



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE GUAYAQUIL
CARRERA DE MECATRÓNICA

**DESARROLLO DE PROTOTIPO DE MANO ROBÓTICA PARA
MANIPULACIÓN DE OBJETOS LIVIANOS APLICANDO
ROBÓTICA SUAVE**

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

AUTORES: David Alejandro Quimiz García
Xavier Andrés Sierra Lindao
TUTOR: David Mateo Cortez Saravia

Guayaquil-Ecuador
2023

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, **David Alejandro Quimiz García** con documento de identificación N° **0952865624** y **Xavier Andrés Sierra Lindao** con documento de identificación N° **0930286414**; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos 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, 08 de septiembre del año 2023

Atentamente,



David Alejandro Quimiz García
0952865624



Xavier Andrés Sierra Lindao
0930286414

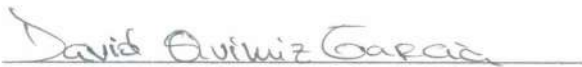
**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros, **David Alejandro Quimiz García** con documento de identificación N° **0952865624** y **Xavier Andrés Sierra Lindao** con documento de identificación N° **0930286414**, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del **DESARROLLO DE PROTOTIPO DE MANO ROBÓTICA PARA MANIPULACIÓN DE OBJETOS LIVIANOS APLICANDO ROBÓTICA SUAVE**, 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, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo a final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana

Guayaquil, 08 de septiembre del año 2023

Atentamente,



David Alejandro Quimiz García
0952865624



Xavier Andrés Sierra Lindao
0930286414

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 PROTOTIPO DE MANO ROBÓTICA PARA MANIPULACIÓN DE OBJETOS LIVIANOS APLICANDO ROBÓTICA SUAVE**, realizado por **David Alejandro Quimiz García** con documento de identificación N° **0952865624** y por **Xavier Andrés Sierra Lindao** con documento de identificación N° **0930286414**, 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, 08 de septiembre del año 2023

Atentamente,



Ing. David Mateo Cortez Saravia, MSc.
0963020193

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis padres, quienes siempre han sido mi mayor fuente de inspiración y apoyo incondicional a lo largo de mi vida y durante esta ardua pero gratificante travesía académica. Su amor inquebrantable, sabiduría y constante aliento han sido el motor que me impulsó a superar cada desafío y obstáculo en este camino hacia la culminación de mi tesis.

Esta dedicatoria es una expresión de gratitud y reconocimiento a todas las personas e instituciones que de una u otra manera contribuyeron al desarrollo y culminación de esta tesis. Su apoyo y aliento fueron fundamentales en cada etapa del proceso y permitieron el logro de este objetivo académico.

¡Gracias a todos por ser parte de este importante logro!

David Alejandro Quimiz García

Este trabajo de titulación está dedicado a mi madre Yoconda Lindao y mi adorada hermana Kristhel Sierra, quienes han estado presentes a lo largo de toda la carrera universitaria. Este trabajo no solo representa el logro de mi educación, sino también un homenaje a tu sacrificio y amor incondicional. Cada avance que he alcanzado en este recorrido ha sido posible gracias a tu inestimable apoyo. Con gratitud sincera, dedico este trabajo a los excepcionales profesores que han iluminado mi camino en esta carrera, brindándome sabiduría y orientación. A todos ustedes, mi más profundo agradecimiento por formar parte de este capítulo significativo en mi vida

Xavier Andrés Sierra Lindao

AGRADECIMIENTO

A mis padres, por ser mi mayor fuente de inspiración, por su amor incondicional, su apoyo inquebrantable y su constante aliento durante todo este camino académico. Gracias por creer en mí y por ser mi guía en cada paso que he dado.

A mis hermanos y primos, por su cariño, comprensión y por siempre estar ahí para levantarme cuando caía. Su presencia ha sido fundamental para mantenerme motivado y enfocado en la culminación de este proyecto.

A mi asesor de tesis, por su valiosa orientación, paciencia y sabiduría durante la elaboración de este trabajo. Sus consejos y conocimientos han sido clave para dar forma a mis ideas y enriquecer el contenido de esta investigación.

A mi círculo social cercano, por su amistad sincera, su ánimo constante y por brindarme momentos de distracción y alegría que han sido fundamentales para mantener el equilibrio en mi vida mientras me dedicaba a esta tesis.

David Alejandro Quimiz García

Agradezco a Dios por haberme brindado esta gran oportunidad, por iluminar cada paso que he dado en mi trayectoria educativa y por permitirme avanzar con sabiduría y perseverancia. Agradezco a mi madre por ser la mayor fuente de inspiración y siempre creer en mí. A mi hermana por apoyarme y siempre darme palabras de aliento para no rendirme.

Mi profundo agradecimiento se dirige a los educadores de la carrera de Ingeniería en Mecatrónica que han sido parte fundamental de mi desarrollo profesional. Su sabiduría y respaldo han dotado de las herramientas necesarias para un futuro exitoso como ingeniero en este campo. Agradezco sinceramente a mi tutor de tesis por su invaluable aporte de ideas, que enriquecieron y guiaron de manera excepcional el desarrollo de este trabajo. Su orientación experta ha sido fundamental para avanzar en la dirección correcta y alcanzar mayores niveles de calidad. A mis queridos amigos, gracias por su constante apoyo y amistad a lo largo de esta travesía académica. Vuestra presencia ha sido un regalo invaluable en este camino. También a aquella persona que siempre estuvo a mi lado guiándome, aconsejándome y pasando cada materia juntos. ¡Muchas Gracias!

Xavier Andrés Sierra Lindao

RESUMEN

En el intrincado funcionamiento del cuerpo humano yace la clave para el bienestar y la independencia de las personas. Si bien el cerebro desempeña un papel crucial al distinguir a los seres humanos de otras criaturas, existen otros elementos esenciales cuya presencia resulta fundamental para el desarrollo y el éxito humano. Un ejemplo elocuente de esta importancia radica en la mano humana, cuya ausencia desencadena impactos profundos tanto en el ámbito físico como en el psicológico de un individuo.

En este contexto, surge un desafío de innovación: la mayoría de las prótesis disponibles en el mercado se caracterizan por su rigidez, lo que limita su eficacia y su capacidad de interactuar de manera segura con el entorno. La respuesta a esta problemática encuentra su eco en la tecnología de la robótica suave, emergiendo como una prometedora alternativa. La presente tesis se introduce como una exploración en el diseño y desarrollo de una prótesis de mano robótica suave, donde la implementación de actuadores de modo dual toma protagonismo. El objetivo principal es forjar un prototipo que no solo garantice la seguridad en la interacción con el entorno, sino que también eleve la funcionalidad de individuos con discapacidades, proporcionándoles una experiencia análoga a la de poseer una mano humana.

El proceso de materialización de esta idea implica la utilización de cinco actuadores de modo dual en combinación con estructuras construidas mediante la impresión 3D, que emplea una variedad de materiales como PLA, TPU y Resina, para lograr la combinación adecuada de resistencia y flexibilidad. La mano robótica concebida permite la flexión y extensión en la articulación metacarpofalángica mediante tendones, y la pronación y supinación a través de un sistema de engranajes en la muñeca.

El proceso de desarrollo abarca diversas etapas, que van desde el diseño mecánico y electrónico, considerando factores cruciales como la potencia, la resistencia y los circuitos necesarios, hasta una investigación meticulosa para la selección adecuada de los materiales y una estimación precisa de los costos involucrados. Este trabajo proporciona una descripción exhaustiva del proceso de implementación, desglosando cada paso en su consecución.

Palabras claves: Soft Robotics, Robótica suave, actuador, prótesis, impresión 3D, discapacidad.

ABSTRACT

Within the intricate functioning of the human body lies the key to the well-being and independence of individuals. While the brain plays a crucial role in distinguishing humans from other creatures, there are other essential elements beyond that fundamental for human development and success. An eloquent example of this significance is the human hand, the absence of which triggers profound impacts both in the physical and psychological realms of an individual.

In this context, an innovation challenge arises: the majority of prosthetics available in the market are characterized by their rigidity, limiting their effectiveness and their ability to interact safely with the environment. The response to this issue finds its echo in the field of soft robotics technology, emerging as a promising alternative. This thesis presents an exploration into the design and development of a soft robotic hand prosthesis, where the implementation of dual-mode actuators takes center stage. The primary objective is to craft a prototype that not only ensures safety in interacting with the environment but also enhances the functionality of individuals with disabilities, providing them an experience akin to having a human hand.

The process of materializing this idea involves the utilization of five dual-mode actuators in combination with structures built using 3D printing, employing a variety of materials such as PLA, TPU, and Resin to achieve the correct blend of strength and flexibility. The conceived robotic hand allows flexion and extension at the metacarpophalangeal joint through tendons, and pronation and supination via a gear system at the wrist.

The developmental journey encompasses various stages, ranging from mechanical and electronic design, considering pivotal factors like power, resistance, and necessary circuits, to meticulous research for the appropriate material selection and a precise cost estimation. This work provides a comprehensive description of the implementation process, breaking down each step in its attainment.

Keywords: Soft Robotics, actuator, prosthesis, 3D printing, disability.

ÍNDICE

I.	PROBLEMA	1
II.	JUSTIFICACIÓN	2
III.	OBJETIVOS	3
III-A.	Objetivo General	3
III-B.	Objetivos Específicos	3
IV.	FUNDAMENTOS TEÓRICOS	4
IV-A.	Arquitectura de la mano	4
IV-A1.	Estructura Ósea Mano Humana	4
IV-A2.	Dedos	4
IV-A3.	Goniometría de los Dedos	4
IV-A4.	Movimientos Básicos Mano	4
IV-A5.	Taxonomía de Agarre de la Mano	5
IV-A6.	Grado de Libertad	6
IV-B.	Antecedentes y Patentes	7
IV-B1.	Actuadores Neumáticos Suaves	7
IV-C.	Soft Robotics	7
IV-C1.	Inspiración Biológica de Soft Robotics	8
IV-C2.	Impresión 3D	8
IV-C3.	Ecoflex™ 00-10	8
IV-C4.	Impresora 3D Creality LD-002H	9
IV-C5.	Servo Motor de Corriente Continua DS04-NFC	10
IV-C6.	Manguera de Silicona	10
IV-C7.	Racor Neumático	11
IV-C8.	Manguera Neumática	11
IV-D.	Controlador	11
IV-D1.	Raspberry Pi 3 Modelo B+	11
IV-E.	Software	12
IV-E1.	Autodesk Inventor Professional	12
IV-E2.	Autodesk Meshmixer	13
V.	MARCO METODOLÓGICO	14
V-A.	Descripción de Etapas del Proyecto	14
V-B.	Diseño Preliminar del Prototipo	15
V-B1.	Consideraciones Antropométricas de los Dedos	17
V-B2.	Manos Robóticas más Actuales	18
V-B3.	Diseño Actuador Suave	19
V-B4.	Manufactura del Actuador Suave	19
V-B5.	Ensayo de Tracción para Materiales Hiperelásticos (TTHM)	20
V-C.	Diseño Actuador Suave	23
V-C1.	Versión 1	23
V-C2.	Versión 2	26
V-C3.	Versión 3	29
V-D.	Diseño Prototipo de Mano	30
V-D1.	Versión 1	30
V-D2.	Versión 2	31
V-D3.	Versión 3	32

V-E.	Diseño Estructural Antebrazo	34
V-E1.	Base Servomotores	34
V-E2.	Plato Base Guía	34
V-E3.	Plato Base Sistema Pan	37
V-E4.	Plato Base Sistema Tilt	38
V-E5.	Mordaza Mangueras	39
V-E6.	Diseño Corredizo	40
V-E7.	Soporte Sistema Pan and Tilt	41
V-E8.	Moldes para Actuadores Neumáticos	42
V-F.	Generador de Presión	43
V-G.	Manufactura de Actuadores Suaves	44
V-G1.	Medición	45
V-G2.	Pan and Tilt	47
V-H.	Software	48
V-H1.	Blynk	48
V-H2.	Guía de enlace Blynk - ESP32	48
V-I.	Hardware	52
V-J.	Torque Elevación	53
V-K.	Prueba de Presión Fuerza	54
V-L.	Prueba experimental manómetro	55
VI.	RESULTADOS	57
VI-A.	Actuador Manufacturado	57
VI-A1.	Diseño final del Prototipo	58
VI-B.	Pruebas de Prehensión de Mano Robótica Suave	60
VII.	CRONOGRAMA	65
VIII.	PRESUPUESTO	66
IX.	CONCLUSIONES	67
X.	RECOMENDACIONES	68
XI.	ANEXOS	71
XI-A.	Anexo 1. Programación	71
XI-B.	Anexo 2. Programación Servomotores 360°	76
XI-C.	Anexo 3. Plano Acople para Manguera y Racor	83
XI-D.	Anexo 4. Acople para Servomotor	84
XI-E.	Anexo 5. Acople para Servomotor Complemento	85
XI-F.	Anexo 6. Base para Servomotor	86
XI-G.	Anexo 7. Disco Acoplamiento de Rodamiento	87
XI-H.	Anexo 8. Disco Soporte	88
XI-I.	Anexo 9. Disco con Base de Rodamiento	89
XI-J.	Anexo 10. Eje de Unión	90
XI-K.	Anexo 11. Soporte para Plato Superior e Inferior	91
XI-L.	Anexo 12. Base de Dedo Anular	92
XI-M.	Anexo 13. Base de Dedi Índice	93
XI-N.	Anexo 14. Base de Dedo Medio	94
XI-Ñ.	Anexo 15. Base de Dedo Meñique	95
XI-O.	Anexo 16. Base de Dedo Pulgar	96

XI-P.	Anexo 17. Molde Pulgar Superior	97
XI-Q.	Anexo 18. Base Superior de Dedo Anular	98
XI-R.	Anexo 19. Recámara de Aire Dedo Anular	99
XI-S.	Anexo 20. Recámara de Aire Dedo Medio	100
XI-T.	Anexo 21. Recámara de Aire Dedo Meñique	101
XI-U.	Anexo 22. Recámara de Aire Dedo Índice	102
XI-V.	Anexo 23. Base Dedo Pulgar	103

ÍNDICE DE FIGURAS

1.	Arco Discal. Fuente: Dr. González, V. (2010)	4
2.	Tipos de Agarre según MR Cutkosky and RD Howe, Fuente: [31]	5
3.	Modelo de la Mano Humana de 21 GDL de Qiang Zhan	6
4.	Estructura Soft Robot, Fuente: Hang, Su. Xu,Hou. Xin, Zhang. (2022)	7
5.	Impresora 3D Creality LD-002H	9
6.	Servo Motor MG996R	10
7.	Manguera TIGON 3350. Fuente: [17]	11
8.	Placa Raspberry Pi, Fuente:[19]	12
9.	Autodesk Inventor Professional, Fuente: Quimiz D, Sierra X	12
10.	Autodesk Meshmixer, Fuente: Quimiz D, Sierra X	13
11.	Diagrama de Bloques de Etapas del Proyecto.	14
12.	Diagrama de Bloques del Accionamiento del Elastómero. Fuente: Quimiz D, Sierra X	15
13.	Planteamiento del Modelo. Fuente: Quimiz D, Sierra X	16
14.	Consideraciones Longitudinales de Dedos de la mano.Fuente: Quimiz D, Sierra X	17
15.	Prótesis Multifunción Robótica. Fuente:DEKA Hand[20]	18
16.	Prótesis Mano Robótica. Fuente:Hannes Hand [15]	18
17.	Probetas sin Exposición al Vacío. Fuente: Quimiz D, Sierra X	20
18.	Probetas con Exposición al Vacío. Fuente: Quimiz D, Sierra X	21
19.	Ensayo de Tracción. Fuente: Quimiz D, Sierra X	22
20.	Diseño Molde de Dedo Pulgar. Fuente: Quimiz D, Sierra X	24
21.	Proceso de Impresión de Molde de Dedo Pulgar. Fuente: Quimiz D, Sierra X	25
22.	Preparación e Inyección de Ecoflex 00-10. Fuente: Quimiz D, Sierra X	25
23.	Actuación de Pulgar Suave. Fuente: Quimiz D, Sierra X	26
24.	Diseño CAD Dedo Pulgar	27
25.	Diseño CAD Dedo Índice	27
26.	Diseño CAD Dedo Medio	27
27.	Diseño CAD Dedo Anular	28
28.	Diseño CAD Dedo Meñique	28
29.	Moldes Impresos en Resina. Fuente: Quimiz D, Sierra X	28
30.	Segundo Prototipo de Dedo. Fuente: Quimiz D, Sierra X	29
31.	Diseño Prototipo Mano Robótica. Fuente: Quimiz D, Sierra X	30
32.	Diseño Prototipo Mano Robótica. Fuente: Quimiz D, Sierra X	31
33.	Segundo Prototipo Mano Robótica. Fuente: Quimiz D, Sierra X	31
34.	Segundo Diseño Prototipo Mano Robótica. Fuente: Quimiz D, Sierra X	32
35.	Análisis Topológico en Mano. Fuente: Quimiz D, Sierra X	32
36.	Segundo prototipo mano robótica. Fuente: Quimiz D, Sierra X	33
37.	Diseño Prototipo Final Mano Robótica. Fuente: Quimiz D, Sierra X	33
38.	Base Principal de Servomotores 360° Grados. Fuente: Quimiz D, Sierra X	34
39.	Plato Base Guía. Fuente: Quimiz D, Sierra X	35
40.	Disposición de Capas. Fuente: Quimiz D, Sierra X	36
41.	Plato Base Sistema Pan. Fuente: Quimiz D, Sierra X	37
42.	Plato Base Sistema Tilt. Fuente: Quimiz D, Sierra X	38
43.	Mordaza de Manguera. Fuente: Quimiz D, Sierra X	39
44.	Acople. Fuente: Quimiz D, Sierra X	40
45.	SopORTE Sistema Pan and Tilt. Fuente: Quimiz D, Sierra X	41
46.	Moldes para Actuadores Neumáticos. Fuente: Quimiz D, Sierra X	42
47.	Moldes para Actuadores Neumáticos. Fuente: [12].	43
48.	Prototipo con Burbujas. Fuente: Quimiz D, Sierra X	44
49.	Moldes para Actuadores Neumáticos. Fuente: Quimiz D, Sierra X	45

50.	Cámara de Vacío. Fuente: Quimiz D, Sierra X	46
51.	Cera Desmoldante. Fuente: Quimiz D, Sierra X	46
52.	Aplicación Cera Desmoldante. Fuente: Quimiz D, Sierra X	46
53.	Aplicación de Ecoflex 00-10. Fuente: Quimiz D, Sierra X	47
54.	Pan and Tilt Ensamblado: Quimiz D, Sierra X	47
55.	Registro en Blynk. Fuente: Quimiz D, Sierra X	49
56.	Registro en Aplicación Móvil Blynk. Fuente: Quimiz D, Sierra X	49
57.	Dashboard de Blynk web. Fuente: Quimiz D, Sierra X	50
58.	Token de Autenticación. Fuente: Quimiz D, Sierra X	50
59.	Instalación Librería ESP32. Fuente: Quimiz D, Sierra X	51
60.	Código Inicial Librerías. Fuente: Quimiz D, Sierra X	51
61.	Código de configuración Wifi. Fuente: Quimiz D, Sierra X	51
62.	ESP-WROOM-32. Fuente: Alldatasheet [7].	52
63.	Circuito Electrónico. Fuente: Quimiz D, Sierra X	52
64.	Tabla de Peso Elevación Servomotor, Fuente: Quimiz D, Sierra X	53
65.	Escala de Pesos, Fuente: Quimiz D, Sierra X	54
66.	Conexión sensor FSR 402. Fuente: [13]	54
67.	Prueba con Manómetro, Fuente: Quimiz D, Sierra X	55
68.	Diseño Actuador Manufacturado Completo. Fuente: Quimiz D, Sierra X	57
69.	Agarre de Objeto Cilíndrico. Fuente: Quimiz D, Sierra X	58
70.	Agarre de Objeto Cúbico. Fuente: Quimiz D, Sierra X	58
71.	Servomotor TD-8320MG	59
72.	Diseño Final de Prototipo de Mano Robótica con Actuadores Suaves. Fuente: Quimiz D, Sierra X	60
73.	Gráfica de Presión de Dedo Robótico Suave. Fuente: Quimiz D, Sierra X	61
74.	Pruebas de Prehensión. Fuente: Quimiz D, Sierra X	63
75.	Cronograma de Actividades. Fuente: Quimiz D, Sierra X	65
76.	Acople para manguera y racor. Fuente: Quimiz D, Sierra X	83
77.	Acople para Servomotor Principal. Fuente: Quimiz D, Sierra X	84
78.	Acople para Servomotor Complemento. Fuente: Quimiz D, Sierra X	85
79.	Base para Servomotores. Fuente: Quimiz D, Sierra X	86
80.	Disco acoplamiento de Rodamiento. Fuente: Quimiz D, Sierra X	87
81.	Disco soporte. Fuente: Quimiz D, Sierra X	88
82.	Disco con Base de Rodamiento. Fuente: Quimiz D, Sierra X	89
83.	Eje de unión. Fuente: Quimiz D, Sierra X	90
84.	Soporte para plato superior e inferior. Fuente: Quimiz D, Sierra X	91
85.	Base de Dedo Anular. Fuente: Quimiz D, Sierra X	92
86.	Base de Dedo Índice. Fuente: Quimiz D, Sierra X	93
87.	Base de Dedo Medio. Fuente: Quimiz D, Sierra X	94
88.	Base de Dedo Meñique . Fuente: Quimiz D, Sierra X	95
89.	Base Dedo Pulgar. Fuente: Quimiz D, Sierra X	96
90.	Molde Pulgar Superior. Fuente: Quimiz D, Sierra X	97
91.	Base Superior de Dedo Anular. Fuente: Quimiz D, Sierra X	98
92.	Recámara de Aire Dedo Anular. Fuente: Quimiz D, Sierra X	99
93.	Recámara de aire Dedo Medio . Fuente: Quimiz D, Sierra X	100
94.	Recámara de aire Dedo Menique. Fuente: Quimiz D, Sierra X	101
95.	Recámara de aire Dedo Índice . Fuente: Quimiz D, Sierra X	102
96.	Base Dedo Pulgar . Fuente: Quimiz D, Sierra X	103

I. PROBLEMA

Según la Encuesta de Situación de Vida (ECV-2014), Ecuador cuenta con 15.952.442 habitantes, de los cuales 563.515 presentan algún tipo de discapacidad física, psicosocial o sensorial. Este grupo prioritario constituye el 3,5 % de la población nacional. Las personas con discapacidad se distribuyen principalmente en las zonas urbanas con un 62,4 % y el 37,6 % restante en las zonas rurales. [16] Con respecto a la estructura etaria de esta población, se sabe que cierto tipo de trastornos pueden desarrollarse a cualquier edad, dependiendo de las consecuencias de una enfermedad o accidente, desde el nacimiento hasta su manifestación a lo largo del ciclo vital.

Ecuador es el segundo país de Latinoamérica con mayor número de amputaciones, cada año aproximadamente 500 de sus habitantes se ven afectados por algún tipo de amputación.[10] Las prótesis humanas son extremadamente raras debido al alto costo de producción. Estas requieren modificación, mantenimiento y cuidado profesional. En adultos, tienen una vida útil de 4 a 5 años, mientras que, en niños y adolescentes se deben cambiar por completo cada 2 o 3 años. Los ajustes deben hacerse por lo menos cada seis meses, ya que están en la etapa de crecimiento. Para determinar el tipo de dispositivo o extensión artificial que requiere una persona, es importante conocer sus necesidades, por lo tanto, se deberá someter a una evaluación física.

Hay menos de 7 compañías conocidas a nivel nacional que realizan la elaboración de prótesis a lo largo del país por esta razón el costo promedio de una prótesis supera los USD \$1000, dependiendo del tipo de amputación, material y función requerida. No se debe utilizar el mismo tipo de prótesis para las personas mayores que pasan la mayor parte del tiempo en casa, como para los de 15 años.

Teniendo en cuenta personas con amputaciones en las manos que forman parte del “Subgrupo 220 con discapacidad de las extremidades superiores”[8], las tareas complejas pueden ser un inconveniente o llegar a ser arriesgado para realizar con los brazos robóticos, por este motivo, el robot blando tiene las características de flexibilidad, resistencia y fuerza que robots normales no tienen. Esto lo convierte en una opción valiosa cuando se tiene que diseñar prótesis robóticas en los que la seguridad y flexibilidad del usuario es primordial importancia.

II. JUSTIFICACIÓN

Tradicionalmente, los sistemas robóticos han sido construidos con materiales duros como el aluminio, en la naturaleza es difícil ver componentes duros, en cambio, el cuerpo tiende a ser suave, elástico, resistente y flexible, lo que les permite tener una mejor adaptación al entorno. Esta es una de las razones por las que existe un interés creciente en el uso de materiales inusuales debido a sus propiedades mecánicas al interactuar con entornos dinámicos.

La principal ventaja de aplicar Robótica Suave, “Soft Robotics” por su siglas en inglés, sobre el acercamiento tradicional a los manipuladores robóticos es su capacidad para agarrar objetos de forma de interactuar de forma segura con los humanos. Todo gracias a su forma inspirada en la naturaleza, simplifica la ejecución de acciones que serían complejas si se realizaran con un robot tradicional. Además, debido a que tienen menos piezas mecánicas y son más simples, requieren menos mantenimiento y si recibe un golpe, pueden absorber el impacto sin agrietar o deformar.

A nivel latinoamericano son pocas las aplicaciones en las que se usan los “Soft Robots”. Tomando como ejemplo a Ecuador, son muy escasas las investigaciones y aplicaciones que hacen referencia a este tipo de Robots, siendo considerados uno de los más grandes avances tecnológicos para diferentes áreas. Es por este motivo que se pretende realizar el diseño de un prototipo de mano robótica, capaz de manipular objetos livianos como solución tecnológica viable y a bajo costo.

III. OBJETIVOS

III-A. Objetivo General

Diseñar un prototipo de mano basado en “Soft Robotics” aplicando un accionamiento de modo dual para la sujeción de objetos livianos.

III-B. Objetivos Específicos

- Investigar la anatomía, fisiología y mecánica del movimiento de una mano para el estudio de los beneficios que los “Soft Robot” ofrecen dentro del área de desarrollo de prótesis.
- Realizar el diseño mecánico utilizando programas de diseño asistido por computador CAD, tomando en consideración el estudio del estado del arte.
- Implementar el accionamiento neumático y por tendones artificiales utilizando las características de ambos sistemas para el correcto movimiento de la prótesis.
- Validar el funcionamiento del prototipo mediante pruebas experimentales del movimiento básicos de la mano.

IV. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Tradicionalmente, los robots han evolucionado en torno a estructuras rígidas que limitan su capacidad para interactuar con su entorno. En los últimos años, los robots se pueden clasificar en duros o blandos en función de la deformabilidad de los materiales que los componen. Con su estructura blanda y grados de libertad redundantes, los robots blandos se pueden utilizar para tareas sofisticadas en entornos abarrotados o desestructurados, proporcionando una excelente destreza.

IV-A. Arquitectura de la mano

Es un órgano que se localiza en el extremo de cada antebrazo, es aquel que se deriva para la manipulación física. La mano posee 27 huesos, 8 en el carpo, 5 metacarpianos y 14 falanges. En cada ser humano existe una dominante la cual es aquella con la que se tiene más fuerza o más habilidad o agilidad para hacer las cosas, esta pueda ser la zurda (izquierda) o la diestra (derecha).[29] Las unidades arquitecturales de la mano se dividen en unidades rígidas y móviles. La unidad rígida está constituida por el segundo y tercer metacarpiano y fila distal del carpo, ya que esta presenta un movimiento en articulaciones que es muy limitado intercarpianas.

IV-A1. Estructura Ósea Mano Humana: Es aquella en donde se da la unión entre el antebrazo y la mano. Sus partes anatómicas están constituidas por las partes metaepifisarias distales de los huesos del antebrazo, radio, cúbito y el conjunto de huesos que conforman el carpo. La muñeca realiza movimientos en eje transversal y en un eje anteroposterior que efectúa la flexión y extensión de en el primer eje y en el segundo realiza movimientos de inclinación.

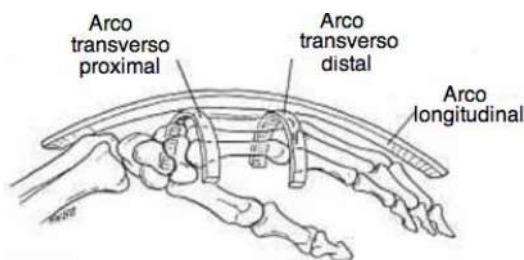


Figura 1: Arco Discal. Fuente: Dr. González, V. (2010)

IV-A2. Dedos: Son los 5 apéndices articulados que se encuentran en las manos y en los pies. Son aquellos que pueden apreciar la forma, tamaño, temperatura y textura de un objeto. Cada dedo recibe un nombre: pulgar o dedo gordo, índice, medio, anular y meñique. Cada uno tiende a diferenciarse del otro no solo por su nombre sino por su forma y tamaño. Existe la presencia de 3 huesos en cada dedo a excepción de los pulgares en donde solamente hay 2.

IV-A3. Goniometría de los Dedos: La goniometría es una técnica de evaluación que se utiliza para medir el rango de movimiento (ROM) de las articulaciones. El ROM es la distancia que puede moverse una articulación en cada dirección, como se muestra en la tabla I.

La goniometría se realiza para evaluar el rango de movimiento articular y determinar si hay algún problema articular. En los procesos de rehabilitación, se utilizan para medir el rango de movimiento antes y después de someterse a algún tratamiento.

IV-A4. Movimientos Básicos Mano: Los movimientos básicos de las manos son aquellos que se realizan con respecto a los ejes de las manos y no del cuerpo. Como referencia a los movimientos que hacemos día a día, existen los movimientos de abducción y aducción, flexión y extensión, pronación y supinación. Estos movimientos comúnmente en el campo clínico suelen llamarse o describirse como biomecánicos por el conjunto de ángulos de rotación fisiológica.

Tabla I: Goniometría de Dedos de la Mano. Fuente: [27]

Goniometría de los dedos			
Articulación metacarpofalángica	Flexión	Grado Inicial Grado Flexión	0° 0 - 50°
	Extensión	Grado Inicial Grado Flexión	0° 0°
Articulación interfalángica	Flexión	Grado Inicial Grado Flexión	0° 0-80°
	Extensión	Grado Inicial Grado Flexión	0° 0-20°
Articulación metacarpofalángica	Flexión	Grado Inicial Grado Flexión	0° 0 - 90°
	Extensión	Grado Inicial Grado Flexión	0° 0-45°
Articulación interfalángica proximal	Flexión	Grado Inicial Grado Flexión	0° 0 - 100°
	Extensión	Grado Inicial Grado Flexión	0° 0°

IV-A5. *Taxonomía de Agarre de la Mano*: Es el estudio que abarca las distintas formas de agarre basado en el entorno [2]. La determinación de la adherencia se basa en cualidades medibles analíticamente:

- **Flexibilidad**: Se define como la capacidad de una articulación o grupo de articulaciones para realizar un rango máximo de movimiento.
- **Fuerza de apertura**: El agarre satura la fuerza de apertura cuando la conexión donde se produce el contacto tiene juego
- **Manipulabilidad**: La capacidad de los dedos para dar movimientos voluntarios a los objetos.
- **Estabilidad**: Capacidad de aguante sin deformación.

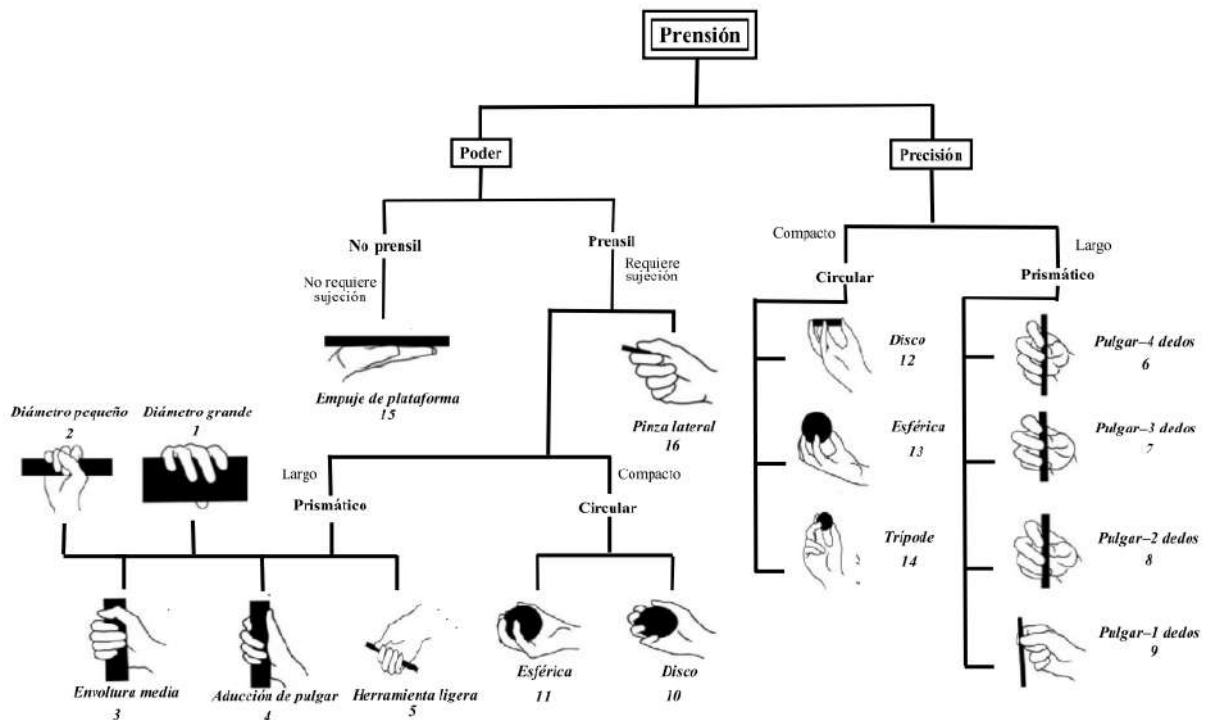


Figura 2: Tipos de Agarre según MR Cutkosky and RD Howe, Fuente: [31]

Como se visualiza en la Figura 3 la disposición del espacio de los agarres humanos, la organización de la taxonomía revela uno de los factores que influyen en la decisión del agarre. El agarre puede ser continuo dependiendo del tamaño del objeto y la potencia requerida. La Taxonomía nos da a conocer los requerimientos tales como fuerza, movimiento y firmeza.

Se priorizará los movimientos básico dentro de la vida cotidiana:

Tabla II: Selección y clasificación de prensiones, Fuente: Quimiz D, Sierra X

Clasificación de prensiones		
Clasificación	Tipo	Selección
Poder: Prensil	Pinza lateral	✓
	Circular esférica	
	Circular disco	
	Prismático herramienta ligera	
	Abducción de pulgar ligera	
	Prismático envoltura media	
	Prismático diámetro grande	
Poder: No prensil	Empuje de plataforma	✓
Precisión: Prismático	Pulgar - 4 dedos	
	Pulgar - 3 dedos	
	Pulgar - 2 dedos	
	Pulgar - 1 dedos	
Precisión: Circular	Disco	✓
	Esférico	
	Trípode	

IV-A6. Grado de Libertad: Los grados de libertad se refieren al número de movimientos independientes que puede realizar una articulación del dedo sin afectar a otras articulaciones. Todos los dedos humanos se componen de tres articulaciones principales: la articulación metacarpofalángica, la articulación interfalángica proximal y la articulación interfalángica distal. Estas articulaciones son las responsables de los diferentes grados de libertad de los dedos. El movimiento de cada articulación puede ser de traslación, rotación o una combinación de estos, lo que permite obtener 6 articulaciones.[29]

Estos grados de libertad permiten que nuestros dedos se adapten a diferentes tareas. Desde escribir en teclados hasta tocar instrumentos musicales, los dedos se pueden ajustar y mover con una alta precisión. La capacidad de agarrar, pellizcar, apretar y manipular objetos de varias formas y tamaños se logra mediante una combinación de movimientos coordinados en estas articulaciones.

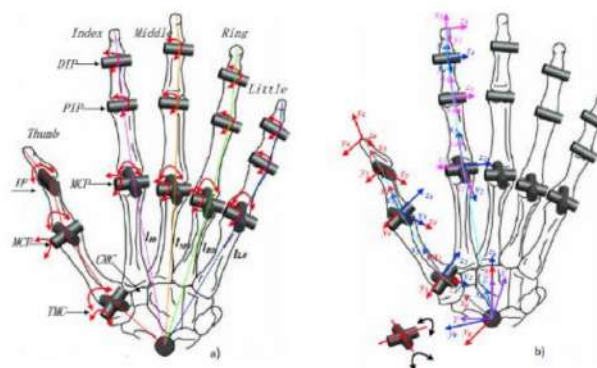


Figura 3: Modelo de la Mano Humana de 21 GDL de Qiang Zhan

IV-B. Antecedentes y Patentes

IV-B1. Actuadores Neumáticos Suaves : Un actuador blando es un tipo de actuador fabricado con materiales flexibles, como elastómeros o aleaciones con memoria de forma, y está diseñado para imitar el movimiento y la flexibilidad de los sistemas biológicos. Estos actuadores se utilizan a menudo en aplicaciones robóticas que requieren un alto grado de flexibilidad, como en robótica blanda, prótesis y dispositivos portátiles.

Hay varios tipos de modelos de actuador suave, algunos ejemplos incluyen:

- Actuador McKibben: Tipo de músculo artificial neumático que utiliza una membrana elastomérica multicapa como elemento de contracción. Se compone de una cámara inflable de material elastomérico, que está rodeada por una capa exterior de tela y se puede inflar o desinflar para contraerse o expandirse.
- Actuadores neumáticos: Estos utilizan aire comprimido para inflar o desinflar una cámara flexible, lo que resulta en movimiento. Ejemplos de actuadores neumáticos incluyen actuadores McKibben y actuadores de fuelle.
- Actuadores de polímero electroactivo (EAP): utilizan un campo eléctrico para producir movimiento en un material polimérico flexible. Los ejemplos de actuadores EAP incluyen actuadores de elastómero dieléctrico (DEA) y actuadores de compuesto de metal y polímero iónico (IPMC).
- Actuadores de aleación con memoria de forma (SMA): utilizan el efecto de memoria de forma de ciertas aleaciones, como el Nitinol, para producir movimiento.
- Actuadores magnéticos: utilizan la interacción entre campos magnéticos y un material magnético para producir movimiento.

Cada uno de estos modelos tiene sus propias ventajas y desventajas, y la elección de cuál usar depende de la aplicación específica y los requisitos del sistema.

