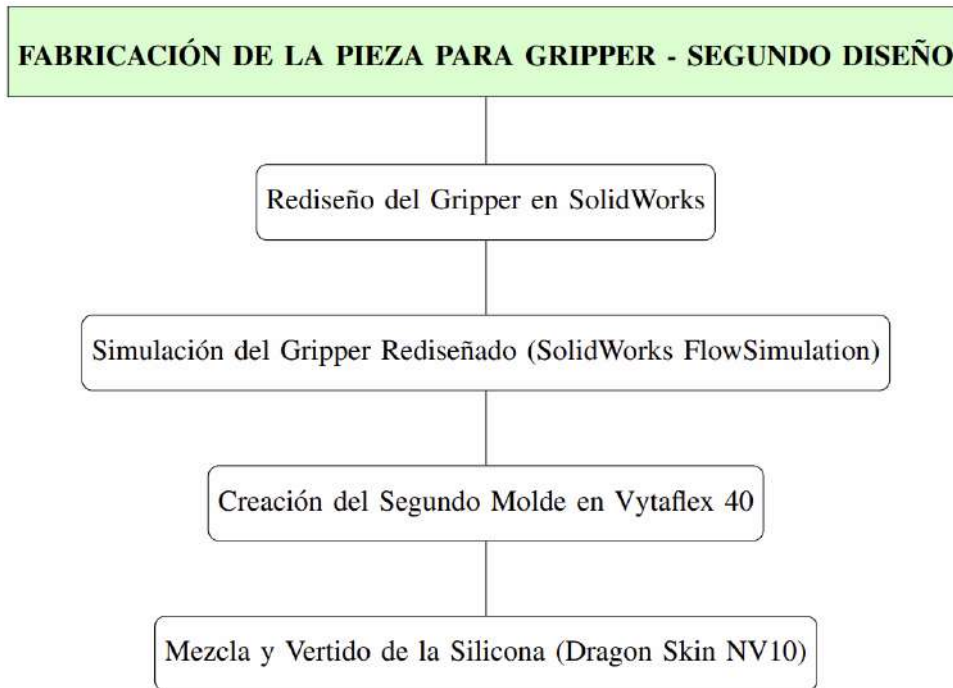


Figura 41: Diagrama de flujo del proceso de creación del segundo diseño del gripper neumático.

Después de un análisis de los resultados del primer diseño, tanto en la simulación como en el desmoldeo real, fue evidente que había aspectos importantes que necesitaban mejoras. La pieza inicial mostraba debilidad en zonas críticas, especialmente en la unión con el pistón y en la base del gripper, lo cual comprometía su estabilidad y resistencia. A partir de esas observaciones, se decidió rediseñar el gripper con cambios importantes, aprovechando lo aprendido para reforzar los puntos más vulnerables.

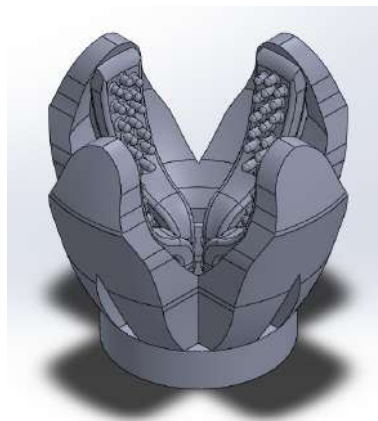
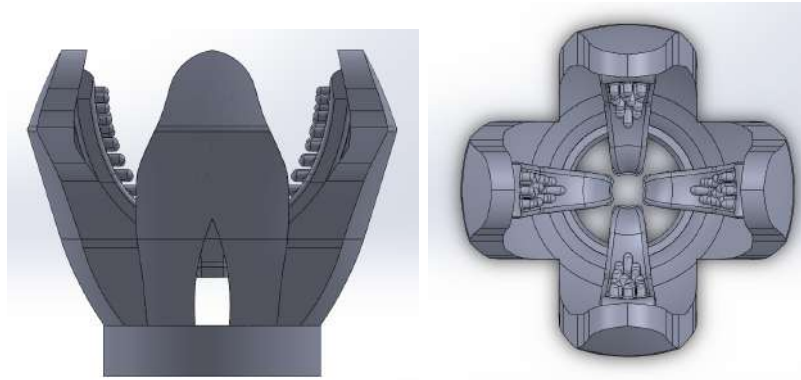


Figura 42: Vista isométrica del segundo diseño del gripper.

En esta segunda versión se amplió el tamaño de la base, lo que permitió un mejor ajuste y mayor firmeza al momento de fijarlo a la estructura. También se reforzó la zona de conexión con el pistón, aumentando el grosor en esa área que, según la simulación, estaba sometida a una gran tensión. Esto era un cambio necesario para evitar fallas futuras. Además, se añadió una textura en la superficie de contacto con la manzana, lo que ayuda a reducir el deslizamiento durante la manipulación. Todos estos ajustes hicieron que esta versión fuera mucho más robusta y funcional en comparación con la primera.



(a) Vista frontal del segundo diseño (b) Vista superior del segundo diseño del gripper

Figura 43: Vistas del segundo diseño del gripper

En la Figura 44 se evidenciaron las zonas donde los cambios implementados en el segundo diseño del gripper se hicieron más notorios. En particular, se observó la superficie con pequeñas protuberancias, diseñadas para entrar en contacto directo con las manzanas, optimizando la distribución de fuerzas durante la manipulación. Asimismo, se destacaron las extremidades de acople con el pistón, cuya geometría resultó crítica debido a que la simulación previa indicó concentraciones de tensión elevadas en estas áreas, justificando el refuerzo y ajuste del diseño.

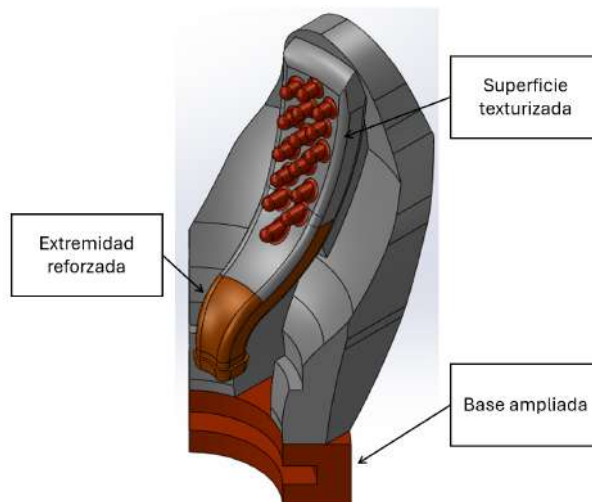


Figura 44: Vista isométrica en sección del segundo diseño del gripper.

En la Figura 44 se pueden apreciar las mejoras y cambios implementados respecto al diseño anterior, destacando optimizaciones en la geometría que buscan un mejor desempeño y reducción de concentraciones de tensión.

VI-J. Fabricación de molde Vytaflex para diseño #2

VI-J1. *Aplicación de desmoldantes del Segundo Diseño* : Una vez impresa la pieza correspondiente al nuevo diseño del gripper #2, se procedió a repetir el mismo procedimiento que en la prueba anterior. Para esta segunda versión del diseño, se aplicó nuevamente Sonite Wax en conjunto con el desmoldante en aerosol Universal Mold Release, lo que permitió mantener en óptimas condiciones la superficie del molde y garantizar un desmoldeo sin complicaciones.



Figura 45: Aplicación de desmoldantes del Segundo Diseño

VI-J2. *Segundo proceso de preparación del Vytaflex 40*: Se procedió a preparar el Vytaflex 40 para el segundo molde del gripper, siguiendo el mismo protocolo establecido en la mezcla anterior: medición precisa 1:1 de las partes A y B, homogenización completa para garantizar un curado óptimo, y vertido controlado en el modelo. Este método consistente asegura la repetibilidad y calidad en la fabricación de los moldes.



Figura 46: Componentes A y B del caucho Vytaflex 40 - Segundo Diseño

La Figura 46 muestra los componentes base del material, cuya proporción exacta es crítica para lograr un curado uniforme y estable. Una vez preparados los compuestos, se procede con la etapa de mezclado, vertido y conformación

del molde, representados en la Figura 47, donde se ilustran de manera secuencial las fases de fabricación. De esta manera, se evidencia la transición desde la preparación inicial de los reactivos hasta la obtención del molde final, listo para el posterior colado de silicona.



(a) Segunda mezcla del Vytaflex 40

(b) Inmersión de la pieza en Vytaflex



(c) Corte preciso del exceso de material con estilete de precisión

Figura 47: Segundo proceso completo de fabricación del molde con Vytaflex 40

El material se vertió meticulosamente en el molde maestro (a) con movimientos circulares para distribución uniforme, curándose a temperatura ambiente durante 48 horas (b) para garantizar propiedades óptimas. Finalizado el curado, se realizó un corte de precisión con estilete quirúrgico (c) para el desmolde, obteniendo un molde dimensionalmente exacto para el posterior vaciado de silicona. Este proceso estandarizado, aplicado consistentemente en ambos diseños, asegura repetibilidad y calidad en la fabricación de moldes funcionales.

VI-J3. *Preparación de la pieza de silicona:* El proceso mostrado en las Figuras 48 y 49 consistió en la preparación y vertido de la silicona Vytaflex 40 en el molde, repitiendo el procedimiento previamente detallado para la mezcla de Dragon Skin NV10.



(a) Vertido de silicona Vytaflex – Parte A (b) Vertido de silicona Vytaflex – Parte B

Figura 48: Proceso de vertido de la silicona Vytaflex 40 en el molde

Durante esta etapa, se vertió cuidadosamente la mezcla de ambos componentes (A y B) en el molde, aplicando la experiencia adquirida en ensayos anteriores para mejorar la técnica de colada. En particular, se realizó un hueco de mayor profundidad en el molde, lo que permitió eliminar la necesidad de un embudo; el aumento del espacio facilitó la salida del aire atrapado, evitando la formación de burbujas que anteriormente ocurrían al verter la mezcla en huecos más estrechos. Esta modificación optimizó la homogeneidad del vertido y garantizó una mejor reproducción de los detalles del molde.



(a) Mezcla final de los componentes A y B (b) Vertido final en el molde

Figura 49: Preparación y vertido de la mezcla Vytaflex 40

VI-J4. *Pieza de silicona desmoldada – Segundo diseño:* Después del proceso de curado, se procedió al desmolde de la pieza de silicona del segundo diseño. La Figura 50 muestra la pieza una vez retirada del molde de Vytaflex, evidenciando la fidelidad con respecto al modelo original.



Figura 50: Pieza de silicona del segundo diseño desmoldada del molde de Vytaflex.

VI-J5. *Adhesión de componentes de silicona con Sil-Poxy:* Tras completar el moldeado y desmolde de las piezas del segundo diseño del gripper, se procedió al ensamblaje final utilizando el adhesivo Sil-Poxy de Smooth-On. Este producto, desarrollado específicamente para unir superficies de silicona



Figura 51: Primera aplicación del SIL-POXY.

El proceso de unión consistió en aplicar cuidadosamente el adhesivo Sil-Poxy sobre los bordes de contacto entre las piezas, seguido de un alineamiento preciso de las secciones del gripper. La manipulación se realizó dentro del tiempo de trabajo útil del adhesivo, estimado en aproximadamente 5 minutos, lo cual permitió realizar ajustes finos

durante la aplicación. Una vez posicionadas correctamente las piezas, se mantuvo la unión sin movimiento durante el tiempo inicial de 12 minutos a una temperatura ambiente de $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$.



Figura 52: Primera unión de las dos secciones del gripper.

Para asegurar una adhesión completa y alcanzar la resistencia mecánica máxima del conjunto, se dejó reposar el gripper durante al menos 24 horas. Este periodo adicional de curado es esencial para garantizar una fijación fuerte y duradera, considerando que el gripper estará sometido a deformaciones cíclicas durante su operación.



(a) Segunda aplicación del SIL-POXY

(b) Última aplicación del SIL-POXY

(c) Unión completa del gripper

Figura 53: Aplicación de adhesivo SIL-POXY para la unión de piezas de silicona

Unión final de silicona en el ensamble del gripper: Tras finalizar el proceso de adhesión con Sil-Poxy, se obtuvo el ensamblaje definitivo de las piezas de silicona, listo para su integración en la estructura mecánica del gripper. A

continuación, se presentan las vistas del resultado final.



(a) Vista isométrica - ensamblaje del gripper

(b) Vista frontal - ensamblaje del gripper

Figura 54: Ensamblaje del gripper con adhesivo SIL-POXY

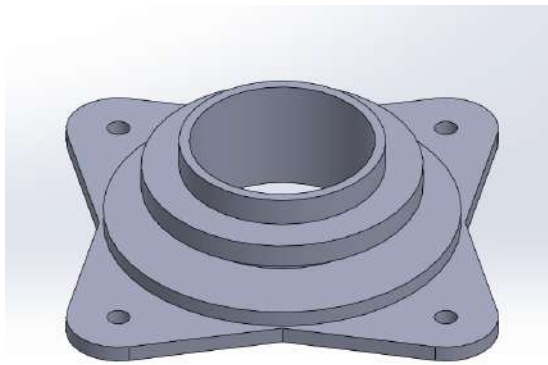
Como se observa en la Figura 54, el adhesivo Sil-Poxy cumplió su función como pegamento especializado para unir las secciones de silicona NV10 del gripper. Su aplicación permitió una adhesión uniforme y precisa, logrando que el ensamblaje final se ajustara al diseño modelado en SolidWorks, asegurando que las dimensiones, geometría y alineación de los dedos se mantuvieran según los parámetros de diseño y garantizando un comportamiento funcional óptimo durante las pruebas de manipulación.

VI-K. Diseño y fabricación de la base del gripper

VI-K1. *Modelado computacional de la base:* Se desarrolló un modelo CAD de la base y elementos de sujeción del gripper empleando el software SolidWorks, considerando las dimensiones del cuerpo de silicona y los puntos de acoplamiento al brazo robótico KUKA KR R600. El diseño contempló elementos de fijación, canales para el paso de tubos neumáticos y geometrías adaptadas al proceso de fabricación aditiva.

Cada pieza fue optimizada en función de su función mecánica, precisión dimensional requerida y método de fabricación. En las siguientes secciones se describen las bases principales, con sus vistas isométricas, croquis acotados y especificaciones de material y proceso. Al final se incluye una vista explosionada del conjunto.

