



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**  
**SEDE GUAYAQUIL**  
**CARRERA DE BIOMEDICINA**

**DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA PRÓTESIS FUNCIONAL PARA  
LA PATA DELANTERA DE PERROS CON DISCAPACIDAD  
MOTORA**

Trabajo de titulación previo a la obtención del  
Título de Ingeniera Biomédica

AUTOR: Melany Anais Sánchez Castillo  
TUTOR: Ing. Darío Xavier Romero Santistevan, Mgs.

Guayaquil - Ecuador  
2025

## CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Melany Anais Sánchez Castillo con documento de identificación N° 1317638540, manifiesto que:

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

Guayaquil, 14 de febrero del año 2025

Atentamente,



---

Melany Anais Sánchez Castillo  
1317638540

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

Yo, **Melany Anais Sánchez Castillo** con documento de identificación N° **1317638540** , expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autora del **Proyecto Técnico: DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA PRÓTESIS FUNCIONAL PARA LA PATA DELANTERA DE PERROS CON DISCAPACIDAD MOTORA**, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniera Biomédica, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

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

Guayaquil, 14 de febrero del año 2025

Atentamente,



---

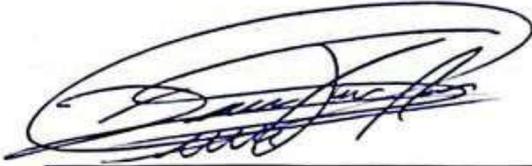
Melany Anais Sánchez Castillo  
1317638540

## CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, **Darío Xavier Romero Santistevan**, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA PRÓTESIS FUNCIONAL PARA LA PATA DELANTERA DE PERROS CON DISCAPACIDAD MOTORA**, realizado por **Melany Anais Sánchez Castillo** con documento de identificación N° **1317638540**, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción **Proyecto Técnico** que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 14 de febrero del año 2025

Atentamente,



---

Ing. Darío Xavier Romero Santistevan, Mgs.  
1206442616

## DEDICATORIA

Con inmensa gratitud y amor, dedico este trabajo a las personas que han sido mi mayor fortaleza a lo largo de este camino, quienes con su apoyo incondicional, amor y sacrificio hicieron posible la culminación de esta etapa tan importante en mi vida.

A mis padres, Williams Sánchez Ponce y Kenia Castillo Rodríguez, por ser mi luz y mi guía. Gracias por cada palabra de aliento, por cada sacrificio silencioso, por cada enseñanza de vida que han sembrado en mí. Su esfuerzo y dedicación me han inspirado a seguir adelante, incluso en los momentos más difíciles. Gracias por enseñarme con su ejemplo el valor de la perseverancia, la responsabilidad y la humildad.

A mis hermanos, quienes han sido mis compañeros de vida. Gracias por su apoyo, por cada muestra de interés y por recordarme siempre la importancia de seguir adelante a pesar de las adversidades.

A mi novio, Lucas Ordóñez, por ser mi compañero de batallas, por estar a mi lado en cada momento de este arduo camino, por su paciencia infinita, por sus palabras de ánimo y por creer en mí incluso cuando yo misma dudaba. Gracias por cada gesto de amor y comprensión, por acompañarme en noches de desvelo, por celebrar cada pequeño avance y por ser mi refugio en los momentos de cansancio y estrés. Tu apoyo ha sido fundamental en esta travesía, y por ello, este logro también es tuyo.

A cada uno de ustedes, con todo mi amor y gratitud, les dedico este trabajo, con la esperanza de que sea un reflejo del esfuerzo, la constancia y los valores que me han inculcado.

**Melany Anais Sánchez Castillo**

## AGRADECIMIENTO

Agradezco a los docentes de la carrera de Ingeniería en Biomedicina por su enseñanza, orientación y compromiso con nuestra formación. Su conocimiento y apoyo han sido fundamentales para desarrollar las habilidades necesarias en esta disciplina y afrontar los retos profesionales con mayor preparación.