IV-C. Soft Robotics

El término “Soft Robot” se está utilizando para identificar robots con características morfológicas y constitutivas no convencionales. Sin embargo, el concepto de suavidad, en este caso, puede ser muy amplio e incluso hacer referencia a características muy diferentes. [6]

Estos Robots tienen la particularidad de estar orientados a la seguridad del ser humano porque son blandos y su material ayuda a la elasticidad de la misma, esto nos da una amplia gama de aplicaciones. El accionamiento neumático de los “soft robot” se divide en presión positiva y negativa. La tecnología de actuadores de presión positiva consiste en mover suavemente el actuador moviendo la cavidad, deformándola y llenándola con aire comprimido para expandir el cuerpo principal. Por el contrario, el negativo hace que los actuadores blandos se muevan y se deformen extrayendo aire del orificio a través de la succión, lo que hace que el vacío se encoja.[25] En la Figura 4, se observa la capa con la que cuenta un “soft robot”, para su funcionamiento.

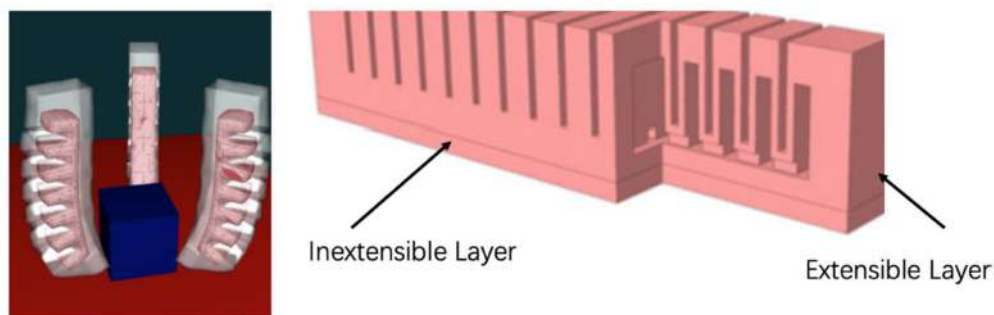


Figura 4: Estructura Soft Robot, Fuente: Hang, Su, Xu, Hou, Xin, Zhang. (2022)

IV-C1. Inspiración Biológica de Soft Robotics: La robótica blanda, especialmente los robots blandos inspirados en la biotecnología, es un área con mucho potencial para aplicaciones médicas, ya que se enfoca en crear dispositivos más amigables con el ser humano y más adaptables al entorno biológico.

Las redes neumáticas, conocidas como PneuNets, son una serie de canales y cavidades en un elastómero que responden a una cierta presión de aire comprimido inflándose y creando movimiento. Estos actuadores son estables, permiten controlar o establecer movimientos cambiando la geometría de la red interna, y son movimientos de gran amplitud en ciclos repetitivos e ininterrumpidos [9].

IV-C2. Impresión 3D: La impresión 3D implica la creación de objetos físicos generados por computadora mediante la aplicación continua de capas de materiales. Esta tecnología utiliza una variedad de métodos y materiales, cada uno con indicaciones específicas según la resolución y la calidad del objeto resultante. Se puede categorizar como manufactura de adición. Los plásticos y las aleaciones de metal son los materiales más comunes que se utilizan para la impresión 3D, pero se puede utilizar casi cualquier cosa, desde hormigón hasta tejido vivo [22].

La impresión 3D se puede utilizar para resolver una gran variedad de tareas, como diseñar y experimentar con prototipos. Las herramientas CAD/CAM son compatibles con los formatos necesarios para la impresión y exportación 3D para la impresión de productos en menos tiempo [28].

Tabla III: Tipos de Impresión 3D. Fuente: Quimiz D, Sierra X

Tipo de Impresión	Descripción
Estereolitografía	La estereolitografía (SLA) utiliza luz láser ultravioleta para tratar selectivamente con una solución de resina líquida tratable, creando un patrón sólido. Esta es una técnica muy precisa que asegura una buena calidad superficial.
Sinterizado selectivo por láser	Es una tecnología de fabricación aditiva que utiliza láseres para sinterizar partículas de polvo de polímero en una estructura sólida basada en un modelo 3D.
Modelado por deposición fundida (MDF)	Crean objetos depositando capas de polímeros termoplásticos fundidos. Se puede utilizar una amplia gama de materiales, lo que facilita el cumplimiento de cualquier requisito.
Bioimpresión	El objetivo final es replicar tejidos y materiales, como órganos, que luego puedan trasplantarse a personas. Una ventaja destacable es el uso de células de pacientes, que pueden imprimir tejidos u órganos personalizados según las necesidades de cada persona, aunque todavía no es posible evaluar si el organismo los aceptará o no.
Procesamiento digital de luz – DLP	Tratamiento de luz selectivo en un baño de resina líquida curable para formar un patrón sólido. Aunque ambos métodos son similares a SLA en el uso de resinas curables, difieren en el tipo de fuente de luz utilizada para tratar el fotopolímero.

IV-C3. Ecoflex™ 00-10: La silicona Ecoflex está compuesta mayoritariamente por platino, el cual presenta la capacidad de autorregenerarse a temperatura ambiente. Se caracterizan por su baja viscosidad, lo que asegura una fácil mezcla en el entorno donde se aplicará y además tiene una buena desaireación. Pueden ser estirados y volver a su forma original sin distorsión. La vida útil de un producto depende de la aplicación, materiales expuestos, frecuencia de uso, etc. La temperatura especificada por el fabricante para curar el producto es (73 °F/23 °C). Los resultados deben almacenarse en una superficie plana en un ambiente fresco y seco. En Tabla IV se podrá observar los parámetros del Ecoflex.

Tabla IV: Tabla técnica de Ecoflex. Fuente: [24]

	Mixed Viscosity (ASTM D-2393)	Specific Gravity (g/cc) (ASTM D-1475)	Specific Volume (cu. in./lb.) (ASTM D-1475)	Pot Life (ASTM D-2471)	Cure Time	Shore Hardness (ASTM D-2240)	Tensile Strength (ASTM D-412)	100% Modulus (ASTM D-412)	Elongation at Break % (ASTM D-412)	Die B Tear Strength (ASTM D-624)	Shrinkage (in./in.) (ASTM D-2566)
Ecoflex™ 5	13,000 cps	1.07	25.8	1 min.	5 min.	5A	350 psi	15 psi	1000%	75 pli	< .001 in./in.
Ecoflex™ 00-50	8,000 cps	1.07	25.9	18 min.	3 hours	00-50	315 psi	12 psi	980%	50 pli	< .001 in./in.
Ecoflex™ 00-30	3,000 cps	1.07	26.0	45 min.	4 hours	00-30	200 psi	10 psi	900%	38 pli	< .001 in./in.
Ecoflex™ 00-33 AF	3,000 cps	1.07	26.0	45 min.	4 hours	00-33	200 psi	10 psi	900%	38 pli	< .001 in./in.
Ecoflex™ 00-20	3,000 cps	1.07	26.0	30 min.	4 hours	00-20	160 psi	8 psi	845%	30 pli	< .001 in./in.
Ecoflex™ 00-20 FAST	3,000 cps	1.07	26.0	20 min.	1 hour	00-20	160 psi	8 psi	845%	30 pli	< .001 in./in.
Ecoflex™ 00-10	14,000 cps	1.04	26.6	30 min.	4 hours	00-10	120 psi	8 psi	800%	22 pli	< .001 in./in.

*All values measured after 7 days at 73°F/23°C

Mix Ratio: 1A:1B by volume or weight Color: Translucent	Useful Temperature Range: -65°F to 450°F (-53°C to 232°C) Dielectric Strength (ASTM D-147-97a): >350 volts/mil
--	---

IV-C4. *Impresora 3D Creality LD-002H* : La impresión en 3D ha experimentado una transformación significativa con la evolución de las impresoras de resina. Estas innovadoras máquinas han logrado superar los límites previamente establecidos al ofrecer una combinación excepcional de alta resolución y precisión de impresión. Con una resolución impresionante de 1620 x 2560 píxeles, la impresora de resina captura cada detalle con una meticulosidad sorprendente, permitiendo que incluso los puntos más pequeños se representen con una claridad excepcional. [18] La precisión lograda, que llega a los 51 micrómetros, redefine la forma en que podemos crear objetos en tres dimensiones con una fidelidad sin precedentes.

Con un rango de impresión de 130 x 82 x 160 mm, se ha establecido un marco en el que las piezas deben adaptarse para garantizar que no excedan las dimensiones permitidas por la impresora. Esto demuestra la necesidad de ajustar cuidadosamente las medidas de los componentes para asegurar una impresión precisa y de alta calidad.

Un aspecto adicional que distingue a esta impresora de resina es su pantalla LCD de alta definición. Esta pantalla no solo contribuye a una experiencia de impresión más rica y detallada, sino que también mejora la eficiencia del proceso. Un desarrollo particularmente notorio es el tiempo de solidificación, que se ha reducido significativamente a 1-4 segundos por capa. Este logro es aún más impresionante considerando que representa un aumento del 10 % en comparación con impresoras de resina similares [18].



Figura 5: Impresora 3D Creality LD-002H

IV-C5. Servo Motor de Corriente Continua DS04-NFC : Un servo motor de rotación continua de 360 grados se usa a menudo en aplicaciones donde el motor necesita girar continuamente en cualquier dirección, como en robótica o sistemas de automatización. Estos motores también se conocen como servo motores de rotación continua o “servos CR”.

Este tipo de servo motores tienen un circuito de control incorporado que les permite ser controlados por una señal de servocontrol estándar, que generalmente usa una señal de modulación de ancho de pulso (PWM) para establecer la posición del motor. Por lo general, también vienen con un mecanismo de reducción de engranajes incorporado, que proporciona un mayor par y una velocidad reducida. Vale la pena señalar que estos servos se utilizan principalmente en aplicaciones robóticas, ya que permiten un control más preciso sobre la rotación del motor y un mayor rango de movimiento en comparación con un motor de CC estándar

Tabla V: Especificaciones servo motor DS04-NFC. Fuente: [21]

Especificaciones técnicas	
Modelo	DS04-NFC
Tamaño	40,5 x 20 x 40 mm
Ángulo de rotación	360° continuo
Torque	5kg/cm
Voltaje de operación	4.8V – 6V
Corriente	1000mA
Velocidad	0.22 seg/60° (45RPM aprox)
Periodo de pulso	20mS (50Hz)
Ancho de pulso	entre 1ms y 2ms



Figura 6: Servo Motor MG996R

IV-C6. Manguera de Silicona: La manguera TIGON 3350 es una manguera de silicona alimentaria fabricada con 100 % de silicona virgen, lo que la hace segura para su uso en aplicaciones de procesamiento de alimentos. Cumple con las normas sanitarias 3-A, que establecen los estándares para equipos y sistemas utilizados en la industria alimentaria, y también cumple con las normas FDA, que establecen los requisitos para productos alimentarios, medicamentos y dispositivos médicos. Además, cumple con las normas ISO 10993, que establecen los requisitos para la evaluación de biocompatibilidad de materiales utilizados en contacto con tejidos vivos o fluidos corporales. Estas normas garantizan que la manguera TIGON 3350 es segura para su uso en aplicaciones de procesamiento de alimentos y que cumple con los estándares internacionales de seguridad alimentaria. [17]

Algunas de las características de la manguera TIGON 3350 son:

- Fabricada con 100 % de silicona virgen: esto garantiza que es segura para su uso en aplicaciones de procesamiento de alimentos.
- Cumple con las normas sanitarias 3-A, FDA e ISO 10993: estas normas garantizan que la manguera cumple con los estándares internacionales de seguridad alimentaria.
- Resistencia a altas y bajas temperaturas: puede soportar temperaturas extremadamente altas y bajas, lo que la hace adecuada para aplicaciones de pasteurización y congelación.
- Resistente a productos químicos: resistente a la mayoría de los productos químicos utilizados en el procesamiento de alimentos.

- Flexibilidad: es flexible y puede doblarse en ángulos pequeños sin dañarse, lo que la hace adecuada para aplicaciones en espacios reducidos.
- Fácil de limpiar: es lisa y no porosa, lo que la hace fácil de limpiar y desinfectar.
- Durabilidad: fabricada con materiales de alta calidad para garantizar una vida útil prolongada.



Figura 7: Manguera TIGON 3350. Fuente: [17]

IV-C7. Racor Neumático: En la industria existen varios tipos de accesorios neumático para realizar distintos trabajos con aire. Un racor es un pequeño accesorio que cuenta con una unión y un acople el cual sirve para unir con válvulas, accionamiento neumáticos, entre otros. Del mismo modo, se pueden definir diferentes tipos de accesorios: cortos, rectos, en forma de Y y en forma de T.

Se pueden clasificar de la siguiente manera:

- Instantáneos: Esto permite la creación rápida y eficiente de circuitos que transportan gases, aire comprimido, líquidos y otras sustancias que se encuentran en una amplia gama de temperaturas, presiones y tipos de fluidos.
- Compresión: Permiten el transporte de líquidos y gases comprimidos a través de tuberías metálicas o termoplásticas.
- Función: Se utilizan en muchas aplicaciones y son ideales para los cambios ambientales, ya que ayudan a prevenir o regular el transporte de sustancias por toda la instalación.

IV-C8. Manguera Neumática: Es el medio por el que circula el aire comprimido en el sistema neumático para hacer funcionar los distintos elementos, estas están fabricadas con materiales resistentes a alta presión, como poliuretano, nylon, PVC o goma. Se combina con una especie de conector rápido o conexión neumática con el fin de conectar varios componentes neumático. Estos se pueden encontrar en diferentes diámetros y en diferentes materiales.

Cuenta con las siguientes características:

- Capacidad de filtrado de hasta 99,9% para partículas de 0,01 micras.
- Diseño compacto y de fácil montaje
- La presión máxima de trabajo es de 250 PSI.
- La capacidad de caudal es de 40 SCFM

IV-D. Controlador

IV-D1. Raspberry Pi 3 Modelo B+: Raspberry Pi tiene soluciones informáticas que se adaptan a una amplia gama de aplicaciones. Desde microcontroladores hasta computadoras basadas en ARM, Raspberry Pi brinda hasta la última gota de energía para su aplicación. El bajo consumo de energía de Raspberry Pi lo convierte en una plataforma extremadamente eficiente. Bueno para sus gastos generales y bueno para el medio ambiente también.[19]

En el contexto de los primeros prototipos, Raspberry Pi se emplea para controlar servomotores y gestionar conexiones a través de aplicaciones telefónicas utilizando la tecnología Bluetooth. Su capacidad para ejecutar códigos permite manejar la rotación de los servomotores, y su compatibilidad con Bluetooth brinda la posibilidad

de establecer conexiones inalámbricas con dispositivos móviles para una mayor interacción y control.

Utilizando esta placa, se llevó a cabo la programación necesaria para lograr el movimiento individual de cada servomotor. Estos servomotores son responsables de suministrar el aire almacenado en las mangueras hacia los actuadores.



Figura 8: Placa Raspberry Pi, Fuente:[19]

IV-E. Software

IV-E1. Autodesk Inventor Professional: Inventor®, el software CAD 3D, ofrece un conjunto completo de recursos para la creación de diseños mecánicos en 3D, generación de documentación y simulación de productos de nivel profesional [1]. Fusiona de manera sólida capacidades de diseño paramétrico, enfoques directos, modelado de formas libres y aplicaciones basadas en reglas. Incorpora herramientas integradas para diversas aplicaciones, como chapas de metal, estructuras, sistemas de tuberías, cableado, presentaciones, representación visual, simulación, diseño para mecanizado y una amplia gama de funciones adicionales. Utilizando este software, se logró la creación precisa de moldes destinados a los dedos, con el fin de posteriormente verter el Ecoflex de manera controlada en dichos moldes.

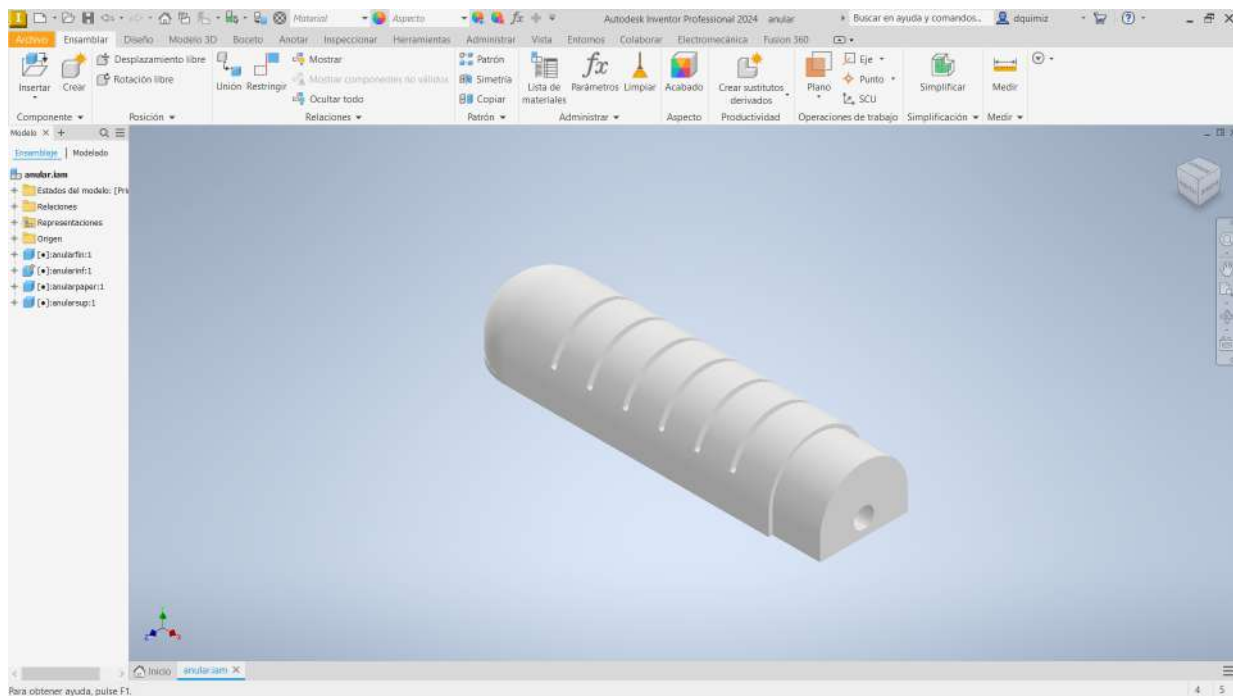


Figura 9: Autodesk Inventor Professional, Fuente: Quimiz D, Sierra X

IV-E2. Autodesk Meshmixer: MeshMixer se fundamenta en estructuras triangulares que constan de tres componentes esenciales: vértices, aristas y caras, representando respectivamente puntos en un espacio tridimensional, conexiones entre pares de vértices y agrupaciones de tres vértices formando triángulos. El nombre del software deriva de su función original, Meshmix, que alude a la capacidad de combinar mallas. Esta característica permite la incorporación de diversos tipos de mallas mediante una herramienta intuitiva de arrastrar y soltar. Es una de las aplicaciones más notables para la edición y preparación de archivos en formato de malla tridimensional. Mediante la aplicación de este software, se logró una representación precisa de la topología de la mano, dado que dispone de herramientas fundamentales para llevar a cabo esta tarea de manera precisa.



Figura 10: Autodesk Meshmixer, Fuente: Quimiz D, Sierra X

V. MARCO METODOLÓGICO

Implementando el concepto de actuador de modo dual se diseñó una mano robótica blanda, con el propósito de acercar el prototipo a un modelo de mano humana, se requirió de seis actuadores de modo dual. Adicional, se utilizó estructuras impresas en 3D con filamentos de PLA y TPU que funcionen como bases rígidas y flexibles para soportar los actuadores de elastómeros, es decir, las falanges. Las estructuras funcionaron de la mismas manera que los huesos metacarpianos situados en la palma de la mano humana.

El sistema se desarrolló, de forma que ejecuta movimientos que asemejan a la mano humana; movimiento de flexión y extensión generando el primer grado de libertad que se obtiene mediante articulación metacarpofalángica accionada por tendón. El segundo grado de libertad consta de los movimientos de pronación y supinación, puesto en ejecución mediante un sistema de engranajes localizado en la muñeca.

El siguiente capítulo tiene como función principal describir el proceso llevado a cabo y la aplicación de los métodos y técnicas que se utilizaron para lograr los objetivos planteados en el diseño del prototipo de mano robótica suave. En primera instancia se presenta el diagrama de etapas del proyecto.

V-A. Descripción de Etapas del Proyecto

Se clasifica el proyecto en 5 etapas generales: diseño, elección de materiales, estimación de costos, implementación y pruebas de validación.

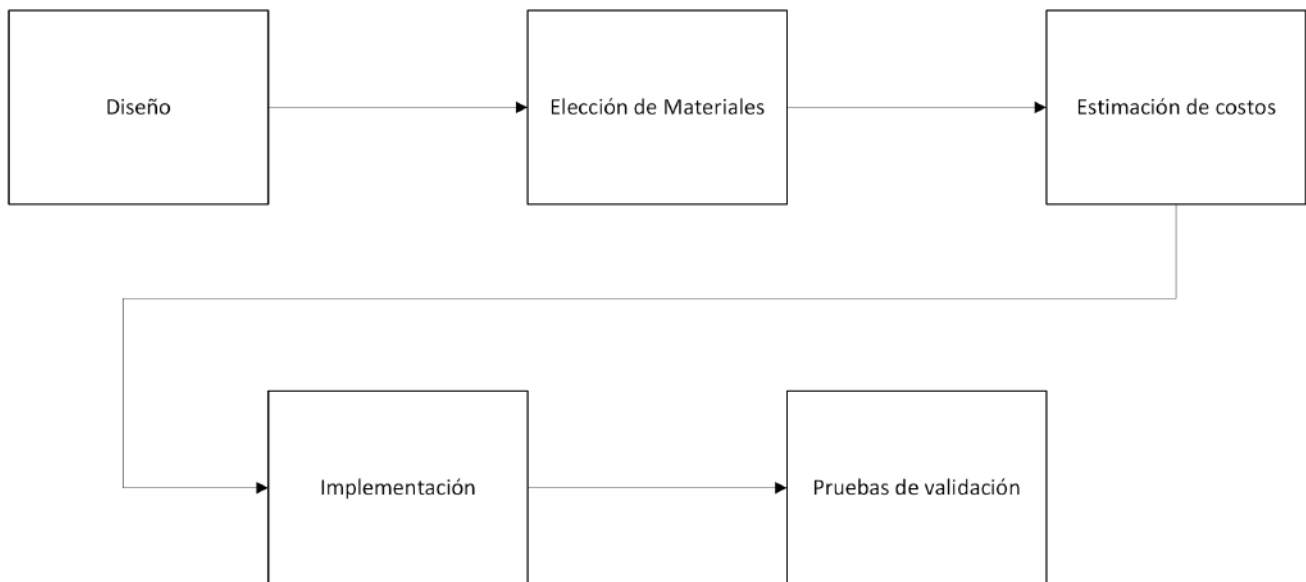


Figura 11: Diagrama de Bloques de Etapas del Proyecto.

En la etapa de Diseño o constitución del proyecto se detalla el desarrollo del mismo; la parte mecánica y electrónica, la fuerza que actuación, la resistencia, etc. Además, conceptos electrónicos como la potencia a utilizar en el proyecto, baterías y circuitos. Es decir, en este apartado se concreta el tipo de Hardware, Software y Diseño Estructural que tomó en cuenta para concretar el diseño final.

Una vez concluida la etapa de Diseño, se avanzó a la segunda etapa de Selección de Materiales, en donde se realizaron las respectivas investigaciones de los materiales de construcción integrados en el diseño.

En la etapa de Presupuesto o Estimación de costos se utilizó para predecir la cantidad y el precio de los recursos necesarios para el alcance del proyecto. La precisión de la estimación fue dependiente en gran medida del alcance

del proyecto: cuanto más detallada sea la estructura y las condiciones del proyecto, mayor será la estimación. Se toma en cuenta: proveedores, la cantidad, calidad, etc. La siguiente etapa es de implementación en donde se detalló el proceso a seguir paso a paso para la construcción del mecanismo. Finalmente, se concluyó con la etapa de Pruebas de Validación, comprobando el correcto funcionamiento de los actuadores blandos, también para validar que los mecanismos cumplan con los parámetros establecidos en los objetivos.

V-B. Diseño Preliminar del Prototipo

Este estudio proporciona un diseño de actuador para mano robótica blanda y combina dos métodos de accionamiento diferentes, se lo puede definir como un actuador que opera en dos modos. El diseño del proyecto sintetizado mediante diagrama de flujos, mostrado en la Figura 12, representa el orden que el mecanismo deberá seguir para ejecutar el modo dual de actuación.

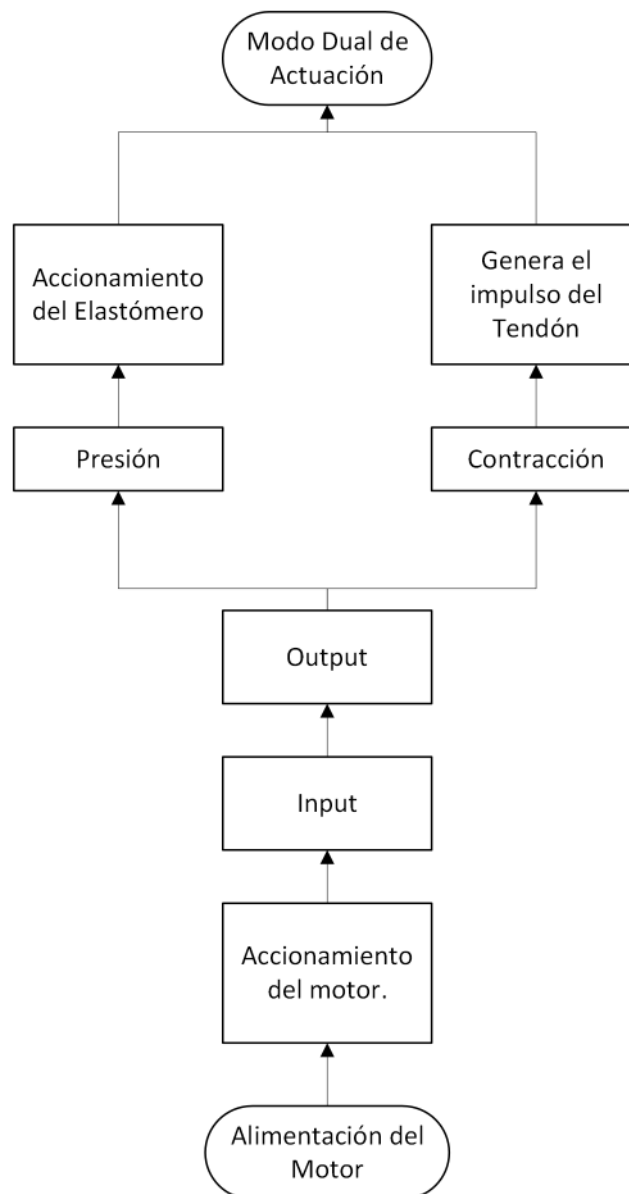


Figura 12: Diagrama de Bloques del Accionamiento del Elastómero. Fuente: Quimiz D, Sierra X

Para el diseño de este mecanismo, se requiere de un tubo de silicona por cada falange de la mano robótica propuesta y conseguir una forma espiral, que se puede conseguir con ayuda de un motor, ejerciendo el par suficiente se podrá generar dos modos de operación, por presión y por contracción, ayudando a simplificar el diseño mecatrónico.

Para el control de conducción de modo dual, el actuador elastómero y la parte de estrangulación del tubo de silicona, están conectadas por una manguera de transmisión de fluidos y tendones, ambos son utilizados para transmitir la presión del fluido acompañado de la fuerza de contracción. Figura 13a

Girar un tubo de silicona que en su interior contenga algún tipo de fluido: pueden ser aire o agua, o incluso una combinación de aire y agua. Se puede usar para controlar un robot blando. Cuando un tubo elástico de pared delgada se tuerce continuamente desde un extremo (el otro extremo está fijo) mediante un par externo, el pandeo se transmite a lo largo del tubo en forma cuasi helicoidal. Se genera la suficiente presión ocasionada por fluidos para hacer que las falanges hechas de elastómero (Ecoflex) actúen imitando el movimiento natural de dedo al doblarse. Figura 13b

El tubo de silicona estará fijado al motor mediante una mordaza diseñada e impresa en 3D para transmitir el par desde el eje del motor. El extremo superior del tubo se fija en el deslizador que puede moverse a lo largo de una trayectoria lineal.

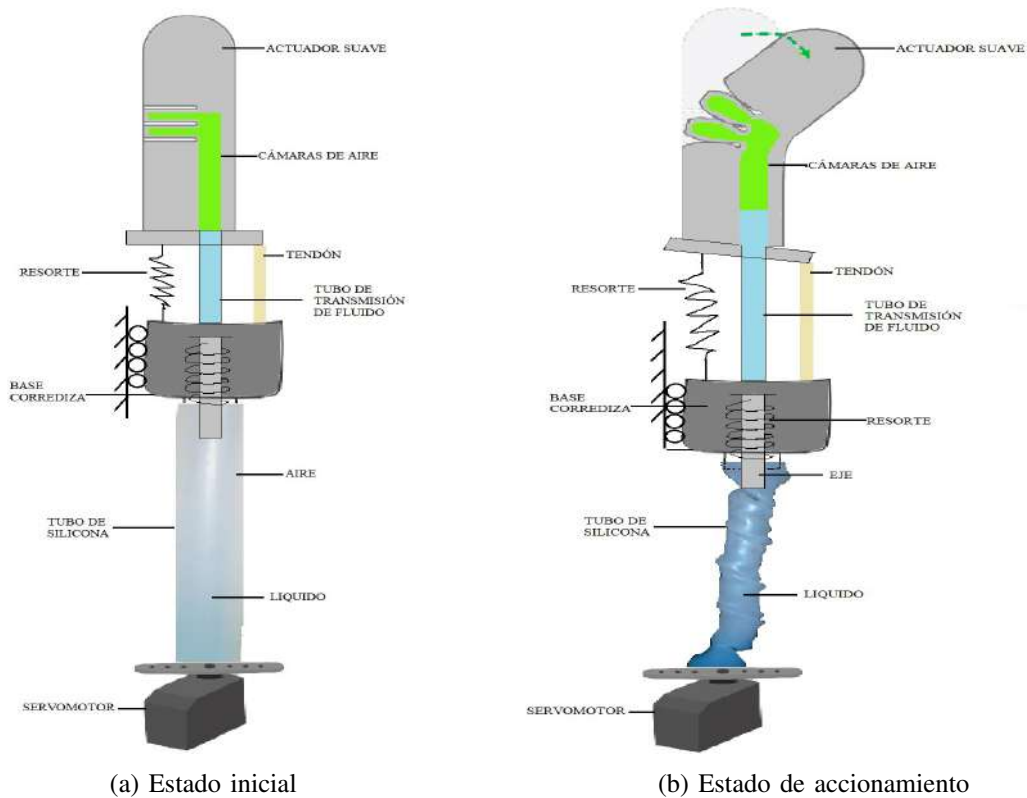


Figura 13: Planteamiento del Modelo. Fuente: Quimiz D, Sierra X

V-B1. *Consideraciones Antropométricas de los Dedos:* La antropometría es la ciencia que estudia las medidas del cuerpo humano, teniendo como principal estudios en las áreas antropológicas, médicas y biomecánica. Es una disciplina de gran importancia en el diseño industrial, ya que permite conocer las dimensiones y formas del cuerpo humano para poder adaptar los objetos a él. Este enfoque resulta especialmente valioso en la creación de sistemas que involucran la interacción del ser humano con: objetos, herramientas, mobiliario, salas y puestos de trabajo.

En el desarrollo del prototipo se consideran las medidas antropométricas de una mano izquierda sana, considerando:

- Ancho máximo de dedos de la mano.
- Altura máxima de los dedos de la mano.
- Distancia en la que se encuentra la articulación interfalángica distal (DIP).

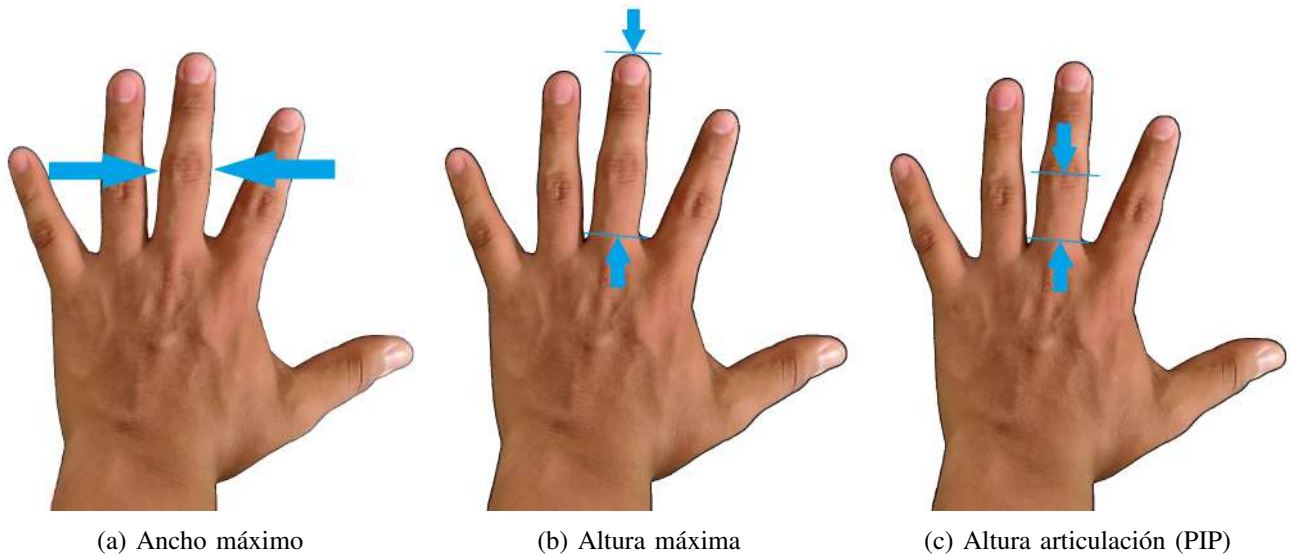


Figura 14: Consideraciones Longitudinales de Dedos de la mano. Fuente: Quimiz D, Sierra X

1. **Ancho máximo de dedos de la mano.**

En la figura 14a se considera el ancho del dedo medio para realizar la medición, con el fin de mantener la medida a lo largo del diseño. El resultado de la medición fue de un ancho de 22 mm.

2. **Altura máxima de los dedos de la mano.**

Para considerar la altura máxima de los dedos, se toma como punto de referencia el borde de la palma hasta donde termina el dedo, como se aprecia en la figura 14b. Los resultados se muestran en la tabla VI.

Tabla VI: Tabla de altura de los dedos de la mano. Fuente: Quimiz D, Sierra X

Dedo	Altura [mm]
Pulgar	63
Índice	68
Medio	82
Anular	76
Meñique	59

3. Distancia en la que se encuentra la articulación interfalángica distal (PIP).

Por limitaciones de diseño sólo se toma en cuenta la articulación PIP, como se ilustra en la figura 14c y su longitud se mide desde donde se aprecia el borde de la palma hasta la mitad de dicha articulación. Los resultados se visualizan en la tabla VII.

Tabla VII: Tabla de altura de PIP. Fuente: Quimiz D, Sierra X

Dedo	Altura PIP [mm]
Pulgar	29
Índice	23
Medio	29
Anular	29
Meñique	19

V-B2. Manos Robóticas más Actuales: A continuación, se presentará una introducción que abordará diversas concepciones relacionadas con las manos robóticas originadas a partir de investigaciones. El enfoque principal radica en lograr la comprensión de las soluciones que se encuentran actualmente en práctica, así como en la identificación de los desafíos y las perspectivas disponibles para potenciar el desarrollo de manos robóticas con un desempeño más eficaz, una adaptabilidad mayor.

DEKA Hand: El propósito fundamental de esta iniciativa es el desarrollo de una prótesis de brazo que emule de manera cercana la funcionalidad de un brazo humano. Este dispositivo en particular está diseñado con una pluralidad de grados de libertad, lo que otorga al usuario la capacidad de ejecutar distintos tipos de agarre. La prótesis incorpora un total de 10 grados de libertad que se encuentran motorizados, lo que posibilita el movimiento de todas las articulaciones características de un brazo. La confección de la mano se lleva a cabo empleando aluminio mediante procesos de mecanizado, y para mejorar su apariencia, se añade un guante fabricado en silicona.[20]



Figura 15: Prótesis Multifunción Robótica. Fuente:DEKA Hand[20]

Hannes Hand: Esta idea de prótesis de mano busca alcanzar una semejanza excepcional con una mano humana, con el propósito de contrarrestar la alta tasa de desuso que actualmente afecta a las prótesis. Este problema surge debido a que las manos robóticas más avanzadas, aunque cuenten con múltiples grados de libertad, aún no logran igualar la adaptabilidad, habilidad y complejidad intrínsecas de una mano natural. El dispositivo Hannes adopta un enfoque antropomórfico en su diseño y su comportamiento, imitando las características de una mano humana.[15].



Figura 16: Prótesis Mano Robótica. Fuente:Hannes Hand [15]

V-B3. Diseño Actuador Suave: Se requiere que los diseños de los actuadores del prototipo sean bio-inspirados, lo que significa que el diseño físico del actuador debe ser similar a la forma de los cinco dedos de la mano humana para lograr un mayor nivel de similitud con el movimiento y funcionalidad. Esta técnica de diseño bio-inspirado puede ayudar a mejorar la eficiencia y la eficacia del prototipo, ya que el diseño se adapta mejor a la tarea que se está realizando. Además, estos actuadores pueden ser más versátiles y permitir un mayor rango de movimientos y control en comparación con los actuadores no bio-inspirados. En general, la incorporación de estos tipos de diseños en la ingeniería puede conducir a innovaciones más efectivas y eficientes en una amplia variedad de aplicaciones.

En el diseño de los actuadores suaves que simulan las acciones que realizan los dedos de la mano, se tomaron en cuenta las características que ofrecen las articulaciones metacarpofalángicas (MCF) y articulaciones interfalángicas proximales (PIP), comúnmente conocidos como nudillos. Cada sección está conectada entre sí por articulaciones representadas por separaciones en el diseño.