Base 1 — Placa inferior de acoplamiento: La base del gripper fue diseñada para fijarse a la parte inferior. Su función principal es conectar y asegurar el conjunto. Es por eso que cuenta con orificios para pernos y alojamientos precisos, fabricado con un material de resina fotopolimérica por sus ventajas en precisión dimensional y el buen acabado superficial, lo que permite crear los alojamientos adaptativos del gripper. Para garantizar su seguridad, la pieza se somete a un post-curado completo con luz ultravioleta (UV).



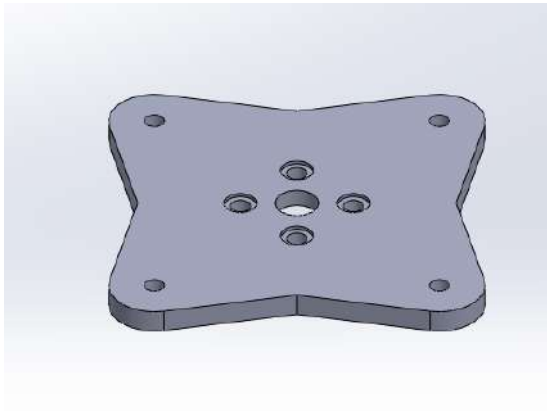
(a) Modelo CAD



(b) Base impresa

Figura 55: Base 1 — Placa inferior de acoplamiento del gripper

Base 2 — Placa de acople al pistón: Diseñada para fijar la parte superior del pistón, incorporando perforaciones para la conexión con la Base 1. Se utilizó resina fotopolimérica, priorizando la exactitud para la correcta alineación con la Base 1. La capacidad de la resina para reproducir detalles finos garantizó un ajuste sin holguras en la interfaz con el pistón, minimizando desalineaciones y desgaste prematuro.



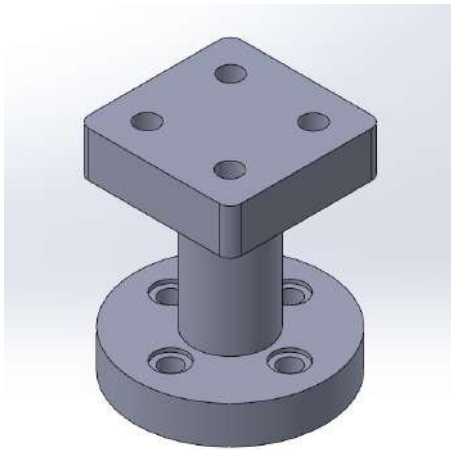
(a) Modelo CAD



(b) Base impresa

Figura 56: Base 2 — Placa de acople al pistón

Base 3 — Placa de conexión principal: Elemento estructural que conecta directamente el brazo robótico con la parte inferior del gripper. Presenta orificios para que la pieza soporte la mayor carga mecánica durante el funcionamiento. Se utilizó filamento PETG debido a su mayor resistencia mecánica y tenacidad en comparación con la resina, así como su menor fragilidad ante impactos.



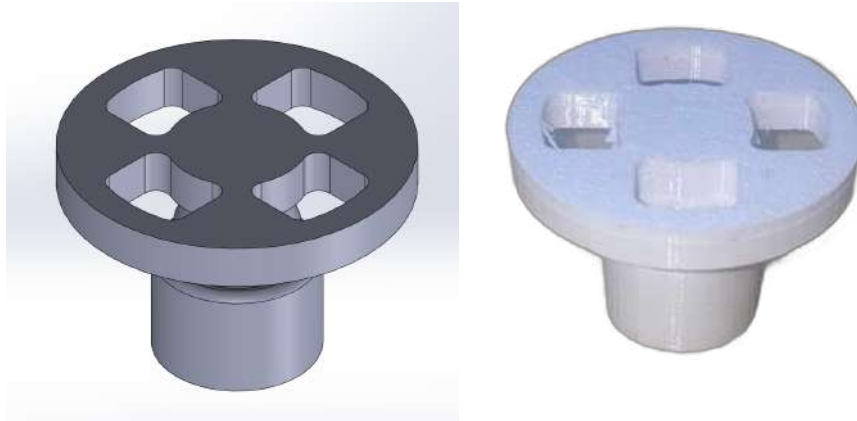
(a) Modelo CAD



(b) Base impresa

Figura 57: Base 3 — Placa de conexión principal

Base 4 — Pieza de enlace al pistón: componente que conecta el pistón con el sistema de tracción del gripper. Incluye un alojamiento en la tuerca, para la reducción de la sección transversal de la pieza. Se imprimió en resina para asegurar alta precisión en el alojamiento de la tuerca y en las dimensiones generales. No se empleó roscado mecanizado ya que, dada la pequeña escala de la pieza y la menor resistencia de la resina en paredes delgadas, para no dañar la estructura.

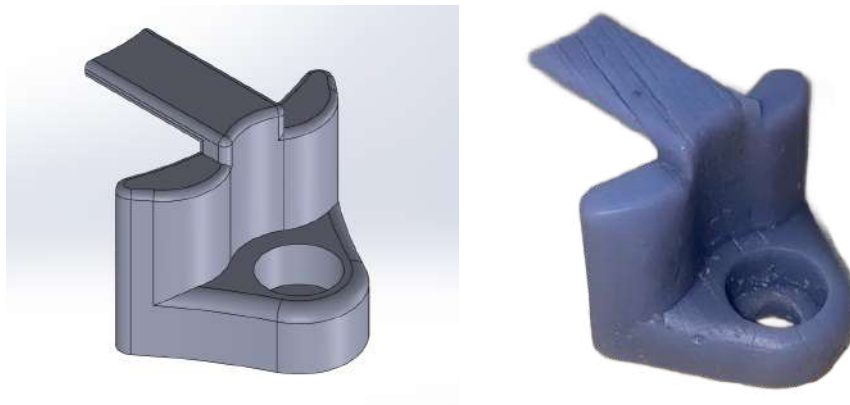


(a) Modelo CAD

(b) Base impresa

Figura 58: Base 4 — Pieza de enlace al pistón

Base 5 — Soportes laterales: Conjunto de cuatro piezas distribuidas alrededor del gripper cuya función es impedir el desplazamiento o inclinación lateral durante el funcionamiento. Se fijan sobre la Base 1 y atraviesan hasta la Base 2 mediante los mismos pernos. Se optó por resina debido a la complejidad geométrica y las curvas de pequeño radio presentes en el diseño. La resina permitió reproducir con precisión estas formas sin necesidad de soporte adicional excesivo y con un acabado superficial apto para el correcto acoplamiento lateral.



(a) Modelo CAD

(b) Base impresa

Figura 59: Base 5 — Soportes laterales del gripper

Ensamble del gripper: En la Fig 61 se muestra el ensamble de las piezas detalladas anteriormente.

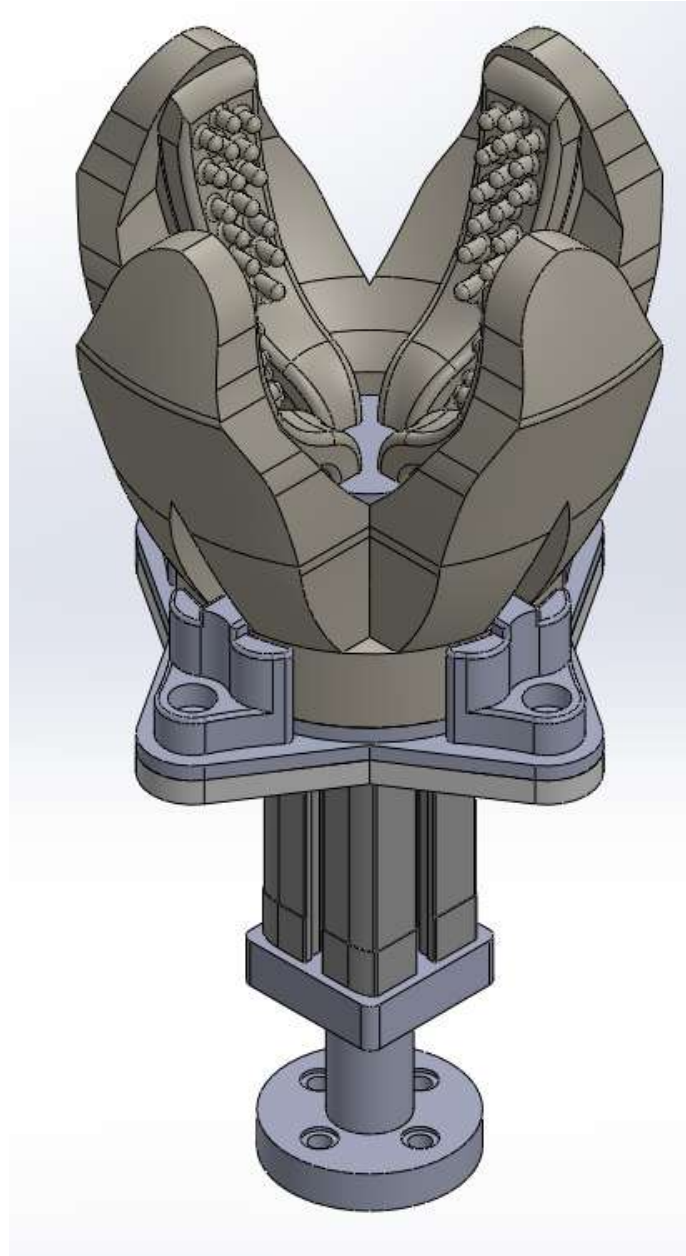


Figura 60: Ensamble final del gripper modelado en SolidWorks.

Vista explosionada de ensamble del gripper: Para mayor detalle del ensamblaje, se incluye la vista explosionada de la pieza Vytaflex, mostrando cómo se integran las secciones del gripper (Fig. 60).

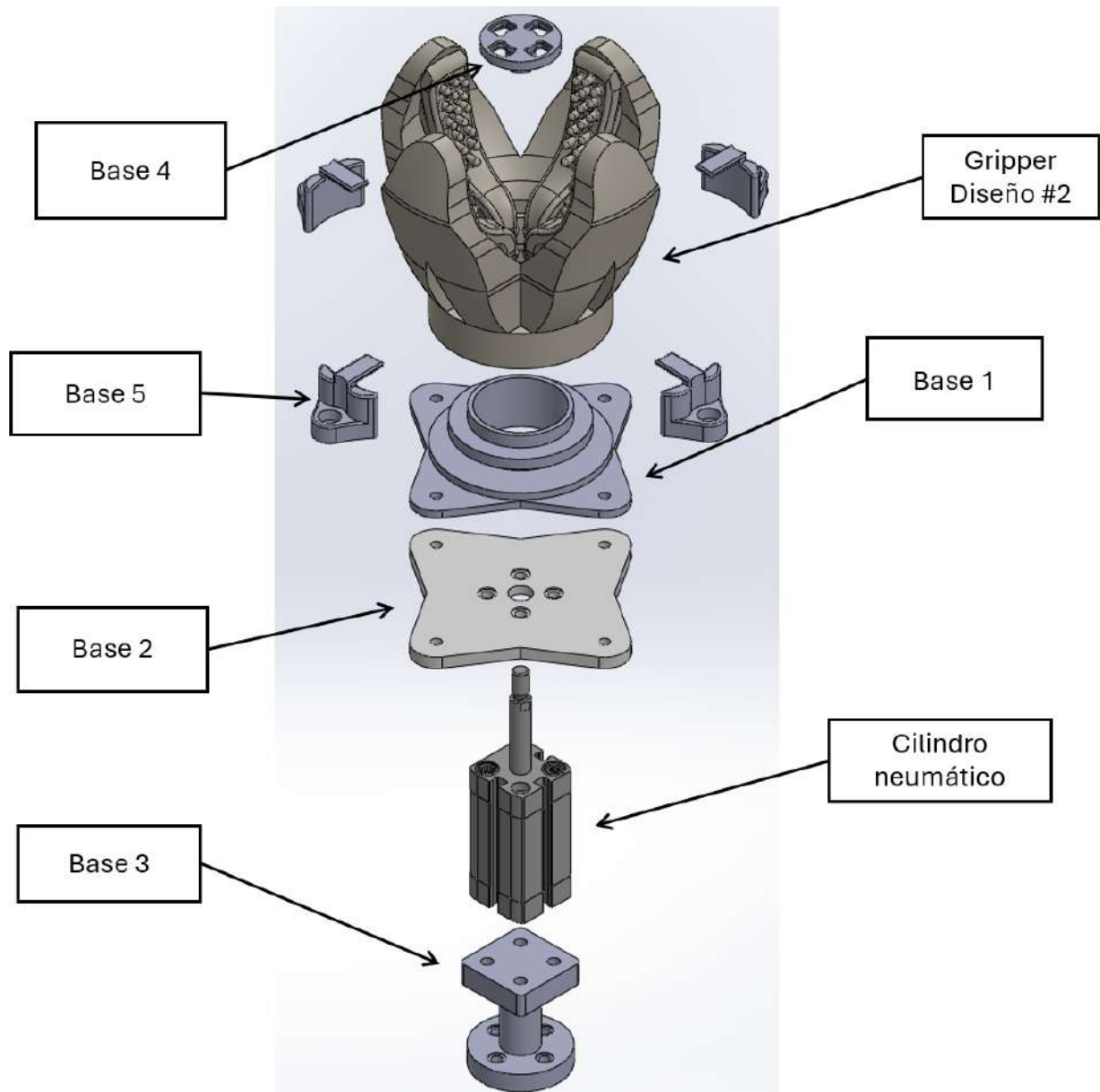


Figura 61: Vista explosionada de la base en el ensamble final del gripper.

VI-L. Ensamblaje e instalación del gripper

VI-L1. *Montaje del gripper en el brazo robótico:* El gripper se integró al manipulador industrial de seis ejes KUKA KR 4 R600, el cual ofrece alta precisión y versatilidad en espacios reducidos. Este robot cuenta con una capacidad de carga de 4 kg, un alcance de 600 mm y una repetibilidad de ± 0.02 mm, permitiendo ejecutar trayectorias complejas y orientar libremente el efector final, esencial la manipulación de manzanas. Para la fijación se emplearon las bases adaptadoras diseñadas previamente, asegurando un acoplamiento preciso del gripper al efector final. Como se aprecia en la Figura 62, el gripper queda listo para su conexión al sistema neumático, con los dedos de silicona preparados para el agarre controlado de frutas.



Figura 62: Acoplamiento del gripper a la base adaptadora según el diseño previsto.