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento al Ing. Darío Romero por su valiosa guía, paciencia y compromiso durante el desarrollo de esta tesis. Su apoyo y confianza fueron fundamentales para la realización de este trabajo, brindándome siempre el soporte necesario.

También quiero reconocer a mis compañeros de estudio, quienes con su colaboración y compañerismo hicieron más llevadero este camino. Su apoyo en proyectos, trabajos en equipo y largas jornadas de estudio fueron clave para mi crecimiento académico.

Además, agradezco a todas aquellas personas que, de una u otra manera, aportaron su granito de arena para la culminación de esta etapa. Familiares, amigos y personas cercanas que brindaron su apoyo, motivación y consejo en los momentos más desafiantes. Sin duda, su presencia y ayuda contribuyeron a que este proceso fuera más llevadero y enriquecedor.

**Melany Anais Sánchez Castillo**

## RESUMEN

El presente proyecto tiene como objetivo el diseño de una prótesis para la pata delantera de un perro, considerando aspectos biomecánicos y funcionales para mejorar su movilidad e interacción con el entorno. Para ello, se realizó un estudio de la zoometría del canino, asegurando que el diseño se adapte correctamente a su anatomía y proporcione estabilidad y comodidad en sus desplazamientos.

Uno de los principales enfoques del proyecto es identificar las limitaciones de autonomía del perro en sus actividades diarias, con el fin de diseñar una prótesis que facilite su movimiento y le permita desenvolverse de manera más natural. Se busca que el diseño favorezca una mejor integración con su entorno y optimice su calidad de vida.

Para garantizar la resistencia y seguridad del diseño, se llevaron a cabo simulaciones estructurales que incluyen pruebas de fatiga, tensión y factor de seguridad. Estas pruebas permitieron evaluar la capacidad de la prótesis para soportar cargas y esfuerzos mecánicos, asegurando su durabilidad y funcionalidad.

El diseño se realizó en Fusion 360, donde se definieron aspectos clave como la geometría, la distribución de esfuerzos y la estabilidad del modelo. Una vez optimizado el diseño mediante simulaciones, el modelo será enviado a impresión 3D, con el propósito de mostrar físicamente el prototipo ya diseñado.

**Palabras claves:** diseño de prótesis, canino, simulación, impresión 3D, materiales, zoometría, Fusion360.

## ABSTRACT

The objective of this project is to design a prosthesis for a dog's front leg, considering biomechanical and functional aspects to improve its mobility and interaction with the environment. To achieve this, a study of the canine's zoometry was conducted, ensuring that the design fits correctly with its anatomy and provides stability and comfort during its movements.

One of the main focuses of the project is to identify the limitations of the dog's autonomy in its daily activities, in order to design a prosthesis that facilitates its movement and allows it to function more naturally. The goal is for the design to promote better integration with its environment and enhance its quality of life.

To ensure the resistance and safety of the design, structural simulations were performed, including fatigue, tension, and safety factor tests. These tests allowed for the evaluation of the prosthesis's ability to withstand loads and mechanical stress, ensuring its durability and functionality.

The design was created in Fusion 360, where key aspects such as geometry, load distribution, and stability of the model were defined. Once the design was optimized through simulations, the model will be sent for 3D printing, with the purpose of physically presenting the already designed prototype.