- **Articulación metacarpofalángica (MCF):** encargada de conectar los huesos metacarpianos con la falange proximal.
En el diseño del prototipo cumple una función similar a la que tiene en una mano humana. En resumen, esta articulación ayuda a las falanges a realizar los movimientos de flexión y extensión desde la parte superior de la palma, proporcionando estabilidad y permitiendo que los dedos se doblen y se enderecen con facilidad
- **Articulación interfalángica proximal (PIP):** une las falanges media y proximal.
Por otro lado, las articulaciones interfalángicas proximales (PIP) permiten el movimiento de flexión y extensión en la mitad de los dedos, lo que permite que los dedos se doblen y se extiendan. De esta manera, se proporciona una mayor movilidad y capacidad de agarre a los dedos en el prototipo

Se ha tomado en cuenta la importancia del almacenamiento y desplazamiento de aire en el diseño del actuador para permitir que funcione correctamente, mientras que la longitud se ha seleccionado para adaptarse a las necesidades específicas del prototipo. La técnica escogida fue la de actuadores PneuNets que implica el uso de una red de canales huecos ubicados dentro del material elastomérico. Estos canales se llenan de aire comprimido, lo que permite al material elastomérico deformarse y moverse de forma controlada. Al aplicar presión de aire a los canales en una secuencia particular, se pueden crear movimientos complejos y precisos en los dedos robóticos.

El diseño de dedos robóticos suaves mediante PneuNets ofrece varias ventajas sobre otros enfoques de diseño. En primer lugar, los dedos robóticos suaves son más seguros que los dedos robóticos duros, ya que pueden reducir el riesgo de lesiones a los usuarios. Además, la técnica PneuNets es altamente personalizable, lo que significa que los dedos robóticos se pueden diseñar para adaptarse a una amplia variedad de aplicaciones y tareas específicas.

Esta técnica de diseño puede ser útil en una amplia variedad de aplicaciones donde se requiera un control preciso del movimiento. En general, el diseño cuidadoso del actuador puede ser un factor clave para el éxito del prototipo y puede contribuir a una mayor eficiencia y funcionalidad.

V-B4. Manufactura del Actuador Suave: Los PneuNets son dispositivos innovadores compuestos por una ingeniosa combinación de canales internos incorporados en un material elastomérico. Mediante el proceso de inflado de estos canales al presurizarlos, los actuadores se enroscan sobre sí mismos, generando un interesante movimiento. La capacidad de movimiento de estos actuadores se encuentra fuertemente influenciada tanto por su morfología como por las propiedades específicas de los materiales utilizados en su fabricación.

Con el fin de alcanzar distintas propiedades deseadas en los actuadores, es posible realizar ajustes en diversos parámetros morfológicos o seleccionar materiales alternativos. Esto brinda una versatilidad considerable en el diseño de estos dispositivos, adaptándolos a una amplia gama de aplicaciones y requisitos específicos.

El Ecoflex se ha convertido en uno de los principales materiales seleccionado por los diseñadores de robots para la creación de dedos robóticos suaves debido a su impresionante conjunto de propiedades físicas. Su flexibilidad excepcional permite que los dedos robóticos fabricados con este material tengan un rango de movimiento más amplio, lo que los hace aptos para realizar diversas tareas con precisión y destreza.

Tabla VIII: Ficha técnica de tipos de Ecoflex. Fuente: [24]

Material	Curado [h]	Resistencia a la tracción [psi]	Elongación [%]
Ecoflex™ 00-50	3	315	980
Ecoflex™ 00-30	4	200	900
Ecoflex™ 00-10	4	120	800

Además de su alta elasticidad, Ecoflex ofrece una suavidad al tacto que es esencial para garantizar la seguridad en la interacción con humanos y objetos delicados. Otra ventaja clave del Ecoflex es su resistencia al desgaste y su durabilidad. Los dedos robóticos fabricados con este material pueden soportar numerosos ciclos de uso sin experimentar daños significativos y reduce la necesidad de reemplazos frecuentes.

Para llevar a cabo el diseño de estos actuadores y sus respectivos moldes, se ha empleado el paquete de software de diseño asistido por ordenador Inventor 2023. La elección de este software se sustenta en una serie de argumentos sólidos y convincentes. En primer lugar, Inventor ofrece un conjunto amplio de herramientas avanzadas, que facilitan en gran medida el proceso de diseño y modelado de los PneuNets. Además, su interfaz intuitiva permite a los ingenieros y diseñadores explorar todas las posibilidades creativas sin dificultades.

Los materiales elastoméricos, como la silicona Ecoflex 00-10, Ecoflex 00-20 y Ecoflex 00-50 han revolucionado la industria de la robótica al proporcionar una alternativa altamente funcional para la fabricación de actuadores suaves. Estos actuadores, que imitan el comportamiento natural de músculos y tendones humanos, han permitido a los robots adquirir una mayor movilidad y habilidades para interactuar de manera segura y efectiva con su entorno.

V-B5. Ensayo de Tracción para Materiales Hiperelásticos (TTHM): TTHM es un método de prueba para determinar las propiedades mecánicas de los materiales superelásticos. El material se somete a un alargamiento uniaxial y se registra la curva tensión-deformación resultante. Se pueden determinar varios parámetros a partir de esta curva: módulo de Young, relación de Poisson, límite elástico y resistencia a la tracción.



Figura 17: Probetas sin Exposición al Vacío. Fuente: Quimiz D, Sierra X

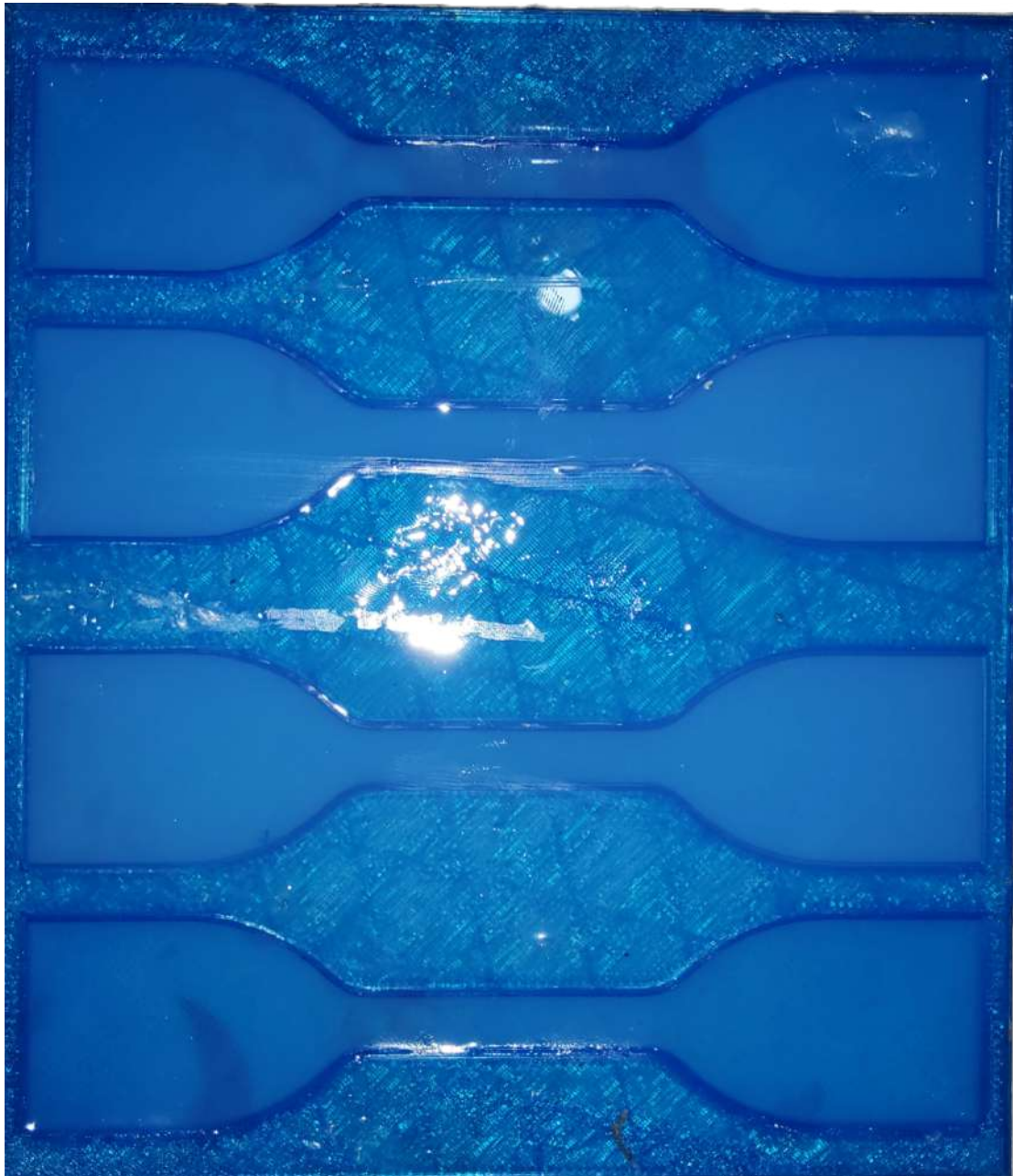


Figura 18: Probetas con Exposición al Vacío. Fuente: Quimiz D, Sierra X

La Figura17 revela la presencia de burbujas de aire de pequeño tamaño distribuidas en diversas áreas a lo largo de la muestra. No obstante, debido a la existencia de aire, estas muestras no reúnen las condiciones necesarias para ser sometidas a pruebas en la máquina, ya que la presencia de aire crea un punto crítico de debilidad que podría resultar en una fractura de manera sencilla. Con el fin de garantizar la idoneidad de las probetas para llevar a cabo los ensayos, se vuelve imperativo someterlas a un proceso de desgasificación al vacío durante un período de tiempo suficiente. En contraste, en la Figura18, se observa cómo las probetas se expusieron al vacío durante un lapso de 5 minutos, lo que se tradujo en una superficie uniforme y transparente.

Este conjunto de muestras se posiciona de manera óptima para ser utilizadas en los ensayos, ya que se asegura que no presentarán un punto de fractura en común. Este procedimiento maximiza tanto su integridad como su confiabilidad en el proceso de análisis, estableciendo una base sólida para la obtención de resultados precisos y concluyentes en el ámbito de estudio.

El dispositivo consta de dos placas paralelas, una en reposo y la otra moviéndose a velocidad constante. Se coloca una muestra de material entre las dos placas y se estira hasta que falla. La fuerza aplicada para estirar la muestra se puede medir con un medidor de tensión o midiendo la corriente en un motor eléctrico que mueve una placa en relación con otra, [32].



Figura 19: Ensayo de Tracción. Fuente: Quimiz D, Sierra X

Después de que se formaron las muestras, el material se analiza de acuerdo con la norma ISO 37 [11]. Se tienen que realizar cinco muestras, luego cargar en una máquina de pruebas TTHM para realizar una prueba de tracción para obtener datos experimentales [32].

V-C. *Diseño Actuador Suave*

V-C1. Versión 1: En la búsqueda de un diseño inicial para el proyecto, se ha planteado la utilización de uno de los dos tipos de actuadores de red neumáticos disponibles: el tipo "Slow Pneut-net". Estos actuadores se distinguen por presentar cámaras interconectadas, lo que implica que comparten paredes entre sí. Este enfoque se ha elegido con el propósito de evaluar su viabilidad como diseño óptimo para el prototipo en desarrollo [14].

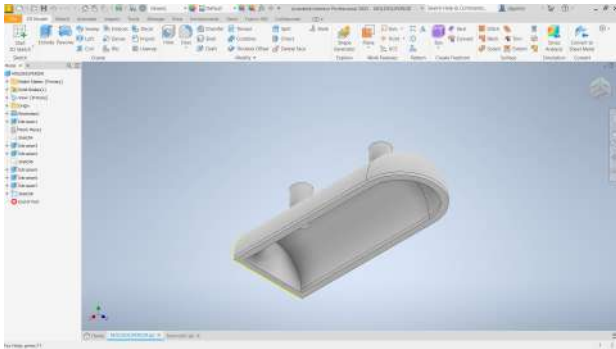
Considerando los parámetros y resultados obtenidos en las etapas precedentes del proceso, se ha optado por emplear el software de diseño CAD 3D "Inventor 2023" para llevar a cabo la modelación digital del molde correspondiente al dedo pulgar. Esta elección se basa en la robustez y capacidades del software, permitiendo una representación precisa y detallada del diseño propuesto. En esta introducción, se explorarán los aspectos fundamentales de esta primera versión del diseño, abordando tanto la elección de los actuadores de red como el proceso de modelado 3D, con el objetivo de sentar las bases de un análisis integral del enfoque adoptado.

Etapas de Diseño: En la búsqueda por desarrollar un prototipo funcional de un actuador suave, se enfrenta la crucial tarea de definir su diseño inicial. Este proceso requiere una comprensión precisa del tipo de accionamiento que se pretende lograr, el cual está intrínsecamente ligado a la configuración estructural del dispositivo. Dicha configuración determinará los comportamientos de actuación posibles, que pueden abarcar desde flexiones y contracciones hasta extensiones controladas [23].

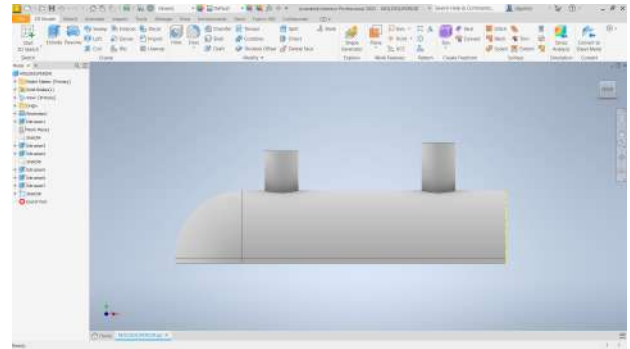
En el contexto de este proyecto de titulación, se plantea un requisito específico para el actuador: la generación de un movimiento de flexión que emule el doblado natural de los dedos de una mano humana. En esta exploración, se examinarán los principios fundamentales del diseño y la actuación de estos dispositivos, buscando desarrollar un prototipo que no solo cumpla con los requerimientos técnicos, sino que también posea la capacidad de replicar de manera eficiente y realista el movimiento deseado.

En este escenario, las representaciones visuales cobran un papel fundamental para comprender el progreso y las características del prototipo. La Figura 20a presenta la cubierta superior del primer prototipo, destacando dos cavidades cilíndricas. Una de estas configuraciones opera como punto de entrada de material, mientras que la otra cumple la función de salida, proporcionando una indicación del nivel de llenado en el molde. Esta disposición no solamente asegura una distribución homogénea del contenido, sino también refleja un compromiso con la eficiencia en el proceso de producción, evidenciando una atención cuidadosa hacia la optimización.

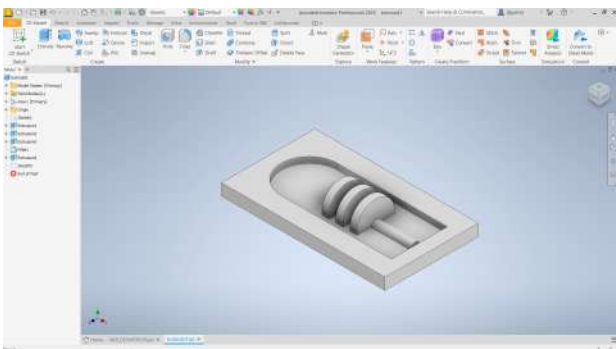
Por otro lado, la siguiente Figura 20c proporciona una visión detallada del molde que alberga las cámaras de vacío. Estas cámaras, con su forma semicilíndrica, son esenciales para el funcionamiento del prototipo. Esta imagen resalta la importancia de la geometría y la estructura en la eficacia del diseño.



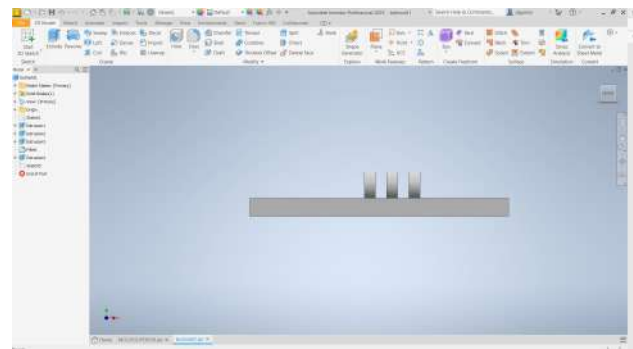
(a) Vista del interior del molde superior



(b) Vista lateral del molde superior



(c) Vista interior del molde inferior



(d) Vista lateral del molde inferior

Figura 20: Diseño Molde de Dedo Pulgar. Fuente: Quimiz D, Sierra X

Proceso de Impresión 3D del Primer Prototipo: La fabricación de moldes es un proceso esencial en la producción de componentes y objetos con formas y diseños específicos. En este contexto, la tecnología de impresión 3D ha emergido como una solución altamente efectiva para la creación de prototipos y moldes debido a su simplicidad y versatilidad. La capacidad de transformar diseños 3D en objetos tangibles con rapidez y precisión ha llevado a la adopción de esta tecnología en diversas industrias.

En particular, la fabricación de moldes para actuadores ha requerido una atención especial en la generación de prototipos. Estos moldes deben cumplir con criterios específicos que aseguren un proceso de manufactura eficiente y sin problemas. Uno de los aspectos clave es la facilidad con la que los moldes pueden ser desmoldados, permitiendo su reutilización sin sufrir desgastes o deterioros notorios.

La elección de la tecnología de impresión de resina agrega un nivel adicional de calidad a estos moldes. Su capacidad para producir superficies con alta precisión y detalle evita imperfecciones que podrían afectar la producción de los actuadores. La rapidez también juega un papel crucial en este proceso, con un tiempo de impresión promedio de alrededor de 2 horas para los primeros prototipos. Durante este tiempo, los moldes superiores e inferiores ilustrados en la figura 23, pueden ser creados directamente a partir de sus respectivos diseños, como se ilustra en la figura ??.



Figura 21: Proceso de Impresión de Molde de Dedo Pulgar. Fuente: Quimiz D, Sierra X

Inyección Ecoflex 00-10 en moldes: Los robots blandos se caracterizan por su capacidad de adaptación a entornos cambiantes y su versatilidad en aplicaciones que requieren interacción delicada. Un componente clave en la creación de estos robots es el material utilizado, donde el caucho de silicona se ha convertido en una elección popular debido a sus propiedades flexibles y moldeables.

La metodología fundamental que respalda la fabricación de estos robots blandos se denomina modelado por deposición fundida [26]. Este proceso revolucionario implica verter o inyectar un material líquido, como el caucho de silicona, en una cavidad que representa la forma deseada del robot. A medida que el líquido llena gradualmente el molde, adquiere la forma y las características deseadas, acercando el objeto a su forma final. Una vez que el material líquido se solidifica, se completa el proceso de fabricación. El último paso implica despegar cuidadosamente el elastómero sólido resultante del molde, lo que da como resultado una pieza terminada lista para su implementación en la construcción de robots blandos.



(a) Preparación Ecoflex 00-10



(b) Inyección en molde

Figura 22: Preparación e Inyección de Ecoflex 00-10. Fuente: Quimiz D, Sierra X

Resultados preliminares versión 1: Una vez completado el proceso de diseño de los moldes y la etapa de curado del Ecoflex 00-10, se logran identificar los resultados concernientes al movimiento del pulgar. Analizando la máxima inclinación obtenida en el primer prototipo figura 23e, se deduce que, en el caso de la flexión, es necesario aplicar un ángulo de inclinación mayor. Esta conclusión se basa en el análisis previo de las mediciones angulares de los dedos utilizando goniometría. Con el propósito de abordar esta necesidad, se planea aumentar el número de cámaras de aire en la próxima iteración. Este ajuste tiene como objetivo lograr un ángulo de inclinación en los actuadores que se asemeje más al rango de movimiento de los dedos humanos, asegurando así un diseño más cercano a la biomecánica natural. El tipo de actuador Slow Pneu-net al tener las cámaras de aires interconectadas requiere una gran cantidad de energía en forma de volumen de aire presurizado, para realizar el movimiento. Esto da como resultado tres debilidades de estos actuadores: acción lenta, gran variación de volumen y corta vida útil.

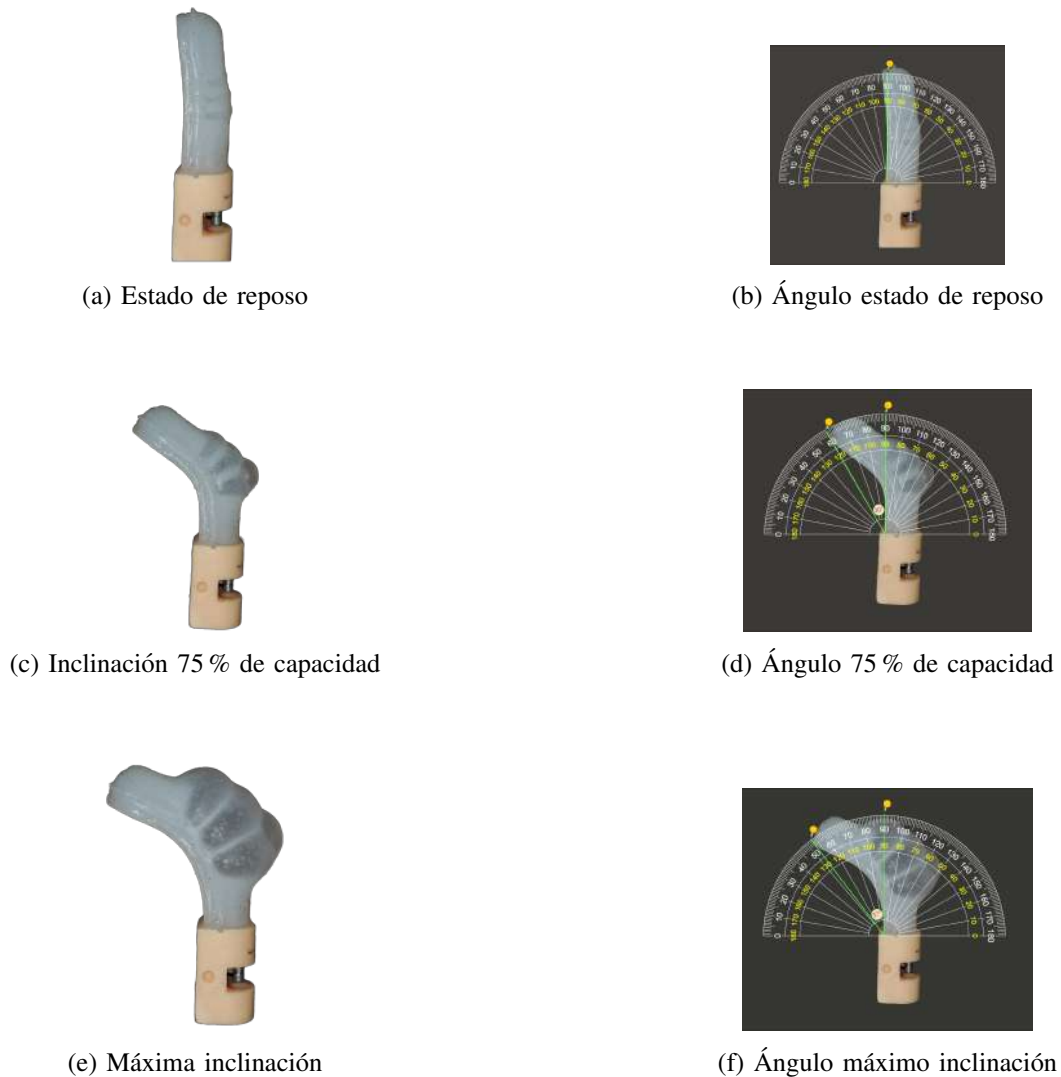


Figura 23: Actuación de Pulgar Suave. Fuente: Quimiz D, Sierra X

V-C2. Versión 2: En su continuo esfuerzo por perfeccionar el diseño y la funcionalidad del proyecto, la versión previa contempló la viabilidad de incrementar el número de cámaras de aire con el objetivo de mejorar el rango de movimiento en los actuadores y alcanzar una flexión más eficiente. En esta progresión, se presenta la Versión 2, en

la cual se han implementado mejoras sustanciales. Principalmente, se llevó a cabo una optimización en el diseño del molde, lo que ha simplificado de manera significativa el procedimiento de inyección del Ecoflex. Esta modificación no solamente aumenta la eficiencia en la producción, sino que también asegura una distribución más homogénea del material. Adicionalmente, se han integrado aberturas estratégicas en la cubierta superior del molde. Estas aperturas cumplen una doble finalidad: por un lado, posibilitan una observación minuciosa del flujo del Ecoflex 00-10 en cada cámara, lo que facilita un mejor control durante la inyección; por otro lado, permiten la liberación del aire atrapado cuando el material es sometido al vacío, optimizando de esta manera la calidad del producto final.

Etapa de Diseño:

■ **Diseño Pulgar**

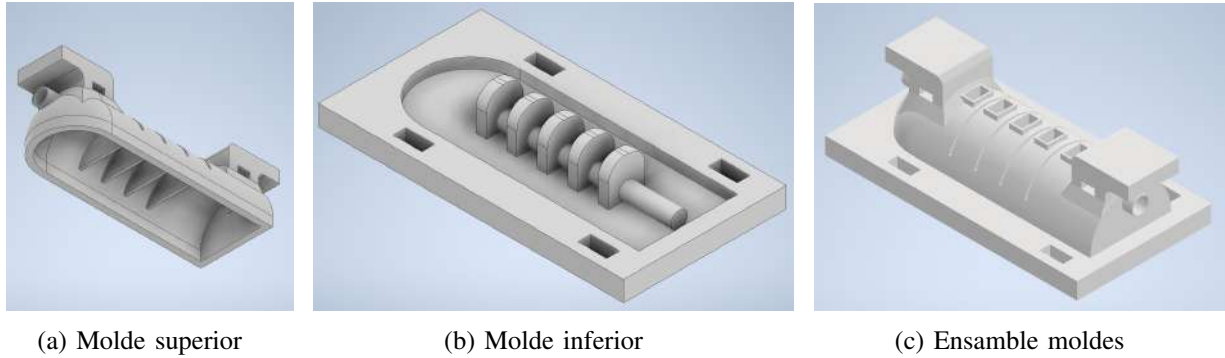


Figura 24: Diseño CAD Dedo Pulgar

■ **Diseño Índice**

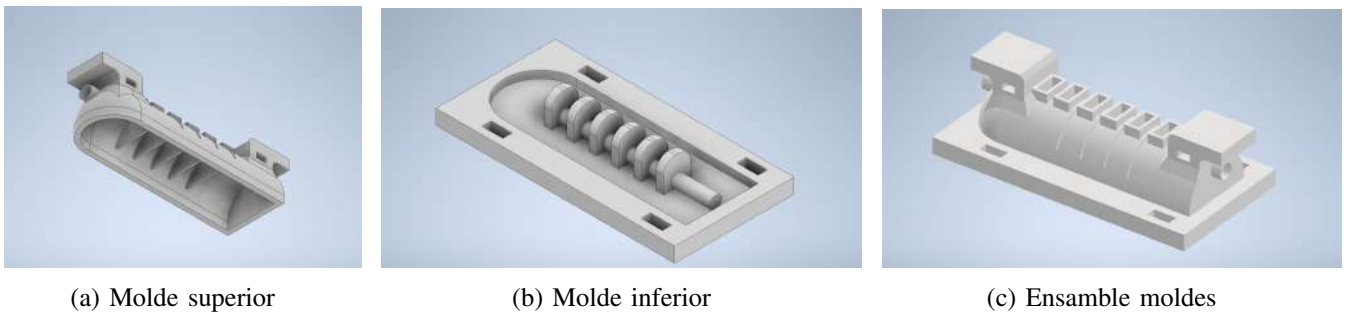


Figura 25: Diseño CAD Dedo Índice

■ **Diseño Medio**

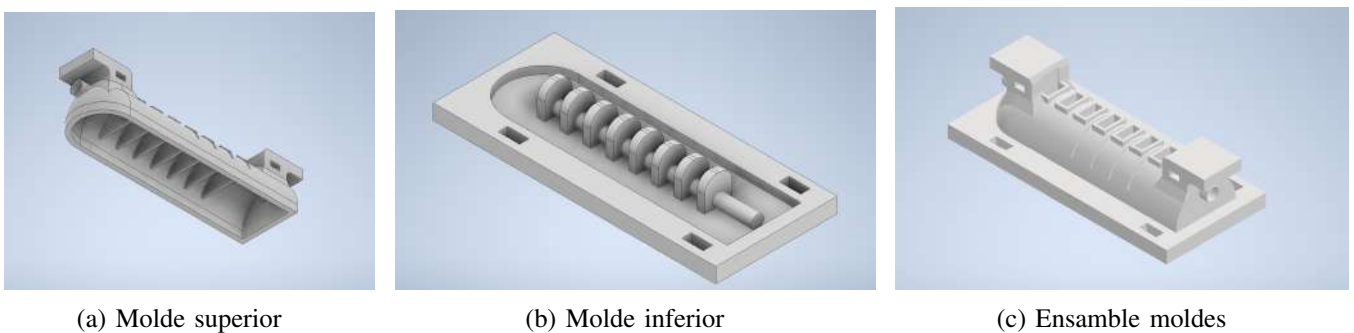


Figura 26: Diseño CAD Dedo Medio

■ Diseño Anular

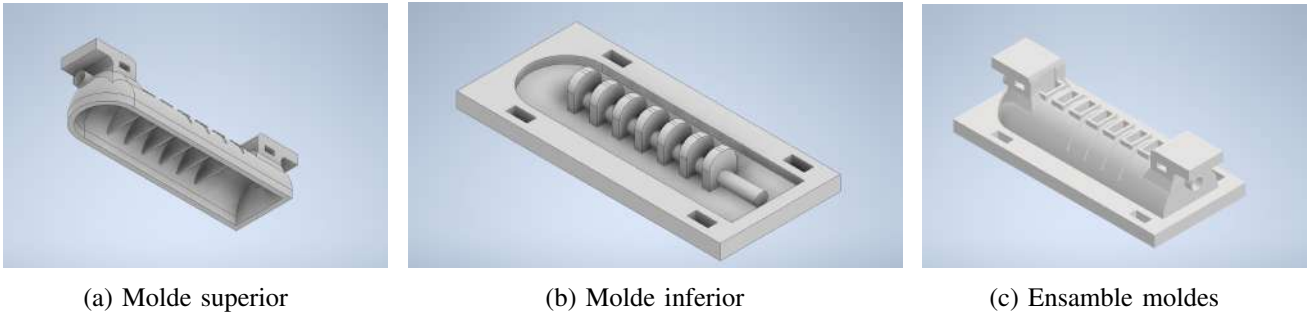


Figura 27: Diseño CAD Dedo Anular

■ Diseño Meñique

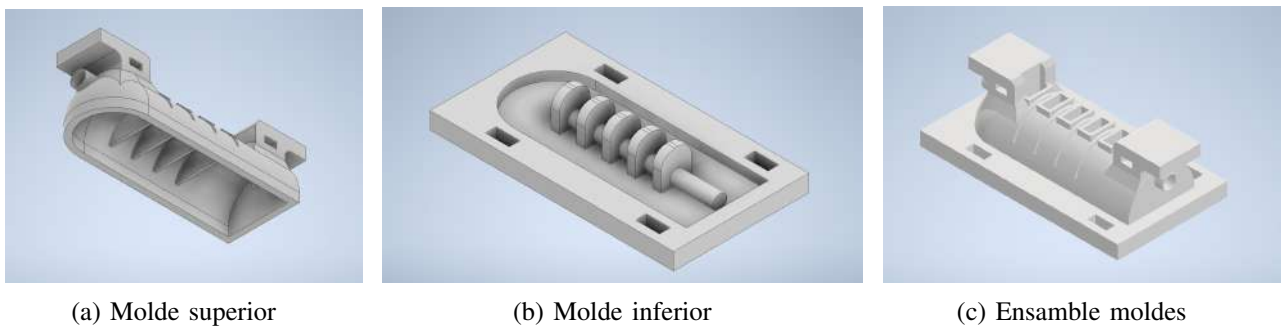


Figura 28: Diseño CAD Dedo Meñique

Experimentación: En la más reciente evolución de este proceso, los moldes se han dividido en tres componentes distintos, cada uno cumpliendo una función esencial. Una pieza base, posicionada en la parte inferior, sostiene el molde de las cámaras de aire, mientras que una pieza superior, en calidad de tapa, se encarga de establecer divisiones que otorgan un espacio cómodo para que las cámaras de aire se inflen con libertad y alcancen el ángulo de inclinación óptimo. Una tercera pieza, de diseño plano, asume la responsabilidad de crear una capa inferior de material suave, asegurando un sellado completo del dedo y evitando cualquier fuga indeseada.

Estos moldes se han fabricado empleando resina, lo que acarrea una ventaja significativa: el material proporciona un acabado superficial de alta calidad. Esta característica se traduce en una textura más adecuada para los actuadores finales. En esta fase del proceso, se ha mantenido la metodología de inyección con Ecoflex 00-10, evitando la aplicación de exposición al vacío. Esto se realiza con el propósito de verificar y validar que los moldes cumplen su función con eficacia y celeridad, dado que cada ciclo de exposición al vacío conlleva una considerable inversión de tiempo.



Figura 29: Moldes Impresos en Resina. Fuente: Quimiz D, Sierra X

Mediante la implementación de las modificaciones en esta sección de diseño, se logró una mejora significativa en el ángulo de inclinación del dedo. Esta optimización ha permitido obtener una configuración que se asemeja de manera sorprendente a los ángulos estudiados en la sección de goniometría de los dedos.



Figura 30: Segundo Prototipo de Dedo. Fuente: Quimiz D, Sierra X

Resultados: Las mejoras implementadas en el diseño actual han culminado en resultados que corroboran las expectativas planteadas, especialmente en lo que respecta al ángulo de flexión. De hecho, se ha logrado una mejora substancial en la capacidad de flexión del dedo, ajustándose de manera notoria a los valores deseados y buscados en el proyecto. Sin embargo, cabe destacar que el método de inyección previamente empleado presentaba desafíos, manifestándose en pérdidas de material debido a desbordamientos y dando lugar, en muchas ocasiones, a la producción de dedos incompletos y defectuosos.

Durante la ejecución de un experimento de sujeción, surgió otro problema crucial: la sección de la yema del dedo no generaba la presión de sujeción necesaria al llevar a cabo la manipulación de piezas redondas. Como respuesta a esto, se propone realizar mejoras en la zona de las cámaras de aire, incluyendo el aumento del número de estas una vez más.

Para abordar estas problemáticas con un enfoque integral, se ha tomado la decisión de adoptar una serie de medidas. En primera instancia, se propone mejorar el diseño en una futura versión del proceso. Esto permitirá optimizar el flujo del material durante la inyección y mitigar los problemas relacionados con las pérdidas y la integridad de los dedos resultantes. Además, se ha tomado la determinación de cambiar el método de inyección, sustituyendo el enfoque anterior por la utilización de Ecoflex 00-10 como material de molde. Esta elección no solo promete una mejor gestión del material durante el proceso, sino también una mayor coherencia en la calidad y la integridad de los dedos finales.

Estas decisiones estratégicas, respaldadas por el análisis de los desafíos previos, apuntan a perfeccionar tanto la producción como la calidad del producto final. El resultado esperado es una producción más eficiente, menos propensa a defectos y más congruente con los objetivos de diseño y rendimiento del proyecto.

V-C3. Versión 3: En esta iteración del proceso, se ha puesto un enfoque renovado en abordar los desafíos que previamente obstaculizaban la eficacia del molde utilizado. Se busca superar las limitaciones identificadas en la versión anterior para garantizar un avance fluido en el desarrollo del prototipo. Una solución integral se plantea para afrontar los inconvenientes que surgieron, centrándose principalmente en optimizar el diseño del molde y, específicamente, en contrarrestar el desbordamiento lateral del material Ecoflex 00-10.

La premisa de mantener una apertura que facilite el proceso de exposición al vacío se conserva, pero se introduce una propuesta innovadora: la implementación de una única cavidad en la parte inferior del molde. Esta modificación está diseñada con el objetivo de prevenir el exceso no deseado del material durante la fase de producción.

En este contexto, el presente trabajo explora las mejoras sustanciales que se han incorporado en la versión actual del proyecto. Se detallan los cambios específicos realizados en el diseño del molde, así como la fundamentación detrás de estas decisiones. A través de esta evolución planificada y enfocada, se busca no solo resolver los problemas previos, sino también allanar el camino hacia un proceso de prototipado más eficiente y exitoso.

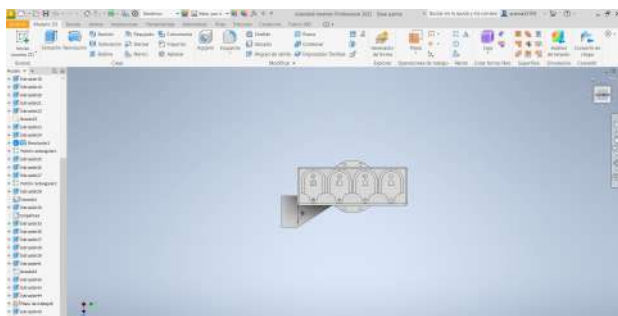
Etapa de Diseño: En el proceso evolutivo de los diseños previos, se ha identificado una consideración crucial que no se tuvo en cuenta en iteraciones anteriores: la inclusión de articulaciones en cada uno de los dedos. En esta ocasión, para abordar esta particularidad, se ha rediseñado el molde de la parte inferior del dedo, encargado de sellar las cámaras de aire por la parte inferior. Este molde ha sido concebido con una estructura que simula las articulaciones, con dimensiones precisamente investigadas para su ajuste.

De manera simultánea, se ha llevado a cabo una modificación en el diseño del molde del dedo en sí. En este caso, el molde ha adquirido una nueva configuración rectangular, una decisión que permite la incorporación de dos prensas nodulares. Estas prensas nodulares desempeñan la función de evitar que el Ecoflex sobresalga por los bordes al ser sometido al proceso de exposición al vacío. A continuación, se examinará con detalle cada uno de estos cambios y su contribución al refinamiento de los diseños.