VI-M. Conexión de válvulas y mangueras

En la instalación neumática se incorporó una válvula direccional 5/2 (Figura 63), que regula la entrada y salida de aire al pistón neumático mediante racores para manguera de 4 mm, acompañados de reguladores de caudal, con el fin de controlar la velocidad de desplazamiento y evitar cierres bruscos del gripper (Figura 63).



Figura 63: Elementos neumáticos principales y conexión al pistón

Para permitir la activación eléctrica del gripper, se integró la bobina solenoide Festo MSFW-34-420, conectada a la electroválvula 5/2 (Figura 64b). Este dispositivo posibilita el control remoto del flujo de aire, habilitando la

apertura o cierre del pistón mediante un interruptor externo, lo que facilita la ejecución de pruebas y ajustes sin depender exclusivamente del sistema automatizado del brazo robótico (Figura 64a).



(a) Bobina solenoide Festo MSFW-34-420 (b) Integración de la bobina con la electroválvula

Figura 64: Activación eléctrica del sistema neumático

VI-N. Calibración e implementación del sensor de fuerza

Para la calibración del sensor de fuerza B0DD45J4HB se buscó obtener una relación precisa entre las lecturas en unidades ADC y la fuerza aplicada sobre el sensor. Este proceso es fundamental para garantizar mediciones confiables durante la manipulación de frutas, evitando sobrecargas o daños.

Para ello, se realizaron mediciones utilizando pesos conocidos, verificados con una balanza digital, registrando la señal correspondiente en unidades ADC para cada peso. Los datos obtenidos se organizaron en una tabla de correspondencia, y registrado en Matlab.

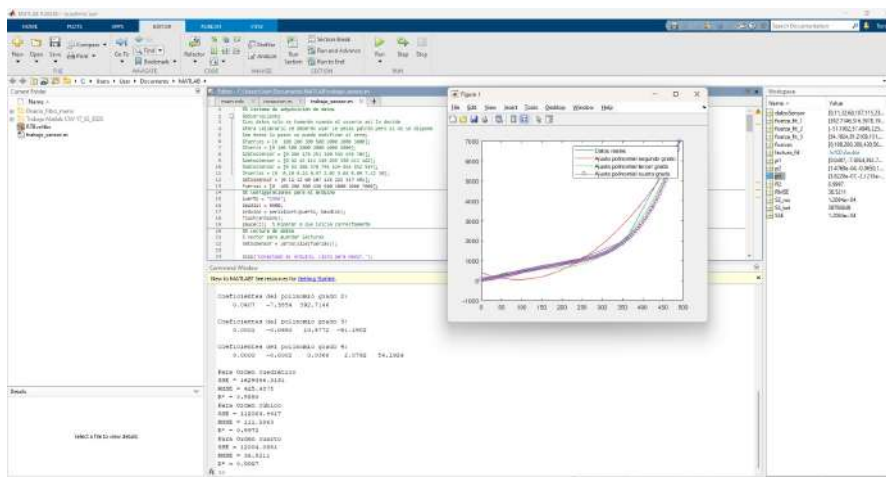


Figura 65: Tabla de lecturas obtenidas durante la calibración del sensor de fuerza y la correspondiente fuerza aplicada.

Con los datos recopilados, se aplicó un ajuste polinomial para relacionar la lectura del sensor (x) con la fuerza aplicada (y), empleando polinomios de grado 2, 3 y 4. Los coeficientes a_0, a_1, \dots, a_n se calcularon mediante la función `polyfit` de MATLAB. Posteriormente, se utilizó `polyval` para estimar la fuerza correspondiente a cualquier lectura dentro del rango calibrado:

$$y = a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + \dots + a_1 x + a_0 \quad (8)$$

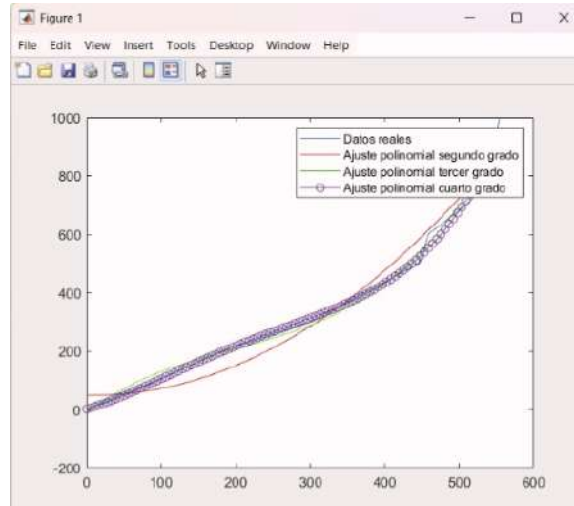


Figura 66: Comparación entre curvas polinómicas ajustada en MATLAB.

En la Figura 66 se muestran las curvas polinómicas ajustadas de segundo, tercero y cuarto grado. Se observa que la curva de cuarto grado es la que mejor se aproxima a las mediciones reales, por lo que fue seleccionada para la implementación en el sistema. Este ajuste garantiza una conversión más precisa de las lecturas ADC a valores de fuerza.

Para implementar la estimación de fuerza en tiempo real, los coeficientes obtenidos se incorporaron en el código de Arduino, siguiendo los siguientes pasos:

1. Lectura del sensor (valor ADC 0–1023).
2. Cálculo de la fuerza en Newtons mediante:

$$F_N = ax^4 + bx^3 + cx^2 + dx + e \quad (9)$$

3. Conversión a gramos:

$$F_g = \frac{F_N}{0,0098067} \quad (10)$$

4. Visualización en el monitor serial (Newtons y gramos).
5. Ajuste de valores negativos a cero.

Este procedimiento permite obtener una medición directa y confiable de la fuerza de agarre, garantizando la manipulación segura de las frutas. Como se observa en la Figura 67, el código desarrollado permitió verificar la correspondencia entre las lecturas del sensor y los valores de fuerza en MATLAB. En un rango de 100 a 500 g, las estimaciones obtenidas fuera de este rango tienden a presentar una ligera subestimación (fenómeno conocido

como *signal saturation* o pérdida de linealidad). Dado que los ensayos experimentales no superaron los 500 g, manteniéndose dentro del rango seguro y confiable de medición.

```

%#codegen
function fuerza = calcularFuerza(lectura);
%#noclobber
%#codegen

// Mostrar resultados
Serial.print("Lectura ADC: ");
Serial.print(lectura);
Serial.println(" -> Fuerza estimada: ");
Serial.print(fuerza);
Serial.println(" N");

//float fuerza_gramos = calcularFuerza_g(lectura);
Serial.print(" | Fuerza en gramos estimada: ");
Serial.print(fuerza_gramos);
Serial.println(" gramos fuerza");
delay(500);

// Función para calcular la fuerza a partir de la lectura usando ajuste de grado 4
float calcularFuerza(float lectura) {
float x = (float)lectura;
float fuerza = a*pow(x, 4) + b*pow(x, 3) + c*pow(x, 2) + d*x + e;
}

```

Output: Serial Monitor x

```

Mensaje (Mensaje serial) mensaje de Arduino (Arduino Uno) en COM4
Lectura ADC: 445 -> Fuerza estimada: 2.35 N | Fuerza en gramos estimada: 232.430 gramos fuerza
Lectura ADC: 234 -> Fuerza estimada: 2.35 N | Fuerza en gramos estimada: 232.430 gramos fuerza
Lectura ADC: 233 -> Fuerza estimada: 1.88 N | Fuerza en gramos estimada: 187.04 gramos fuerza
Lectura ADC: 204 -> Fuerza estimada: 1.36 N | Fuerza en gramos estimada: 133.04 gramos fuerza
Lectura ADC: 202 -> Fuerza estimada: 1.74 N | Fuerza en gramos estimada: 171.04 gramos fuerza
Lectura ADC: 148 -> Fuerza estimada: 1.28 N | Fuerza en gramos estimada: 125.04 gramos fuerza
Lectura ADC: 153 -> Fuerza estimada: 1.17 N | Fuerza en gramos estimada: 115.04 gramos fuerza
Lectura ADC: 155 -> Fuerza estimada: 1.17 N | Fuerza en gramos estimada: 115.04 gramos fuerza
Lectura ADC: 143 -> Fuerza estimada: 1.22 N | Fuerza en gramos estimada: 119.04 gramos fuerza
Lectura ADC: 5 -> Fuerza estimada:

```

Figura 67: Prueba de funcionamiento del código de estimación de fuerza en MATLAB y su correspondencia con la lectura en tiempo real.

VI-Ñ. Simulación de Trayectoria para el Brazo Robótico en RoboDK

Para la simulación de la manipulación de manzanas con el soft gripper neumático, se utilizó el software RoboDK, el cual permite modelar y programar trayectorias de brazos robóticos industriales.

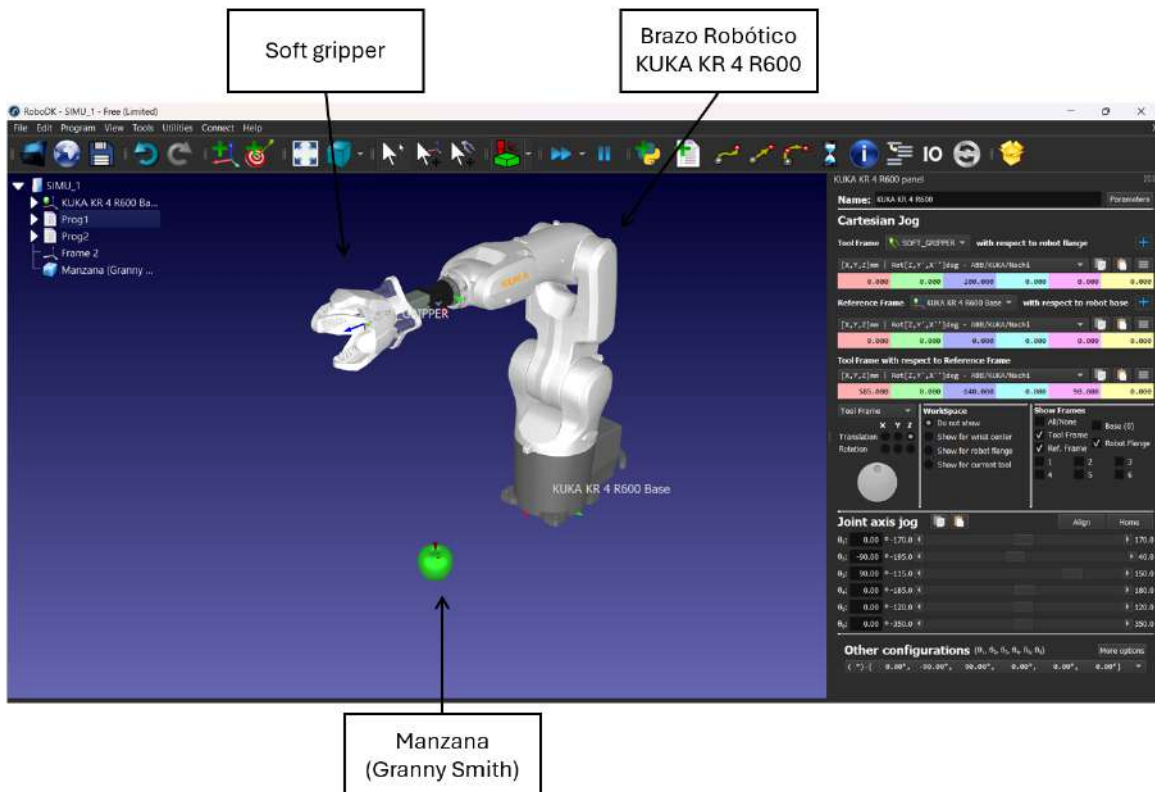


Figura 68: Simulación en RoboDK del brazo KUKA KR 4 R600 con el soft gripper y la manzana *Granny Smith*.

En este caso, se implementó el brazo robótico KUKA KR 4 R600 junto con el modelo STL del soft gripper acoplado, y se colocó un objeto representando una manzana Granny Smith para evaluar la interacción durante la rutina de agarre. La simulación permite planificar movimientos precisos y asegurar que la fruta no sufra colisiones ni desplazamientos inesperados.

Simulación de Trayectoria del Brazo Robótico con Visualización de Targets en RoboDK

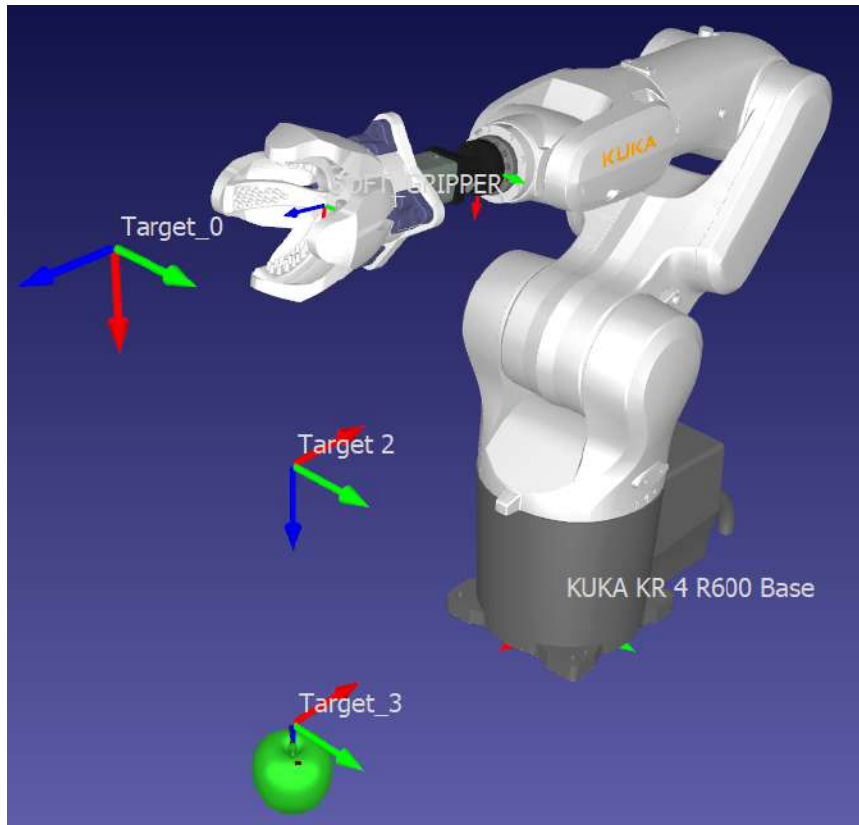


Figura 69: Definición de targets en RoboDK.