**Keywords:** Design of prosthesis, canine, simulation, 3D printing, materials, zoometry, Fusion 360.

## ÍNDICE

|             |   |    |
|-------------|---|----|
| <b>I.</b>   | <b>Introducción</b>   | 1  |
| <b>II.</b>  | <b>Problema</b>   | 2  |
| <b>III.</b> | <b>Justificación</b>  | 3  |
| <b>IV.</b>  | <b>Objetivos</b>  | 4  |
| IV-A.       | Objetivo general . . . . .  | 4  |
| IV-B.       | Objetivos específicos . . . . .   | 4  |
| <b>V.</b>   | <b>Fundamentos Teóricos</b>   | 5  |
| V-A.        | Biomecánica del perro   |    |
|             | 5   |    |
| V-A1.       | Anatomía y fisiología canina . . . . .                                      | 5  |
| V-A2.       | Planos anatómicos . . . . .   | 5  |
| V-A3.       | Direcciones anatómicas . . . . .  | 6  |
| V-A4.       | Regiones corporales . . . . .   | 6  |
| V-A5.       | Sistema esquelético . . . . .   | 7  |
| V-A6.       | Tipos de huesos . . . . .   | 8  |
| V-A7.       | Sistema muscular canino . . . . .   | 8  |
| V-A8.       | Tipos de tejido muscular . . . . .  | 8  |
| V-A9.       | Sistema nervioso canino . . . . .   | 9  |
| V-A10.      | Mecánica de la locomoción . . . . .   | 10 |
| V-A11.      | Marchas y modos de movimiento . . . . .                                     | 10 |
| V-A12.      | Rango de movimiento en las articulaciones caninas . . . . .                 | 11 |
| V-A13.      | Articulaciones principales y ángulos caninos . . . . .                      | 11 |
| V-B.        | Zoometría . . . . .   | 12 |
| V-B1.       | Metodología de obtención de medidas . . . . .                               | 12 |
| V-B2.       | Medidas habituales . . . . .  | 13 |
| V-C.        | Causas comunes de pérdida de extremidades en perros y necesidad de prótesis |    |
|             | 13  |    |
| V-D.        | Prótesis . . . . .  | 16 |
| V-D1.       | Antecedentes de las prótesis en humanos . . . . .                           | 16 |
| V-D2.       | Antecedentes de las prótesis en animales . . . . .                          | 18 |
| V-D3.       | Prótesis de animales en la actualidad . . . . .                             | 18 |
| V-D4.       | Clasificación de prótesis en animales . . . . .                             | 19 |
| V-D5.       | Diferencias entre órtesis y prótesis . . . . .                              | 20 |
| V-E.        | Materiales . . . . .  | 22 |
| V-F.        | Software de diseño y simulación . . . . .                                   | 24 |
| V-F1.       | AutoCAD . . . . .   | 24 |
| V-F2.       | SolidWorks . . . . .  | 24 |
| V-F3.       | Fusion360 . . . . .   | 24 |
| V-F4.       | Blender . . . . .   | 24 |
| V-F5.       | Autodesk Maya . . . . .   | 25 |
| V-F6.       | ANSYS . . . . .   | 25 |
| V-F7.       | ZBrush . . . . .  | 25 |
| V-F8.       | COMSOL Multiphysics . . . . .   | 25 |