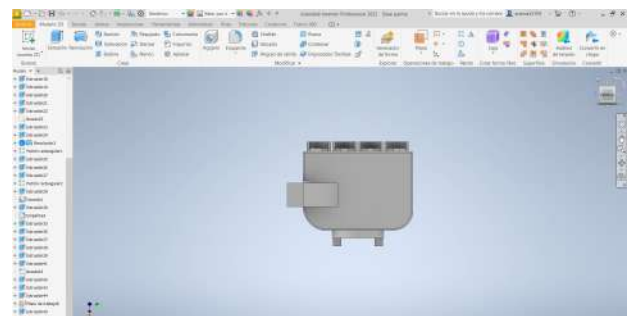
V-D. *Diseño Prototipo de Mano*

V-D1. *Versión 1:*

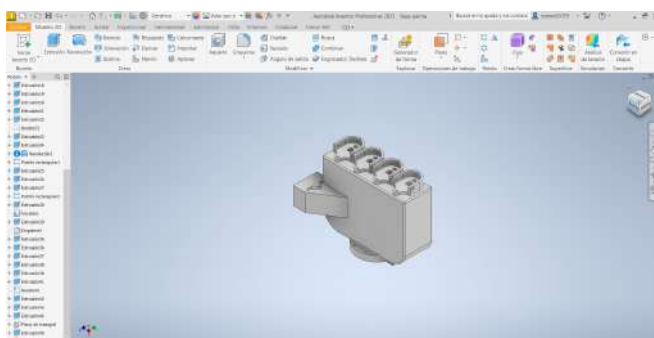
Considerando el diseño adoptado para cada dedo, se ha desarrollado una mano robótica que incorpora acoples como bases para los dedos. Estas bases presentan ejes que permiten lograr una inclinación controlada al flexionar cada dedo, aprovechando la presión interna para facilitar el movimiento debido al peso. Este prototipo proporciona una visión de cómo la inclinación influye en el funcionamiento de los dedos durante su operación. La confección del modelo digital se llevó a cabo mediante el software CAD 3D Inventor 2023.



(a) Vista superior del prototipo mano robótica



(b) Vista frontal del prototipo mano robótica



(c) Vista isométrica del prototipo mano robótica

Figura 31: Diseño Prototipo Mano Robótica. Fuente: Quimiz D, Sierra X

Experimentación y Resultados : Después de ensamblar los dedos en la estructura de la mano robótica, se procedió a realizar pruebas exhaustivas para evaluar la calidad del agarre obtenido. Durante este proceso, surgió un desafío: la presencia de un eje de unión entre el acople y la mano generaba resistencia, dificultando alcanzar el ángulo de flexión deseado. Como solución, se consideró una revisión del diseño para mejorar el ángulo de flexión individual de cada dedo, buscando así una mayor semejanza con los movimientos de una mano humana.



(a) Vista frontal del prototipo mano robótica

(b) Vista lateral del prototipo mano robótica

Figura 32: Diseño Prototipo Mano Robótica. Fuente: Quimiz D, Sierra X

V-D2. Versión 2: Se desarrolla un diseño que presenta tanto las características como las similitudes necesarias para imitar una mano real de manera precisa. Tomando de referencia una modelo de mano articulada[3]. Este nuevo enfoque de diseño resultó beneficioso, marcando una notable mejora con respecto al diseño inicial. Se logró una significativa reducción en las dimensiones de la mano, obteniendo así un diseño más compacto y eficiente. Además, se llevó a cabo una renovación en el modelo de acoples para los dedos, eliminando la necesidad de un eje para lograr el ángulo de flexión deseado en su descenso. Se utilizó Autodesk Meshmixer para integrar el diseño de la mano con las nuevas adaptaciones para cada dedo, su conjunto de herramientas para la corrección de modelos 3D, su capacidad de trabajar con tecnología de impresión 3D y su versatilidad para importar y exportar archivos CAD en varios formatos. [30]

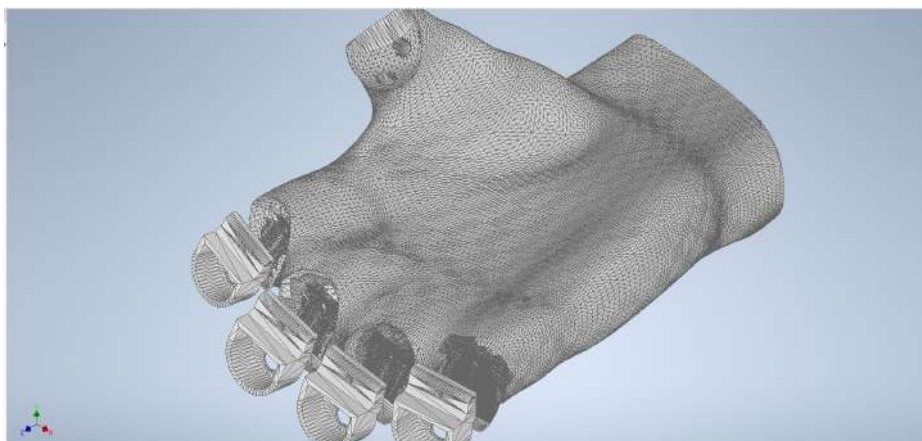


Figura 33: Segundo Prototipo Mano Robótica. Fuente: Quimiz D, Sierra X

Experimentación y Resultados : Con esta nueva iteración del diseño de la mano robótica, se logró mejorar el ángulo de flexión de cada dedo, además de conseguir dimensiones que se asemejan a las de una mano humana real. Este avance se traduce en un agarre más natural y efectivo. Adicionalmente, se rediseñó los acoples para cada dedo, permitiendo un funcionamiento aún más eficiente.



(a) Vista frontal del segundo prototipo mano robótica



(b) Vista lateral del segundo prototipo mano robótica

Figura 34: Segundo Diseño Prototipo Mano Robótica. Fuente: Quimiz D, Sierra X

V-D3. Versión 3: Se realizó un estudio de la topología de la mano con el objetivo de identificar los puntos cruciales para garantizar su rigidez y funcionalidad. Esta investigación fue el fundamento para diseñar un prototipo de mano que refleje estas características esenciales. En iteraciones previas, la impresión de prototipos se llevó a cabo utilizando una impresora 3D y material TPU, lo que resultaba en tiempos de impresión considerablemente largos. Sin embargo, la incorporación del diseño topológico ha logrado reducir significativamente el tiempo de impresión en un 60%,



Figura 35: Análisis Topológico en Mano. Fuente: Quimiz D, Sierra X

Como se ilustra en la figura 35, se identificaron los puntos críticos de rigidez y funcionalidad utilizando el programa Meshmixer. Este análisis se basó en el diseño previo, permitiéndolo determinar los puntos esenciales con precisión.

Tras completar el estudio, se integró los acoples previamente diseñados para lograr un ensamblaje cohesivo, como se presenta en la figura 36. Durante este proceso, se mantuvieron la integridad de la forma y dimensiones de la mano, asegurando una transición sin pérdidas.



Figura 36: Segundo prototipo mano robótica. Fuente: Quimiz D, Sierra X

Experimentación y Resultados : Mediante este innovador diseño de mano robótica, conseguimos optimizar tanto el consumo de material TPU durante la impresión como el tiempo necesario para la fabricación. Se mantuvieron las dimensiones estándar previamente mencionadas y logramos incorporar los acoplamientos de manera exitosa. Este enfoque resultó en mejoras significativas en la eficiencia del proceso.



(a) Vista frontal del prototipo final mano robótica



(b) Vista lateral del prototipo final mano robótica

Figura 37: Diseño Prototipo Final Mano Robótica. Fuente: Quimiz D, Sierra X

V-E. Diseño Estructural Antebrazo

En la siguiente sección, se llevará a cabo una exploración detallada de una variedad de diseños con un enfoque particular en el proceso de desarrollo, desde la etapa de concepción hasta la realización física. A lo largo de este recorrido, se seguirá el proceso de transformar diseños aparentemente simples en piezas intrincadas que, al unirse, culminan en la creación de un componente impresionante que guarda semejanza con un antebrazo humano. Más allá de ser un testimonio de los avances en el campo de la fabricación, este proceso ejemplifica de manera destacada la sinergia entre la ingeniería y la creatividad, dando como resultado la consecución de un prototipo muy bueno en términos de funcionalidad y utilidad.

V-E1. Base Servomotores: Este componente esencial desempeñará un papel crucial en el ensamblaje completo del prototipo, sirviendo como cimiento sobre el cual se edificará todo el diseño. Además de ser la base estructural, está destinado a proporcionar la estabilidad necesaria para alojar y asegurar firmemente cinco servomotores, lo cual implica la necesidad de ajustar sus dimensiones en consonancia con estos elementos. Un aspecto destacado de este plato base es la inclusión de un tubo metálico central, el cual asumirá un rol importante al actuar como pilar principal que sostendrá las subsiguientes piezas del prototipo, consolidando así su integridad y funcionalidad.

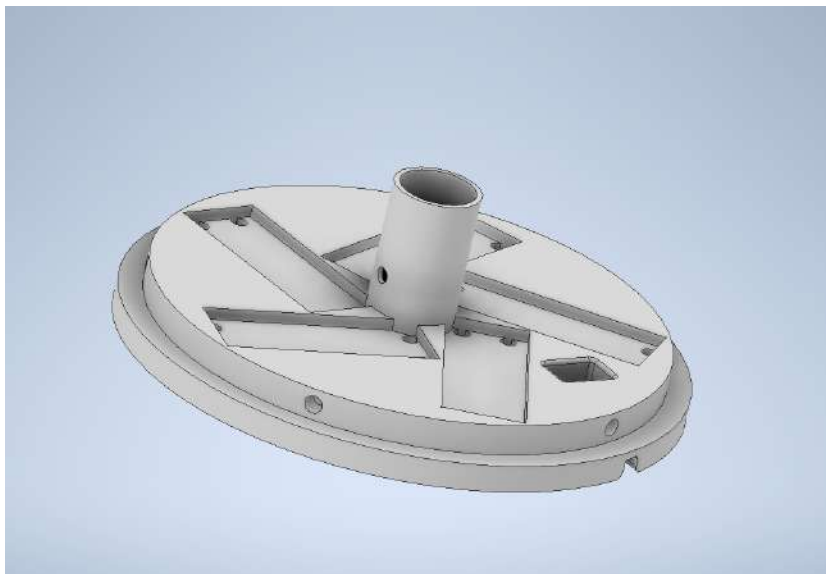


Figura 38: Base Principal de Servomotores 360° Grados. Fuente: Quimiz D, Sierra X

Parámetros de Impresión 3D:

V-E2. Plato Base Guía: En respuesta a la necesidad de asegurar la estabilidad de los ejes de los acoples corredizos, se introduce la siguiente pieza, concebida como una solución. Esta solución involucra la creación de dos discos manufacturados mediante impresión 3D: un disco superior y otro inferior. La función primordial de estos discos reside en garantizar la firmeza de los ejes de los acoples corredizos, estableciendo así un entorno propicio para su desempeño efectivo. No obstante, el disco inferior adquiere una dimensión adicional al asumir la tarea de conectar el tubo metálico central, un componente esencial que actúa como pilar fundamental para sostener la estructura del prototipo en su conjunto.

Tabla IX: Parámetros de Impresión 3D Base Principal. Fuente: Quimiz D, Sierra X

Parámetros de Impresión 3D	
Calidad	
Altura de capa	0.2 mm
Altura de capa inicial	0.2 mm
Perímetro	
Grosor de pared	1.5 mm
Imprimir paredes finas	True
Material	
Temperatura de impresión	215 °C
Temperatura de impresión de la capa inicial	220 °C
Temperatura de la placa de impresión	70 °C
Relleno	
Densidad de relleno	25 %
Patrón de relleno	zigzag
Velocidad	
Velocidad de impresión	150 mm/s
Soporte	
Soporte	No
Experimental	
Utilizar capas de adaptación	True

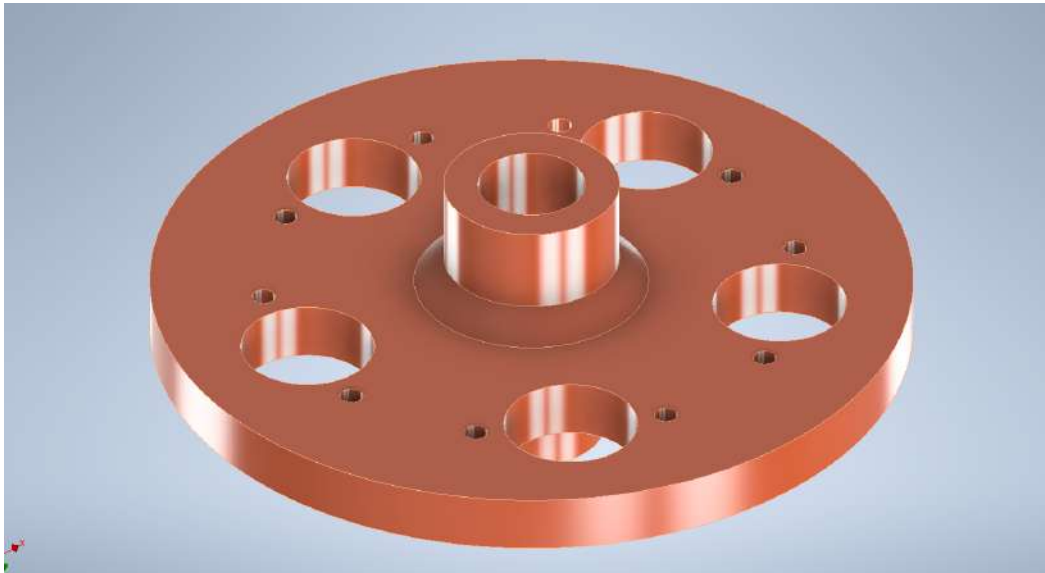


Figura 39: Plato Base Guía. Fuente: Quimiz D, Sierra X

Parámetros de Impresión 3D

Antes de iniciar el proceso de impresión de las piezas, es crucial llevar a cabo una cuidadosa consideración con respecto a la disposición de las capas. Este paso es esencial para asegurar que la mayoría de las capas cuenten con un sólido soporte, evitando la presencia de capas flotantes sin una base de apoyo, especialmente en situaciones en las que se requieran estructuras de soporte adicionales. Este enfoque salvaguarda la integridad de las piezas impresas y contribuye a un resultado final más adecuado.

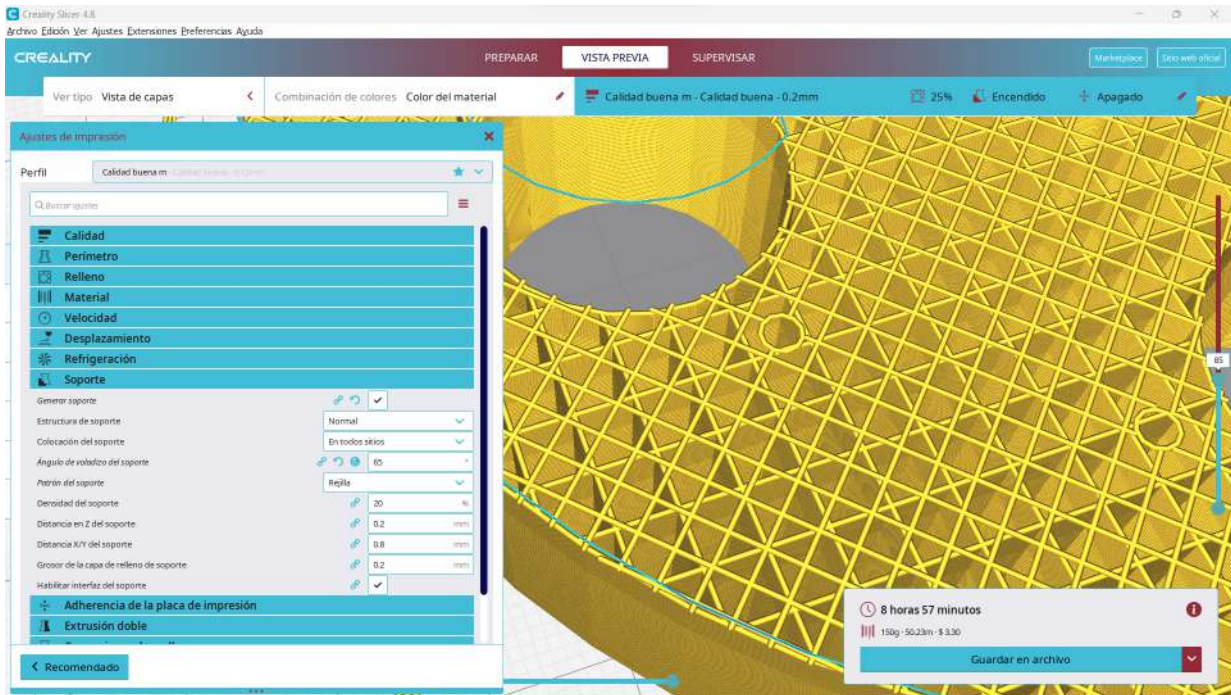


Figura 40: Disposición de Capas. Fuente: Quimiz D, Sierra X

En busca de una solución eficaz, se ha identificado que un enfoque prometedor reside en la manipulación de la densidad de los soportes utilizados en el proceso. Mediante un ajuste que eleva la densidad de los soportes hasta un 35 %, se logra un efecto notable en la mejora del contacto entre las superficies de soporte y las capas individuales de la pieza. Esta estrategia no solo sugiere un aumento en la cohesión y estabilidad del proceso de impresión, sino que también presenta la perspectiva de un producto final más sólido y de mayor calidad.

Tabla X: Parámetros de Impresión 3D Plato Base Guía. Fuente: Quimiz D, Sierra X

Parámetros de Impresión 3D	
Calidad	
Altura de capa	0.2 mm
Altura de capa inicial	0.2 mm
Perímetro	
Grosor de pared	1.5 mm
Imprimir paredes finas	True
Material	
Temperatura de impresión	215 °C
Temperatura de impresión de la capa inicial	220 °C
Temperatura de la placa de impresión	70 °C
Relleno	
Densidad de relleno	25 %
Patrón de relleno	zigzag
Velocidad	
Velocidad de impresión	150 mm/s
Soporte	
Generar soporte	Si
Ángulo de voladizo del soporte	65°
Patrón de soporte	Zigzag
Densidad del soporte	30 %
Experimental	
Utilizar capas de adaptación	True

V-E3. *Plato Base Sistema Pan:* El componente que vamos a explorar en el siguiente análisis desempeña un papel fundamental en la estructura y el funcionamiento del conjunto. Este disco superior, con su diseño meticuloso y multifuncional, se establece como el pilar que sostiene los ejes con los acoples corredizos previamente mencionados. Sin embargo, sus responsabilidades no se detienen allí, ya que también asume un rol adicional de vital importancia: la firme sujeción de un servomotor Mg996R, un elemento esencial en la configuración de un sistema de movimiento Pan and Tilt. Además, su diseño ha sido concebido estratégicamente con la inclusión de roscas en su entorno, brindando la capacidad de enroscar soportes adicionales para sistemas posteriores.

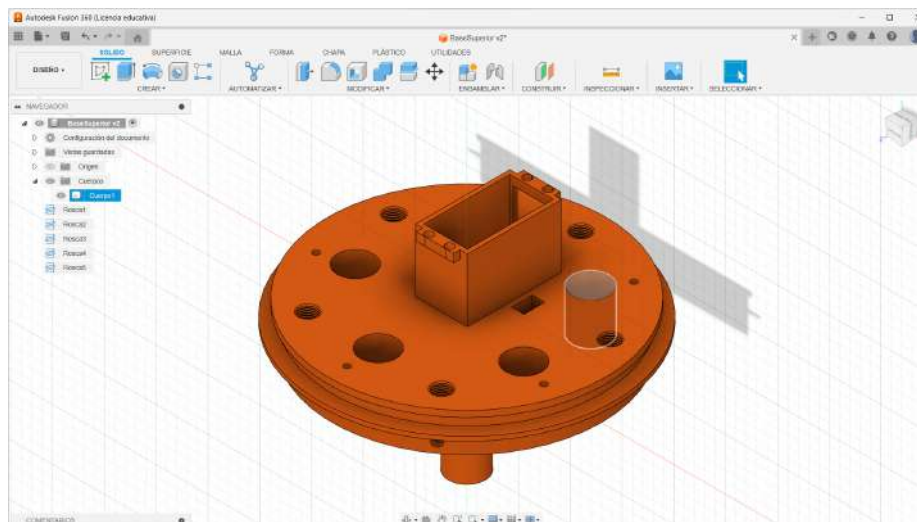


Figura 41: Plato Base Sistema Pan. Fuente: Quimiz D, Sierra X

Parámetros de Impresión 3D

Tabla XI: Parámetros de Impresión 3D Plato Base Sistema Pan. Fuente: Quimiz D, Sierra X

Parámetros de Impresión 3D	
Calidad	
Altura de capa	0.2 mm
Altura de capa inicial	0.2 mm
Perímetro	
Grosor de pared	1.5 mm
Imprimir paredes finas	True
Material	
Temperatura de impresión	215 °C
Temperatura de impresión de la capa inicial	220 °C
Temperatura de la placa de impresión	70 °C
Relleno	
Densidad de relleno	25 %
Patrón de relleno	zigzag
Velocidad	
Velocidad de impresión	150 mm/s
Soporte	
Generar soporte	Si
Ángulo de voladizo del soporte	65°
Patrón de soporte	Zigzag
Densidad del soporte	30 %
Experimental	
Utilizar capas de adaptación	True

V-E4. *Plato Base Sistema Tilt*: En el contexto de este diseño, se ha previsto la inclusión de un rodamiento en una posición central. Este componente cumple una función esencial al transmitir el torque que surge del servomotor del Sistema Pan hacia el servomotor correspondiente del Sistema Tilt. La implementación de este rodamiento establece una conexión vital entre ambos sistemas, permitiendo una transferencia eficiente y precisa del torque generado. A medida que profundizamos en las próximas secciones, se explorará en detalle la importancia y el funcionamiento de este rodamiento en el contexto del diseño integral.

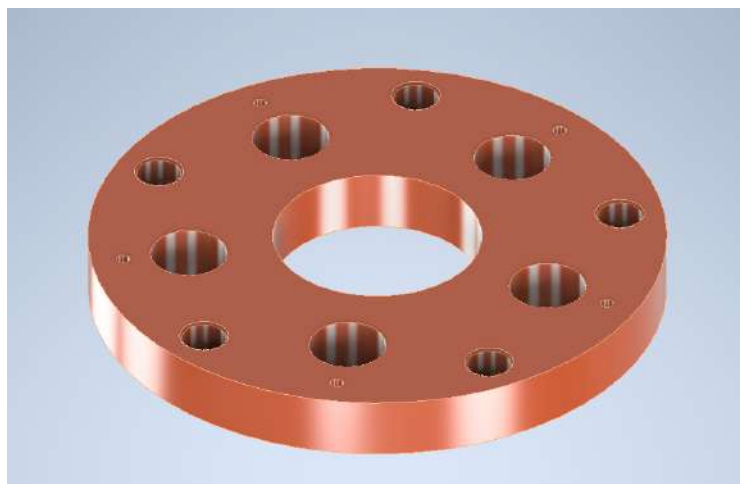


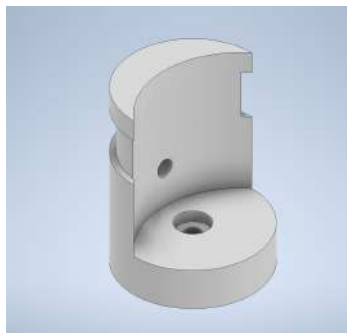
Figura 42: Plato Base Sistema Tilt. Fuente: Quimiz D, Sierra X

Parámetros de Impresión 3D

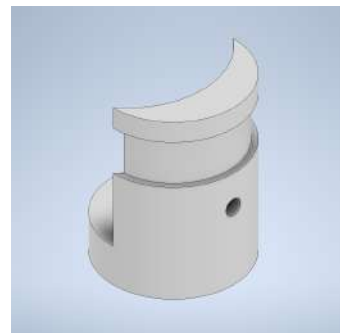
Tabla XII: Parámetros de impresión 3D plato base sistema Tilt. Fuente: Quimiz D, Sierra X

Parámetros de Impresión 3D	
Calidad	
Altura de capa	0.2 mm
Altura de capa inicial	0.2 mm
Perímetro	
Grosor de pared	1.5 mm
Imprimir paredes finas	True
Material	
Temperatura de impresión	215 °C
Temperatura de impresión de la capa inicial	220 °C
Temperatura de la placa de impresión	70 °C
Relleno	
Densidad de relleno	25 %
Patrón de relleno	zigzag
Velocidad	
Velocidad de impresión	150 mm/s
Soporte	
Generar soporte	Si
Ángulo de voladizo del soporte	65°
Patrón de soporte	Zigzag
Densidad del soporte	25 %
Experimental	
Utilizar capas de adaptación	True

V-E5. *Mordaza Mangueras*: Se ha buscado crear un componente que satisfaga la demanda de transmitir el torque originado por los servomotores en un rango completo de 360 grados hacia los tubos de silicona. Este diseño se ha materializado en dos partes interconectables que, una vez ensambladas, desempeñan un papel análogo al de una mordaza, ejerciendo presión sobre la manguera para prevenir cualquier fuga del fluido interno. Este enfoque ingenioso refleja una solución cuidadosamente pensada para garantizar la funcionalidad y la integridad del sistema en su conjunto.



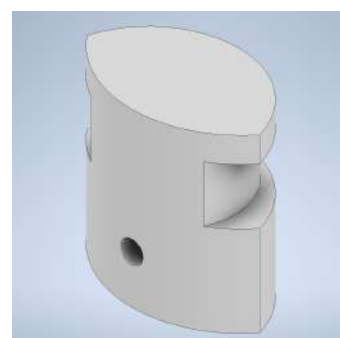
(a) Cara interna de mordaza fija



(b) Cara externa de mordaza fija



(c) Cara externa de mordaza móvil



(d) Cara interna de mordaza móvil

Figura 43: Mordaza de Manguera. Fuente: Quimiz D, Sierra X

Parámetros de Impresión 3D

Tabla XIII: Parámetros de impresión 3D plato base sistema Tilt. Fuente: Quimiz D, Sierra X

Parámetros de Impresión 3D	
Layer Heigh	0.05 mm
Bottom Layer Count	6
Exposure Time	2.5 s
Bottom Exposure Time	12 s
Light-off Delay	0
Bottom Light-off Delay	0
Bottom Lift Distance	7 mm
Lifting Distance	5 mm
Bottom Lift Speed	60 mm/min
Lifting Speed	60 mm/min
Retract Speed	60 mm/min

V-E6. *Diseño Corredizo*: Con el objetivo de asegurar una transmisión fluida de aire y agua desde un tubo de silicona con un diámetro de 1/2" hacia dedos robóticos de superficie suave, se ha concebido una solución ingeniosa en forma de una pieza deslizante. Esta pieza, diseñada para operar a través de una configuración de dos ejes, presenta una estructura que acopla el tubo de silicona en su parte inferior y se complementa con un racor en la parte superior, destinado a facilitar la conexión con un tubo de menor diámetro. La función de esta pieza es salvaguardar el tubo de silicona de posibles tensiones adversas causadas por su torsión y la consecuente reducción en su longitud. De esta manera, se evita la generación de fuerzas de tracción capaces de comprometer su integridad y, por ende, prevenir posibles fallos en el sistema. Una vez que ha cumplido con su propósito, la pieza corrediza retorna a su posición inicial gracias a la acción de dos resortes de pequeñas dimensiones, dispuestos estratégicamente en cada uno de los ejes. Este enfoque de diseño refinado y funcional demuestra un compromiso tangible con la optimización del rendimiento y la durabilidad en el contexto de la transmisión de fluidos en entornos de Soft Robotics.



Figura 44: Acople. Fuente: Quimiz D, Sierra X

Parámetros de Impresión 3D

Tabla XIV: Parámetros de impresión 3D plato base sistema pan. Fuente: Quimiz D, Sierra X

Parámetros de Impresión 3D	
Calidad	
Altura de capa	0.2 mm
Altura de capa inicial	0.2 mm
Perímetro	
Grosor de pared	1.5 mm
Imprimir paredes finas	True
Material	
Temperatura de impresión	215 °C
Temperatura de impresión de la capa inicial	220 °C
Temperatura de la placa de impresión	70 °C
Relleno	
Densidad de relleno	25 %
Patrón de relleno	zigzag
Velocidad	
Velocidad de impresión	150 mm/s
Soporte	
Generar soporte	Si
Ángulo de voladizo del soporte	65°
Patrón de soporte	Zigzag
Densidad del soporte	20 %
Experimental	
Utilizar capas de adaptación	True

V-E7. *Soporte Sistema Pan and Tilt*: Un componente de crucial importancia, concebido con la finalidad primordial de actuar como estabilizador en el sistema Pan and Tilt, desempeñando un papel fundamental en la mitigación de esfuerzos innecesarios en el componente Pan. Este soporte ha sido meticulosamente diseñado con el propósito específico de ser enroscado alrededor del plato base superior, estableciendo conexiones vitales o logrando un acoplamiento preciso con otro disco previsto para fungir como la base principal del sistema Tilt. A medida que avanzamos en este análisis, exploraremos en profundidad tanto la funcionalidad inherente como el diseño estratégico de este soporte, resaltando su contribución esencial en la preservación de la estabilidad y la optimización del sistema Pan and Tilt.



Figura 45: Soporte Sistema Pan and Tilt. Fuente: Quimiz D, Sierra X

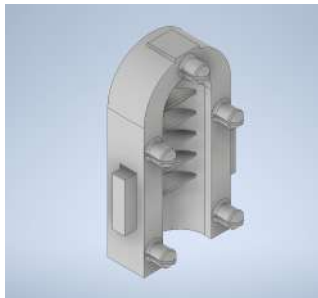
Parámetros de Impresión 3D

Tabla XV: Parámetros de impresión 3D plato base sistema pan. Fuente: Quimiz D, Sierra X

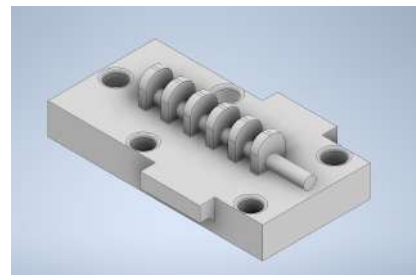
Parámetros de Impresión 3D	
Calidad	
Altura de capa	0.2 mm
Altura de capa inicial	0.2 mm
Perímetro	
Grosor de pared	1.5 mm
Imprimir paredes finas	True
Material	
Temperatura de impresión	215 °C
Temperatura de impresión de la capa inicial	220 °C
Temperatura de la placa de impresión	70 °C
Relleno	
Densidad de relleno	25 %
Patrón de relleno	zigzag
Velocidad	
Velocidad de impresión	150 mm/s
Adherencia a la placa de impresión	
Tipo de adherencia a la placa de impresión	Borde
Soporte	
Generar soporte	Si
Ángulo de voladizo del soporte	65°
Patrón de soporte	Zigzag
Densidad del soporte	20 %
Experimental	
Utilizar capas de adaptación	True

V-E8. Moldes para Actuadores Neumáticos: En el contexto de este proyecto de titulación, se plantea un requisito específico para el actuador: la generación de un movimiento de flexión que emule el doblado natural de los dedos de una mano humana. En esta exploración, se examinarán los principios fundamentales del diseño y la actuación de estos dispositivos, buscando desarrollar un prototipo que no solo cumpla con los requerimientos técnicos, sino que también posea la capacidad de replicar de manera eficiente y realista el movimiento deseado.

Los moldes se han dividido en tres componentes distintos. Una pieza base, posicionada en la parte inferior, sostiene el molde de las cámaras de aire, mientras que una pieza superior, en calidad de tapa, se encarga de establecer divisiones que otorgan un espacio cómodo para que las cámaras de aire se inflen con libertad y alcancen el ángulo de inclinación deseado. Una tercera pieza, de diseño plano, asume la responsabilidad de crear una capa inferior de material suave, asegurando un sellado completo del dedo y evitando cualquier fuga indeseada.



(a) Vista frontal del prototipo mano robótica



(b) Vista lateral del prototipo mano robótica

Figura 46: Moldes para Actuadores Neumáticos. Fuente: Quimiz D, Sierra X

Parámetros de Impresión 3D

Tabla XVI: Parámetros de impresión 3D plato base sistema pan. Fuente: Quimiz D, Sierra X

Parámetros de Impresión 3D	
Calidad	
Altura de capa	0.2 mm
Altura de capa inicial	0.2 mm
Perímetro	
Grosor de pared	1.5 mm
Imprimir paredes finas	True
Material	
Temperatura de impresión	215 °C
Temperatura de impresión de la capa inicial	220 °C
Temperatura de la placa de impresión	70 °C
Relleno	
Densidad de relleno	25 %
Patrón de relleno	zigzag
Velocidad	
Velocidad de impresión	150 mm/s
Adherencia a la placa de impresión	
Tipo de adherencia a la placa de impresión	Borde
Soporte	
Generar soporte	Si
Ángulo de voladizo del soporte	65°
Patrón de soporte	Zigzag
Densidad del soporte	20 %
Experimental	
Utilizar capas de adaptación	True

V-F. *Generador de Presión*

El método de acción de tubo retorcido (TTA) [12], propuesto introduce una novedosa forma de generar movimiento lineal y flujo de fluido utilizando un enfoque ingenioso. En este método, un tubo elástico es sometido a torsión mediante un motor, resultando en un desplazamiento lineal ΔL y la expulsión de fluido, similar al funcionamiento de las bombas convencionales. Una característica destacada es la eliminación de la necesidad de válvulas para el control del flujo, ya que el servomotor es el único elemento requerido para este propósito.

El concepto subyacente del TTA se ejemplifica utilizando un solo tubo elástico con dimensiones internas definidas. Este tubo se divide en segmentos mediante adaptadores en forma de mordazas sellando ambos extremos del tubo. Dependiendo de los requerimientos, el tubo puede llenarse con gas presurizado o líquidos inofensivos como el agua. La torsión de un segmento conduce a una deformación por torsión en el tubo, impulsando el fluido hacia el siguiente segmento y ocasionando un incremento de presión. Este segmento de mayor presión puede ser diseñado como un actuador suave capaz de generar movimientos específicos, como la flexión. [12] Este enfoque combina de manera efectiva las características de un actuador suave y una bomba convencional, simplificando el proceso de control y manipulación del flujo de fluido.

Tabla XVII: Características físicas típicas. Fuente: [17]

Propiedad	Valor o categoría
Durómetro Dureza Shore A, 15 Seg	50
Resistencia a la tracción, psi (MPa)	1,450 (10)
Alargamiento de rotura, %	770
Resistencia al desgarro, lb-f/inch (kN/m)	200 (35)
Peso específico	1.14
Módulo de tracción, @ 200 % Elongación, psi (MPa)	280 (1.9)

En esta investigación, se ha explorado la aplicación del pandeo torsional en tubos elásticos como un método innovador para la transmisión de energía fluida. La selección de los tubos sometidos a análisis y empleados en este estudio se ha basado en su alta elasticidad y en la característica de poseer una estructura de pared delgada. Es crucial considerar que la torsión aplicada a tubos rígidos con baja elasticidad puede conllevar a deformaciones plásticas irreversibles. Sin embargo, cuando se trata de tubos altamente elásticos, la torsión da lugar a una región colapsada y fuertemente torcida, y es importante notar que la mayoría de estas deformaciones son reversibles en naturaleza.

En este contexto, se emplean tubos de látex natural de pared delgada, disponibles en el mercado comercial. Al aplicar una torsión de media vuelta (180°) al tubo, se produce un pandeo que conlleva a deformaciones en su estructura. Si la torsión se incrementa para completar una vuelta completa (360°), la estructura doblada experimenta una deformación aún mayor, manifestando finalmente una configuración helicoidal [12].

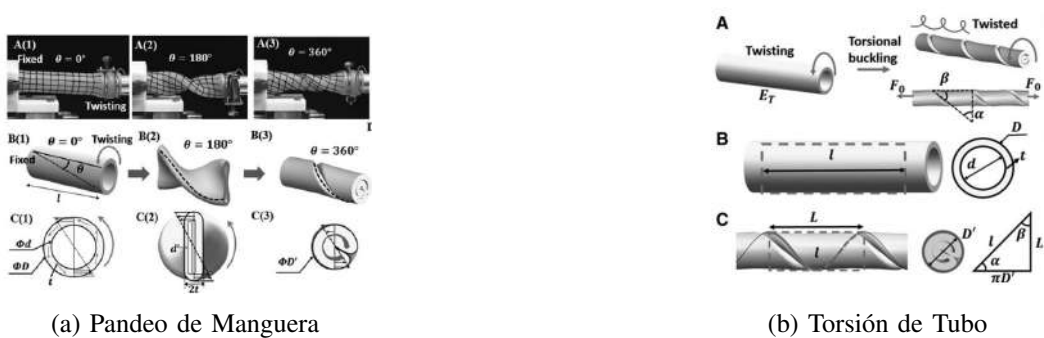


Figura 47: Moldes para Actuadores Neumáticos. Fuente: [12].

V-G. *Manufactura de Actuadores Suaves*

En la investigación y experimentación sobre la creación de robots blandos con características análogas a los dedos humanos, se destaca la importancia de los materiales a utilizados. En este contexto, el caucho de silicona, específicamente el Ecoflex 00-10 [24], se ha erigido como una elección destacada debido a sus notables propiedades flexibles y moldeables.

La metodología central empleada en la fabricación de estos robots blandos se basan en el modelado por deposición fundida [26]. Estos procedimientos implican verter o inyectar de forma gradual el Ecoflex 00-10 en una cavidad que reproduce la forma deseada del robot como se muestra en la Figura 53. A medida que el líquido llena esta cavidad, adquiere progresivamente las características y la forma requeridas, acercándose así a su configuración final. Una vez que el material líquido se solidifica, el proceso de fabricación concluye. El último paso comprende la delicada extracción del elastómero sólido resultante del molde, generando una pieza acabada lista para su incorporación en la construcción de robots blandos.



Figura 48: Prototipo con Burbujas. Fuente: Quimiz D, Sierra X

Las burbujas de aire que se forman en el material Ecoflex 00-10, mostradas en la Figura 48, surgen debido a la presencia de gases atrapados en la mezcla antes de su completa solidificación. Diversos factores durante las etapas de mezcla, vertido y curado del Ecoflex pueden contribuir a la formación de estas burbujas.

Algunas de las razones comunes incluyen:

- **Agitación inadecuada:** Si la mezcla de Ecoflex no se agita de manera uniforme o adecuada, es posible que se atrapen burbujas de aire en la solución.
- **Vertido rápido:** Verter la mezcla de Ecoflex demasiado rápido puede agitar el material y atrapar aire en la mezcla.
- **Exposición al vacío insuficiente:** El Ecoflex, al igual que muchos materiales de silicona, requiere un proceso de desgasificación mediante exposición al vacío antes de su curado. Si este proceso no se realiza adecuadamente o durante el tiempo suficiente, las burbujas de aire pueden quedar atrapadas en la mezcla. Para garantizar una desgasificación completa, se expone el material vertido en el molde durante unos minutos adicionales.

- **Agitación excesiva:** Agitar en exceso la mezcla de Ecoflex puede introducir más aire en la solución y aumentar la probabilidad de que se formen burbujas.

Para prevenir la formación de burbujas de aire en el Ecoflex 00-10, se recomienda seguir rigurosamente las indicaciones proporcionadas por el fabricante en lo que respecta a la mezcla, el curado y el proceso de desgasificación. Además, la utilización de equipamiento como cámaras de vacío y la aplicación de técnicas de mezcla apropiadas pueden reducir al mínimo la presencia de burbujas y garantizar la alta calidad del producto final.