Para los tramos de movimiento del brazo robótico, en la Figura 69 se visualizan los targets, que representan los puntos que constituyen la trayectoria programada. Estos puntos serán recorridos por el efector final siguiendo la secuencia de movimientos planificados, asegurando que el robot ejecute la rutina con precisión y evitando colisiones durante la manipulación.

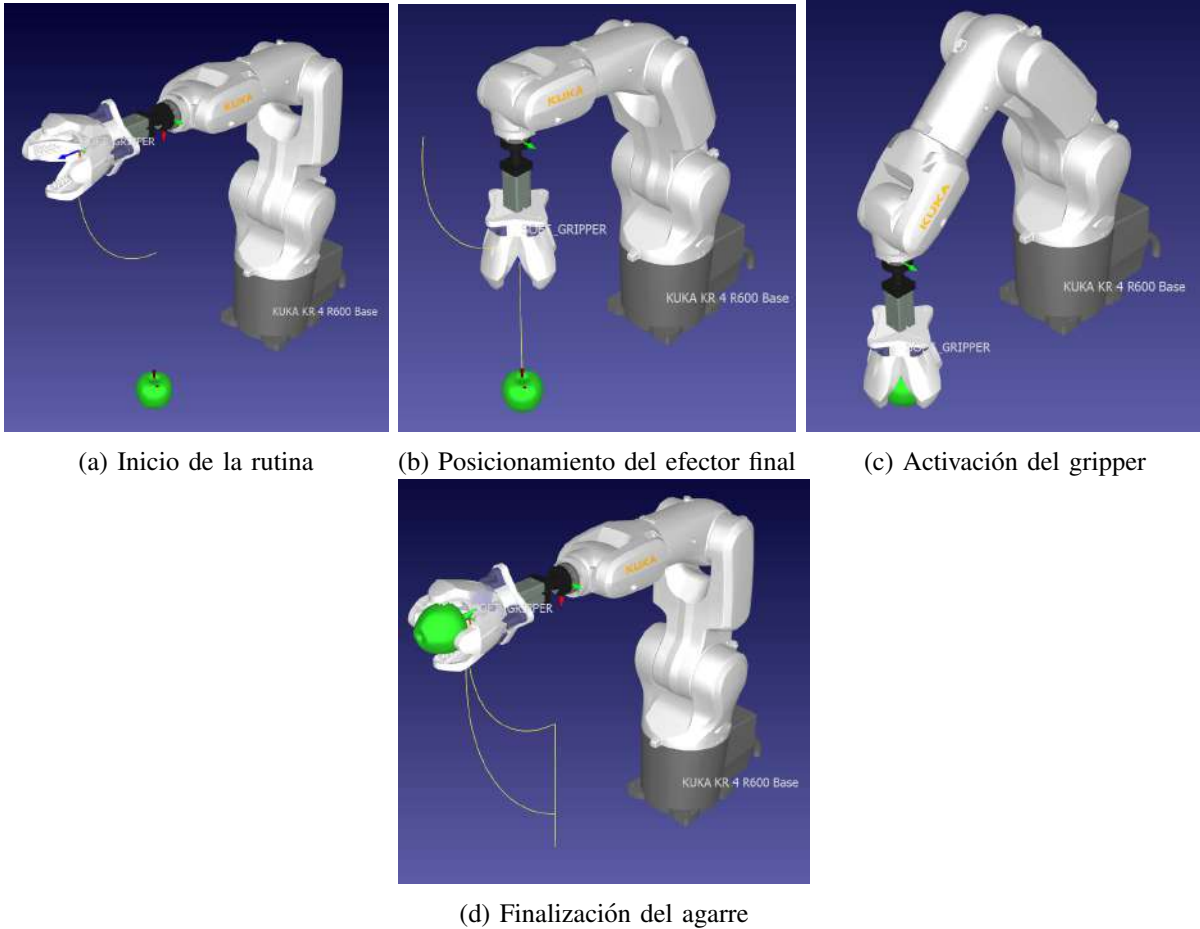


Figura 70: Simulación de la rutina de movimiento para pruebas de agarre con el robot KUKA KR 4 R600 en RoboDK.

En la figura anterior se observa la trayectoria de la manzana en RoboDK, donde se visualizan las líneas de los tramos que componen el movimiento programado. Para garantizar un agarre seguro, se emplean tanto Joint Movements como Linear Movements, permitiendo que el efector final se desplace siguiendo la cinemática del robot sin colisiones. De esta forma, la manzana mantiene su posición estable durante la manipulación, evitando desplazamientos no deseados una vez que ha sido agarrada o al ser desplazada a la ubicación de entrega.

VI-O. Pruebas de agarre con manzana

Con el propósito de evaluar la capacidad del gripper desarrollado, se implementó una rutina de posicionamiento del brazo robótico para ejecutar maniobras de manipulación sobre una manzana Granny Smith ubicada en una superficie fija a baja altura, simulando un escenario real de trabajo.



(a) Inicio de la rutina

(b) Posicionamiento

(c) Activación del gripper



(d) Levantamiento

Figura 71: Secuencia de la rutina de agarre con manzana (Granny Smith).

El gripper, previamente acoplado al brazo robótico, descendió desde una posición superior hasta establecer contacto con la fruta, aplicando la presión neumática definida. Durante la rutina se verificó la efectividad del sistema para sujetar la manzana de manera estable, evitando daños en su superficie y asegurando una liberación controlada. La Figura 71 muestra una secuencia visual del procedimiento realizado.

VI-01. *Pruebas de manipulación con otras frutas:* Con el objetivo de ampliar la evaluación del gripper neumático, se realizaron ensayos de manipulación utilizando otras frutas, como naranjas y mandarinas.



(a) Manipulación de una naranja con el gripper neumático.

(b) Manipulación de una mandarina con el gripper neumático.

Figura 72: Ensayos de manipulación de frutas utilizando el gripper neumático acoplado al brazo robótico.

Estas pruebas permitieron observar el comportamiento del sistema frente a objetos de diferentes tamaños y formas, lo cual es fundamental para la comparación de desempeño y la validación de su potencial aplicabilidad en la manipulación de distintos tipos de frutas. La Figura 72 presenta una secuencia de estas rutinas de manipulación.

VI-O2. *Pruebas de agarre con brazo robótico a velocidad moderada:* Para evaluar la efectividad del gripper suave se realizaron pruebas de agarre repetitivas sobre diferentes frutas. En cada intento, las frutas se colocaron sobre una superficie plana y estable, mientras que el gripper descendía desde una posición superior de forma vertical, simulando una aproximación controlada desde arriba. Este procedimiento permitió estandarizar las condiciones de prueba y garantizar la repetibilidad de los resultados.

Tabla V: Pruebas experimentales de 30 intentos de agarre con el gripper neumático sobre diversas frutas, operando a velocidad moderada.

INTENTOS DE AGARRE CON VELOCIDAD MODERADA					
Intento	Manzana pequeña 116 [g]	Manzana mediana 150 [g]	Manzana grande 201 [g]	Mandarina 80 [g]	Naranja 150 [g]
1	Éxito	Éxito	Éxito	Éxito	Éxito
2	Éxito	Éxito	Éxito	Éxito	Éxito
3	Éxito	Éxito	Éxito	Éxito	Éxito
4	Éxito	Éxito	Éxito	Éxito	Éxito
5	Éxito	Éxito	Éxito	Éxito	Éxito
6	Éxito	Éxito	Éxito	Éxito	Éxito
7	Éxito	Éxito	Éxito	Éxito	Éxito
8	Éxito	Éxito	Éxito	Éxito	Éxito
9	Éxito	Éxito	Éxito	Éxito	Fallo
10	Éxito	Éxito	Fallo	Éxito	Éxito
11	Éxito	Fallo	Éxito	Éxito	Éxito
12	Éxito	Éxito	Éxito	Fallo	Éxito
13	Éxito	Éxito	Éxito	Éxito	Éxito
14	Éxito	Éxito	Éxito	Éxito	Éxito
15	Éxito	Éxito	Éxito	Éxito	Éxito
16	Éxito	Éxito	Éxito	Éxito	Éxito
17	Éxito	Éxito	Éxito	Éxito	Éxito
18	Éxito	Éxito	Éxito	Éxito	Éxito
19	Éxito	Éxito	Éxito	Éxito	Éxito
20	Éxito	Éxito	Éxito	Éxito	Éxito
21	Éxito	Éxito	Éxito	Éxito	Éxito
22	Éxito	Éxito	Éxito	Éxito	Fallo
23	Éxito	Éxito	Éxito	Éxito	Éxito
24	Éxito	Éxito	Éxito	Éxito	Éxito
25	Éxito	Éxito	Fallo	Éxito	Éxito
26	Éxito	Éxito	Éxito	Éxito	Éxito
27	Éxito	Éxito	Éxito	Éxito	Éxito
28	Fallo	Éxito	Éxito	Fallo	Éxito
29	Éxito	Fallo	Éxito	Éxito	Fallo
30	Éxito	Éxito	Éxito	Éxito	Éxito
Éxitos totales	29/30	28/30	28/30	28/30	27/30
Efectividad	96.7 %	93.3 %	93.3 %	93.3 %	90.0 %
Promedio general	93.3 % de efectividad en condiciones de velocidad moderada				

VI-O3. *Pruebas de agarre a velocidad máxima:* En esta etapa experimental se evaluó el desempeño del gripper neumático cuando el brazo robótico operó a una velocidad significativamente mayor, con el fin de analizar la estabilidad y consistencia del agarre bajo condiciones más exigentes. Al igual que en la fase anterior, todas las pruebas se realizaron con las frutas dispuestas sobre una superficie plana, y el gripper descendió desde la parte superior para ejecutar la acción de manipulación.

Tabla VI: Pruebas experimentales de 30 intentos de agarre con el gripper neumático sobre diversas frutas, operando a velocidad máxima.

INTENTOS DE AGARRE CON VELOCIDAD MÁXIMA					
Intento	Manzana pequeña 116 [g]	Manzana mediana 150 [g]	Manzana grande 201 [g]	Mandarina 80 [g]	Naranja 179 [g]
1	Éxito	Éxito	Éxito	Fallo	Éxito
2	Fallo	Éxito	Éxito	Éxito	Éxito
3	Fallo	Éxito	Fallo	Éxito	Éxito
4	Éxito	Fallo	Éxito	Fallo	Éxito
5	Éxito	Éxito	Éxito	Éxito	Fallo
6	Fallo	Éxito	Éxito	Éxito	Éxito
7	Éxito	Éxito	Fallo	Éxito	Éxito
8	Éxito	Éxito	Éxito	Fallo	Éxito
9	Fallo	Éxito	Éxito	Éxito	Fallo
10	Éxito	Éxito	Éxito	Éxito	Éxito
11	Éxito	Fallo	Éxito	Fallo	Éxito
12	Fallo	Éxito	Éxito	Éxito	Éxito
13	Éxito	Éxito	Fallo	Éxito	Fallo
14	Éxito	Éxito	Éxito	Éxito	Éxito
15	Éxito	Éxito	Éxito	Éxito	Éxito
16	Fallo	Éxito	Éxito	Fallo	Éxito
17	Éxito	Éxito	Éxito	Éxito	Fallo
18	Fallo	Fallo	Éxito	Éxito	Éxito
19	Éxito	Éxito	Éxito	Éxito	Éxito
20	Éxito	Éxito	Fallo	Fallo	Éxito
21	Éxito	Éxito	Éxito	Éxito	Éxito
22	Éxito	Éxito	Éxito	Éxito	Fallo
23	Fallo	Éxito	Éxito	Éxito	Éxito
24	Éxito	Fallo	Éxito	Fallo	Éxito
25	Éxito	Éxito	Éxito	Éxito	Éxito
26	Fallo	Éxito	Fallo	Éxito	Éxito
27	Éxito	Éxito	Éxito	Éxito	Fallo
28	Fallo	Éxito	Éxito	Éxito	Éxito
29	Éxito	Éxito	Éxito	Fallo	Éxito
30	Fallo	Éxito	Éxito	Éxito	Éxito
Éxitos totales	10/30	12/30	11/30	9/30	13/30
Porcentaje de éxito	33.3 %	40.0 %	36.7 %	30.0 %	43.3 %
Promedio general	36.7 % de éxito en condiciones de velocidad máxima				

VII. RESULTADOS

VII-1. Resultados del molde y pieza - Segundo Diseño: La pieza de silicona NV10 se creó usando un molde hecho de VytaFlex 40. Como el VytaFlex 40 tiene baja viscosidad, se esparció de manera uniforme por todo el molde, evitando burbujas. El material se vertió con cuidado desde un solo punto para asegurar que llenara por completo todos los detalles de la pieza.



Figura 73: Pieza de silicona NV10 obtenida con el molde de VytaFlex 40 del segundo diseño.

El curado del molde se hizo durante 48 horas para que tuviera la rigidez y estabilidad necesarias y no se deformara al verter la silicona. Después de desmoldar con cuidado, se obtuvo la pieza final lista para ser usada en el gripper. Es importante saber que, una vez curados, tanto el VytaFlex 40 como la pieza de silicona NV10 pueden manipularse sin ningún riesgo para el usuario.