|  |    |
|--|----|
| <b>VI. Marco Metodológico</b>                            | 26 |
| VI-A. Enfoque general . . . . .                          | 26 |
| VI-B. Desarrollo de la solución . . . . .                | 26 |
| VI-B1. Evaluación inicial y planificación . . . . .      | 26 |
| VI-B2. Fase de diseño . . . . .                          | 26 |
| VI-B3. Fase de modelado 3D . . . . .                     | 26 |
| VI-B4. Fase de ensamblaje . . . . .                      | 27 |
| VI-B5. Simulación y pruebas virtuales . . . . .          | 27 |
| VI-B6. Impresión del prototipo . . . . .                 | 27 |
| VI-B7. Proyecciones de mejora y refinamiento . . . . .   | 27 |
| VI-C. Evaluación inicial . . . . .                       | 28 |
| VI-D. Fase de diseño . . . . .                           | 32 |
| VI-E. Fase de modelado 3D . . . . .                      | 36 |
| VI-F. Fase de ensamblaje . . . . .                       | 39 |
| VI-G. Simulación y pruebas virtuales . . . . .           | 43 |
| VI-H. Impresión de prototipo<br>49                       |    |
| VI-I. Proyecciones de mejora y refinamiento . . . . .    | 50 |
| <b>VII. Resultados</b>                                   | 51 |
| VII-A. Prueba de tensión von Mises . . . . .             | 51 |
| VII-B. Pruebas de Factor de seguridad<br>51              |    |
| VII-B1. Interpretación del Factor de Seguridad . . . . . | 51 |
| VII-C. Prueba de Fatiga<br>52                            |    |
| <b>VIII. Cronograma</b>                                  | 53 |
| <b>IX. Presupuesto</b>                                   | 54 |
| <b>X. Conclusiones</b>                                   | 55 |
| <b>XI. Recomendaciones</b>                               | 55 |
| <b>Referencias</b>                                       | 56 |
| <b>Anexo A: Planos</b>                                   | 58 |
| <b>Anexo B: Herramientas CAD</b>                         | 60 |
| <b>Anexo C: Programa de impresión en 3D, Artillery3D</b> | 64 |
| <b>Anexo D: Impresión del prototipo</b>                  | 65 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 1.  | Planos anatómicos caninos [6]. . . . .   | 6  |
| 2.  | Regiones anatómicas caninas [8]. . . . .   | 7  |
| 3.  | Sistema esquelético canino [9]. . . . .  | 7  |
| 4.  | Sistema muscular [11]. . . . .   | 8  |
| 5.  | Tejido muscular esquelético [12]. . . . .  | 9  |
| 6.  | Sistema Nervioso Canino [14]. . . . .  | 10 |
| 7.  | Marcha canina [17]. . . . .  | 10 |
| 8.  | Articulaciones y ángulos caninos [18]. . . . .   | 12 |
| 9.  | Zoometría [20]. . . . .  | 12 |
| 10. | Osteomielitis crónica [22]. . . . .  | 14 |
| 11. | Aptitud de prótesis canina [22]. . . . .   | 15 |
| 12. | Malformación congénita-Hemimelia radial [24]. . . . .  | 15 |
| 13. | Prótesis antigua [26]. . . . .   | 16 |
| 14. | Prótesis de pierna [25]. . . . .   | 17 |
| 15. | Prótesis canina siglo XX [28]. . . . .   | 18 |
| 16. | Exo-prótesis canina [29]. . . . .  | 19 |
| 17. | Endo-prótesis canina [29]. . . . .   | 20 |
| 18. | Prótesis y órtesis canina [30]. . . . .  | 20 |
| 19. | Órtesis de cadera canina [31]. . . . .   | 21 |
| 20. | Prótesis de extremidad canina [30]. . . . .  | 21 |
| 21. | Etapas del proyecto, Autor propio. . . . .   | 26 |
| 22. | Sujeto de prueba, Autor propio . . . . .   | 28 |
| 23. | Mediciones con cinta métrica, Autor propio . . . . .   | 29 |
| 24. | Mediciones con Goniómetro, Autor propio . . . . .  | 29 |
| 25. | Diagrama de cuerpo libre, Autor propio . . . . .   | 30 |
| 26. | Boceto 1, Autor propio . . . . .   | 32 |
| 27. | Boceto Final, Autor propio . . . . .   | 33 |
| 28. | Sistema de rótulas, Autor propio . . . . .   | 34 |
| 29. | Fusion 360, Autor propio . . . . .   | 35 |
| 30. | Boceto de estructura para muñón, Autor propio . . . . .                                      | 36 |
| 31. | Uso de herramienta extrusión, Autor propio . . . . .   | 36 |
| 32. | Uso de herramienta extrusión para modelado del espacio del muñón, Autor propio . . . . .     | 37 |
| 33. | Tope para limitar movimiento de articulación, Autor propio . . . . .                         | 37 |
| 34. | Espacios para asegurar la prótesis, Autor propio . . . . .                                   | 38 |
| 35. | Hendidura para vincha de retención, Autor propio . . . . .                                   | 38 |
| 36. | Selección de componentes de ensamblaje, Autor propio . . . . .                               | 39 |
| 37. | Unión de los componentes, Autor propio . . . . .   | 39 |
| 38. | Componentes de prótesis unidos, Autor propio . . . . .                                       | 40 |
| 39. | Movimiento y Límite de movimiento de unión, Autor propio . . . . .                           | 41 |
| 40. | Propiedades térmicas, mecánicas y resistencia del PETG, Autor propio . . . . .               | 41 |
| 41. | Modelado 3D de las piezas ensambladas con material PETG aplicado, Autor propio . . . . .     | 42 |
| 42. | Espesor interno de las piezas, Autor propio . . . . .  | 42 |
| 43. | Restricción de la cara inferior de la pata, Autor Propio . . . . .                           | 44 |
| 44. | Restricción de la cara inferior de la pata, Autor Propio . . . . .                           | 44 |
| 45. | Restricción de la cara inferior de la pata, Autor Propio . . . . .                           | 45 |
| 46. | Simulación de tensión de las piezas ensambladas en el ángulo de 90°, Autor propio . . . . .  | 45 |
| 47. | Simulación de tensión de las piezas ensambladas en el ángulo de 10°, Autor propio . . . . .  | 46 |
| 48. | Simulación de tensión de las piezas ensambladas en el ángulo de 135°, Autor propio . . . . . | 46 |
| 49. | Simulación de Factor de Seguridad, Autor propio . . . . .                                    | 47 |