V-G1. Medición: Resulta imperativo observar con precisión las directrices proporcionadas por su fabricante. En este sentido, se estipula que los componentes Tipo A y Tipo B del material deben ser mezclados en una relación de 1:1. En consecuencia, se hace necesaria la medición exacta de estas proporciones previas a la mezcla, un paso que se lleva a cabo con la asistencia de una balanza de precisión.

Sin embargo, la rigurosidad del proceso no se limita solo a la relación de mezcla. El tiempo de agitación también constituye un factor clave, con una duración prescrita de 3 minutos, durante los cuales se debe garantizar una mezcla homogénea, evitando cualquier residuo de componentes sin integrar. En las próximas secciones, se sondeará en cada uno de estos aspectos, reconociendo su importancia en la obtención de un resultado final adecuado.



(a) Ecoflex 00-10 tipo A

(b) Ecoflex 00-10 tipo B

Figura 49: Moldes para Actuadores Neumáticos. Fuente: Quimiz D, Sierra X

En la búsqueda de un procedimiento óptimo, es fundamental considerar los requerimientos específicos de la bomba de vacío que utilizamos. Es necesario lograr una succión mínima de 29 pulgadas de mercurio (1 Bar / 100 KPa). Además, se debe tener en cuenta la expansión del material y asegurar suficiente espacio en el contenedor.

Para satisfacer la necesidad de disponer de una cámara de vacío, se decidió adquirir una Bomba de Vacío de una sola etapa, específicamente el modelo HCEC-6S, con una capacidad de desplazamiento de aire libre de 6 CFM. Esta elección se basa en la premisa de optimizar la extracción de aire de una cámara de vacío de fabricación casera. Dicha cámara está compuesta por elementos como una olla, una tapa de vidrio, acoples de bronce y un manómetro de presión negativa. En las próximas secciones, exploraremos con profundidad los fundamentos científicos detrás de esta selección y cómo cada componente contribuye al proceso de generación de vacío en la cámara casera.



Figura 50: Cámara de Vacío. Fuente: Quimiz D, Sierra X

En el proceso de manipulación del Ecoflex, un material de silicona-caucho, se han identificado las etapas para asegurar la calidad y la integridad del resultado final. Antes de llevar a cabo este procedimiento, se aplica una capa de cera desmoldante sobre la superficie utilizando una brocha. Este paso busca garantizar que el Ecoflex no se adhiera a la superficie interna de los moldes, evitando así deformaciones no deseadas en el material durante el proceso de curado.



Figura 51: Cera Desmoldante. Fuente: Quimiz D, Sierra X



Figura 52: Aplicación Cera Desmoldante. Fuente: Quimiz D, Sierra X

En el proceso culminante, se incorporan dos mordazas de tipo C al molde impreso, desempeñando la función crucial de prevenir cualquier escape del material a través de los costados. Posteriormente, se procede a verter el Ecoflex 00-10 en el molde como se muestra en la figura 53, una vez que ha sido sometido a un proceso de vacío. Con el propósito de garantizar la ausencia total de burbujas en el producto final, se somete a una exposición adicional al vacío durante un minuto adicional tras el vertido inicial.



Figura 53: Aplicación de Ecoflex 00-10. Fuente: Quimiz D, Sierra X

La fase de curado en el proceso de tratamiento del caucho presenta consideraciones esenciales para asegurar el resultado deseado. Un factor de destacada relevancia es el tiempo de curado a temperatura ambiente ($73^{\circ}\text{F}/23^{\circ}\text{C}$), que precede al proceso de desmolde. Sin embargo, no se limita únicamente a esta etapa inicial. El enfoque en la obtención de las propiedades físicas y de rendimiento óptimas se refleja en la posibilidad de llevar a cabo un curado adicional posterior. Tras el proceso de curado a temperatura ambiente, entra en juego el proceso de post-curado, caracterizado por la exposición del caucho a temperaturas de $176^{\circ}\text{F}/80^{\circ}\text{C}$ durante 2 horas, seguidas de $212^{\circ}\text{F}/100^{\circ}\text{C}$ durante una hora.

V-G2. Pan and Tilt: Se decidió buscar un diseño que pudiera cumplir con los requisitos de flexión y rotación necesarios. Se seleccionó un diseño de Pan and Tilt disponible en GrabCAD para satisfacer estas necesidades **paaaaan**. El sistema Pan and Tilt se establece con el propósito fundamental de asegurar y simular los movimientos de flexión y rotación característicos de una mano humana. En este sistema, dos servomotores desempeñan un rol central al transmitir la potencia necesaria para ejecutar estos movimientos específicos. A lo largo de las próximas secciones, exploraremos minuciosamente la función y la relevancia de este sistema, así como el papel crucial desempeñado por los servomotores en la recreación de movimientos análogos a los realizados por la mano humana.

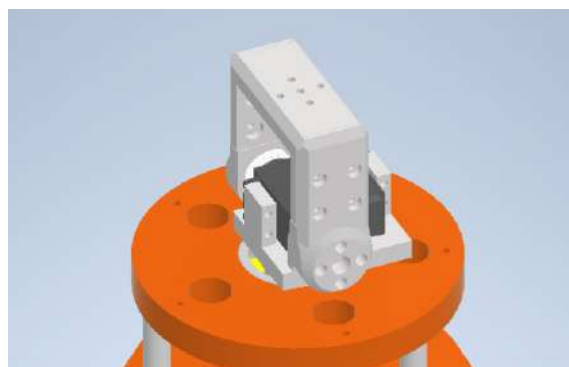


Figura 54: Pan and Tilt Ensamblado: Quimiz D, Sierra X

Parámetros de Impresión 3D

Tabla XVIII: Parámetros de impresión 3D plato base sistema pan. Fuente: Quimiz D, Sierra X

Parámetros de Impresión 3D	
Calidad	
Altura de capa	0.2 mm
Altura de capa inicial	0.2 mm
Perímetro	
Grosor de pared	1.5 mm
Imprimir paredes finas	True
Material	
Temperatura de impresión	215 °C
Temperatura de impresión de la capa inicial	220 °C
Temperatura de la placa de impresión	70 °C
Relleno	
Densidad de relleno	25 %
Patrón de relleno	zigzag
Velocidad	
Velocidad de impresión	150 mm/s
Adherencia a la placa de impresión	
Tipo de adherencia a la placa de impresión	Borde
Soporte	
Generar soporte	Si
Ángulo de voladizo del soporte	65°
Patrón de soporte	Zigzag
Densidad del soporte	20 %
Experimental	
Utilizar capas de adaptación	True

V-H. Software

Dentro del marco de esta investigación, se profundiza en la aplicación específica del software Blynk, el cual desempeña un papel fundamental en la administración de la rotación de los servomotores. Asimismo, se detalla minuciosamente el procedimiento esencial para establecer una conexión fluida entre el módulo ESP32 y esta plataforma de software. Esta sección se sumerge en la exploración tanto de la operatividad que rodea el control de los servomotores mediante la interfaz de Blynk, como de los pasos concretos que demanda la exitosa interconexión entre el mencionado módulo y el software mencionado.

V-H1. Blynk: El software Blynk emerge como una poderosa plataforma que aborda esta demanda, permitiendo a los desarrolladores y entusiastas de la electrónica crear interfaces personalizadas de manera sencilla y efectiva. Blynk se erige como un puente virtual que conecta dispositivos hardware, como microcontroladores y placas de desarrollo, con aplicaciones móviles, posibilitando la interacción y supervisión a través de la nube.

V-H2. Guía de enlace Blynk - ESP32: A continuación se presentan los pasos para enlazar Blynk a un módulo ESP32.

Registro y creación de proyecto en Blynk

Antes que nada, se procede a realizar el registro en la plataforma Blynk visitando su sitio web (<https://blynk.io/>) y crear una cuenta. Una vez dentro, se inicia la creación de un nuevo proyecto y se elige el tipo de dispositivo como “ESP32”.

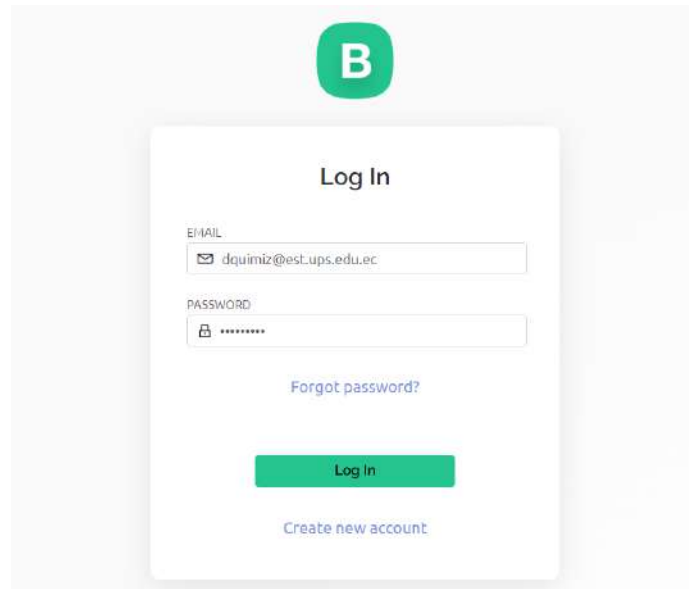


Figura 55: Registro en Blynk. Fuente: Quimiz D, Sierra X

Descarga e inicio de la aplicación Blynk

Se sugiere acceder a la tienda de aplicaciones del dispositivo móvil y proceder a la descarga de la aplicación oficial de Blynk. Tras la descarga exitosa, se recomienda abrir la aplicación e ingresar utilizando las credenciales de acceso correspondientes a la cuenta de Blynk.

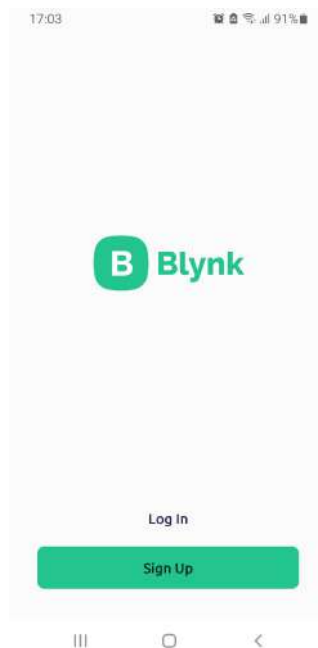


Figura 56: Registro en Aplicación Móvil Blynk. Fuente: Quimiz D, Sierra X

Configuración del proyecto en la aplicación

Dentro de la plataforma Blynk, se procede a acceder al proyecto previamente establecido en el primer paso. En este punto, se adquiere la capacidad de incorporar y ajustar los elementos visuales conocidos como widgets, destinados a facilitar la interacción con el dispositivo ESP32. Los widgets abarcan una variedad de opciones como botones, deslizadores y medidores, entre otros.

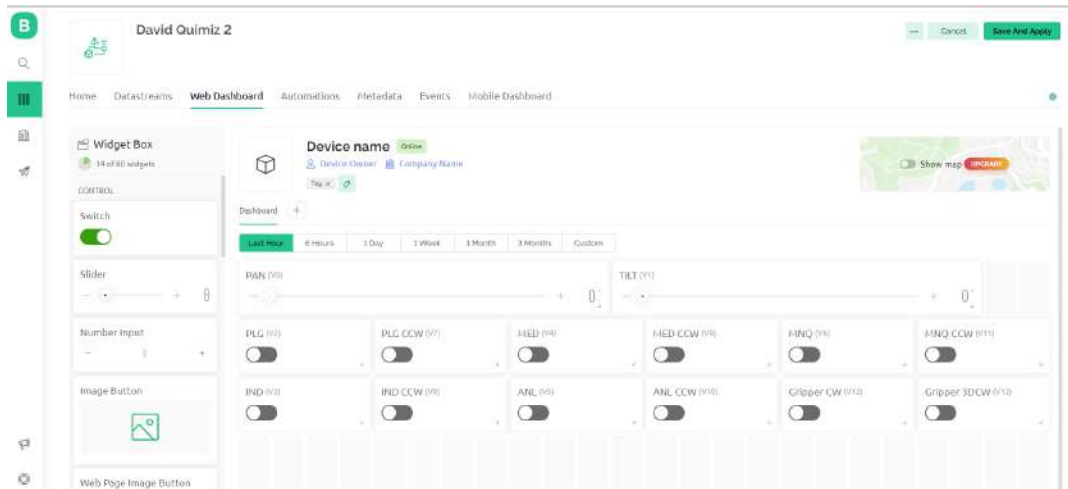


Figura 57: Dashboard de Blynk web. Fuente: Quimiz D, Sierra X

Obtención del token de autenticación

Dentro de la estructura del proyecto en la plataforma Blynk, se localiza un código identificado como “Auth Token” o “Token de Autenticación”. Este código es singular y específico para el proyecto en cuestión y el dispositivo ESP32 asociado. Es recomendable tomar nota o copiar este código, ya que resultará necesario en etapas posteriores.

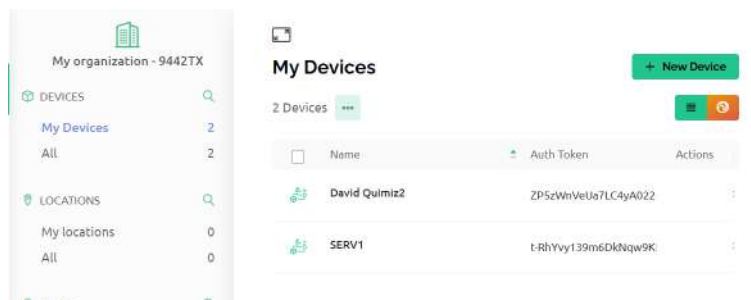


Figura 58: Token de Autenticación. Fuente: Quimiz D, Sierra X

Preparación del entorno de desarrollo

Se debe contar con el entorno de desarrollo Arduino IDE previamente instalado en la computadora, así como asegurarse de disponer de la biblioteca de Blynk en dicho entorno. En caso de no estar presente, se puede realizar la instalación a través de la opción “Sketch > Incluir Biblioteca > Gestionar Bibliotecas” buscando “Blynk”. Finalmente, se recomienda seleccionar la placa “ESP32” en la pestaña “Herramientas > Placa” dentro del entorno.

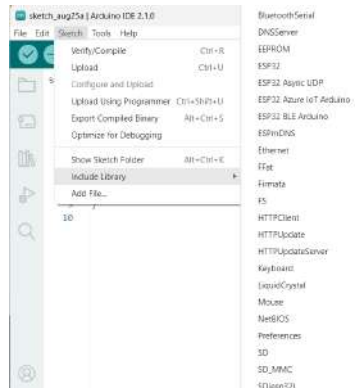


Figura 59: Instalación Librería ESP32. Fuente: Quimiz D, Sierra X

Código de conexión ESP32 - Blynk

Este código es una implementación que utiliza la plataforma Blynk junto con la librería ESP32Servo para controlar varios servomotores a través de pines virtuales. Se trata de un programa para una placa ESP32 (probablemente un ESP32 devkit) que se comunica con la plataforma Blynk para recibir comandos y controlar la posición de los servomotores conectados.

En la figura 60, se incluyen las librerías necesarias para usar Blynk, controlar servomotores y configurar la conexión WiFi.

```

1  #include <BlynkSimpleEsp32.h>
2  #include <ESP32Servo.h>
3  #include <WiFi.h>
4  #include <WiFiClient.h>
5

```

Figura 60: Código Inicial Librerías. Fuente: Quimiz D, Sierra X

En la figura 61, se muestra el código que establece las credenciales necesarias para conectarse a la red WiFi y a la plataforma Blynk.

La variable ssid[] almacena el nombre del punto de acceso WiFi al que el dispositivo ESP32 debe conectarse. En pass[] se almacena la contraseña del punto de acceso WiFi. Variable auth[] almacena la clave de autenticación única que se utiliza para conectar el dispositivo ESP32 a la plataforma Blynk. Cada proyecto en Blynk tiene un token de autenticación único que se utiliza para identificar el proyecto y permitir la comunicación entre el dispositivo y la aplicación Blynk.

```

char ssid[] = "****";
char pass[] = "****";
char auth[] = "****";

```

Figura 61: Código de configuración Wifi. Fuente: Quimiz D, Sierra X

Visualización y control a través de la aplicación Blynk

Se procede a conectar el ESP32 a una fuente de energía, aguardando su conexión a la red Wi-Fi. Posteriormente, se accede al proyecto previamente establecido en la aplicación Blynk. A partir de este momento, los widgets configurados en la aplicación ofrecen la posibilidad de ejercer control y supervisión remota sobre las funcionalidades del ESP32.

V-I. Hardware

Componentes : En la sección relacionada con la manipulación de la rotación de la mano, se decidió de adoptar un diseño que se basa en la integración de dos servomotores capaces de girar 180 grados. De acuerdo con la documentación técnica, se establece que estos motores requieren una alimentación de 5 VDC. Para garantizar este suministro eléctrico y cumplir con los requisitos de corriente, se procedió a la adquisición de una placa reguladora de voltaje diseñada para transformar la entrada de 12VDC en una salida estable de 5VDC. Este enfoque se implementó con el propósito de asegurar tanto el nivel adecuado de voltaje como la capacidad de amperaje necesarios para un rendimiento óptimo del sistema.

Microcontroladores y Circuitos : Durante la fase de pruebas con las Raspberry Pi, se encontraron dificultades que culminaron en la inoperatividad de la placa. Debido a esta situación, se decidió de cambiar a una placa diferente, ya que la obtención de una nueva Raspberry requeriría un proceso que implicaría tiempo y gastos. Se eligió la placa ESP32, en vista de su versatilidad de adquisición. Además, la ESP32 se puede programar utilizando la interfaz de Arduino. Tras migrar las configuraciones previamente establecidas desde la Raspberry, se continuó con el desarrollo del sistema de control de la mano utilizando esta nueva placa.



Figura 62: ESP-WROOM-32. Fuente: Alldatasheet [7].

La ESP32 destaca como un microcontrolador altamente eficiente en términos de consumo energético, logrando una velocidad de reloj máxima de hasta 160 MHz. Su distintivo radica en la habilidad de establecer conexiones inalámbricas a través de Wi-Fi y Bluetooth, posibilitando la comunicación sin cables con otros dispositivos y redes. Además, el 80 % de su capacidad de procesamiento está dedicado a la programación y el desarrollo de aplicaciones por parte del usuario. [7]

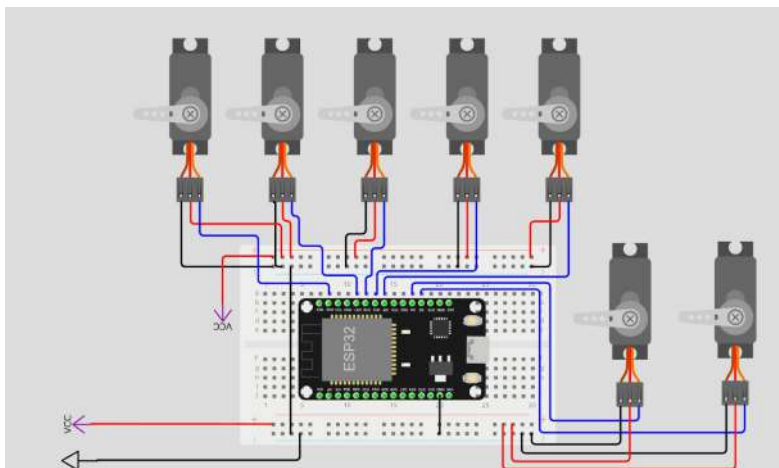


Figura 63: Circuito Electrónico. Fuente: Quimiz D, Sierra X

Posteriormente se procedió a programar los servomotores, que como previamente mencionado, serán utilizados para aplicar torsión a la manguera, permitiendo que el aire remanente en el interior llegue a los dedos. Esta

programación se basó en aprovechar las salidas digitales disponibles en la placa ESP32, garantizando un control preciso y eficiente del proceso.

Como se tiene un total de 5 servomotores de 360 grados, hay que tener en cuenta el consumo de energía de cada uno, ya que, si la fuente no suministra el voltaje necesario ocasiona que los servomotores no funcionen de manera correcta.

Tabla XIX: Ficha Técnica Servomotores. Fuente: Electronilab[5]

Componente	Voltaje [V]	Amperaje [mA]
Servomotor DS04-NFC 360	5	800
Servomotor FT5330M	5	180

Como se refleja en la tabla XIX, en consumo de amperaje es mínimo para cada servomotor. Por ende, el consumo general es:

$$A = 800mA * 5 = 4Amperios \quad (1)$$

V-J. Torque Elevación

Considerando la configuración del sistema "Pan and Tilt", se procede a efectuar un análisis para determinar la capacidad de elevación de la mano en cuestión. Los servomotores cumplen el rol de conectar componentes en movimiento, operando como articulaciones electromecánicas en diversas situaciones, y para lograr esto se emplean diversos elementos de fijación. La capacidad de levantamiento varía en función del ángulo de inclinación en el que se sitúe mediante la fórmula:

$$Torque = 35Kg/cm \quad (2)$$

Dado que este servomotor tiene una capacidad de elevación máxima de 35 kg, en la fórmula se considera como un valor constante, el cual puede cambiar según el tipo de servomotor empleado. Se tiene en cuenta la altura de la mano para crear una tabla de intervalos que especificará la capacidad de carga sin inconvenientes que la mano podrá manejar.

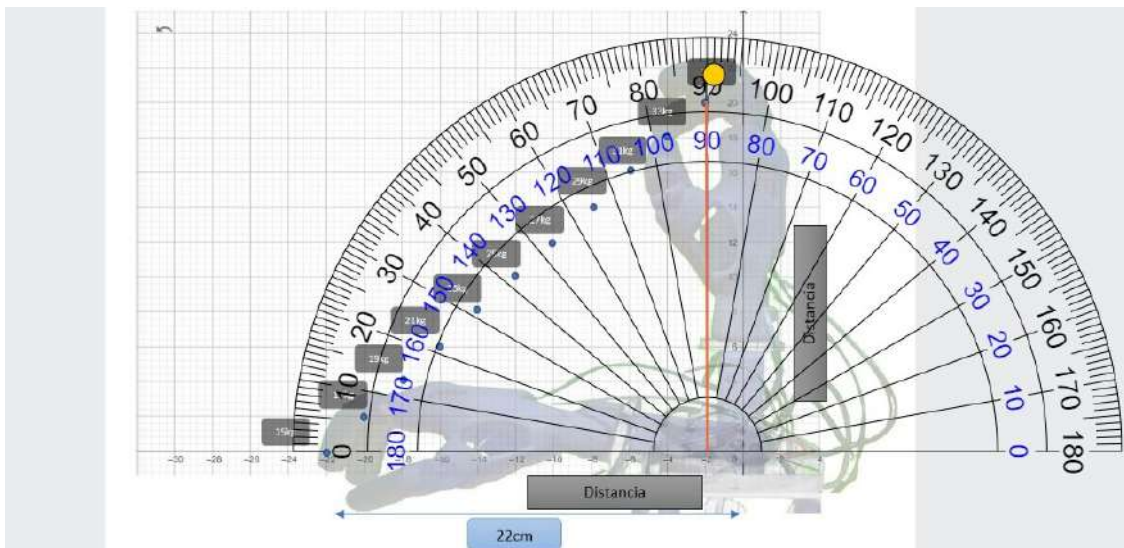


Figura 64: Tabla de Peso Elevación Servomotor, Fuente: Quimiz D, Sierra X

A continuación, se presenta la escala de peso que la mano será capaz de levantar. Es importante tener en mente este gráfico, ya que guarda una estrecha relación con la presión que cada dedo ejercerá para agarrar objetos de poco peso de manera paralela.

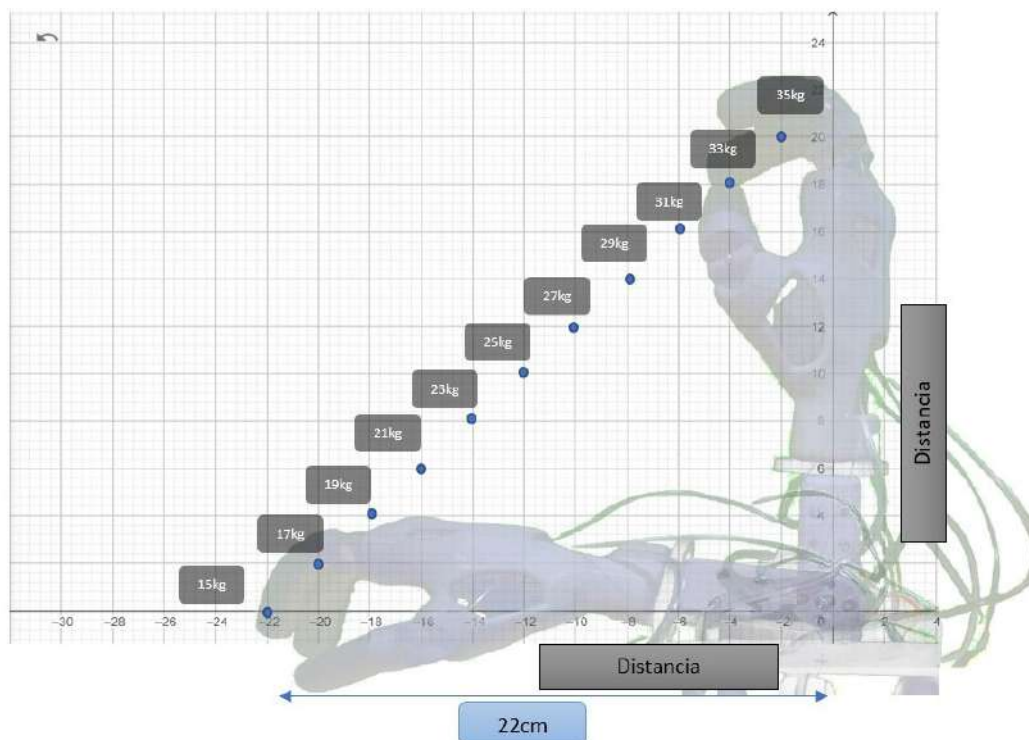


Figura 65: Escala de Pesos, Fuente: Quimiz D, Sierra X

V-K. Prueba de Presión Fuerza

El sensor FSR402 es un dispositivo de detección de fuerza resistiva ampliamente empleado para medir la presión o fuerza ejercida por actuadores suaves, como los dedos robóticos [13]. Con el objetivo de verificar la significativa presión que los actuadores suaves aplican en las superficies de sujeción, se ha llevado a cabo un experimento utilizando este sensor.

Proceso de Experimentación:

Montaje del Sensor Para llevar a cabo la medición de la fuerza, se procede a instalar el sensor FSR402 en la ubicación deseada. Este puede ser ubicado en la punta del dedo robótico suave o en la superficie con la que interactúa. En este caso particular, se ha colocado en la superficie de un objeto cilíndrico.

Conexión Eléctrica Luego de haber instalado el sensor en su posición, se procede a conectar los cables del FSR402 a una placa Arduino Nano. Este último se utiliza como un sistema de adquisición de datos fundamental para la lectura en tiempo real de la resistencia del sensor. Cabe destacar que estos sensores son de tipo resistivo, lo que implica que su resistencia varía en función de la fuerza aplicada.

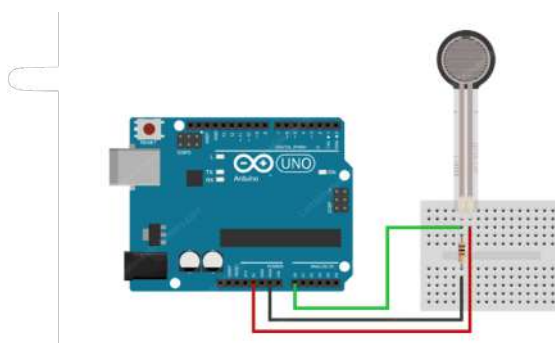


Figura 66: Conexión sensor FSR 402. Fuente: [13]

V-L. Prueba experimental manómetro

En esta etapa, procedemos a llevar a cabo un proceso experimental mediante el uso de un manómetro casero. El objetivo es analizar la presión generada al activar el servomotor, lo cual induce la rotación de la manguera. Esta exploración tiene como finalidad determinar la presión específica que cada dedo recibirá. Dado que los dedos no comparten las mismas características, contando con medidas distintas que han sido previamente especificadas, su rango de operatividad se encuentra directamente vinculado a la presión de aire que les llega.



Figura 67: Prueba con Manómetro, Fuente: Quimiz D, Sierra X

Los valores son obtenidos mediante la aplicación de la ecuación de presión hidrostática, la cual refleja la presión ejercida sobre un objeto inmerso en un fluido debido a la columna de líquido que se encuentra encima de él. En donde “d” es la densidad del agua, “g” es la gravedad y “h” es la variación de altura entre referencias.

$$d = 1000\left(\frac{Kg}{m^3}\right) \quad (3)$$

$$g = 9,81\left(\frac{m}{s^2}\right) \quad (4)$$

$$P = d * g * h \quad (5)$$

A continuación, se expondrá el empleo de la ecuación a través de dos experimentos: uno utilizando agua en la manguera y otro sin agua. El objetivo es discernir en cuál de los experimentos se logra una mayor presión para cada dedo.

Durante la fase experimental con dos servomotores, se otorgó un enfoque central a la influencia del medio fluido, específicamente el agua, con el propósito de analizar las variaciones de presión originadas por el uso de aire y agua. En la primera serie de pruebas, se optó por una combinación equitativa de aire y agua. Los resultados demostraron que al realizar un cuarto de giro, se evidenció una disparidad en la altura de 0.07 metros. Posteriormente, al ejecutar un giro completo, la diferencia de altura aumentó a 0.31 metros. Como se muestra en la tabla XX

Tabla XX: Experimentación con Agua en Magueras de Servomotores, Fuente: Quimiz D, Sierra X

Experimento con Agua		
Servomotor	Giro	h
Primer Servomotor (D. Anular)	1/4	7
	1/2	31
Segundo Servomotor(D. Índice)	1/4	8
	1/2	31

Realizamos el experimento en ausencia de agua y observamos notables variaciones. Al girar un cuarto de vuelta, se evidenció una altura de 0.03 metros, mientras que al realizar medio giro, la altura registrada fue de 0.017 metros. Por lo tanto, se plantea la recomendación de mantener una cantidad determinada de agua en la manguera, ya que esta acción resulta aconsejable para lograr un incremento eficaz en la presión. Como se muestra en la tabla XXI

Tabla XXI: Experimentación con Agua en Magueras de Servomotores, Fuente: Quimiz D, Sierra X

Experimento sin Agua		
Servomotor	Giro	h
Primer Servomotor (D. Anular)	1/4	3
	1/2	17
Segundo Servomotor(D. Indice)	1/4	6
	1/2	23

VI. RESULTADOS

VI-A. Actuador Manufacturado

Esta sección se concentra en la exposición de los resultados obtenidos a través de una serie de experimentos meticulosamente diseñados y realizados en el contexto de un dedo robótico con cualidades de suavidad. Entre los parámetros evaluados, se incluyen la fuerza de agarre, la precisión en la ejecución de tareas y la capacidad de respuesta del sistema ante diferentes estímulos. Estos resultados se someten a un análisis, contextualizándolos mediante su comparación con investigaciones anteriores y, crucialmente, mediante la comparativa con la capacidad de agarre y manipulación propia de los dedos humanos.

En el presente escenario, se exhibe el modelo culminado del dedo robótico en su forma definitiva. A través de diversas imágenes, se brinda la oportunidad de apreciar varios aspectos cruciales, como el acabado superficial logrado, el ángulo de flexión que puede alcanzar y la manera en que el dedo robótico está asegurado o sujeto. Estas imágenes capturan los detalles esenciales que destacan tanto la apariencia como la funcionalidad del dedo robótico en su estado finalizado. En las siguientes secciones, se exploran a profundidad cada uno de estos elementos para comprender mejor el producto final y sus atributos.

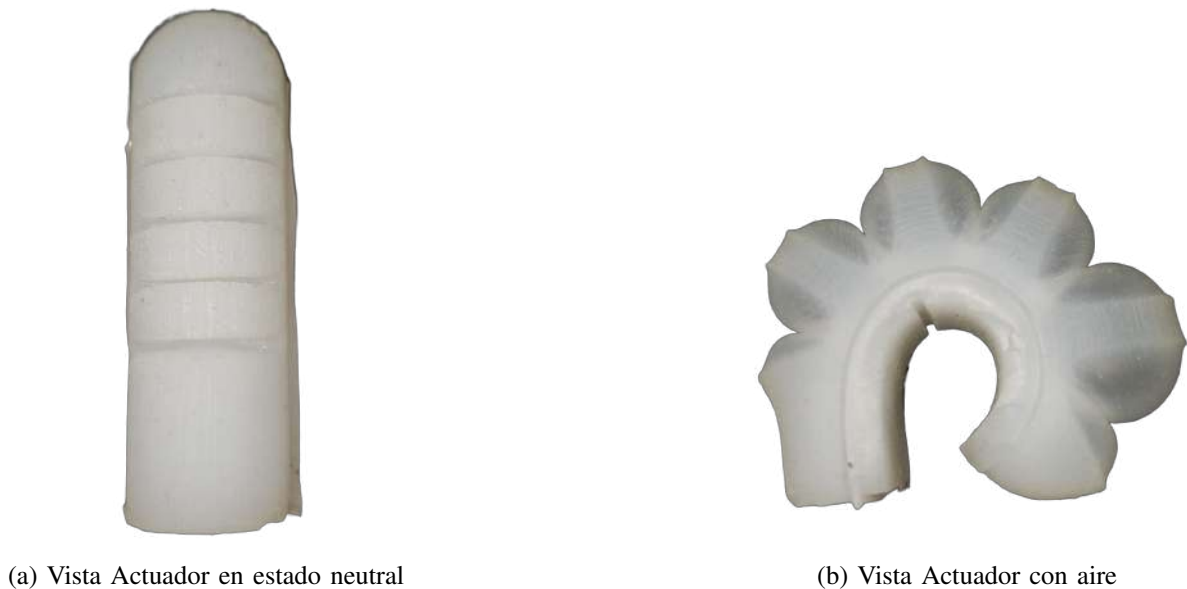


Figura 68: Diseño Actuador Manufacturado Completo. Fuente: Quimiz D, Sierra X

En las Figuras 69 y 70, se presenta una representación visual de diversos tipos de agarre previamente seleccionados para el estudio. Entre estos, se destacan los agarres de prensión de diámetro amplio 69, el agarre de prensión convencional y el agarre de precisión en configuración de trípode 70. Estos ejemplos ilustrativos brindan una visión concreta de los escenarios de agarre explorados y servirán como referencia visual a lo largo del análisis posterior.



(a) Vista Frontal



(b) Vista Lateral

Figura 69: Agarre de Objeto Cilíndrico. Fuente: Quimiz D, Sierra X



(a) Vista Frontal



(b) Vista Lateral

Figura 70: Agarre de Objeto Cúbico. Fuente: Quimiz D, Sierra X

VI-A1. Diseño final del Prototipo: Luego de varios análisis individuales, se procede a la integración de las partes previamente estructurado para evaluar su desempeño. Cada dedo ensamblado ha sido confeccionado conforme a su diseño. Se han implementado fuentes de alimentación de corriente continua (DC) para energizar tanto los servomotores de 360 grados como los de 180 grados. La fuente destinada a los servomotores de 360 grados es de 5VDC a 5A, mientras que la de los servomotores de 180 grados opera a 12 VDC y 5A. Esta última fuente está

integrada de manera coherente con la tarjeta de regulación de voltaje, todo ello ubicado en el interior de la caja de distribución. Se ha elegido la opción de un conector industrial de 24 pines para cubrir todas las conexiones de los servomotores. El calibre del cable utilizado es de 18 AWG, debido a que los cálculos del consumo de los servomotores no superan los 10 amperios.

En el contexto de este proyecto de titulación, se ha establecido un requisito específico para el actuador: generar un movimiento de flexión que simule el natural doblar de los dedos de una mano humana. Este desafío ha conducido a una exploración profunda de los principios fundamentales del diseño y la actuación de estos dispositivos.

Es importante destacar que, durante este proceso, se identificaron desafíos relacionados con la capacidad de carga de los servomotores de rotación continua DS04. En consecuencia, se tomó la decisión de cambiar a servomotores de mayor capacidad TD-830MG [4], que mejor se ajustaran a las demandas del proyecto, mostrándose en la Tabla XXII las características del servomotor. Este ajuste fue esencial para garantizar el adecuado funcionamiento del sistema y cumplir con el requisito específico de generar los debidos movimientos.

Tabla XXII: Especificaciones servomotor TD-8320MG. Fuente: [4]

Especificaciones técnicas	
Modelo	TD-8320MG
Tamaño	40,6 x 20,4 x 30,0 mm
Ángulo de rotación	180° y 360° continuo
Torque	20.5kg*cm
Voltaje de operación	4.8V – 7.2V
Corriente	201mA
elocidad	0.18 seg/60°
Ancho de pulso	entre 500 y 2500useg



Figura 71: Servomotor TD-8320MG

Se presenta el modelo físico del prototipo en la Figura 72:



Figura 72: Diseño Final de Prototipo de Mano Robótica con Actuadores Suaves. Fuente: Quimiz D, Sierra X

VI-B. Pruebas de Prehensión de Mano Robótica Suave

Las pruebas de prehensión son esenciales para evaluar el desempeño y la eficacia de las manos robóticas suaves en escenarios del mundo real. Estas pruebas permiten determinar la capacidad de la mano robótica para agarrar objetos con diferentes formas, tamaños y propiedades físicas, como peso, rigidez y fragilidad. Además, se busca asegurar que el agarre sea lo suficientemente firme como para evitar caídas o daños a los objetos manipulados, pero lo bastante suave para no dañarlos.

El principal objetivo de estas pruebas es evaluar la capacidad de prehensión del prototipo con diversos tipos de objetos. Esto incluye la capacidad para agarrar objetos con diferentes formas, tamaños y texturas, así como la capacidad de aplicar la fuerza adecuada para mantener el agarre sin dañar los objetos.

Mediante la utilización del sensor FSR 402, se realiza una validación que demuestra que los dedos robóticos blandos aplican una presión mínima al sujetar objetos. La Figura 73 presenta los resultados obtenidos durante una

prueba de presión, ilustrando cómo un dedo aplica presión al sujetar un objeto y la liberación posterior de dicho objeto.



Figura 73: Gráfica de Presión de Dedo Robótico Suave. Fuente: Quimiz D, Sierra X

En la Tabla XXIII, se presenta una serie de pruebas de prehensión de mano aplicadas a soft robots. Estas pruebas están diseñadas para evaluar la capacidad del prototipo para agarrar y manipular objetos de manera eficiente y precisa, teniendo en cuenta las características únicas de la tecnología de robótica blanda.