VII-2. Resultado pieza de silicona en molde Vytaflex - Segundo Diseño: Tras completar el proceso de moldeo con silicona NV10 y considerando el tiempo aproximado de curado de 16 horas recomendado por el fabricante, se procedió a la unión de las piezas mediante adhesivo SIL-POXY. A continuación, se muestran las etapas finales de aplicación del adhesivo:

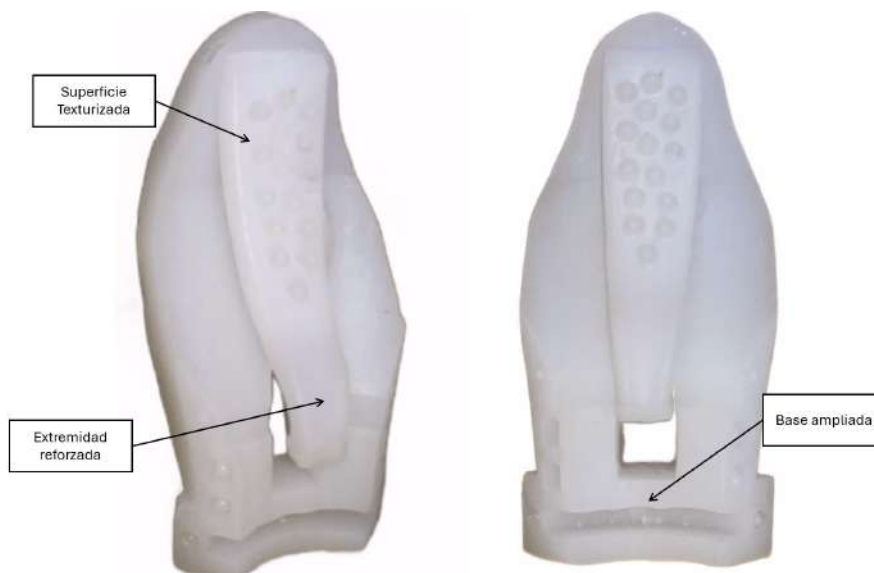


Figura 74: Pieza de silicona NV10 con molde Vytaflex

El resultado fue el esperado, gracias a la experiencia obtenida en la prueba anterior con el molde del primer diseño. La pieza de silicona NV10 obtenida con el segundo diseño presentó mejoras significativas en su geometría y funcionalidad. Las superficies de contacto mostraron protuberancias más grandes, optimizando la distribución de fuerzas sobre la fruta, mientras que las extremidades y la base se adaptaron mejor al actuador neumático, asegurando un montaje más estable. Además, la experiencia en el vertido y curado permitió ajustar el molde para facilitar el flujo del material y reducir la formación de burbujas, logrando una reproducción más fiel de la geometría prevista.

Por otro lado, aunque la simulación del primer diseño del gripper no registró tensiones significativas en la base del gripper, la fabricación del molde en silicona permitió evidenciar que su reducido tamaño dificultaba la integración y adaptación del gripper a esta sección. Esta observación confirmó la necesidad de ajustes de diseño en la base para facilitar el moldeo y garantizar un comportamiento funcional adecuado del dispositivo.

VII-A. Resultados análisis estático - Segundo Diseño

Después de realizar mejoras en el primer prototipo, se implementaron cambios estructurales en el segundo diseño del gripper. Entre las modificaciones más relevantes se encuentra el aumento del grosor en la zona de contacto con el pistón, con el objetivo de reducir la concentración de esfuerzos y mejorar la resistencia mecánica durante la manipulación. Posteriormente, se llevaron a cabo simulaciones estáticas para evaluar el comportamiento del nuevo diseño bajo las mismas condiciones de carga.

Tensiones de Von Mises: En la simulación se obtuvo un valor mínimo de tensión de $3,321 \times 10^2$ [N/m²] (Nodo: 53214) y un valor máximo de $3,662 \times 10^7$ [N/m²] (Nodo: 89703). El incremento de grosor en la zona de apoyo con el pistón permitió que las tensiones máximas se distribuyeran de manera más uniforme, reduciendo la concentración en zonas críticas. Esto implica que, a diferencia del diseño anterior, el nuevo modelo presenta una menor probabilidad de sufrir deformaciones permanentes o fallos prematuros en la interfaz de acoplamiento.

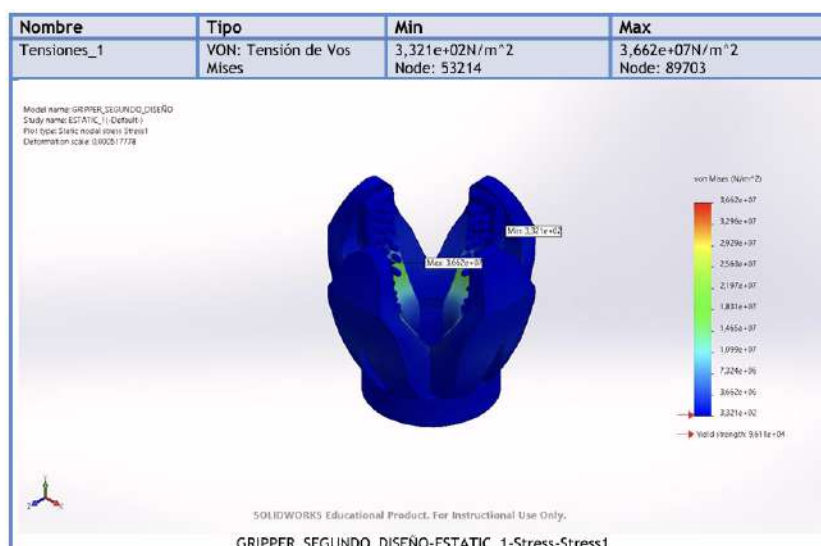


Figura 75: Distribución de tensiones de Von Mises en el segundo diseño del gripper.

Desplazamiento total: El análisis de desplazamientos mostró un valor máximo de $3,796 \times 10^4$ [mm] (Nodo: 273484), localizado en la parte más flexible del dedo, donde se concentra la deformación para permitir el agarre. Este desplazamiento elevado es esperado y necesario para la funcionalidad del gripper, ya que permite adaptarse a la geometría del objeto sin comprometer la integridad de la estructura.

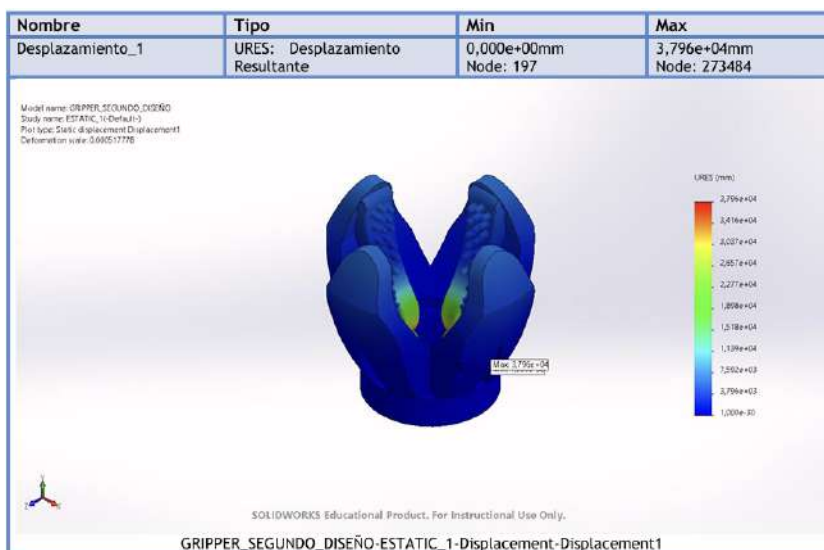


Figura 76: Distribución de desplazamientos en el segundo diseño del gripper.

Deformación unitaria: En cuanto a la deformación unitaria, los resultados mostraron un valor mínimo de $2,296 \times 10^{-3}$ (Elemento: 143468) y un valor máximo de $2,953 \times 10^2$ (Elemento: 56041). Estas deformaciones son adimensionales, ya que representan una relación entre el cambio de longitud y la longitud original, por lo que no poseen unidades. Se concentran principalmente en la zona de flexión del dedo, lo que indica que el material está trabajando dentro de su rango elástico y permite el movimiento adaptativo característico de un gripper de robótica suave. El diseño mantiene la capacidad de deformarse lo suficiente para sujetar la manzana sin superar el límite de rotura del material.

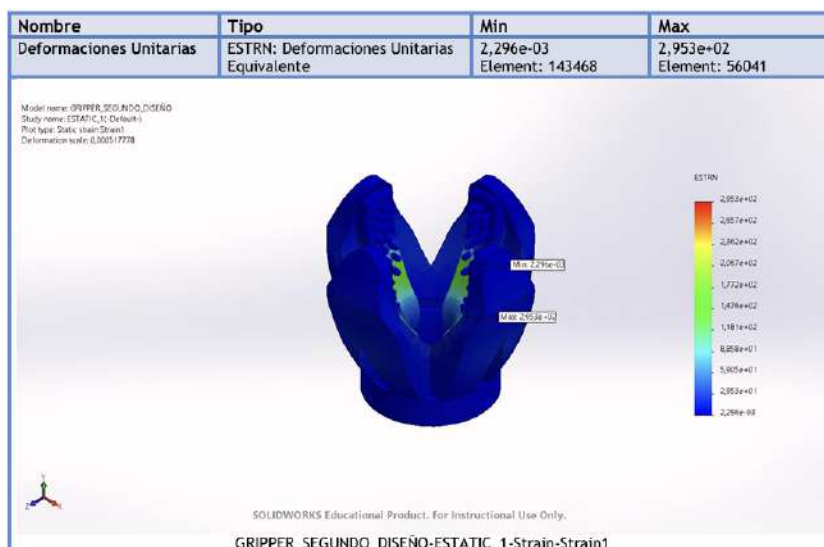


Figura 77: Distribución de deformaciones unitarias en el segundo diseño del gripper.

VII-B. Resultados de manipulación con frutas a velocidad moderada

Se realizaron pruebas con manzanas, naranjas y mandarinas, con el objetivo de evaluar la capacidad del gripper para adaptarse a diferentes morfologías. Cada prueba consistió en levantar la fruta desde una superficie plana, mantenerla suspendida durante 10 segundos y depositarla suavemente. Todas las pruebas se realizaron con el gripper accionado a 6 bar y velocidad moderada.

Tabla VII: Resultados de 30 intentos de agarre a velocidad moderada.

Fruta	Éxitos	Fallos	Porcentaje de éxito
Manzana pequeña 116 [g]	29	1	96.7 %
Manzana mediana 150 [g]	28	2	93.3 %
Manzana grande 201 [g]	28	2	93.3 %
Mandarina 80 [g]	28	2	93.3 %
Naranja 179 [g]	27	3	90.0 %

Como se observa en la Tabla [VII](#), el gripper mostró un desempeño consistente al manipular frutas de diferentes tamaños y morfologías. La mayoría de los intentos fueron exitosos, evidenciando la capacidad del sistema para adaptarse a la geometría de cada fruta y realizar un agarre controlado y repetible.

Resultados cualitativos a velocidad moderada:

- Manzanas pequeñas: el gripper logró sostener la fruta con estabilidad, requiriendo ajustes mínimos en la presión.
- Manzanas medianas: agarre seguro en la mayoría de los intentos, con pocas caídas durante la manipulación.
- Manzanas grandes: agarre consistente, aunque en algunos intentos se observó necesidad de acomodar la fruta antes de levantarla.
- Mandarinas: agarres adecuados, con mínima tendencia a resbalar.
- Naranjas: agarres estables y repetibles, sin incidencias significativas.

VII-C. Resultados de manipulación con frutas a velocidad alta

Para evaluar el desempeño del gripper bajo condiciones más exigentes, se realizaron los mismos ensayos de manipulación con una presión 6 bar. Estos ensayos permiten comparar la efectividad del sistema frente a cambios en la velocidad de acción y analizar su capacidad de adaptación a distintos tamaños y morfologías de fruta.

Como se observa en la Tabla [VIII](#), el gripper presentó una reducción en la efectividad al operar a mayor velocidad, reflejando mayor dificultad para adaptarse a la geometría de las frutas y mantener un agarre estable en todos los intentos. Este comportamiento evidencia que la velocidad impacta directamente en la repetibilidad y control del sistema.

Resultados cualitativos y cuantitativos a velocidad alta:

- **Manzanas pequeñas:** el gripper sostuvo la fruta en pocos intentos, agarre inestable y se requirió ajuste frecuente de presión.
- **Manzanas medianas:** agarre parcialmente seguro; algunas caídas durante la manipulación.
- **Manzanas grandes:** dificultad para cerrar completamente, provocando varios fallos.

Tabla VIII: Resultados de 30 intentos de agarre a velocidad alta.

Fruta	Éxitos	Fallos	Porcentaje de éxito
Manzana pequeña 116 [g]	10	20	33.3 %
Manzana mediana 150 [g]	12	18	40.0 %
Manzana grande 201 [g]	11	19	36.7 %
Mandarina 80 [g]	9	21	30.0 %
Naranja 179 [g]	13	17	43.3 %

- **Mandarinas:** pocos agarres exitosos, tendencia a resbalar debido a la velocidad alta.
- **Naranjas:** agarres más consistentes que las mandarinas, pero aún con fallos en casi 60 % de los intentos.

VII-D. Resultados de la presión con el gripper

Como se observa en la Tabla IX, hay una correlación positiva entre el tamaño de la manzana y la fuerza de agarre necesaria para sostenerla. Las manzanas más grandes, con un diámetro de 8 cm, requieren una fuerza de agarre promedio de 4,08 N, mientras que las manzanas más pequeñas, con un diámetro de 6 cm, solo necesitan una fuerza promedio de 2,95 N. Esto sugiere que, a mayor masa y diámetro, mayor es la fuerza requerida para mantener el objeto.

Tabla IX: Resultado de presión del gripper

Fruta	Diámetro	Fuerza de agarre [N]
Manzana pequeña 116 [g]	6 [cm]	2.75–3.19, 2,95 ± 0,22
Manzana mediana 150 [g]	7 [cm]	3.33–3.53, 3,43 ± 0,10
Manzana grande 201 [g]	8 [cm]	3.67–4.41, 4,08 ± 0,37

VIII. CRONOGRAMA

A continuación se muestra el cronograma de trabajo.

Tabla X: Cronograma

ACTIVIDADES		ACTIVIDAD ESPECIFICA	CRONOMAGRA					VIGENCIA 2025				
			1-2 SEMANA	3-4 SEMANA	5-6 SEMANA	7-8 SEMANA	9-10 SEMANA	11-12 SEMANA				
Diseñar un gripper para adaptabilidad de la formas de las manzanas basado en robotica suave.	Diseñar soft gripper por medio del uso de software CAD.	X										
	Selecionar de material y parámetros técnicos del gripper.	X	X	X								
	Análisis mediante simulación del comportamiento mecánico del soft gripper.	X	X	X								
Fabricación de Moldes para Soft Gripper y Base de Acoplamiento a Brazo Robótico mediante Tecnología de Impresión 3D.	Impresión 3D de moldes utilizando resina SLA y filamento PETG .		X	X								
	Aplicación de mezcla siliconada dentro del molde bajo condiciones controladas.			X	X							
	Ensamblaje de racores neumáticos y sistema de conexión a electroválvula.			X	X							
Validación experimental a funcionamiento del soft gripper integrado a brazo robótico.	Pruebas funcionales a partir de inflado, agarre, liberación y seguridad del sistema.				X	X		X				
	Ensayos de experimentales a partir de agarre a manzanas de distintos tamaños y pesos.							X	X			
	Registro de resultados y análisis de desempeño para optimización del redimensionamiento del gripper.							X	X			

IX. PRESUPUESTO

A continuación se muestra el presupuesto del trabajo.