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 50. | Simulación de Fatiga - Porcentaje de daño, Autor propio . . . . .  | 48 |
| 51. | Simulación de Fatiga - Vida útil en ciclos, Autor propio . . . . . | 48 |
| 52. | Artillery 3D, Autor propio . . . . .                               | 49 |
| 53. | Artillery 3D, Autor propio . . . . .                               | 49 |
| 54. | Prototipo impreso en 3D, Autor propio . . . . .                    | 50 |
| 55. | Tensión máxima alcanzada . . . . .                                 | 51 |
| 56. | Plano de la pieza donde se ubica el muñón, Autor propio . . . . .  | 58 |
| 57. | Plano de la pieza pata base, Autor propio . . . . .                | 59 |
| 58. | Herramientas utilizadas para el diseño, Fusion 360 . . . . .       | 60 |
| 59. | Herramientas utilizadas para el diseño, Fusion 360 . . . . .       | 61 |
| 60. | Herramientas utilizadas para el diseño, Fusion 360 . . . . .       | 61 |
| 61. | Herramientas utilizadas para el diseño, Fusion 360 . . . . .       | 62 |
| 62. | Estudios de simulación, Fusion 360 . . . . .                       | 62 |
| 63. | Estudios de simulación, SOLIDWORKS . . . . .                       | 63 |
| 64. | Diseño exportado para imprimir en 3D, Autor propio . . . . .       | 64 |
| 65. | Diseño exportado para imprimir en 3D, Autor propio . . . . .       | 64 |
| 66. | Proceso de impresión 3D del prototipo, Autor propio . . . . .      | 65 |
| 67. | Proceso de impresión 3D del prototipo, Autor propio . . . . .      | 66 |
| 68. | Proceso de impresión 3D del prototipo, Autor propio . . . . .      | 67 |
| 69. | Proceso de impresión 3D del prototipo, Autor propio . . . . .      | 68 |
| 70. | Proceso de impresión 3D del prototipo, Autor propio . . . . .      | 69 |
| 71. | Proceso de impresión 3D del prototipo, Autor propio . . . . .      | 70 |
| 72. | Prototipo impreso, Autor propio . . . . .                          | 71 |
| 73. | Prototipo impreso, Autor propio . . . . .                          | 72 |
| 74. | Prototipo impreso, Autor propio . . . . .                          | 73 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|      |   |    |
|------|---|----|
| I.   | Materiales para impresión aditiva . . . . .           | 22 |
| II.  | Medidas zoométricas recolectadas del canino . . . . . | 28 |
| III. | Planificación del Proyecto . . . . .                  | 53 |

## I. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de prótesis para animales ha evolucionado significativamente gracias a la impresión 3D, permitiendo la creación de soluciones personalizadas que mejoran la movilidad y calidad de vida de las mascotas. En este proyecto, se diseña una prótesis para la pata delantera de un perro, enfocándose en la optimización de su estructura y funcionalidad. Para ello, se emplea modelado digital en Fusion 360, asegurando un diseño preciso y adaptable a las necesidades del animal.