Tabla XXIII: Ensayos de Agarre de Mano Robótica Suave. Fuente: Quimiz D, Sierra X

Pruebas de Prehensión de Mano Robótica Suave										
Número de Vueltas	Número de Intentos	Pulgar	Índice	Medio	Anular	Meñique	Prehensión Horizontal	Prehensión Vertical		
2	1	✓	✓	✓	X	X	No	Si		
	2	✓	X	✓	✓	X	No	Si		
	3	✓	X	✓	✓	X	Si	Si		
	4	✓	✓	✓	✓	✓	Si	Si		
	5	✓	✓	✓	✓	X	Si	Si		
3	6	✓	✓	✓	✓	X	No	Si		
	7	✓	✓	✓	X	X	No	No		
	8	✓	✓	✓	X	X	No	Si		
	9	✓	X	✓	✓	X	No	No		
	10	✓	✓	✓	X	X	No	Si		
3	11	✓	✓	✓	✓	X	No	Si		
	12	✓	✓	✓	✓	X	Si	Si		
	13	✓	X	✓	✓	X	No	Si		
	14	✓	X	✓	✓	X	No	Si		
	15	✓	✓	✓	✓	X	No	Si		
3	16	✓	✓	✓	✓	✓	No	Si		
	17	✓	✓	✓	✓	X	No	Si		
	18	✓	✓	✓	✓	X	No	Si		
	19	✓	✓	✓	✓	X	No	Si		
	20	✓	✓	✓	✓	✓	Si	Si		
3	21	✓	✓	✓	✓	✓	No	Si		
	22	✓	✓	✓	✓	✓	Si	Si		
	23	✓	✓	✓	✓	✓	Si	Si		
	24	✓	✓	✓	✓	✓	Si	Si		
	25	✓	✓	✓	✓	✓	Si	Si		

Se llevaron a cabo pruebas de validación organizadas en grupos de cinco pruebas por objeto, distribuidas de la siguiente manera; las pruebas del rango uno al cinco se enfocaron en el agarre de botellas de agua vacías, Figura 74a. Del rango seis al diez, se realizaron pruebas con botellas llenas al 1/3 de su capacidad con agua, Figura 74c. La Figura 74d exhibe los resultados de las pruebas del once al quince con prehensión de una pelota. Las pruebas del dieciséis al veinte consistieron en la prehensión de discos de gran tamaño, Figura 74e. Finalmente, las pruebas del veintiuno al veinticinco se centraron en el agarre de discos pequeños, Figura 74f. Esta organización por rangos facilita la sistematización y análisis de los resultados, permitiendo una evaluación completa de las capacidades de prehensión de los dedos robóticos blandos en una variedad de situaciones y objetos.



(a) Prehensión Botella Vacía



(b) Prehensión Botella Horizontal



(c) Prehensión Botella con 1/3 de Agua



(d) Prehensión Pelota



(e) Prehensión Disco Grande



(f) Prehensión Disco Pequeño

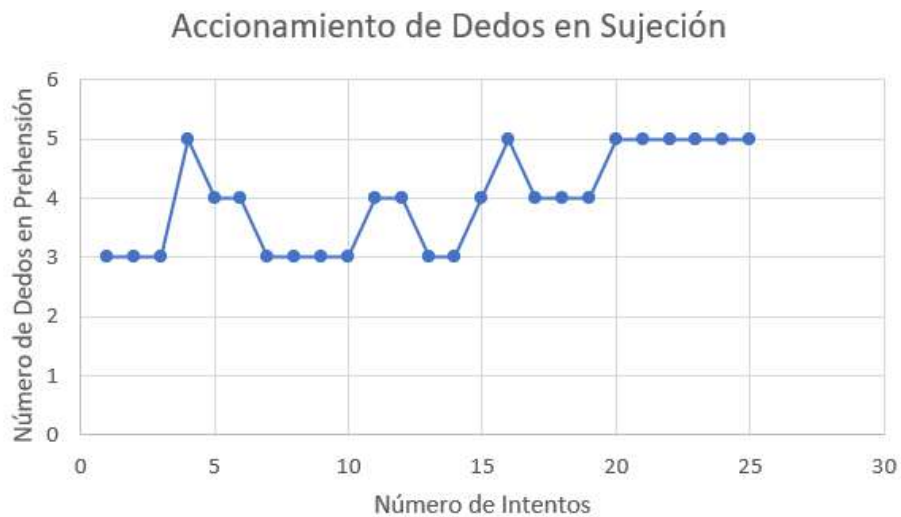
Figura 74: Pruebas de Prehensión. Fuente: Quimiz D, Sierra X

El estudio de las capacidades de sostenimiento estático de objetos se llevó a cabo de manera metódica, organizando las pruebas en grupos específicos, cada uno enfocado en objetos con características y pesos diversos. Esta estrategia permitió una evaluación de las capacidades de prehensión de la mano robótica, abarcando una amplia gama de situaciones y objetos.

Este enfoque organizado y sistemático ha resultado fundamental para comprender no solo la capacidad de la mano para sostener objetos en situaciones estáticas, sino también para establecer su límite de peso máximo, que se ha confirmado en hasta 300 gramos.

A continuación, en la Tabla XXIV, se presenta una síntesis de los resultados obtenidos a partir de observaciones y datos generados durante las pruebas previas. Estos resultados detallan la capacidad de prehensión exitosa de los dedos robóticos suaves en el prototipo diseñado para sujetar una amplia variedad de objetos. La información aquí contenida se basa en las pruebas mencionadas anteriormente y se complementa con una representación visual en la Figura 74, que ofrece una perspectiva más clara de los hallazgos.

Tabla XXIV: Tabla técnica de Ecoflex. Fuente: Quimiz D, Sierra X



Entre los resultados más destacados, se observa que en términos generales, el agarre tipo trípode, según la taxonomía propuesta en la Figura [2], resulta adecuado para una sujeción eficiente de objetos livianos, demostrando su capacidad óptima de agarre.

VIII. PRESUPUESTO

Tabla XXV: Tabla de estimación de Costos de Materiales. Fuente: Quimiz D, Sierra X

Materiales	Costo
Ecoflex	USD \$450.00
Manguera silicona	USD \$69.00
Raspberry pi 4	USD \$90.00
ESP32	USD \$15.00
Aplicación Móvil Blynk	USD \$7.00
Modulo regulador de voltaje	USD \$3.00
Rodamiento 6204	USD \$16.00
Fuente de voltaje 12 V - 5 A	USD \$13.00
Fuente de voltaje 5 V - 5 A	USD \$10.50
Servomotores DS04-NFC	USD \$60.00
Racor Neumatico PUM 6	USD \$12.00
Servomotores FT5330M	USD \$36.00
Servomotores TD-8320MG	USD \$126.00
Disco de aluminio para servomotor	USD \$18.00
Resina para impresión 3D	USD \$70.00
Filamento Amolen PLA	USD \$27.00
Filamento Amolen TPU	USD \$28.00
Mangueras	USD \$10.00
Conector industrial de 24 Pines	USD \$80.00
Cable 18AWG	USD \$15.00
Caja plástica de distribución 20 x 20 cm	USD \$6.00
Caja plástica de distribución 15 x 15 cm	USD \$4.50
Gastos Adicionales (pernos, tornillo, jumpers, tuercas, estaño, amarras plásticas, manómetro, etc)	USD \$80.00
Gastos Totales Tesis	USD \$1231

IX. CONCLUSIONES

El diseño de un prototipo de mano basado en “Soft Robots” con un accionamiento de modo dual para la sujeción de objetos livianos se ha logrado de manera satisfactoria. La combinación de tecnología blanda con sistemas de accionamiento neumático y por tendones artificiales ha demostrado ser efectiva para la creación de una mano robótica versátil y adaptable.

Se ha llevado a cabo una investigación exhaustiva sobre la anatomía, fisiología y mecánica del movimiento de una mano, lo que ha proporcionado una base sólida para el diseño y la implementación de la mano robótica. Esta investigación permitió una comprensión profunda de los principios biomecánicos necesarios para su funcionamiento.

El diseño mecánico se ha realizado de manera eficiente utilizando programas de CAD y teniendo en cuenta el estado del arte en la tecnología de manos robóticas. Esto ha resultado en la creación de un prototipo preciso y funcional que incorpora las últimas innovaciones en el campo.

La implementación de sistemas de accionamiento neumático y por tendones artificiales en la mano robótica ha permitido un movimiento suave y preciso, demostrando la eficacia de estas tecnologías en conjunto.

Aunque existen limitaciones en la apertura de agarre que restringen la capacidad de sostener ciertos objetos, se ha logrado un nivel significativo de validación del funcionamiento del prototipo mediante pruebas experimentales de movimiento básico de la mano. Este estudio preliminar sienta las bases para futuras mejoras y desarrollos en el campo de la robótica blanda.

X. RECOMENDACIONES

Además de los logros mencionados en las conclusiones, es fundamental tener en cuenta una serie de consideraciones prácticas para garantizar el funcionamiento efectivo y seguro del prototipo. Para comenzar, se recomienda encarecidamente el uso de guantes de protección al manipular el Ecoflex. Dada su tendencia a mancharse al entrar en contacto con diversas superficies, estos guantes proporcionarán una capa de protección esencial para mantener la integridad del material y evitar contaminaciones no deseadas durante el proceso de manipulación.

Se debe tener en cuenta que la exposición al vacío del Ecoflex 00-10 ofrece una serie de ventajas significativas en su procesamiento y rendimiento. En primer lugar, elimina las burbujas de aire atrapadas en el material, mejorando la calidad y la consistencia de las piezas, especialmente en aplicaciones que requieren superficies lisas y sin defectos. Además, aumenta la resistencia al desgarro al compactar las moléculas del material elastomérico, mejora la estabilidad dimensional al eliminar el aire atrapado y reduce la porosidad, lo que beneficia la resistencia a la absorción de líquidos y la capacidad de mantener propiedades físicas en entornos desafiantes.

Adicionalmente, antes de poner en funcionamiento el prototipo, es crucial verificar el voltaje de salida de las fuentes de alimentación. Una disminución en el voltaje puede afectar el rendimiento de los servomotores, incluso retrasando su respuesta desde el momento de la activación. Por lo tanto, realizar pruebas regulares de voltaje y asegurarse de que estén dentro de los parámetros adecuados es una medida preventiva esencial para evitar problemas operativos. Cabe destacar que fue necesario el uso de dos fuentes de voltajes. La primera fuente se utilizó para alimentar los servomotores para torsionar las mangueras, y la segunda fuente se utilizó para alimentar los servomotores del sistema pan and tilt.

Por otro lado, es importante tener en cuenta que en el sistema pan and tilt, es crucial evaluar la capacidad en kilogramos fuerza de cada servomotor. Si la capacidad de los servomotores es insuficiente para soportar la carga y las fuerzas aplicadas en el mecanismo, existe el riesgo de que el sistema comience a vibrar o incluso a experimentar fallas en su funcionamiento. Por lo tanto, antes de poner en funcionamiento el sistema, se debe realizar una cuidadosa selección de servomotores que sean capaces de manejar las fuerzas y las cargas asociadas con el movimiento de la mano del prototipo.

Por último, en el entorno de exposición, es imprescindible que la superficie sea lisa y nivelada. Dado que los servomotores son responsables de la rotación de la mano en el prototipo, cualquier irregularidad en la superficie podría ocasionar inestabilidad y comprometer el correcto funcionamiento del sistema. Por tanto, se debe prestar especial atención a la preparación de la superficie para evitar cualquier tipo de tambaleo o interferencia en el proceso. Estas precauciones ayudarán a maximizar la eficiencia y durabilidad del prototipo, garantizando un rendimiento óptimo en futuras pruebas y aplicaciones.

REFERENCIAS

- [1] Autodesk. «Software Autodesk Inventor — Obtener precios y comprar el producto oficial Inventor 2024.» Accedido: 01-09-2023. (), dirección: <https://www.autodesk.es/products/inventor/overview?term=1-YEAR&tab=subscription>.
- [2] H. V. David, *Diseño y construcción de una prótesis de mano con agarre de potencia*. Colombia: Universidad Autónoma de Bucaramanga UNAB, 2021.
- [3] Diwo.bq. «Mano Articulada.» Accedido: 06/07/2023. (), dirección: <http://diwo.bq.com/builds/mano-articulada/>.
- [4] E. ECUADOR. «Servo motor td8320mg 180 grados 20kg.» Accedido: 07/09/2023. (), dirección: <https://www.electronicsecuador.com/producto/servo-motor-td8320mg-180-grados-20kg/>.
- [5] Electronilab. «Servomotor DS04-NFC 360 Grados Rotación Continua 5.5Kg.cm.» (), dirección: <https://electronilab.co/tienda/servo-motor-de-rotacion-continua/r>.
- [6] D. Eric e Y. Tadesse, «A Soft 3D-Printed Robotic hand Actuated by Coiled SMA,» 2020.
- [7] *ESP-WROOM-02 - Datasheet*, 2018.
- [8] M. S. Garcia. Bogotá D.C: Univ. del Rosario, 2021.
- [9] I. García, M. Leonardo, L. Vicuña y Á. Sebastián, «Diseño de un actuador aplicando robótica blanda para la detección y recolección de frutas,» 2022.
- [10] J. M. H y P. V. N. «Soft Robotic: Una nueva generación de robots.» Accedido: 17-10-2022. (2014), dirección: <https://publicaciones.ucuenca.edu.ec/ojs/index.php/maskana/article/view/579/503>.
- [11] *ISO 37: Rubber, vulcanized or thermoplastic — Determination of tensile stress-strain properties*, 2017.
- [12] Y. Li, T. Ren, Y. Chen et al., «Untethered Multimode Fluidic Actuation: A New Approach to Soft and Compliant Robotics,» *Soft Robotics*, vol. 8, n.º 00, 2020. DOI: 10.1089/soro.2019.0131.
- [13] Makerguides.com. «Tutorial de Arduino sobre la resistencia de detección de fuerza (FSR) (3 ejemplos).» Accedido: 01/09/2023. (), dirección: <https://www.makerguides.com/es/fsr-arduino-tutorial/>.
- [14] A. Manobanda y V. Estefanía, *Diseño e implementación de un prototipo de rehabilitador de mano aplicando robótica blanda para el mejoramiento de la sujeción en personas con escasa movilidad*. Ecuador: Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, 2019. dirección: <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/15646>.
- [15] L. Matteo, B. Nicolò, T. Simone et al., «The Hannes hand prosthesis replicates the key biological properties of the human hand,» 2020.
- [16] Ministerio de inclusión económica y social. «CARACTERIZACIÓN DEL SERVICIO DE PERSONAS CON DISCAPACIDAD.» Accedido: 20-01-2023. (2018), dirección: <https://info.inclusion.gob.ec/index.php/informes-pcdusrext/2018-inf-pcd-usrint?download=220:informe-personas-con-discapacidad-febrero>.
- [17] S.-G. P. Plastics. «Tubo de silicona sanitario TYGON® 3350.» Accedido: 29-08-2023. (), dirección: <https://www.geodynamics.com.ar/archivos/archivo-141.pdf>.
- [18] Radlab. «Creality LD-002H.» Accedido: 17-10-2022. (), dirección: <https://www.radlab.com.ec/shop/product/bteqtmdaydstchjvzhvjdg8/>.
- [19] Raspberry. «Raspberry-pi-4-model-b.» (), dirección: <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-4-model-b/>.
- [20] L. Resnik, F. Acluche y M. Borgia, «The DEKA hand: A multifunction prosthetic terminal device patterns of grip usage at home,» 2017.
- [21] Robomart. «DS04-NFC Servo 360-Degree Continuous Rotation Servo DC Gear Motor For Arduino/Raspberry-Pi/Robotics.» (), dirección: <https://www.robomart.com/ds04-nfc-servo-360-degree-continuousrotation-servos-dc-gear-motor>.
- [22] E. B. Rua, F. J. D, G. A. G. A. y N. I. Villamizar, «3D Printing as a Didactic Tool for Teaching some Engineering and Design Concepts,» 2018.
- [23] J. Shintake, *Functional Soft Robotic Actuators Based on Dielectric Elastomers*. Suiza: Lausanne, EPFL, 2016. DOI: <https://doi.org/10.5075/epfl-thesis-6855>.
- [24] Smooth-On. «Ecoflex™ 00-10 Product Information.» Accedido: 18-07-2023. (), dirección: <https://www.smooth-on.com/products/ecoflex-00-10/>.

- [25] H. Su, X. Hou, X. Zhang et al., «Pneumatic Soft Robots: Challenges and Benefits,» 2022.
- [26] E. G. Suárez, *Diseño, modelado y fabricación de robots blandos*. Leganés, Madrid: Universidad Carlos III de Madrid, 2015. dirección: <http://hdl.handle.net/10016/23343>.
- [27] C. H. Taboadela, *Goniometría: Una herramienta para la evaluación de las incapacidades*. Buenos Aires, 2007.
- [28] J. E. Telich-Tarriba, L. E. Ramírez-Sosa², D. Palafox, E. Ortega-Hernandez y M. A. Rendón-Medina, «Aplicaciones de la impresión 3D en cirugía plástica reconstructiva,» 2019.
- [29] C. M. W. Urpiano y C. T. C. Israel, *Desarrollo de un mecanismo de muñeca con dos grados de libertad para una prótesis biomecánica de mano*. Cuenca, Ecuador, 2018.
- [30] A. C. Verstay, *PARAMETRIZACIÓN Y ADAPTACIÓN DE PRÓTESIS DE BRAZO APLICADA A IMPRESIÓN 3D*. España: Universidad Politécnica de Catalunya, 2022.
- [31] D. C. A. Villamil y F. D. B. Sanchez, *Sistema de conexión inalámbrico entre un brazalete Myo y una prótesis de miembro superior por medio de Bluetooth de baja energía*. Bogotá, Colombia: Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2018.
- [32] X. Wang, Y. Cheng, H. Zheng, Y. Li y C. Wang, *Design and optimization of actuator for soft bionic finger*. Wuhan, China: IEEE, 2021. DOI: 10.1109/ICoIAS53694.2021.00053.

XI. ANEXOS

XI-A. Anexo 1. Programación

```
#include <ESP32Servo.h>
#include <WiFi.h>
#include <BlynkSimpleEsp32.h>

char auth[] = "ZP5zWnVeUa7LC4yA022gRiVt460Q9Z6N"; //"t-RhYvy139m6DkNqw9KK0vGMn3gvlip.
char ssid[] = "NETLIFE-DIAZ"; // Reemplaza con tu SSID de red WiFi
char pass[] = "Ndiaz2021"; // Reemplaza con tu clave de red WiFi

Servo servo1; // Servo 1
Servo servo2; // Servo 2
Servo servo3; // Servo 3
Servo servo4; // Servo 4
Servo servo5; // Servo 5
Servo servo6; // Servo 6
Servo servo7; // Servo 7

int servo3Pin = 5; // Pin GPIO para servo 5
int servo4Pin = 18; // Pin GPIO para servo 18
int servo5Pin = 23; // Pin GPIO para servo 19
int servo6Pin = 21; // Pin GPIO para servo 21
int servo7Pin = 22; // Pin GPIO para servo 22

int servo3Position = 90; // Posición inicial de servo 3
int servo4Position = 90; // Posición inicial de servo 4
int servo5Position = 90; // Posición inicial de servo 5
int servo6Position = 90; // Posición inicial de servo 6
int servo7Position = 90; // Posición inicial de servo 7

void setup() {
  Blynk.begin(auth, ssid, pass);

  servo3.attach(servo3Pin);
  servo4.attach(servo4Pin);
  servo5.attach(servo5Pin);
  servo6.attach(servo6Pin);
  servo7.attach(servo7Pin);

  servo3.write(servo3Position);
  servo4.write(servo4Position);
  servo5.write(servo5Position);
  servo6.write(servo6Position);
  servo7.write(servo7Position);

  // Inicialización de los pines de los servomotores
  servo1.attach(2); // Movimiento PAN
  servo2.attach(4); // Movimiento en TILT
```

```

}

//////////Pan Tilt//////////

BLYNK_WRITE(V0) // Función para controlar el servomotor 1
{
  int angle = param.asInt(); // Obtiene el valor del slider

  // Ajusta el rango del valor del slider al rango de 0 a 180 grados
  angle = map(angle, 0, 180, 0, 180);

  servo1.write(angle); // Mueve el servomotor 1 a la posición deseada
}

BLYNK_WRITE(V1) // Función para controlar el servomotor 2
{
  int angle = param.asInt(); // Obtiene el valor del slider

  // Ajusta el rango del valor del slider al rango de 0 a 180 grados
  angle = map(angle, 0, 180, 0, 180);

  servo2.write(angle); // Mueve el servomotor 2 a la posición deseada
}

//////////Individual Drive//////////

BLYNK_WRITE(V2) {
  int buttonState = param.asInt();
  if (buttonState == HIGH) {
    servo3Position = 0; // Giro en sentido horario (0 grados)
  } else {
    servo3Position = 90; // Detener el servo cuando se suelta el botón
  }
  servo3.write(servo3Position);
}

BLYNK_WRITE(V7) {
  int buttonState = param.asInt();
  if (buttonState == HIGH) {
    servo3Position = 180; // Giro en sentido antihorario (180 grados)
  } else {
    servo3Position = 90; // Detener el servo cuando se suelta el botón
  }
  servo3.write(servo3Position);
}

BLYNK_WRITE(V3) {
  int buttonState = param.asInt();
  if (buttonState == HIGH) {
    servo4Position = 0; // Giro en sentido horario (0 grados)

```

```

    } else {
        servo4Position = 90; // Detener el servo cuando se suelta el botón
    }
    servo4.write(servo4Position);
}

BLYNK_WRITE(V8) {
    int buttonState = param.asInt();
    if (buttonState == HIGH) {
        servo4Position = 180; // Giro en sentido antihorario (180 grados)
    } else {
        servo4Position = 90; // Detener el servo cuando se suelta el botón
    }
    servo4.write(servo4Position);
}

BLYNK_WRITE(V4) {
    int buttonState = param.asInt();
    if (buttonState == HIGH) {
        servo5Position = 0; // Giro en sentido horario (0 grados)
    } else {
        servo5Position = 90; // Detener el servo cuando se suelta el botón
    }
    servo5.write(servo5Position);
}

BLYNK_WRITE(V9) {
    int buttonState = param.asInt();
    if (buttonState == HIGH) {
        servo5Position = 180; // Giro en sentido antihorario (180 grados)
    } else {
        servo5Position = 90; // Detener el servo cuando se suelta el botón
    }
    servo5.write(servo5Position);
}

BLYNK_WRITE(V5) {
    int buttonState = param.asInt();
    if (buttonState == HIGH) {
        servo6Position = 0; // Giro en sentido horario (0 grados)
    } else {
        servo6Position = 90; // Detener el servo cuando se suelta el botón
    }
    servo6.write(servo6Position);
}

BLYNK_WRITE(V10) {
    int buttonState = param.asInt();
    if (buttonState == HIGH) {
        servo6Position = 180; // Giro en sentido antihorario (180 grados)
    }
}

```

```

    } else {
        servo6Position = 90; // Detener el servo cuando se suelta el botón
    }
    servo6.write(servo6Position);
}

BLYNK_WRITE(V6) {
    int buttonState = param.asInt();
    if (buttonState == HIGH) {
        servo7Position = 0; // Giro en sentido horario (0 grados)
    } else {
        servo7Position = 90; // Detener el servo cuando se suelta el botón
    }
    servo7.write(servo7Position);
}

BLYNK_WRITE(V11) {
    int buttonState = param.asInt();
    if (buttonState == HIGH) {
        servo7Position = 180; // Giro en sentido antihorario (180 grados)
    } else {
        servo7Position = 90; // Detener el servo cuando se suelta el botón
    }
    servo7.write(servo7Position);
}

//////////Gripper 3F//////////

BLYNK_WRITE(V12) {
    int buttonState = param.asInt();
    if (buttonState == HIGH) {
        // Gira servo3, servo4 y servo5 en sentido de las agujas del reloj (CW)
        servo3Position = 0;
        servo4Position = 0;
        servo5Position = 0;
    } else {
        // Detén los servo cuando se suelta el botón
        servo3Position = 90;
        servo4Position = 90;
        servo5Position = 90;
    }
    servo3.write(servo3Position);
    servo4.write(servo4Position);
    servo5.write(servo5Position);
}

BLYNK_WRITE(V13) {
    int buttonState = param.asInt();
    if (buttonState == HIGH) {
        // Gira servo3, servo4 y servo5 en sentido contrario a las agujas del reloj (CCW)

```

```

    servo3Position = 180;
    servo4Position = 180;
    servo5Position = 180;
} else {
    // Detén los servo cuando se suelta el botón
    servo3Position = 90;
    servo4Position = 90;
    servo5Position = 90;
}
servo3.write(servo3Position);
servo4.write(servo4Position);
servo5.write(servo5Position);
}

//////////Gripper All//////////

BLYNK_WRITE(V14) {
    int buttonState = param.asInt();
    if (buttonState == HIGH) {
        // Gira todos los servos en sentido de las agujas del reloj (CW)
        servo3Position = 0;
        servo4Position = 0;
        servo5Position = 0;
        servo6Position = 0;
        servo7Position = 0;
    } else {
        // Detén todos los servos cuando se suelta el botón
        servo3Position = 90;
        servo4Position = 90;
        servo5Position = 90;
        servo6Position = 90;
        servo7Position = 90;
    }
    servo3.write(servo3Position);
    servo4.write(servo4Position);
    servo5.write(servo5Position);
    servo6.write(servo6Position);
    servo7.write(servo7Position);
}

BLYNK_WRITE(V15) {
    int buttonState = param.asInt();
    if (buttonState == HIGH) {
        // Gira todos los servos en sentido contrario a las agujas del reloj (CCW)
        servo3Position = 180;
        servo4Position = 180;
        servo5Position = 180;
        servo6Position = 180;
        servo7Position = 180;
    } else {

```



```

    // Detén todos los servos cuando se suelta el botón
    servo3Position = 90;
    servo4Position = 90;
    servo5Position = 90;
    servo6Position = 90;
    servo7Position = 90;
}
servo3.write(servo3Position);
servo4.write(servo4Position);
servo5.write(servo5Position);
servo6.write(servo6Position);
servo7.write(servo7Position);
}

void loop() {
    Blynk.run();
}

```

XI-B. Anexo 2. Programación Servomotores 360°

```

#include <BlynkSimpleEsp32.h>
#include <ESP32Servo.h>
#include <WiFi.h>
#include <WiFiClient.h>

Servo servo;

bool actionTaken = false; // Declare the actionTaken variable
//Definir pins de servomotores 360°
#define SERVO_PIN_1 5
#define SERVO_PIN_2 18
#define SERVO_PIN_3 19
#define SERVO_PIN_4 21
#define SERVO_PIN_5 22

//Definir los Virtual Pins
#define CCW_BUTTON_PIN5 V2
#define CW_BUTTON_PIN5 V7

#define CCW_BUTTON_PIN18 V3
#define CW_BUTTON_PIN18 V8

#define CCW_BUTTON_PIN19 V4
#define CW_BUTTON_PIN19 V9

#define CCW_BUTTON_PIN21 V5
#define CW_BUTTON_PIN21 V10

#define CCW_BUTTON_PIN22 V6
#define CW_BUTTON_PIN22 V11

```

```

#define CCW_BUTTON_PIN123 V12
#define CW_BUTTON_PIN123 V13

#define CCW_BUTTON_PINAll V14
#define CW_BUTTON_PINAll V15

char ssid[] = "***"; //Nombre de Red Wifi
char pass[] = "***"; //Contraseña de Red Wifi
char auth[] = "***"; //Token

Servo servo1;
Servo servo2;
Servo servo3;
Servo servo4;
Servo servo5;
Servo servo6;
Servo servo7;

//////////Pan Tilt//////////

BLYNK_WRITE(V0) // Función para controlar el servomotor 1
{
  int angle = param.asInt(); // Obtiene el valor del slider

  // Ajusta el rango del valor del slider al rango de 0 a 180 grados
  angle = map(angle, 0, 180, 0, 180);

  servo1.write(angle); // Mueve el servomotor 1 a la posición deseada
}

BLYNK_WRITE(V1) // Función para controlar el servomotor 2
{
  int angle = param.asInt(); // Obtiene el valor del slider

  // Ajusta el rango del valor del slider al rango de 0 a 180 grados
  angle = map(angle,0 , 180, 0, 180);

  servo2.write(angle); // Mueve el servomotor 2 a la posición deseada
}

//////////Individual Drive//////////

BLYNK_WRITE(CCW_BUTTON_PIN5) {
  int ccwButtonState = param.asInt();
  if (ccwButtonState == HIGH && !actionTaken) {
    servo3.writeMicroseconds(1000); // CCW rotation
    Serial.println("CCW button pressed");
    actionTaken = true;
  } else if (ccwButtonState == LOW && actionTaken) {

```

```

servo3.writeMicroseconds(1500); // Stop position
Serial.println("CCW button released");
actionTaken = false;
}
}

BLYNK_WRITE(CW_BUTTON_PIN5) {
  int cwButtonState = param.asInt();
  if (cwButtonState == HIGH && !actionTaken) {
    servo3.writeMicroseconds(2000); // CW rotation
    Serial.println("CW button pressed");
    actionTaken = true;
  } else if (cwButtonState == LOW && actionTaken) {
    servo3.writeMicroseconds(1500); // Stop position
    Serial.println("CW button released");
    actionTaken = false;
  }
}

BLYNK_WRITE(CCW_BUTTON_PIN18) {
  int ccwButtonState = param.asInt();
  if (ccwButtonState == HIGH && !actionTaken) {
    servo4.writeMicroseconds(1000); // CCW rotation
    Serial.println("CCW button pressed");
    actionTaken = true;
  } else if (ccwButtonState == LOW && actionTaken) {
    servo4.writeMicroseconds(1500); // Stop position
    Serial.println("CCW button released");
    actionTaken = false;
  }
}

BLYNK_WRITE(CW_BUTTON_PIN18) {
  int cwButtonState = param.asInt();
  if (cwButtonState == HIGH && !actionTaken) {
    servo4.writeMicroseconds(2000); // CW rotation
    Serial.println("CW button pressed");
    actionTaken = true;
  } else if (cwButtonState == LOW && actionTaken) {
    servo4.writeMicroseconds(1500); // Stop position
    Serial.println("CW button released");
    actionTaken = false;
  }
}

BLYNK_WRITE(CCW_BUTTON_PIN19) {
  int ccwButtonState = param.asInt();
  if (ccwButtonState == HIGH && !actionTaken) {
    servo5.writeMicroseconds(1000); // CCW rotation
    Serial.println("CCW button pressed");

```

```

    actionTaken = true;
} else if (ccwButtonState == LOW && actionTaken) {
    servo5.writeMicroseconds(1500); // Stop position
    Serial.println("CCW button released");
    actionTaken = false;
}
}

BLYNK_WRITE(CW_BUTTON_PIN19) {
    int cwButtonState = param.asInt();
    if (cwButtonState == HIGH && !actionTaken) {
        servo5.writeMicroseconds(2000); // CW rotation
        Serial.println("CW button pressed");
        actionTaken = true;
    } else if (cwButtonState == LOW && actionTaken) {
        servo5.writeMicroseconds(1500); // Stop position
        Serial.println("CW button released");
        actionTaken = false;
    }
}

BLYNK_WRITE(CCW_BUTTON_PIN21) {
    int ccwButtonState = param.asInt();
    if (ccwButtonState == HIGH && !actionTaken) {
        servo6.writeMicroseconds(1000); // CCW rotation
        Serial.println("CCW button pressed");
        actionTaken = true;
    } else if (ccwButtonState == LOW && actionTaken) {
        servo6.writeMicroseconds(1500); // Stop position
        Serial.println("CCW button released");
        actionTaken = false;
    }
}

BLYNK_WRITE(CW_BUTTON_PIN21) {
    int cwButtonState = param.asInt();
    if (cwButtonState == HIGH && !actionTaken) {
        servo6.writeMicroseconds(2000); // CW rotation
        Serial.println("CW button pressed");
        actionTaken = true;
    } else if (cwButtonState == LOW && actionTaken) {
        servo6.writeMicroseconds(1500); // Stop position
        Serial.println("CW button released");
        actionTaken = false;
    }
}

BLYNK_WRITE(CCW_BUTTON_PIN22) {
    int ccwButtonState = param.asInt();
    if (ccwButtonState == HIGH && !actionTaken) {

```

```

servo7.writeMicroseconds(1000); // CCW rotation
Serial.println("CCW button pressed");
actionTaken = true;
} else if (ccwButtonState == LOW && actionTaken) {
servo7.writeMicroseconds(1500); // Stop position
Serial.println("CCW button released");
actionTaken = false;
}
}

BLYNK_WRITE(CW_BUTTON_PIN22) {
int cwButtonState = param.asInt();
if (cwButtonState == HIGH && !actionTaken) {
servo7.writeMicroseconds(2000); // CW rotation
Serial.println("CW button pressed");
actionTaken = true;
} else if (cwButtonState == LOW && actionTaken) {
servo7.writeMicroseconds(1500); // Stop position
Serial.println("CW button released");
actionTaken = false;
}
}

//////////Gripper 3F//////////

BLYNK_WRITE(CCW_BUTTON_PIN123) {
int ccwButtonState = param.asInt();
if (ccwButtonState == HIGH) {
servo3.writeMicroseconds(1000); // CCW rotation
servo4.writeMicroseconds(1000); // CCW rotation
servo5.writeMicroseconds(1000); // CCW rotation
Serial.println("CCW button pressed");
} else {
servo3.writeMicroseconds(1500); // Stop position
servo4.writeMicroseconds(1500); // Stop position
servo5.writeMicroseconds(1500); // Stop position
Serial.println("CCW button released");
}
}

BLYNK_WRITE(CW_BUTTON_PIN123) {
int cwButtonState = param.asInt();
if (cwButtonState == HIGH) {
servo3.writeMicroseconds(2000); // CW rotation
servo4.writeMicroseconds(2000); // CW rotation
servo5.writeMicroseconds(2000); // CW rotation
Serial.println("CW button pressed");
} else {
servo3.writeMicroseconds(1500); // Stop position
servo4.writeMicroseconds(1500); // Stop position
}
}

```

```

servo5.writeMicroseconds(1500); // Stop position
Serial.println("CW button released");
}
}

//////////Gripper All//////////

BLYNK_WRITE(CCW_BUTTON_PINAll) {
  int ccwButtonState = param.asInt();
  if (ccwButtonState == HIGH) {
    servo3.writeMicroseconds(1000); // CCW rotation
    servo4.writeMicroseconds(1000); // CCW rotation
    servo5.writeMicroseconds(1000); // CCW rotation
    servo6.writeMicroseconds(1000); // CCW rotation
    servo7.writeMicroseconds(1000); // CCW rotation
    Serial.println("CCW button pressed");
  } else {
    servo3.writeMicroseconds(1500); // Stop position
    servo4.writeMicroseconds(1500); // Stop position
    servo5.writeMicroseconds(1500); // Stop position
    servo6.writeMicroseconds(1500); // CCW rotation
    servo7.writeMicroseconds(1500); // CCW rotation
    Serial.println("CCW button released");
  }
}

BLYNK_WRITE(CW_BUTTON_PINAll) {
  int cwButtonState = param.asInt();
  if (cwButtonState == HIGH) {
    servo3.writeMicroseconds(2000); // CW rotation
    servo4.writeMicroseconds(2000); // CW rotation
    servo5.writeMicroseconds(2000); // CW rotation
    servo6.writeMicroseconds(2000); // CW rotation
    servo7.writeMicroseconds(2000); // CW rotation
    Serial.println("CW button pressed");
  } else {
    servo3.writeMicroseconds(1500); // Stop position
    servo4.writeMicroseconds(1500); // Stop position
    servo5.writeMicroseconds(1500); // Stop position
    servo6.writeMicroseconds(1500); // CW rotation
    servo7.writeMicroseconds(1500); // CW rotation
    Serial.println("CW button released");
  }
}

//////////

void setup()
{
  // Configuración de conexión WiFi

```

```
Blynk.begin(auth, ssid, pass);
  Serial.begin(9600);
servo3.attach(SERVO_PIN_1); //Movimiento dedo Pulgar
servo4.attach(SERVO_PIN_2); //Movimiento dedo Indice
servo5.attach(SERVO_PIN_3); //Movimiento dedo Medio
servo6.attach(SERVO_PIN_4); //Movimiento dedo Anular
servo7.attach(SERVO_PIN_5); //Movimiento dedo Meñique
  servo.writeMicroseconds(1500); // Stop position initially
  // Inicialización de los pines de los servomotores
  servo1.attach(2); // Movimiento PAN
  servo2.attach(4); // Movimiento en TILT
}

void loop()
{
  Blynk.run(); // Ejecuta el servicio de Blynk}
}
```