Tabla XI: Presupuesto actualizado para la fabricación del sistema de gripper neumático

Nombre del elemento	Descripción	Cantidad	Valor total [USD]
Resina - ANYCUBIC	1 Kg - lavable al agua	2	60
Filamento - ELEGOO	1 kg - PETG	2	40
Dragon Skin 10 NV	Smooth-On Shore 10A 1 kg	2	120
Manguera - FESTO	4 metros	1	6
Racor M5 - Metalwork	Rosca para manguera	2	5
Electroválvula	FESTO 5/2 - Válvula neumática	1	75
Bobina solenoide	FESTO MSFW-34-420	1	10
Cilindro neumático	Festo ADN-20-25-A-P-A	1	90
Crema Síl-Poxy	Adhesivo para silicona	1	40
Demoldante Universal MOLD A	Liberador de molde	1	25
Sonite Wax	Cera de desmoldeo	1	6
Guantes de nitrilo	Par de protección	1	3
Pernos M6	12 unidades	12	18
SUBTOTAL MATERIALES			498
Mano de obra	Impresión 3D	1	90
TOTAL ESTIMADO			588

X. CONCLUSIONES

Se logró desarrollar y optimizar los modelos CAD de los componentes del soft gripper empleando herramientas de simulación para evaluar su geometría, adaptabilidad y resistencia. El diseño permitió integrar correctamente las piezas con el sistema neumático y el brazo robótico, cumpliendo con los criterios de funcionalidad y adaptabilidad planteados.

Se fabricaron exitosamente cinco componentes bases y dos prototipos del griper utilizando resina fotopolimérica y otros materiales flexibles, asegurando la precisión dimensional y el correcto acoplamiento de las piezas. La selección de materiales permitió que los dedos del griper se adaptaran eficazmente a la morfología irregular de frutas como las manzanas, garantizando un contacto seguro sin dañar la superficie.

El desempeño del griper fue validado mediante 30 pruebas experimentales con manzanas, mandarinas y naranjas. En la mayoría de los ensayos realizados a velocidad moderada, los resultados superaron el 90 % de efectividad, tal como se muestra en la Tabla [VII](#), confirmando que el sistema logra agarres repetibles, controlados y seguros. En contraste, cuando se trabajó a la máxima velocidad posible del brazo robótico Tabla [VIII](#), la efectividad descendió a valores cercanos al 40 %, lo que evidencia la limitación del sistema ante condiciones extremas de operación. Estos resultados destacan que la velocidad moderada no solo permite un desempeño estable y confiable, sino que también asegura la aplicabilidad práctica del griper en procesos de manipulación automatizada.

La integración del griper con un brazo robótico mostró su versatilidad y aplicabilidad en tareas de manipulación de frutas de distintos tamaños y formas, destacando su potencial para procesos automatizados de manipulación y empaquetado, cumpliendo con los objetivos planteados en el proyecto.

XI. RECOMENDACIONES

Se recomienda que el sistema neumático del gripper opere a presiones no mayores a 8 bar, considerando las especificaciones del cilindro utilizado. Mantener la presión dentro de este rango garantiza la integridad de los componentes, evita sobrecargas en el sistema y asegura un agarre seguro de las frutas.

Para mantener la durabilidad y la higiene del gripper, se sugiere limpiar las superficies de silicona con alcohol isopropílico después de cada uso. Este procedimiento permite eliminar residuos de frutas y otros contaminantes sin afectar las propiedades mecánicas del material.

Asimismo, se recomienda ejecutar las rutinas de manipulación a velocidades moderadas, evitando movimientos rápidos que puedan comprometer la efectividad del agarre. Trabajar a velocidad controlada favorece una manipulación más estable y reduce la probabilidad de que las frutas se resbalen o sufran daños durante el proceso.

REFERENCIAS

- [1] C. de OEC, «Frutas tropicales en el Ecuador,» *OEC*, vol. Volume 1 - 2024, 2024. dirección: <https://oec.world/es/profile/bilateral-product/tropical-fruits/reporter/ecu>.
- [2] R. García Sánchez, R. C. García Vacacela, N. Villavicencio Bermudes y J. Meléndez Rangel, «Sistema de robótica industrial en operaciones agroindustriales: optimización del proceso de limpieza y selección de frutas,» *Alternativas*, vol. 20, n.º 1, págs. 62-70, 2019. DOI: [10.23878/alternativas.v20i1.274](https://doi.org/10.23878/alternativas.v20i1.274), dirección: <https://editorial.ucsg.edu.ec/alternativas/alternativas/article/view/274?articlesBySimilarityPage=4>.
- [3] M. A. García, A. Cárdenas, J. M. Rendón y M. Maya Méndez, «Una plataforma de control basado en visión para la rehabilitación de robots manipuladores de tipo industrial,» *Computación y Sistemas*, vol. 12, n.º 4, págs. 409-420, 2009.
- [4] E. Navas, R. Fernández, D. Sepúlveda, M. Armada y P. Gonzalez-de Santos, «Soft Grippers for Automatic Crop Harvesting: A Review,» *Sensors*, vol. 21, n.º 8, 2021, ISSN: 1424-8220. DOI: [10.3390/s21082689](https://doi.org/10.3390/s21082689), dirección: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/8/2689>.
- [5] FAO, *Calidad e inocuidad de las frutas y hortalizas frescas*, 2003. dirección: <https://www.fao.org/4/y4893s/y4893s07.htm>.
- [6] C. de Pomáceas, *Estudio sobre manejo de manzanas para prevenir daños por impacto*, Accedido el 21 de mayo de 2025, 2023. dirección: <https://mundoagro.cl/estudio-sobre-manejo-de-manzanas-para-prevenir-danos-por-impacto/>.
- [7] FAO, *Calidad e inocuidad de las frutas y hortalizas frescas: Una guía para los pequeños y medianos exportadores*, Consultado el 29 de abril de 2025, 2003. dirección: <https://www.fao.org/4/y4893s/y4893s07.htm>.
- [8] U. P. Salesiana, *Implementación de brazo robótico 6DOF para la organización de productos agrícolas*, Accedido el 21 de mayo de 2025, 2021. dirección: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/22830/1/UPS-GT003846.pdf>.
- [9] A. Velasquez, C. Grimm y J. R. Davidson, «Compact robotic gripper with tandem actuation for selective fruit harvesting,» *arXiv preprint arXiv:2408.06674*, 2024, Accedido el 21 de mayo de 2025. dirección: <https://arxiv.org/abs/2408.06674>.
- [10] OnRobot, *Pinza Soft: Pinza robótica flexible para uso alimentario*, Accedido el 1 de mayo de 2025, 2025. dirección: <https://onrobot.com/es/productos/pinza-soft>.
- [11] The Australian, «Why Asia offers investors food for thought,» *The Australian - Agribusiness*, 2024, Accessed: 2025-05-01. dirección: <https://www.theaustralian.com.au/business/agribusiness/why-asia-offers-investors-food-for-thought/news-story/483a6ca366b6952705be1d234d63bf88>.
- [12] A. no especificado(s), *Desarrollo de un gripper adaptativo de accionamiento neumático basado en robótica suave para manipulación adecuada de manzanas Granny Smith (Malus domestica)*, <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/25807/1/UPS-GT004516.pdf>, Tesis de grado, Universidad Politécnica Salesiana. Accedido el 21 de mayo de 2025, 2023.
- [13] S. Armijos Medrano. «Ecuador avanza hacia la automatización, el uso de robots es más habitual en las industrias.» Consultado el 30 de abril de 2025, VISTAZO. (2023), dirección: <https://www.vistazo.com/enfoque/ecuador-avanza-automatizacion-uso-de-robots-es-habitual-en-industrias-EY6405215>.

- [14] A. R. Villanueva Arévalo, *Diseño de un sistema automatizado para la clasificación de manzanas por tamaño utilizando visión artificial y brazo robótico*, Accedido el 21 de mayo de 2025, 2023. dirección: https://repositorioacademico.upc.edu.pe/bitstream/handle/10757/661011/Villanueva_AR.pdf.
- [15] EDS Robotics. «Agricultura automatizada y robótica agrícola.» es. Consultado el 30 de abril de 2025. (2021), dirección: <https://www.edsrobotics.com/blog/agricultura-automatizada-y-robotica-agricola/>.
- [16] K. Chen, T. Li, T. Yan et al., «A Soft Gripper Design for Apple Harvesting with Force Feedback and Fruit Slip Detection,» *Agriculture*, vol. 12, n.º 11, pág. 1802, 2022. DOI: [10.3390/agriculture12111802](https://doi.org/10.3390/agriculture12111802), dirección: <https://www.mdpi.com/2077-0472/12/11/1802>.
- [17] N. Autor, «Diversity-Based Topology Optimization of Soft Robotic Grippers,» *Advanced Intelligent Systems*, vol. 5, n.º 1, págs. 123-135, 2023.
- [18] W. S. University. «New robotic gripper for automated apple picking developed.» Accessed: 2025-05-03. (2024), dirección: <https://news.wsu.edu/news/2024/06/12/new-robotic-gripper-for-automated-apple-picking-developed/>.
- [19] R. de Robots, *Soft Gripper, la nueva Pinza de OnRobot para manipular alimentos*, Accedido el 21 de mayo de 2025, 2020. dirección: <https://revistaderobots.com/robots-y-robotica/soft-gripper-la-pinza-de-onrobot/>.
- [20] E. Faidallah, S. Maged, M. Alsamanty, Y. Hossameldin y S. Abdrabbo, «Design and control Implementation of Adaptive Soft Gripper Installed on KUKA KR6 R900 Robot Arm,» *Engineering Research Journal (Shoubra)*, vol. 51, n.º 4, págs. 239-248, 2022, ISSN: 3009-6049. DOI: [10.21608/erjsh.2022.156200.1073](https://doi.org/10.21608/erjsh.2022.156200.1073). eprint: https://erjsh.journals.ekb.eg/article_264268_1ccd2f25de51b87de58b652618051c0f.pdf. dirección: https://erjsh.journals.ekb.eg/article_264268.html.
- [21] A. for Advancing Automation, *Joseph Engelberger and Unimate: Pioneering the Robotics Revolution*, <https://www.automate.org/robotics/engelberger/joseph-engelberger-unimate>, Accedido el 16 de julio de 2025.
- [22] G. M. Whitesides, «Soft Robotics,» *Angewandte Chemie International Edition*, vol. 57, n.º 16, págs. 4258-4273, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1002/anie.201800907>. eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/anie.201800907>. dirección: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/anie.201800907>.
- [23] F. A. C. KG, *Tentacle Gripper*, https://www.festo.com/co/es/e/sobre-festo/investigacion-y-desarrollo/bionic-learning-network/pinzas-bionicas-y-robots-suaves/tentaclegripper-id_33321/, Accedido: 2025-07-18, 2025. dirección: https://www.festo.com/co/es/e/sobre-festo/investigacion-y-desarrollo/bionic-learning-network/pinzas-bionicas-y-robots-suaves/tentaclegripper-id_33321/.
- [24] Soft Gripping. «Robótica blanda frente a robótica dura – Ideas y análisis comparativos.» Accedido el 7 de mayo de 2025, Soft Gripping. (2023), dirección: <https://soft-gripping.com/es/discover/robotica-blanda-frente-a-robotica-dura-ideas-y-analisis-comparativos/>.
- [25] Grupo SIM. «¿Qué es un gripper o pinza robótica?» es. Último acceso el 14 de julio de 2025, Grupo SIM. (2025), dirección: <https://gruposim.eu/blog/que-es-un-gripper-o-pinza-robotica/> (visitado 14-07-2025).
- [26] D. A. Quimiz García y X. A. Sierra Lindao, *Desarrollo de prototipo de mano robótica para manipulación de objetos livianos aplicando robótica suave*, <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/25777>, Tesis de grado, Universidad Politécnica Salesiana. Accedido el 21 de mayo de 2025, 2023.
- [27] N. Soria y J. L. F., «El cultivo del manzano en la zona alta del Ecuador,» Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP), Quito, Ecuador, inf. téc., 1992, Accedido: 2025-05-22, pág. 25. dirección: <https://repositorio.iniap.gob.ec/bitstream/41000/817/1/iniapscm20c.pdf>.

- [28] Kaylene. «How to Tell When a Green Apple is Ripe.» Accedido el 20 de agosto de 2025. (2023), dirección: <https://thelinkssite.com/tell-green-apple-ripe/>.
- [29] Smooth-On, Inc., «Serie Dragon Skin®: Cauchos de silicona de curado por adición,» Smooth-On, Inc., inf. téc., 2015? Disponible en: https://www.smooth-on.com/tb/files/espanol/DRAGON_SKIN_SERIES_TB_ESPANOL.pdf.
- [30] I. Smooth-On, *Dragon Skin™ FX-Pro™*, Producto en línea, Accedido: 2025-05-12, 2024. dirección: <https://www.smooth-on.com/products/dragon-skin-fx-pro/>.
- [31] I. Smooth-On, *Dragon Skin™ 10 NV*, Accedido: 2025-06-27, 2025. dirección: <https://www.smooth-on.com/products/dragon-skin-10-nv/>.
- [32] SmoothOn, Inc., «VytaFlex® 40 Urethane Rubber,» Smooth-On, Inc., inf. téc., 2024, Technical Bulletin and Product Information PDF available from Smooth-On. dirección: https://www.smooth-on.com/tb/files/Vytaflex_Series_TB.pdf.
- [33] Smooth-On, Inc., *Sil-Poxy® Product Information*, Accessed: 2025-07-28, 2024. dirección: <https://www.smooth-on.com/products/sil-poxy/>.
- [34] Chicago Pneumatic. «¿Qué es un compresor de aire?» Accedido: 2025-05-13. (2025), dirección: <https://compressors.cp.com/es-latinamerica/expert-corner/blog/que-es-un-compresor-de-aire>.
- [35] D. S.A., *¿Qué es una electroválvula y para qué sirve?* Artículo en línea, Accedido: 2025-05-12, 2021. dirección: <https://www.distribtec.com.ar/que-es-una-electrovalvula-y-para-que-sirve/>.
- [36] I. B. Technology. «¿Qué es una tubería neumática?» Accedido: 2025-05-13. (2024), dirección: <https://idealbelltechnology.com/es/what-is-a-pneumatic-tubing/>.
- [37] Festo. «Racores neumáticos.» Accedido: 2025-05-13. (2025), dirección: https://www.festo.com/co/es/c/productos/tecnologias-de-conexiones/tecnologia-de-conexiones-neumaticas/racores-id_pim315/.
- [38] R. de Robots, *Brazo robótico mecánico industrial*, Artículo en línea, Accedido: 2025-05-12, 2023. dirección: <https://revistaderobots.com/robots-y-robotica/brazo-robotico-mecanico-industrial/>.
- [39] D. Systems. «Tipos de filamentos para impresoras 3D.» Accedido: 2025-05-13. (2024), dirección: <https://www.3ds.com/es/make/solutions/blog/types-3d-printer-filaments>.
- [40] Anycubic, *Resina Lavable+*, <https://www.anycubic.es/products/resina-lavable>, Accedido el 21 de mayo de 2025, 2025.
- [41] C. R. Vidal, *Diseño mecánico con SolidWorks 2015*. Ra-Ma Editorial, 2016.
- [42] *Diseño y fabricación de una pinza de cuerpo blando con sensores de curvatura integrados*, 2017. DOI: [10.1109/M2VIP.2017.8211521](https://doi.org/10.1109/M2VIP.2017.8211521).
- [43] A. K. Ghosh, S. F. Burniston, D. Krentzel et al., «A Novel Fetal Movement Simulator for the Performance Evaluation of Vibration Sensors for Wearable Fetal Movement Monitors,» *Sensors*, vol. 20, n.º 21, 2020, ISSN: 1424-8220. DOI: [10.3390/s20216020](https://doi.org/10.3390/s20216020). dirección: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/21/6020>.