Uno de los aspectos clave en este diseño es la selección del material, ya que la prótesis debe ser lo suficientemente resistente para soportar el peso del perro y, al mismo tiempo, flexible para absorber impactos. Tras un análisis comparativo, se ha determinado que el PETG es una opción óptima debido a su equilibrio entre resistencia mecánica, flexibilidad y facilidad de fabricación. Además, su alta resistencia a la humedad y a productos químicos lo hace ideal para su uso en exteriores.

El diseño en Fusion 360 permite la creación de un modelo detallado que considera la anatomía del perro y los esfuerzos mecánicos que actuará sobre la prótesis. Se han definido aspectos como la geometría y la distribución de cargas para garantizar una estructura funcional y cómoda para el animal. Una vez finalizado el modelado, el archivo será exportado y enviado a impresión 3D, asegurando la precisión en la fabricación del prototipo.

La impresión 3D representa una alternativa eficiente para la producción de prótesis, ya que permite la fabricación de modelos idóneos y sin los costos elevados de los métodos tradicionales. Además, posibilita el uso de materiales avanzados como el PETG, que ofrecen una combinación óptima de resistencia y durabilidad para este tipo de aplicaciones.

Este proyecto tiene como objetivo el diseño de una prótesis funcional, resistente y ligera, utilizando herramientas digitales avanzadas y técnicas de manufactura aditiva. A través de un enfoque estructurado, se busca desarrollar una solución eficiente que se adapte a las necesidades del perro y facilite su movilidad en diversas condiciones.

## II. PROBLEMA

En las últimas décadas, el afecto por las mascotas ha experimentado un notable aumento, con muchas personas considerándolos como esenciales integrantes de sus familias. Este creciente vínculo entre humanos y animales ha provocado un incremento en el interés por su bienestar y calidad de vida. No obstante, tal cual los humanos, los animales se pueden ver afectados por varios factores que puedan llevar a cabo una amputación. Numerosos perros experimentan problemas de movilidad por diversas razones, tales como lesiones, enfermedades genéticas o envejecimiento. Estas circunstancias no solo impactan la movilidad de los animales, sino que también afectan su calidad de vida y la de sus dueños, quienes desean brindar el mejor cuidado posible [1].

La tecnología ha progresado significativamente en el ámbito de la medicina veterinaria y la creación de aparatos ortopédicos. Existen prótesis y órtesis disponibles para asistir a perros con discapacidades, pero a menudo estas soluciones resultan costosas, difíciles de ajustar, o ineficientes, restringiendo así su accesibilidad. Además, numerosas prótesis disponibles no están específicamente adaptadas a las necesidades particulares de cada animal, lo que puede resultar en un uso ineficaz o incomodidad para el perro [2].

Así mismo, a nivel internacional los costos de las prótesis son elevados, alcanzando un valor aproximado de 800 dólares. Estos precios podrían significar que individuos de clase media y baja no tengan oportunidad de acceder a estas prótesis. En este sentido es un poco alarmante debido a que existe una cantidad creciente de animales de compañía [1].

Desde hace 10 años en el Ecuador el uso y fabricación de prótesis empezó con materiales reciclados, siendo PVC el material mayormente utilizado. Posteriormente la técnica y los recursos usados fueron mejorando, así mismo diversificando los productos a medida que la demanda aumentaba [1].

Uno de los problemas latentes que presenta el Ecuador respecto a la población canina, es su creciente cantidad. Aunque no de forma intencionada, gracias a la campaña de vacunación antirrábica llevada a cabo en el 2013, fue posible obtener una cantidad cercana de perros en el Ecuador: 1.765.744 [2]. Durante el transcurso de los años este número ha ido en aumento, por ejemplo, en el año 2022 se determinó una cantidad de 770.000 de perros tanto callejeros y de hogar en Guayaquil, así mismo, en el 2023 por medio de un censo realizado en la ciudad de Quito se determinó una cantidad de 775.005 perros callejeros [1].

### III. JUSTIFICACIÓN

La población canina en el Ecuador es elevada. Muchos de estos perros presentan discapacidades, lesiones o enfermedades degenerativas con repercusiones en sus extremidades, disminuyendo de esa forma su calidad de vida. La accesibilidad económica a una prótesis para dar solución a estos problemas se complica debido a su costo. Debido a esto, este proyecto técnico tiene como objetivo el diseño de una prótesis canina, integrando técnicas de modelado e impresión 3D.