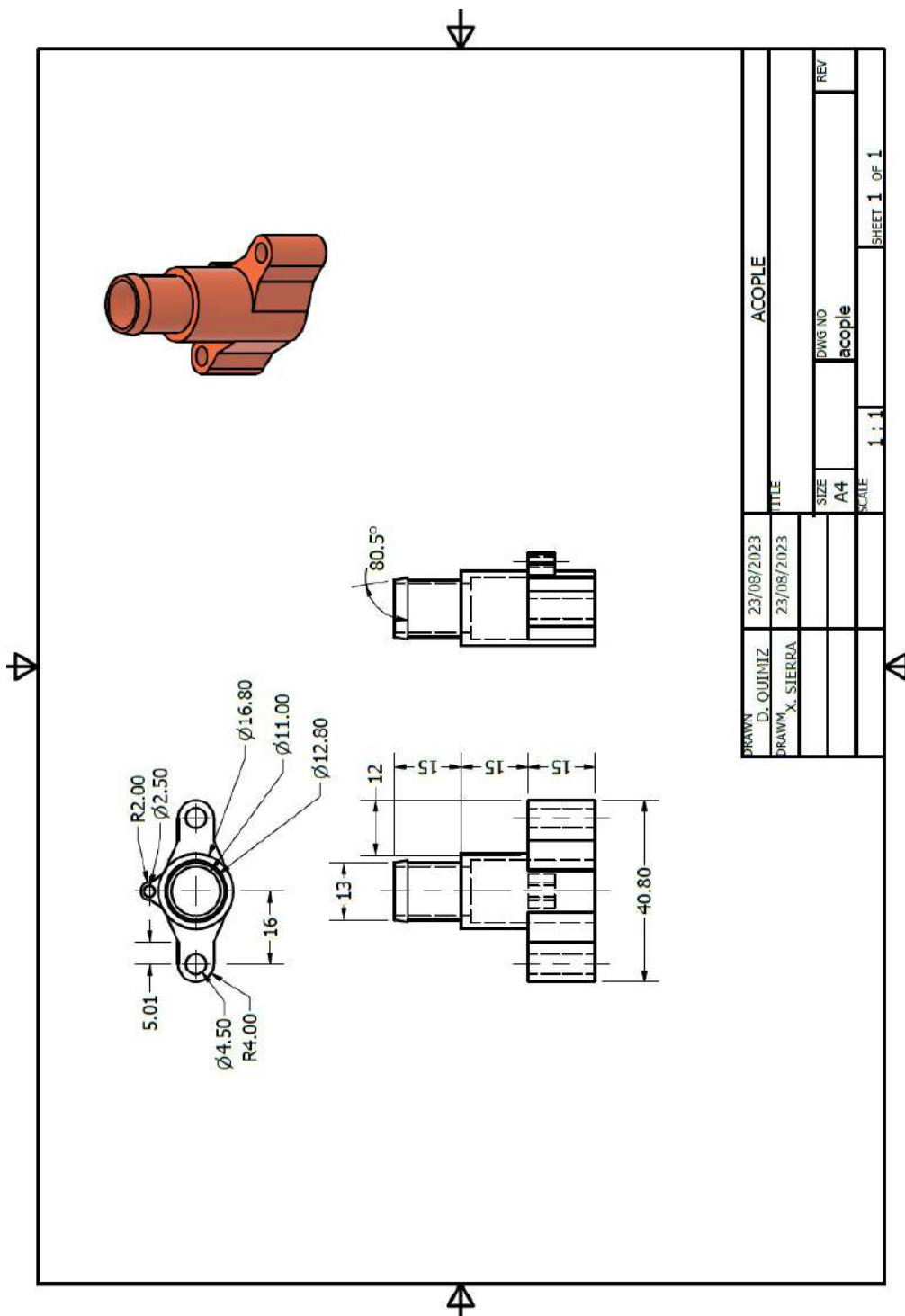


Figura 76: Acople para manguera y racor. Fuente: Quimiz D, Sierra X

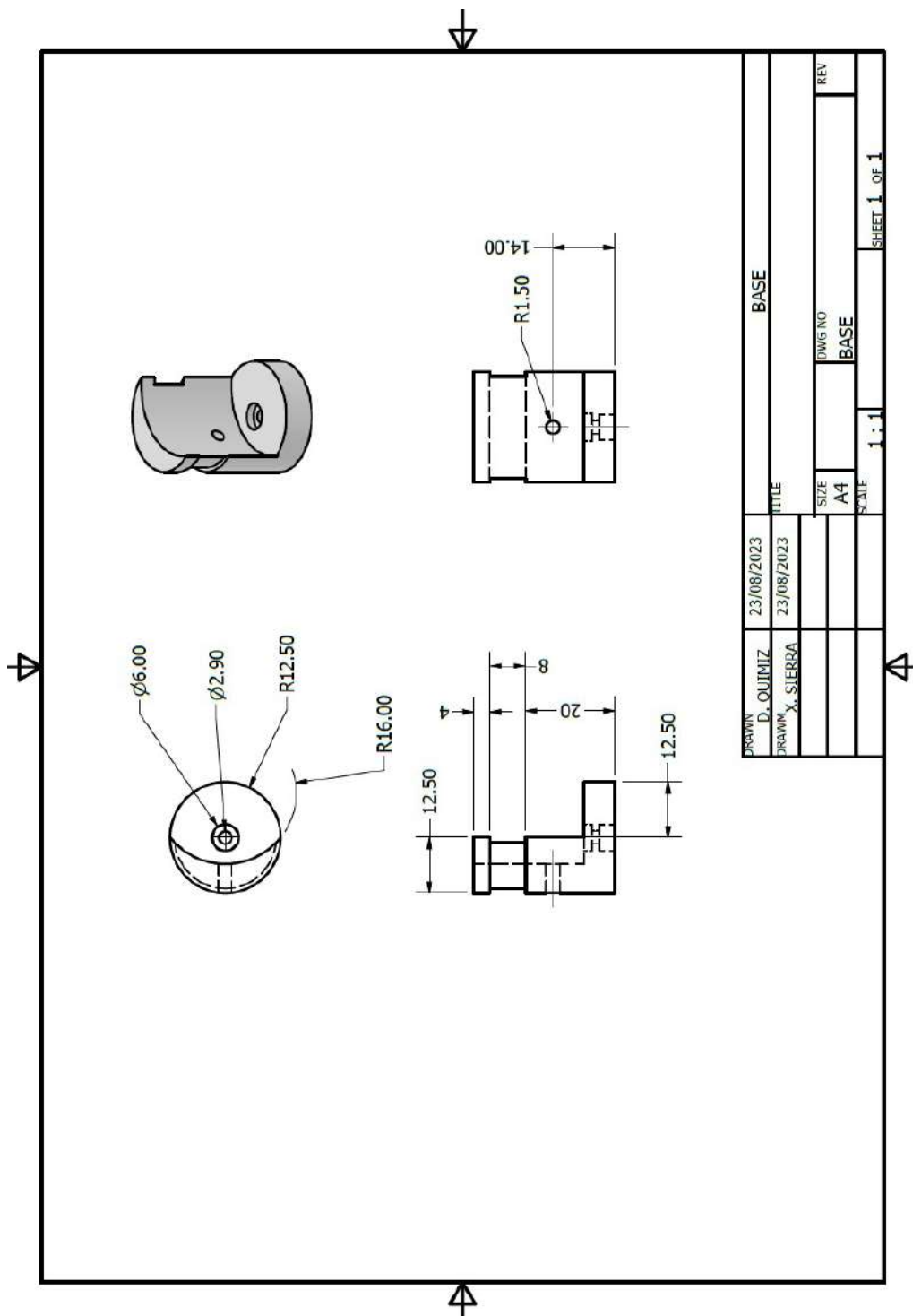


Figura 77: Acople para Servomotor Principal. Fuente: Quimiz D, Sierra X

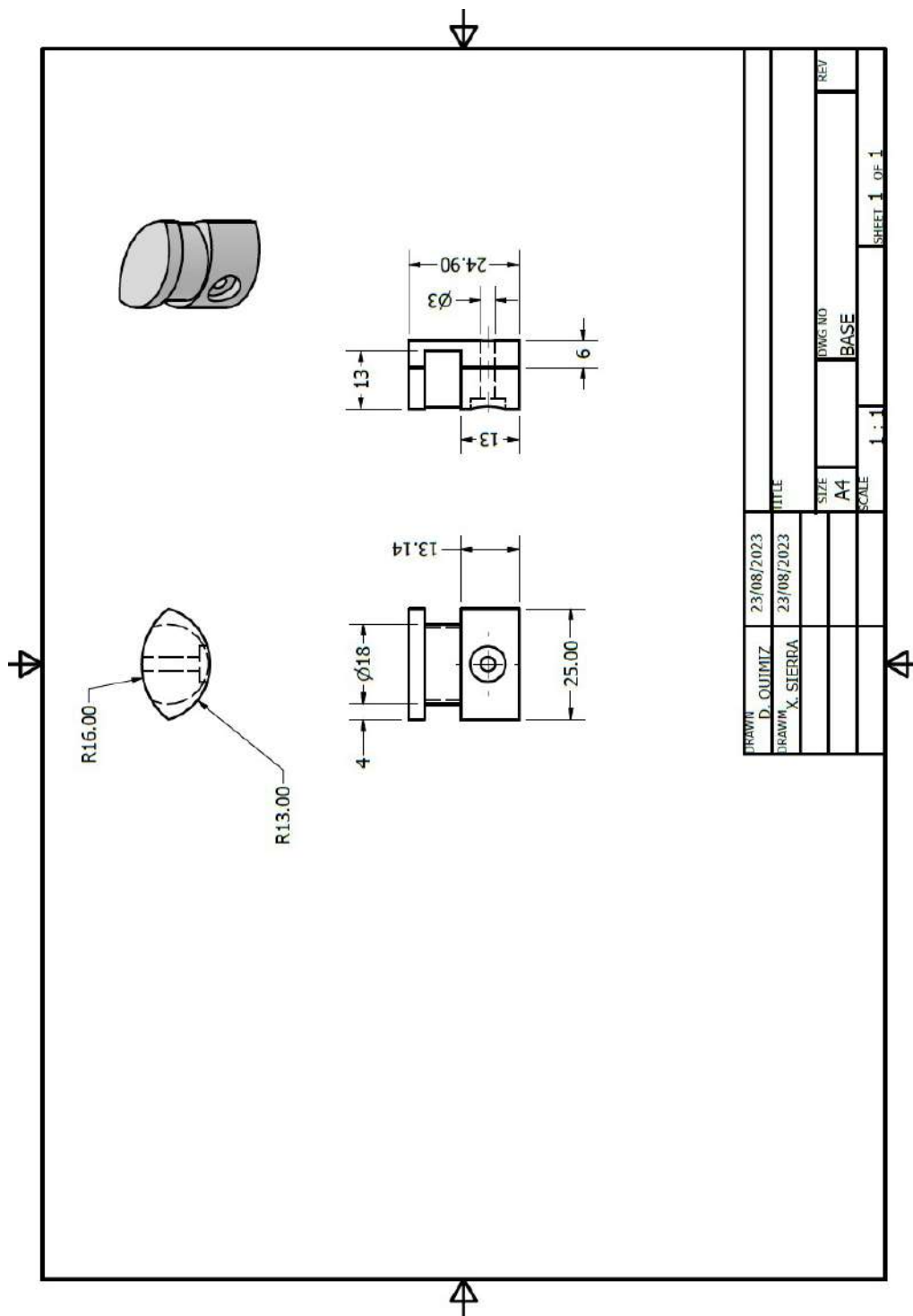


Figura 78: Acople para Servomotor Complemento. Fuente: Quimiz D, Sierra X

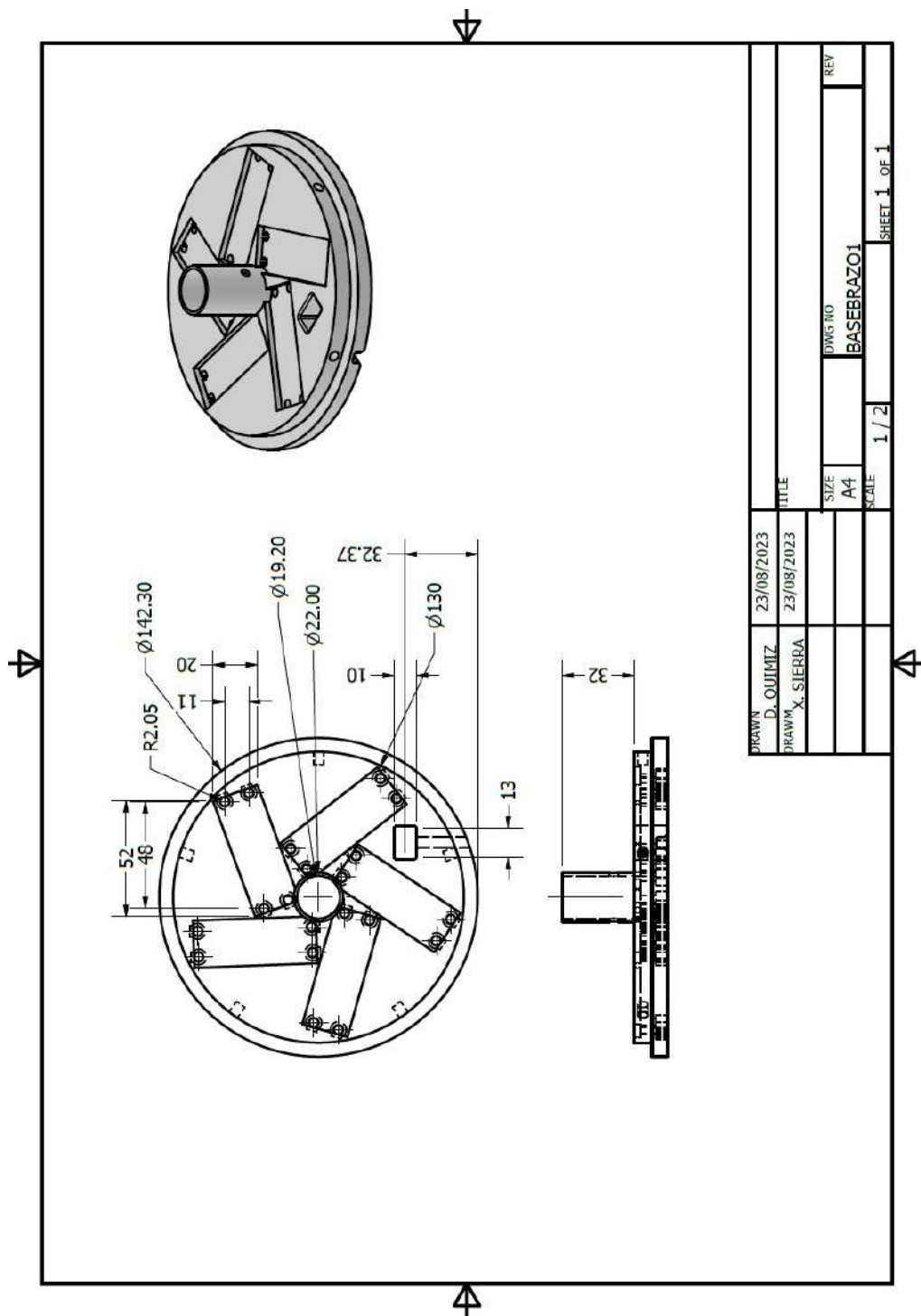


Figura 79: Base para Servomotores. Fuente: Quimiz D, Sierra X

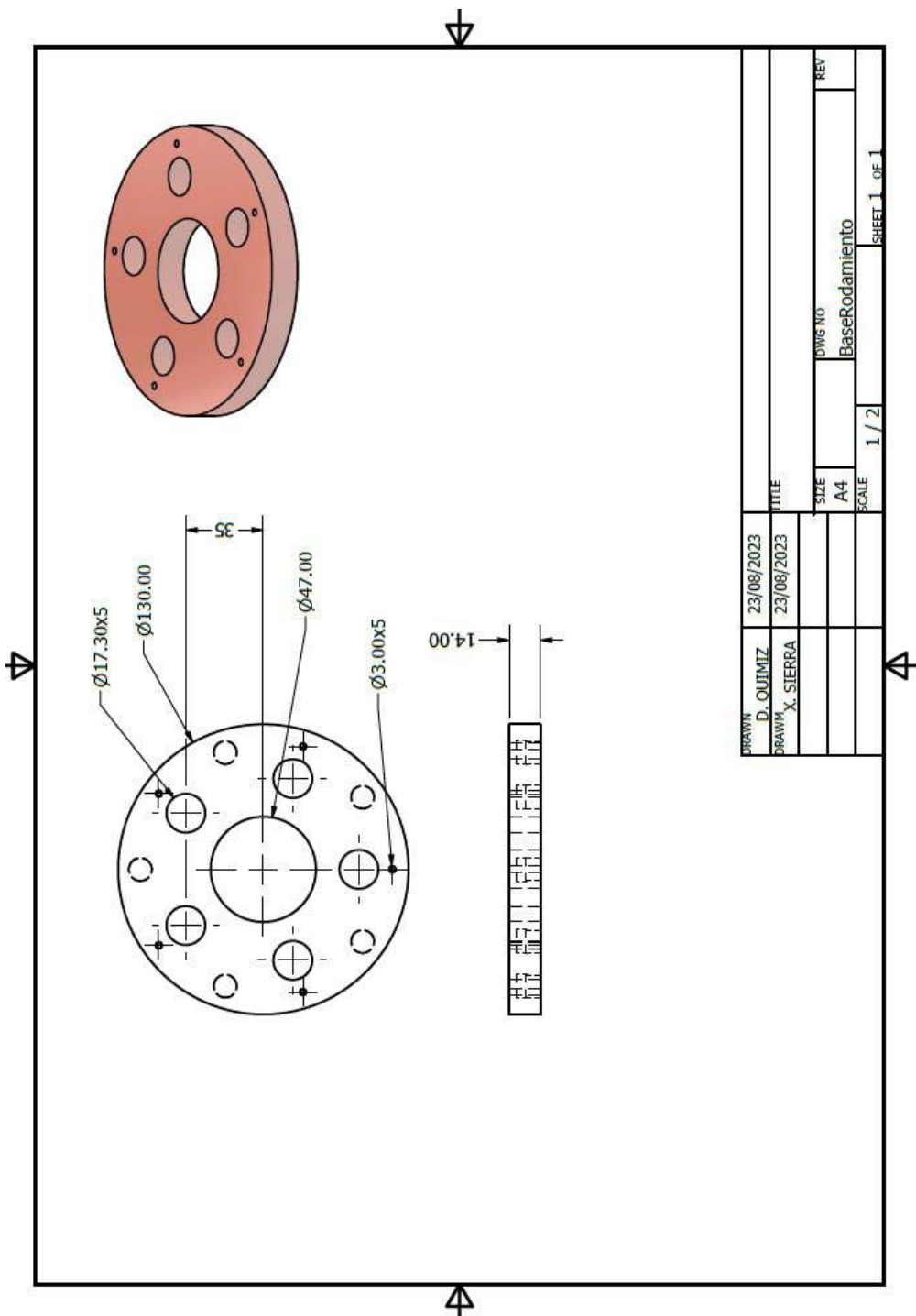


Figura 80: Disco acoplamiento de Rodamiento. Fuente: Quimiz D, Sierra X

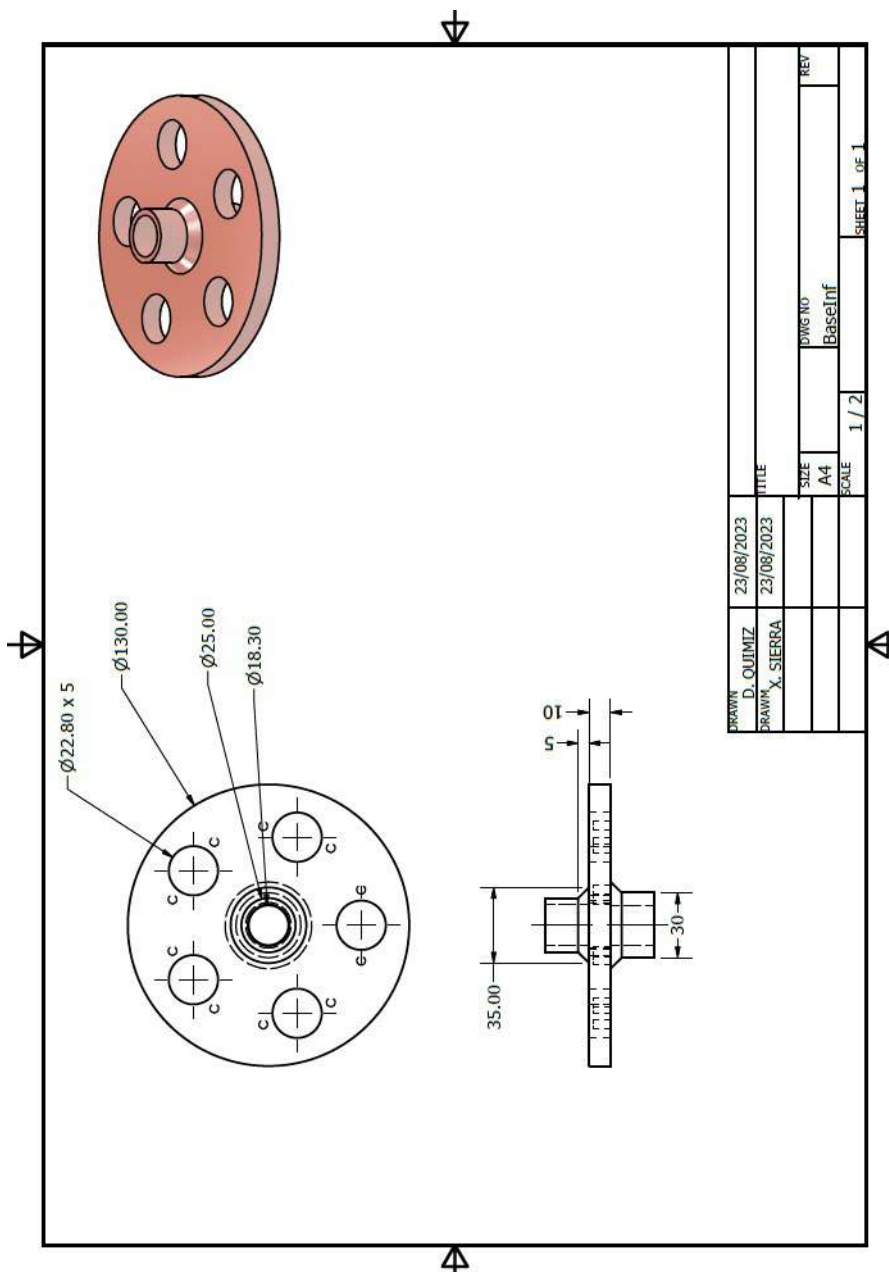


Figura 81: Disco soporte. Fuente: Quimiz D, Sierra X

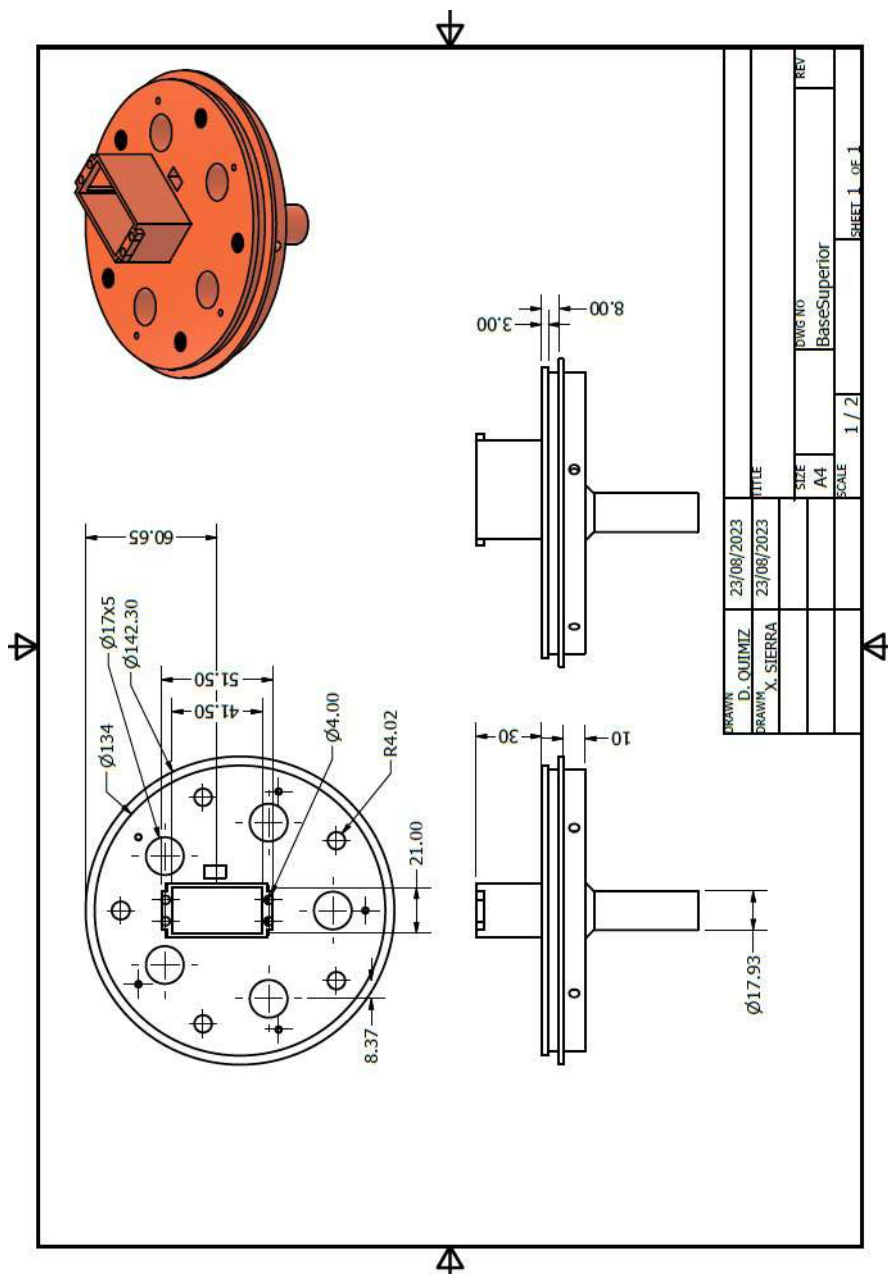


Figura 82: Disco con Base de Rodamiento. Fuente: Quimiz D, Sierra X

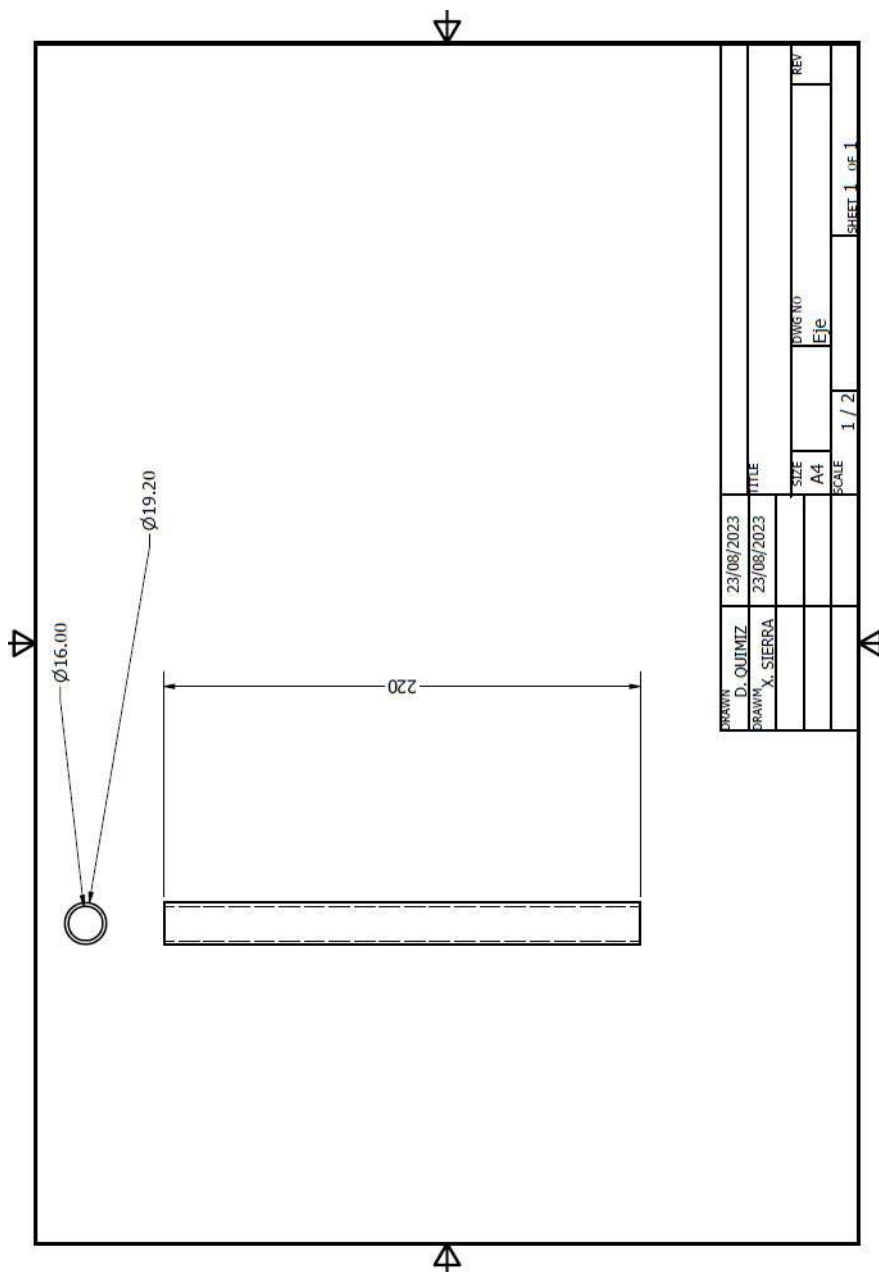


Figura 83: Eje de unión. Fuente: Quimiz D, Sierra X

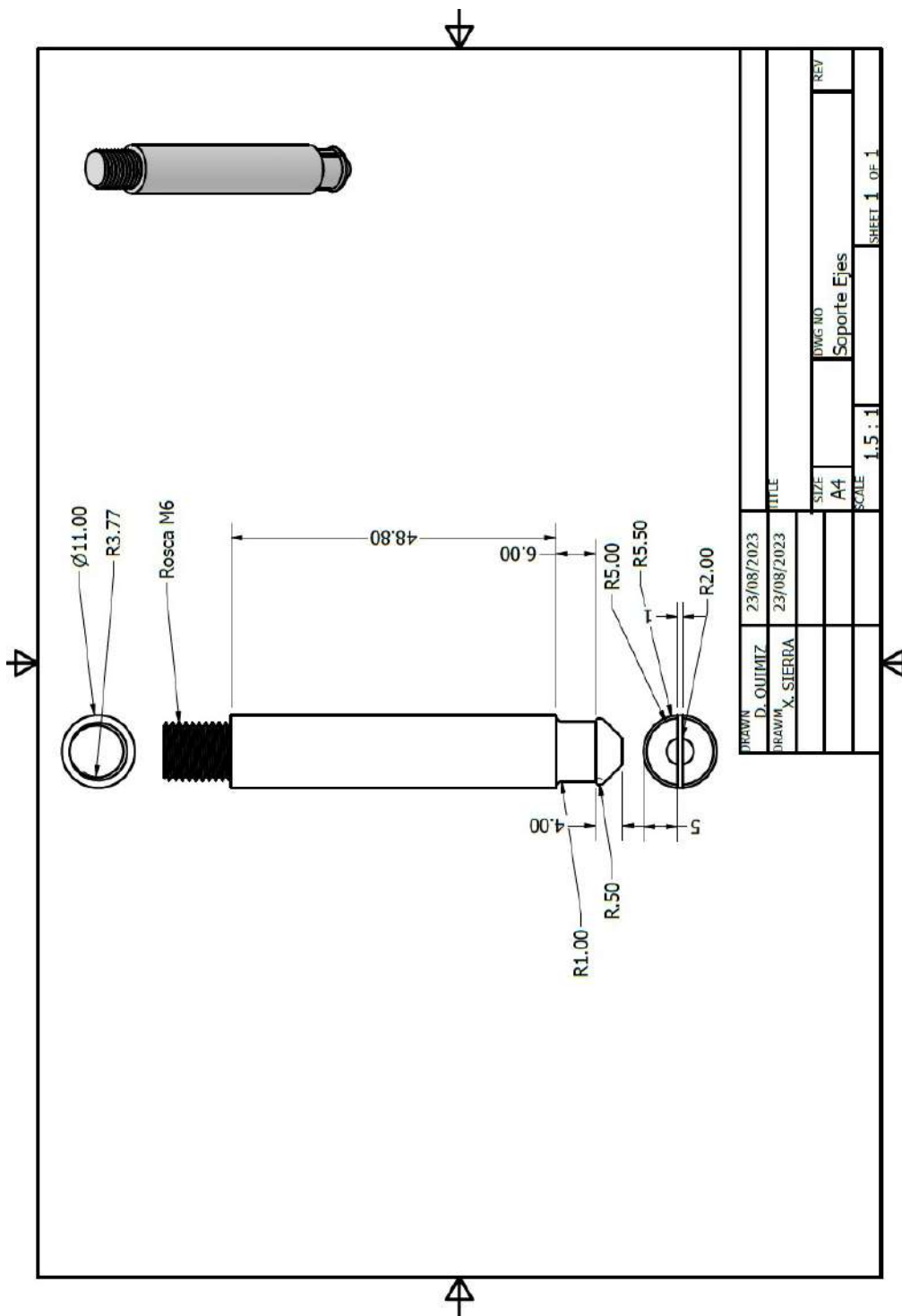


Figura 84: Soporte para plato superior e inferior. Fuente: Quimiz D, Sierra X

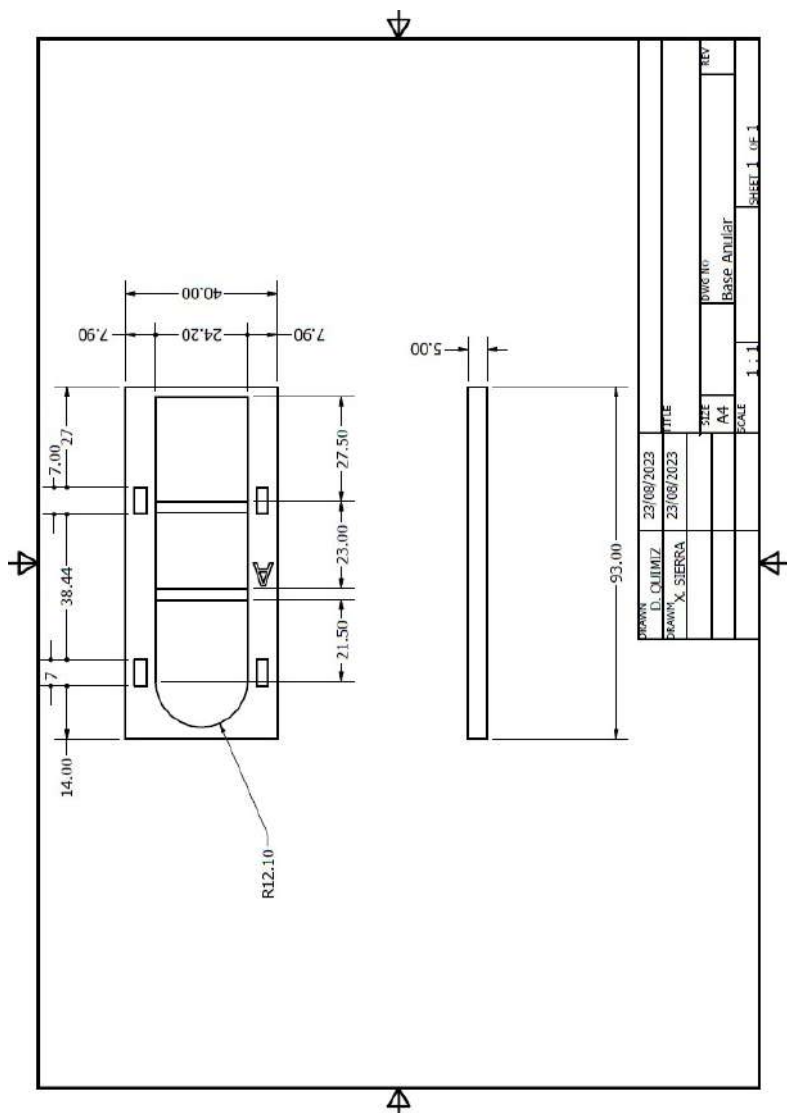
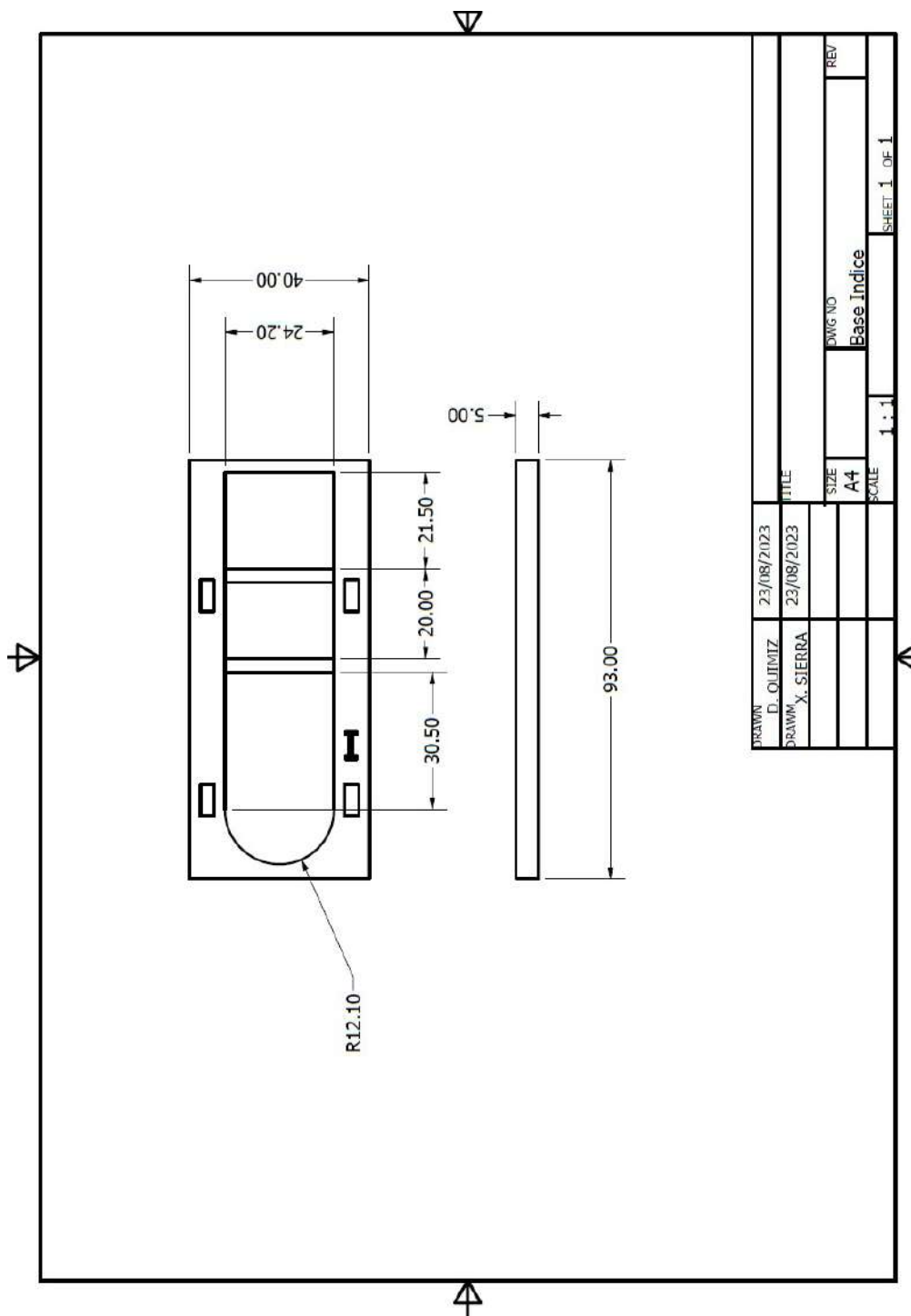
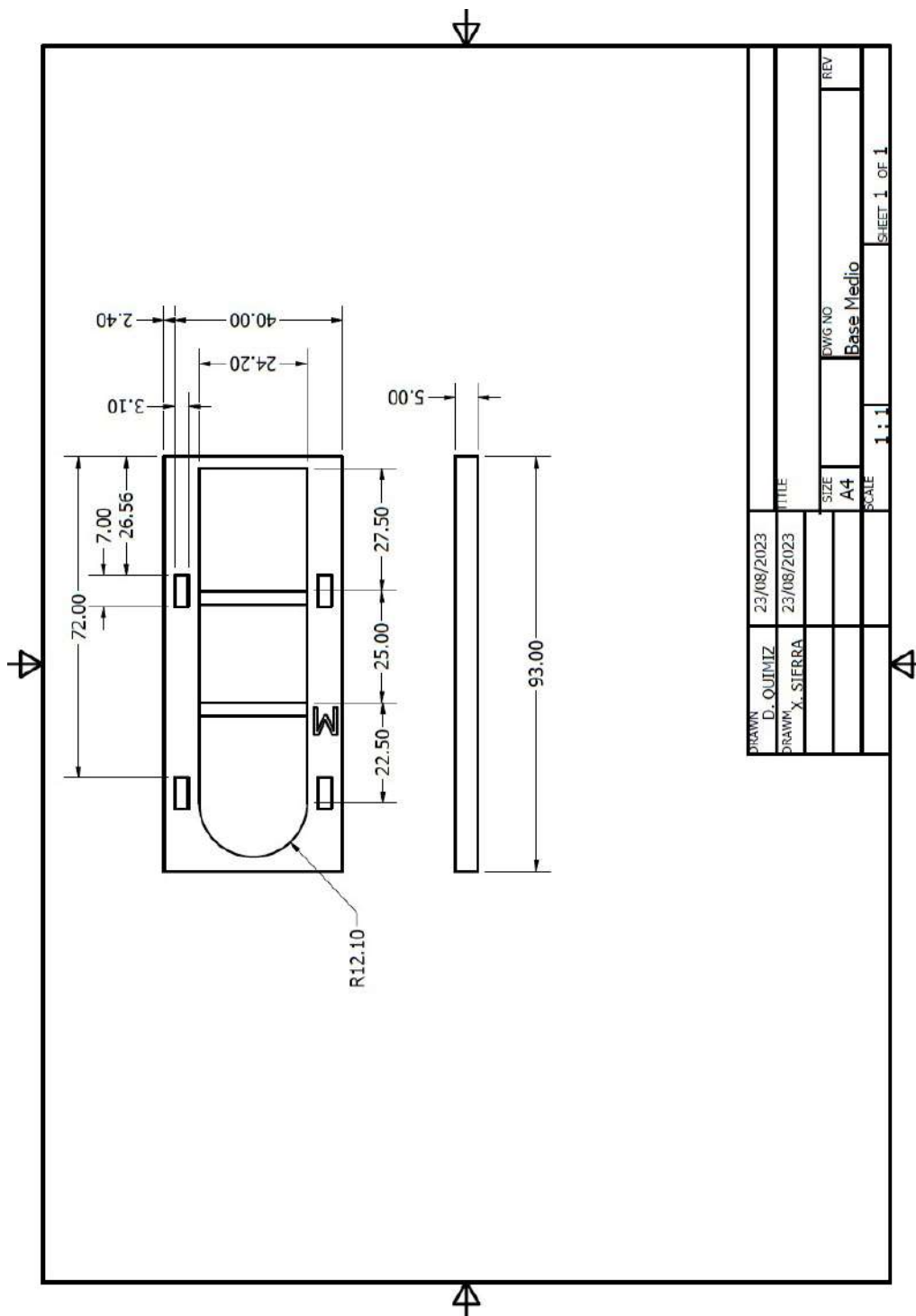