XII. ANEXOS

Planos de las piezas acotadas en SolidWorks 2025:

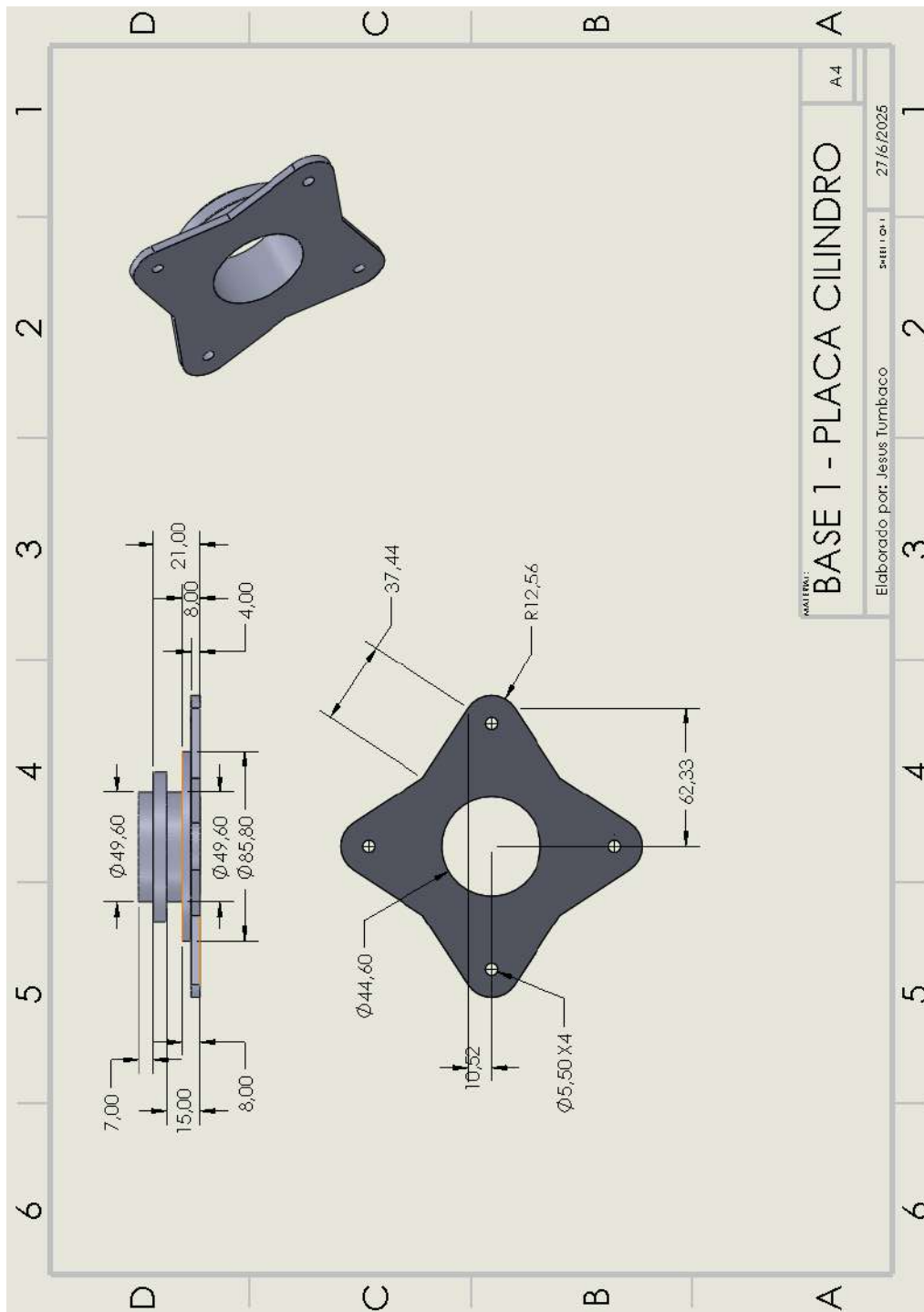


Figura 78: Plano acotado de la Base 1 del ensamble, por J. Tumbaco, SolidWorks

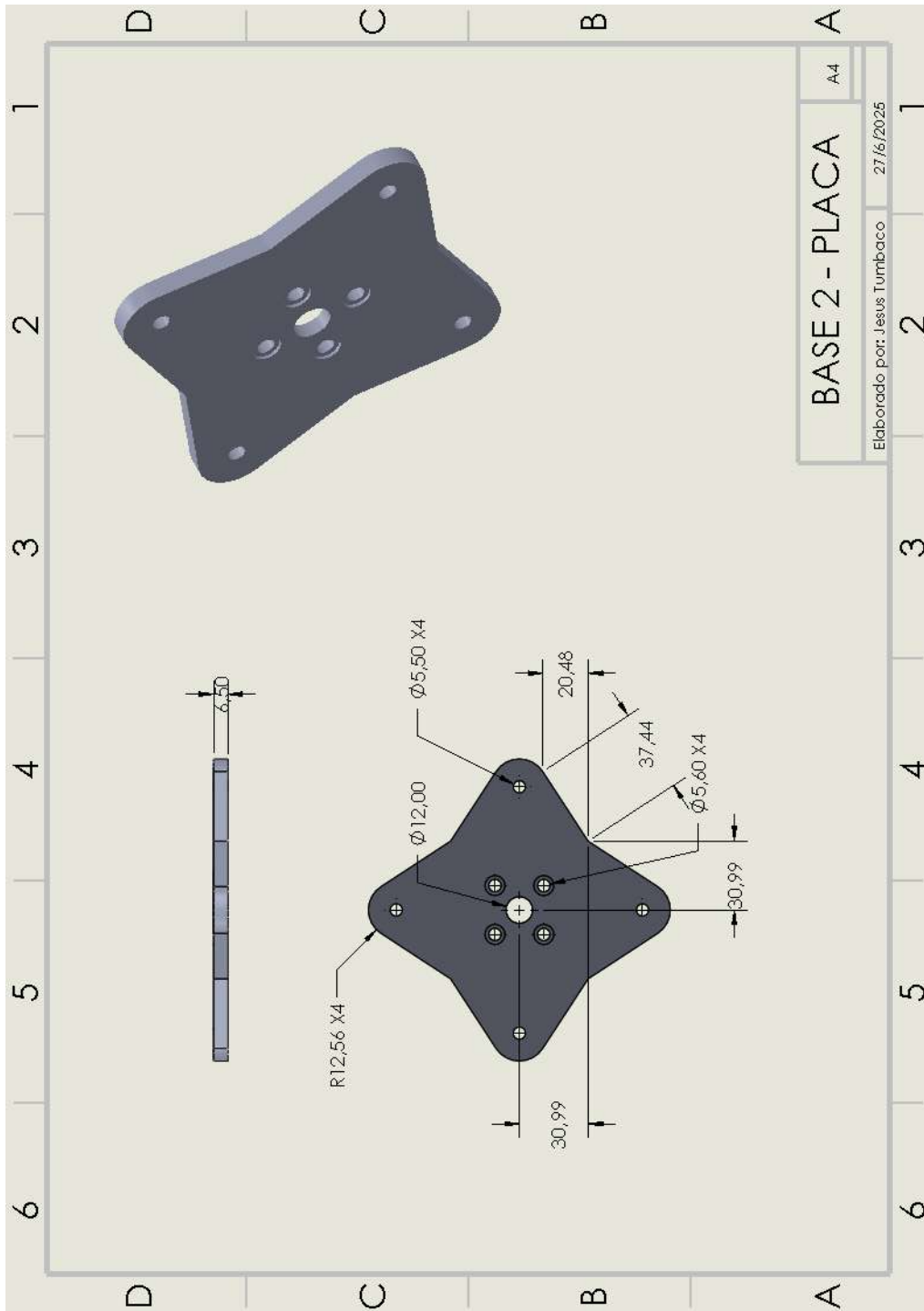


Figura 79: Plano acotado de la Base 2 del ensamble, por J. Tumbaco, SolidWorks

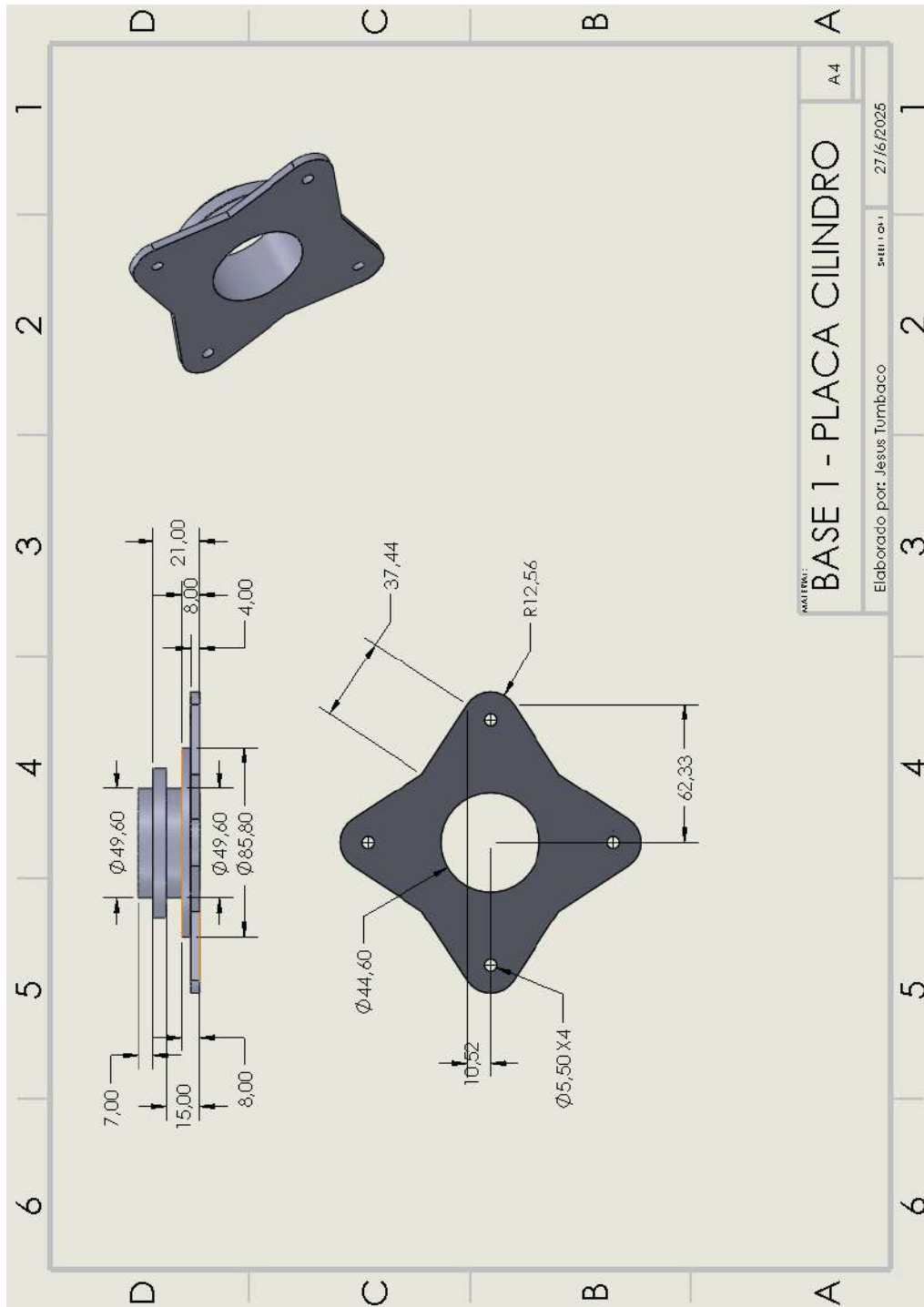


Figura 80: Plano acotado de la Base 3 del ensamble, por J. Tumbaco, SolidWorks

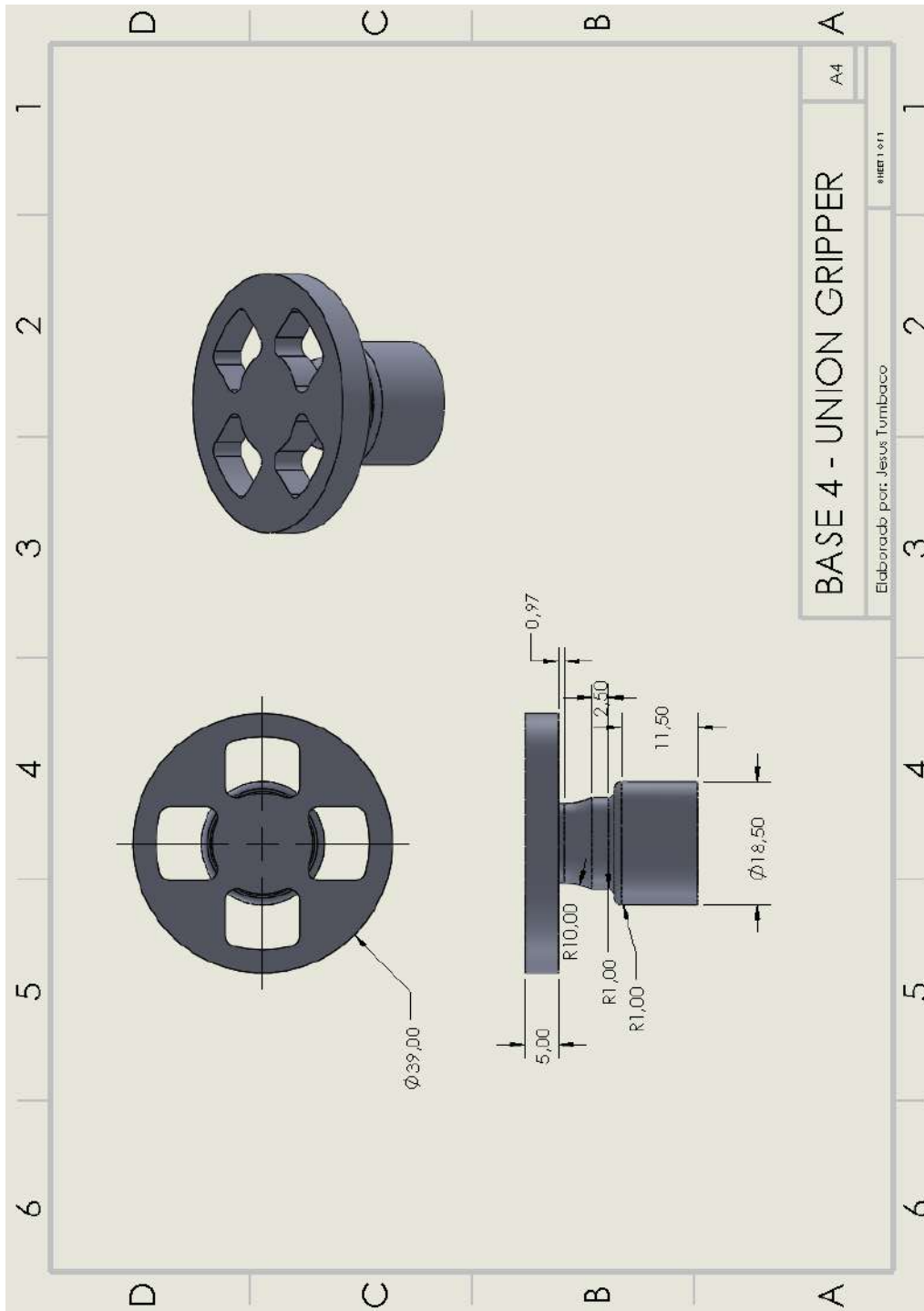