Para el diseño de la prótesis, se hará uso de dos principales técnicas y recursos: zoometría y programa de diseño 3D. La zoometría permitirá obtener medidas de forma precisa de la proporcionalidad del perro y su extremidad delantera, gracias a esto será posible asegurar un ajuste cómodo y funcional de la prótesis. El segundo recurso a utilizar, será un programa de diseño 3D que permitirá representar la prótesis a diseñar.

El programa de diseño 3D permitirá realizar simulaciones avanzadas en los modelos de prótesis, evaluando su resistencia en diferentes condiciones. Para las pruebas de tensión, se pueden aplicar fuerzas y cargas específicas en distintas áreas de la prótesis para ver cómo responde el material ante estas sollicitaciones y determinar su capacidad de soportarlas. Las pruebas de fatiga permiten simular cargas repetitivas para analizar cómo la prótesis se comportaría bajo el uso continuo a lo largo del tiempo, identificando puntos de desgaste o falla potencial. Finalmente, el factor de seguridad se calcula mediante estas simulaciones para asegurar que la prótesis pueda soportar cargas superiores a las previstas sin sufrir daños, lo cual es esencial para garantizar su confiabilidad y durabilidad en diversas situaciones.

## IV. OBJETIVOS

### *IV-A. Objetivo general*

Diseñar una prótesis funcional para la pata delantera de perros con discapacidad motora con el fin de mejorar su calidad de vida.

### *IV-B. Objetivos específicos*

- Identificar la zoometría del canino para el diseño de la prótesis.
- Identificar los problemas de autonomía en las diversas actividades diarias del perro, facilitando su movimiento y favoreciendo su interacción con el entorno.
- Realizar pruebas de fatiga, tensión y factor de seguridad para la simulación y el diseño de la prótesis.
- Desarrollar un prototipo de prótesis canina de pata delantera impresa en material 3D.

## V. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### V-A. *Biomecánica del perro*

La biomecánica es el estudio de los principios mecánicos que rigen el movimiento y la estructura de los sistemas biológicos. Implica analizar las cargas, el movimiento, el estrés y la deformación que experimentan los tejidos biológicos y cómo estos factores afectan el movimiento, el tamaño, la forma y la función general. La biomecánica abarca varios niveles de estudio, desde la mecánica molecular y celular hasta la mecánica de tejidos, órganos y sistemas completos. Su objetivo es comprender cómo las fuerzas mecánicas influyen en las respuestas biológicas, como el crecimiento, el movimiento y la función, y es crucial para aplicaciones en campos como la rehabilitación, la ciencia del deporte y la ortopedia [3].

V-A1. *Anatomía y fisiología canina*: La anatomía podría definirse como “la ciencia biológica que trata de la forma y estructura de los organismos en general.” De la misma forma, posee una relación estrecha con la fisiología, encargada de estudiar las funciones del cuerpo [4].

Es necesario para comprender de mejor manera la anatomía y fisiología canina estudiar ciertos términos que proporcionan un mejor sentido de ubicación, análisis de movimiento y distribución de las fuerzas, de esta manera a la hora de evaluar al perro ya sea por la practica de una intervención quirúrgica, localizar una lesión, interpretación de imágenes o para el ajuste correcto de una prótesis u órtesis, se pueda obtener un resultado óptimo.

V-A2. *Planos anatómicos*: Los planos anatómicos caninos, como se observa en la figura 1, son esenciales para explicar la localización y la conexión entre diversas estructuras del cuerpo del animal. Estos esquemas habilitan a veterinarios e ingenieros en veterinaria para efectuar observaciones exactas y establecer una comunicación eficaz acerca de la morfología y fisiología de los animales [5].

Se entiende como planos anatómicos a las líneas o superficies planas que se trazan en el cuerpo del animal de forma imaginaria, estos planos sirven como referencia para poder localizar y describir las estructuras del animal y sus movimientos [5].