Figura 85: Base de Dedo Anular. Fuente: Quimiz D, Sierra X



DRAWN	23/08/2023	TITLE	
D. OJITMIZ	23/08/2023	SIZE	A4
DRAWN	X. SIERRA	SCALE	1:1
		DWG NO	Base Índice
		REV	
			SHEET 1 OF 1

Figura 86: Base de Dedo Índice. Fuente: Quimiz D, Sierra X



DATE	23/08/2023	TITLE	
DRAWN	D. QUIJIMIZ	SIZE	A4
	X. SIERRA	SCALE	1 : 1
		DWG NO	Base Medio
		REV	

SHEET 1 OF 1

Figura 87: Base de Dedo Medio. Fuente: Quimiz D, Sierra X

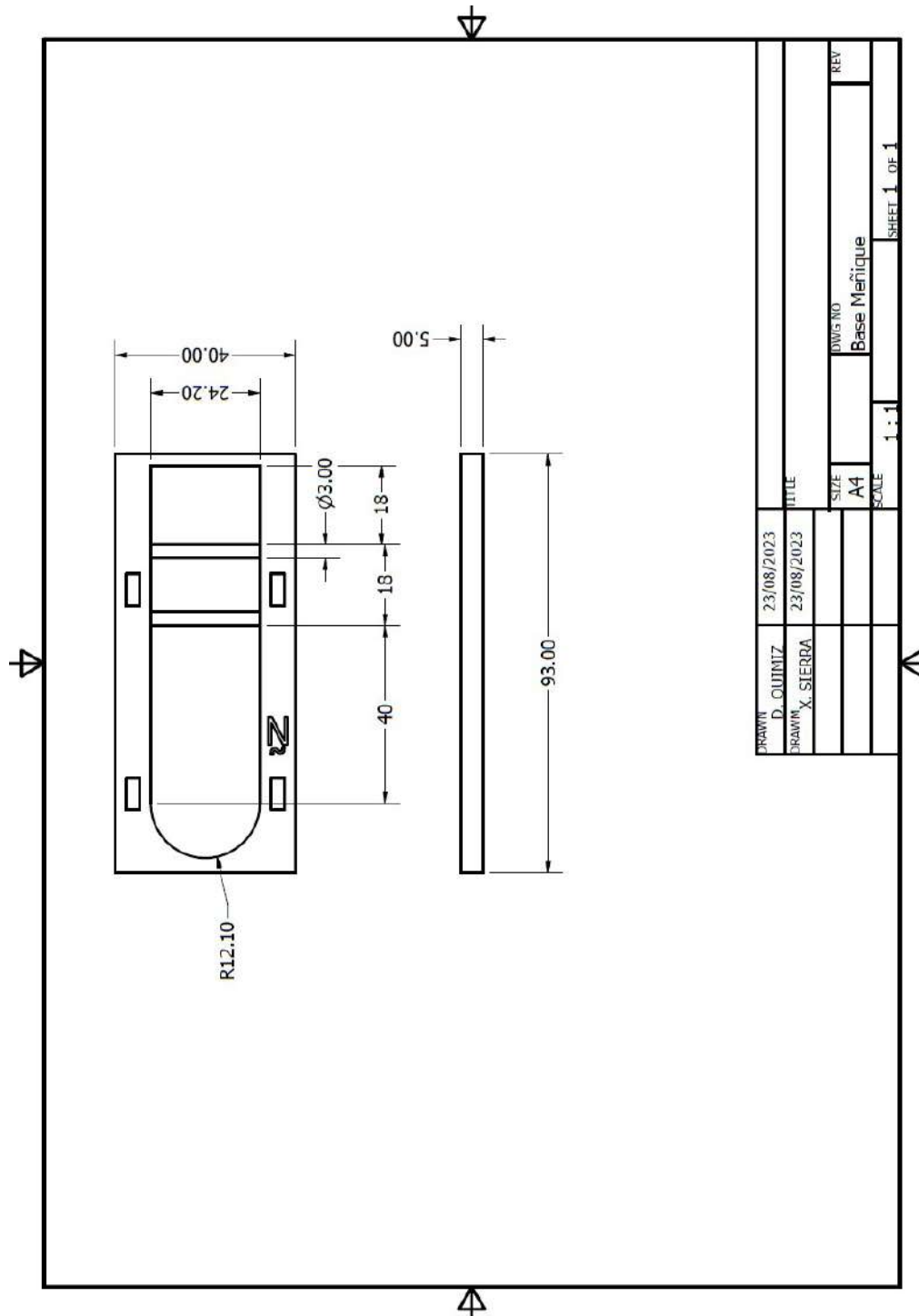


Figura 88: Base de Dedo Meñique . Fuente: Quimiz D, Sierra X

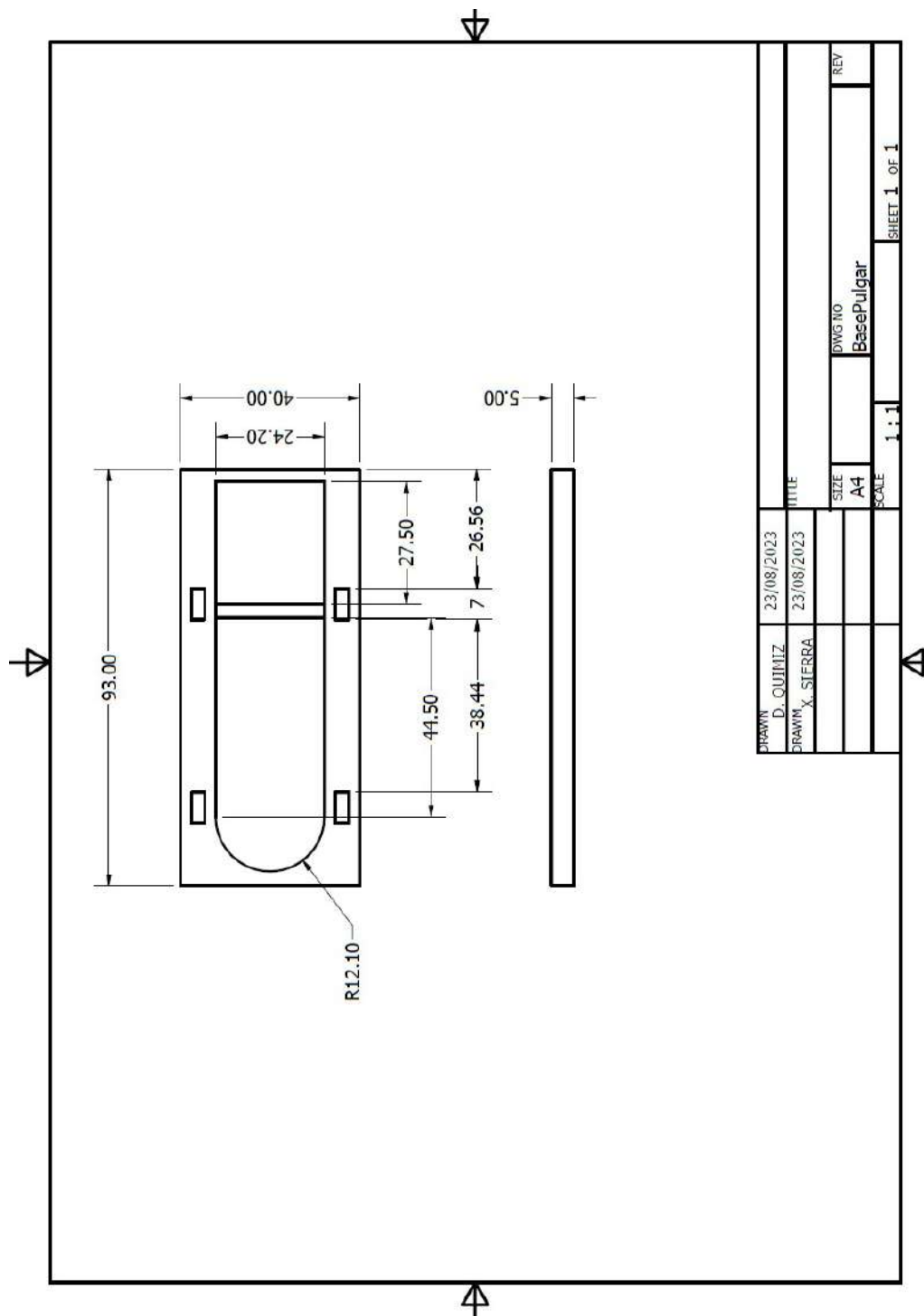


Figura 89: Base Dedo Pulgar. Fuente: Quimiz D, Sierra X

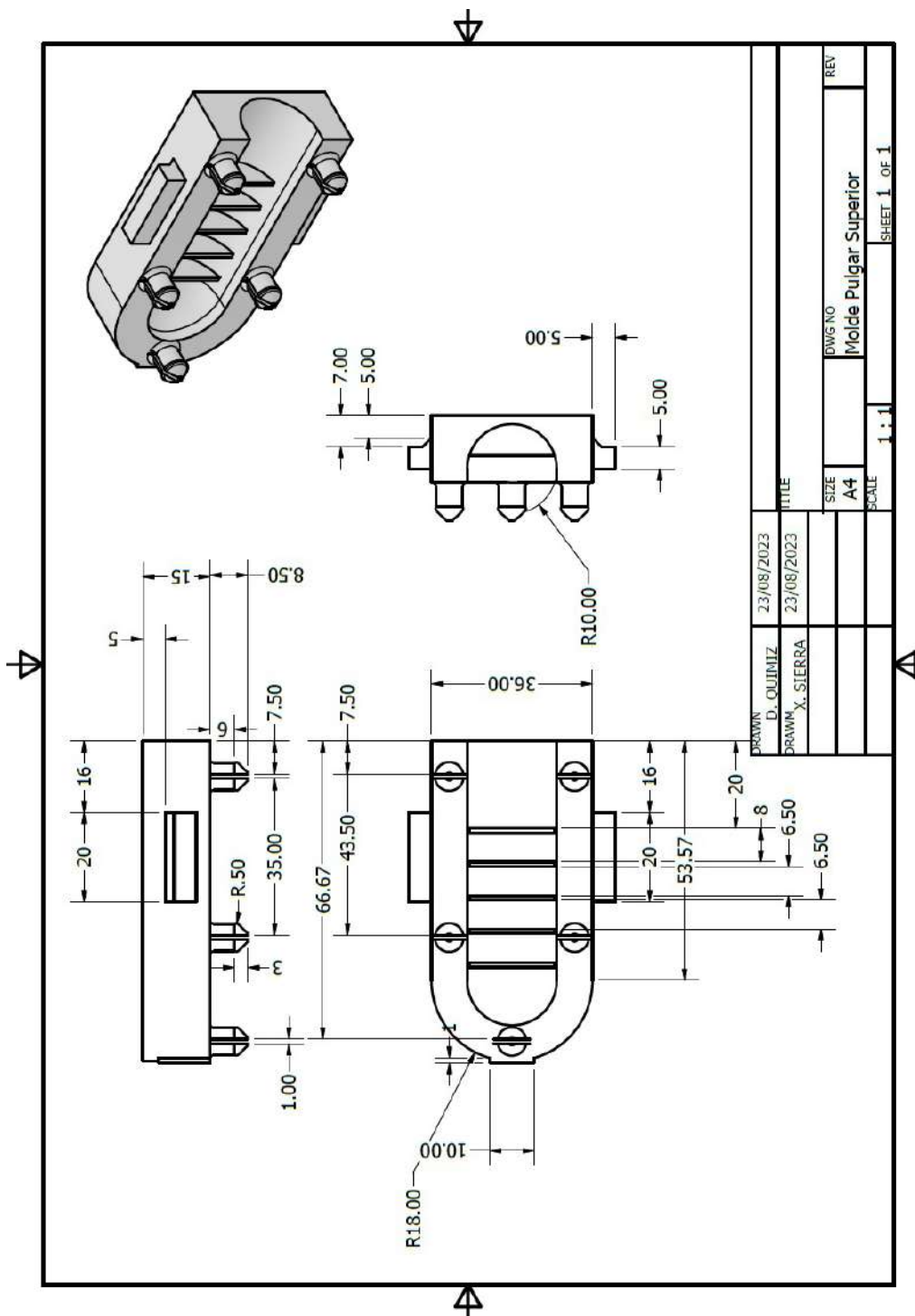


Figura 90: Molde Pulgar Superior. Fuente: Quimiz D, Sierra X

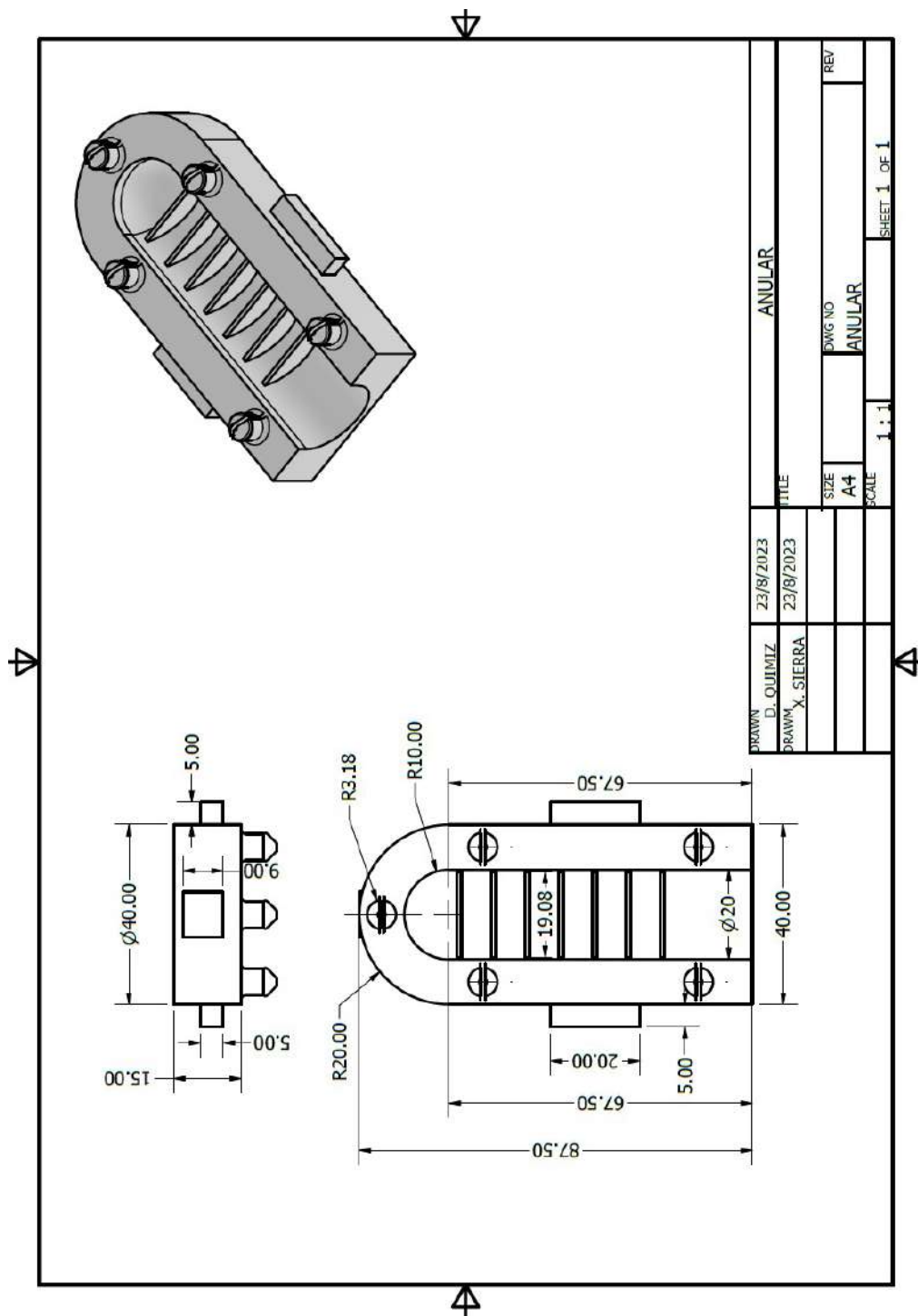


Figura 91: Base Superior de Dedo Anular. Fuente: Quimiz D, Sierra X

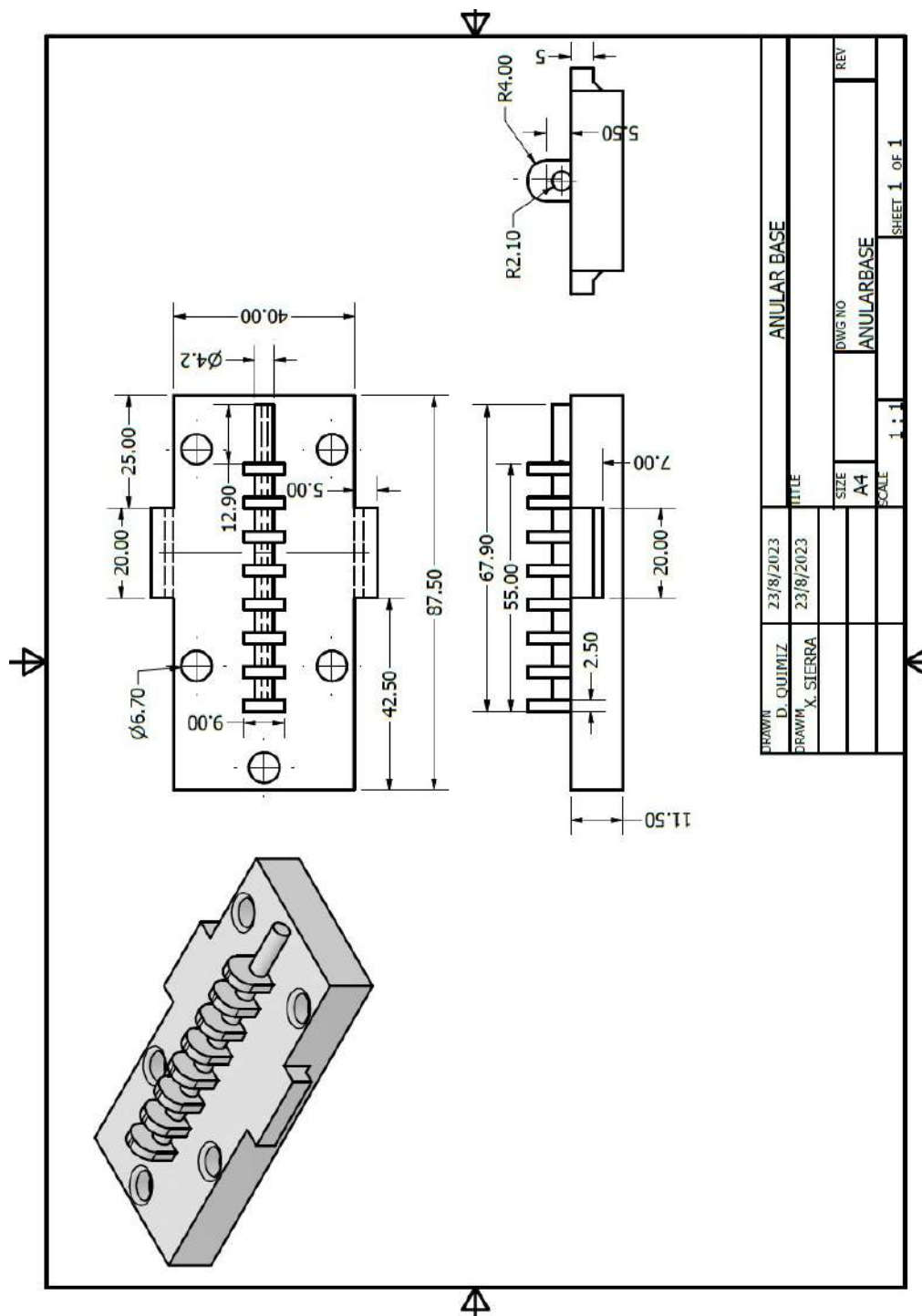


Figura 92: Recámara de Aire Dedo Anular. Fuente: Quimiz D, Sierra X

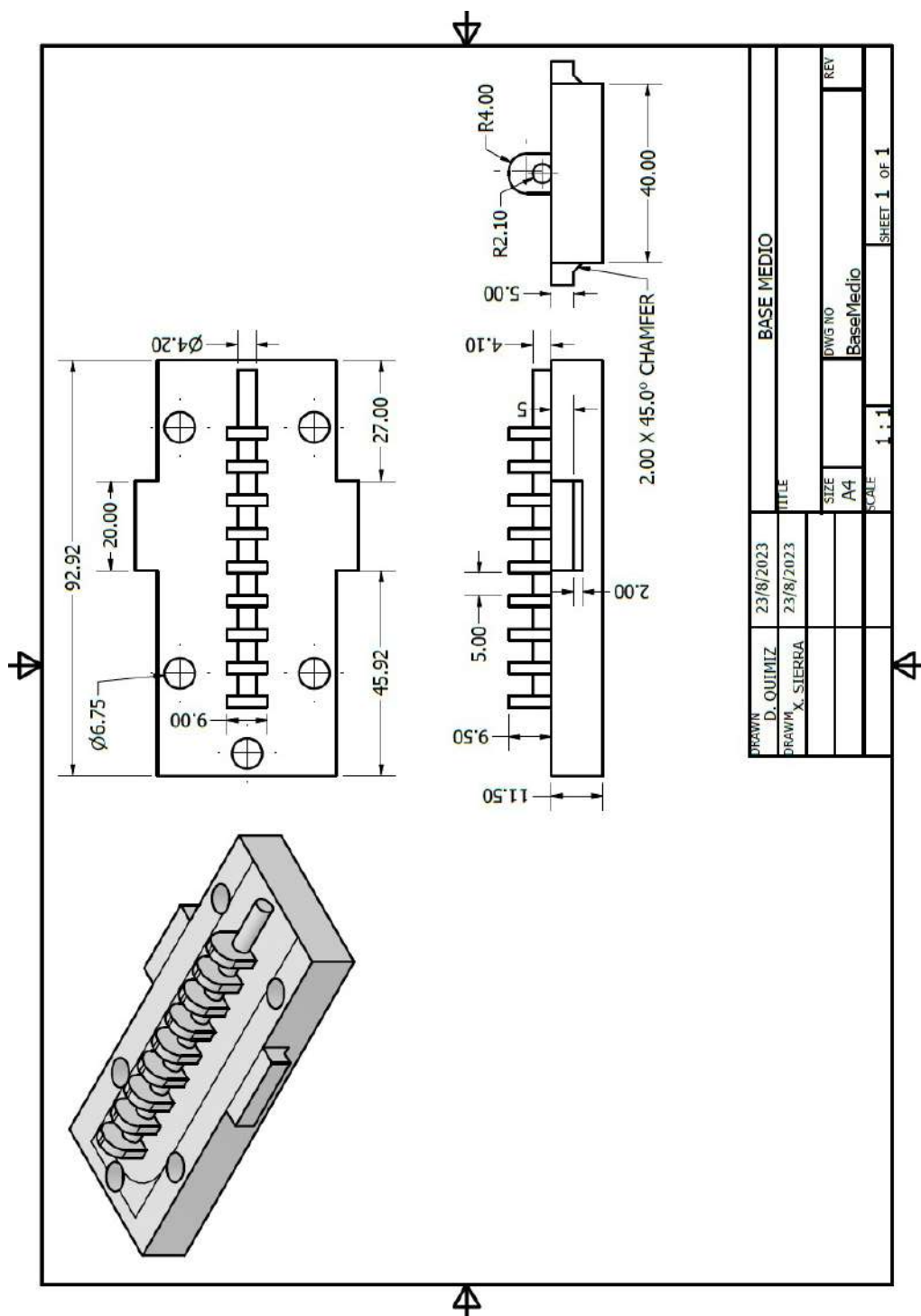


Figura 93: Recámara de aire Dedo Medio . Fuente: Quimiz D, Sierra X

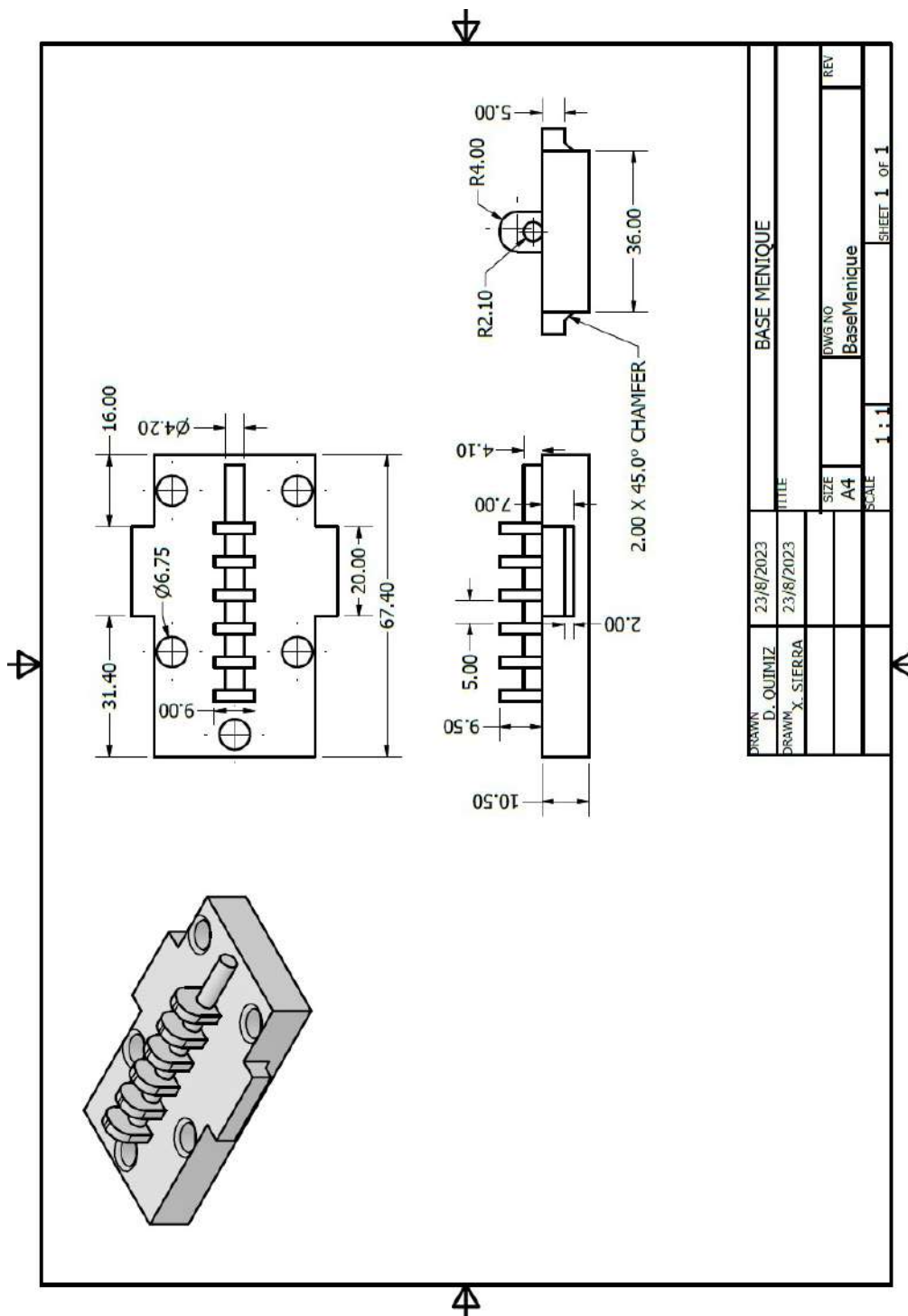


Figura 94: Recámara de aire Dedo Meñique. Fuente: Quimiz D, Sierra X

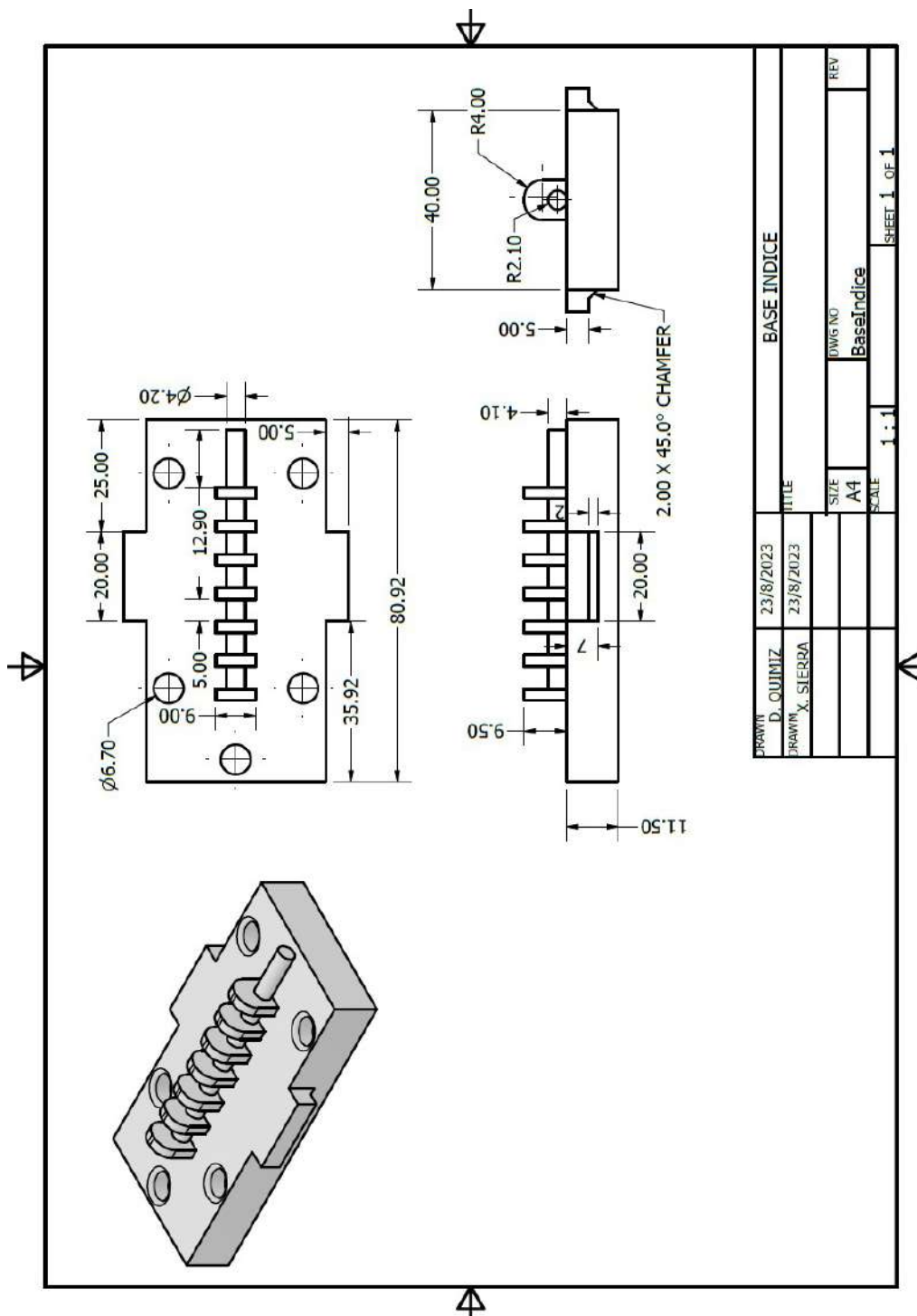


Figura 95: Recámara de aire Dedo Índice . Fuente: Quimiz D, Sierra X

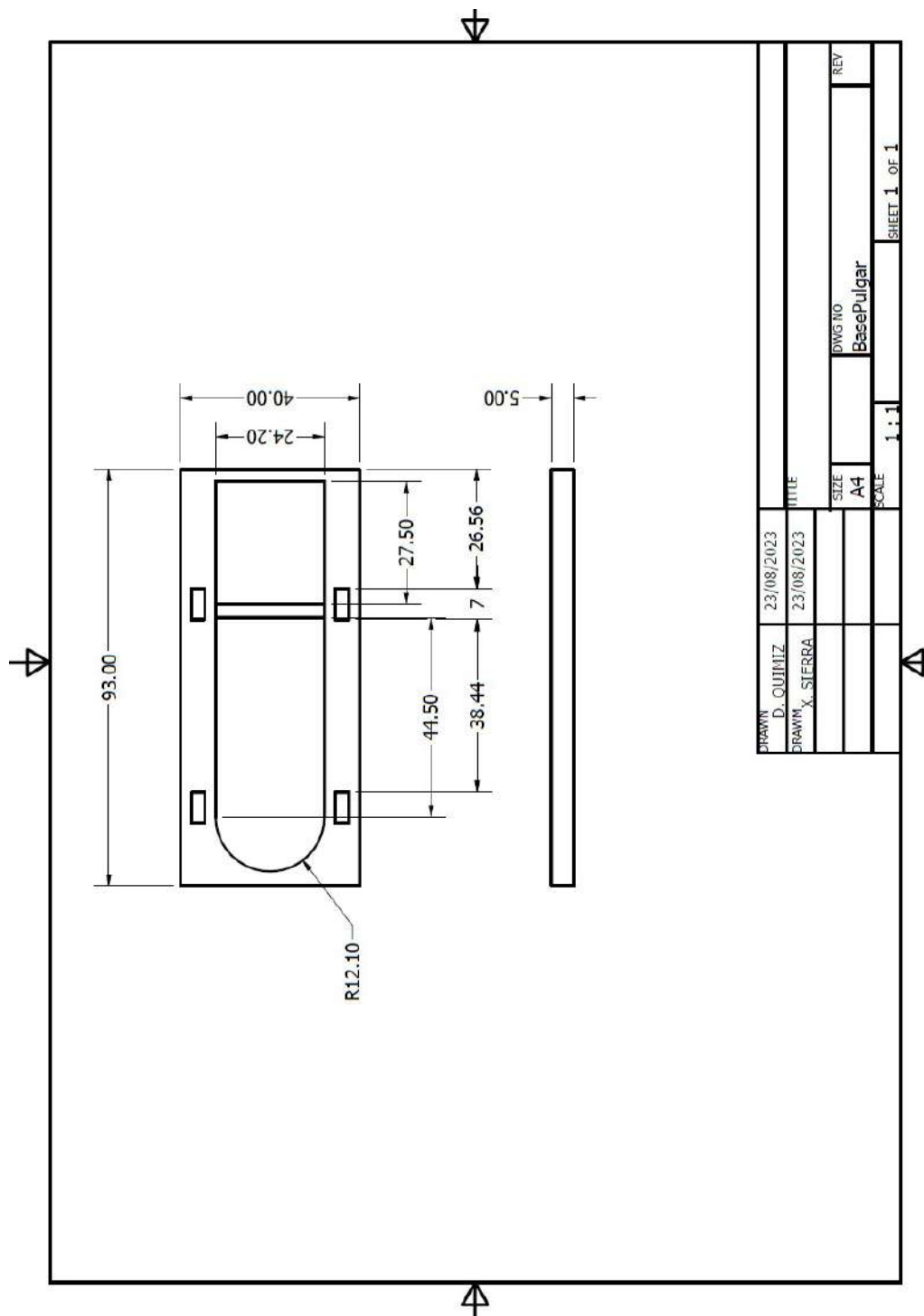


Figura 96: Base Dedo Pulgar . Fuente: Quimiz D, Sierra X