Figura 81: Plano acotado de la Base 4 unión del ensamble, por J. Tumbaco, SolidWorks

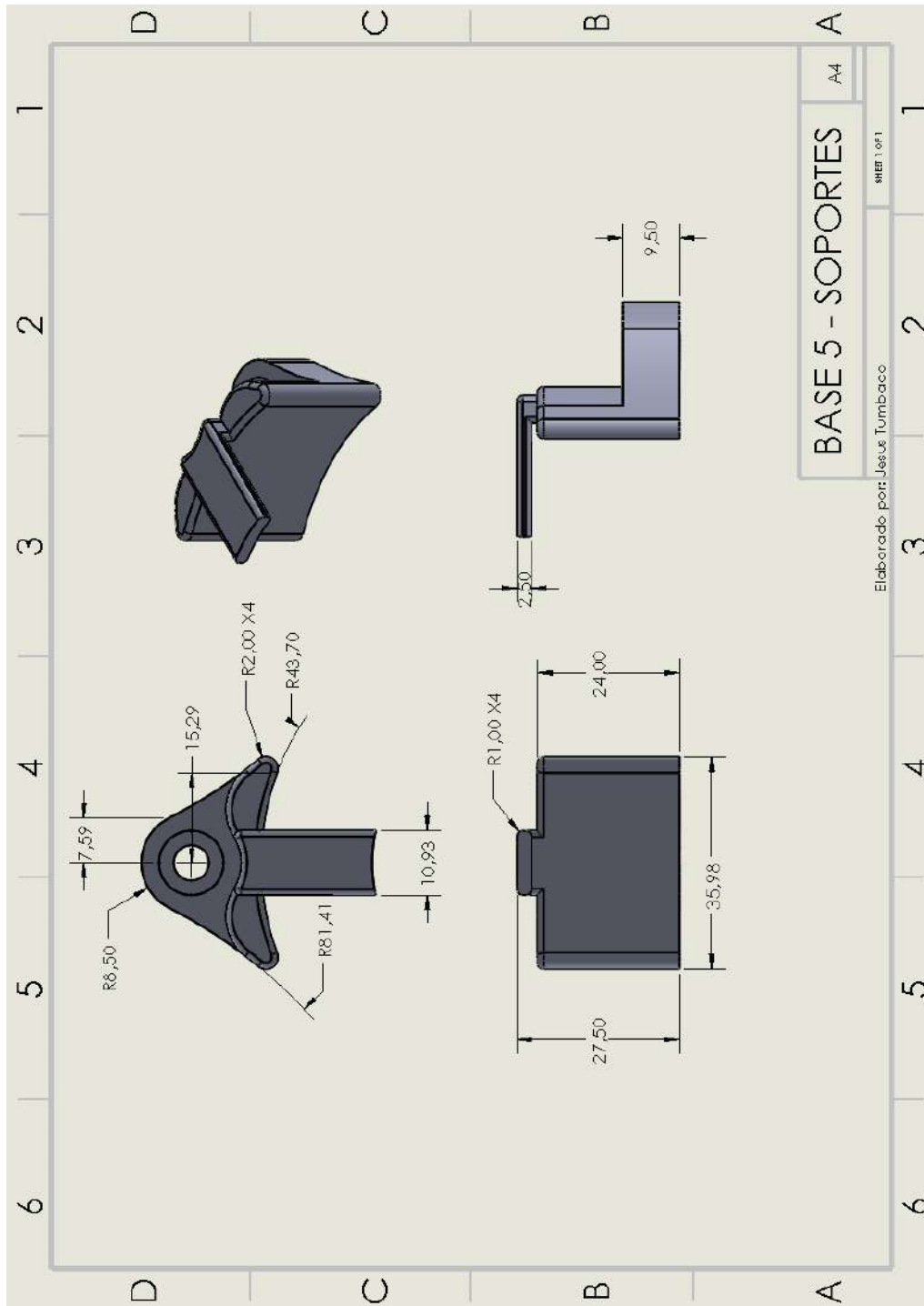


Figura 82: Plano acotado de la Base 5 soporte del gripper del ensamble, por J. Tumbaco, SolidWorks

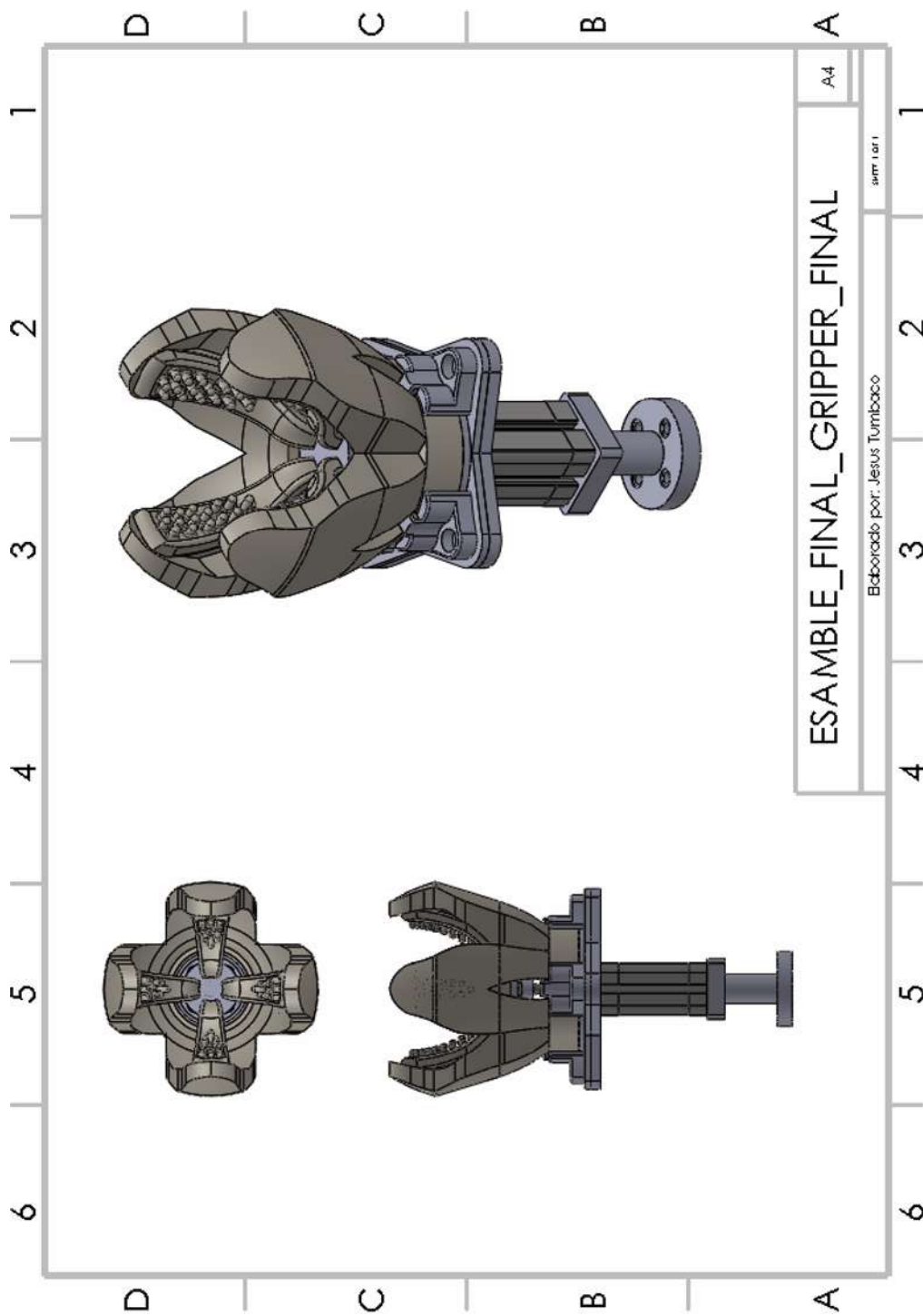


Figura 83: Plano del ensamble final, por J. Tumbaco, SolidWorks

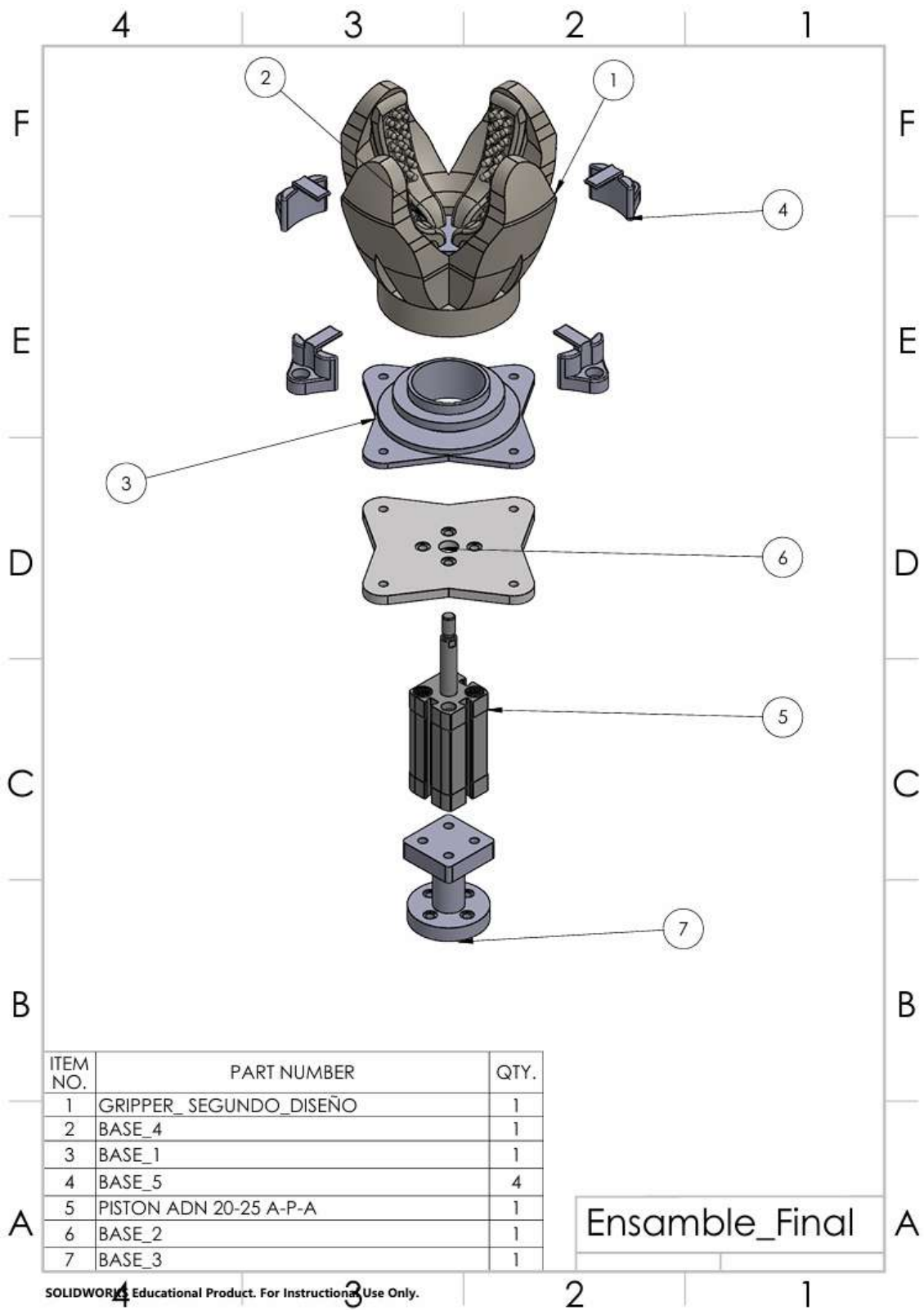


Figura 84: Vista explosionada del ensamble final del gripper, por J. Tumbaco, SolidWorks