La clasificación de los planos anatómicos más importantes, guiándonos de la Figura 1 es la siguiente:

- Plano sagital: Este plano es vertical, nos muestra la división en los lados izquierdo y derecho del cuerpo del animal o un órgano.
- Plano transversal: El plano transversal cruza el cuerpo en un ángulo recto respecto al eje longitudinal del animal, dividiéndolo en una parte frontal (craneal o rostral si se trata de la cabeza) y una parte posterior (caudal).
- Plano frontal o dorsal: El plano dorsal es perpendicular a los planos transversal y mediano, y separa el cuerpo del animal en una parte superior (dorsal) y una inferior (ventral).

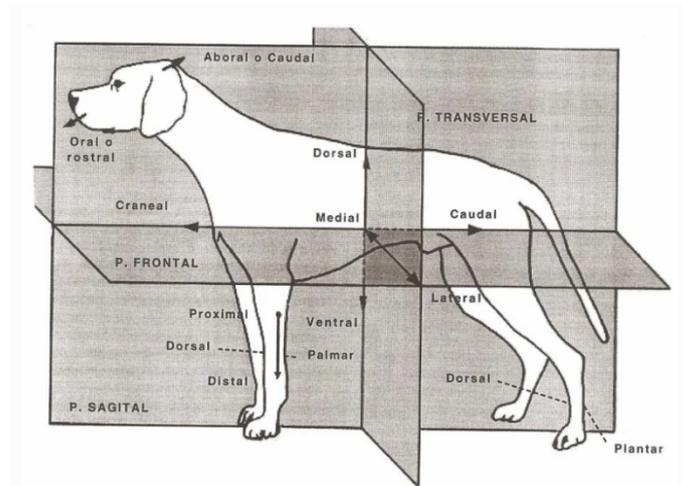


Figura 1. Planos anatómicos caninos [6].

V-A3. *Direcciones anatómicas:* Para indicar la dirección y la posición de las partes del cuerpo del animal de manera correcta, se utilizan términos descriptivos, ayudando a una mejor comprensión. Estos términos se detallan a continuación [7]:

- Oral (nasal)
- Aboral
- Craneal
- Dorsal
- Caudal
- Ventral
- Proximal
- Dorsal
- Medial
- Lateral
- Anterior
- Posterior

V-A4. *Regiones corporales:* Las regiones anatómicas caninas se dividen en varias áreas que ayudan a describir la ubicación de estructuras y órganos en el cuerpo del perro. Cada una de estas regiones tiene características específicas que son importantes para la salud y el cuidado del perro [8].

Como se puede observar en la Figura 2 las principales regiones corporales son las mencionadas a continuación:

- Cabeza
- Cuello
- Tronco
- Miembros torácicos
- Miembros pélvicos
- Cola

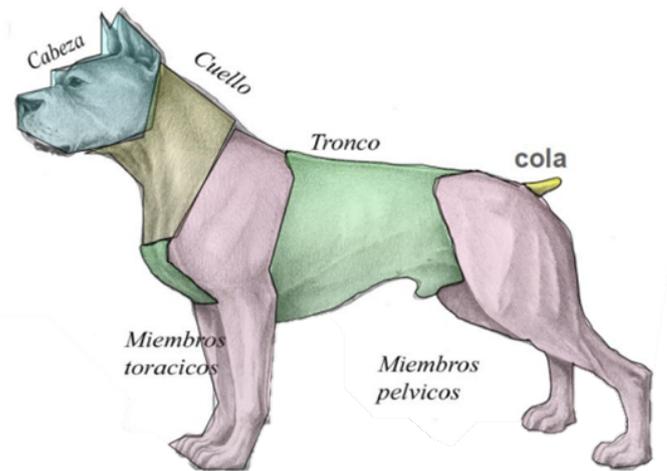


Figura 2. Regiones anatómicas caninas [8].

V-A5. *Sistema esquelético*: Observando la figura 3, el término “esqueleto” se refiere a la estructura resistente que sostiene y resguarda los tejidos blandos de los animales [9].

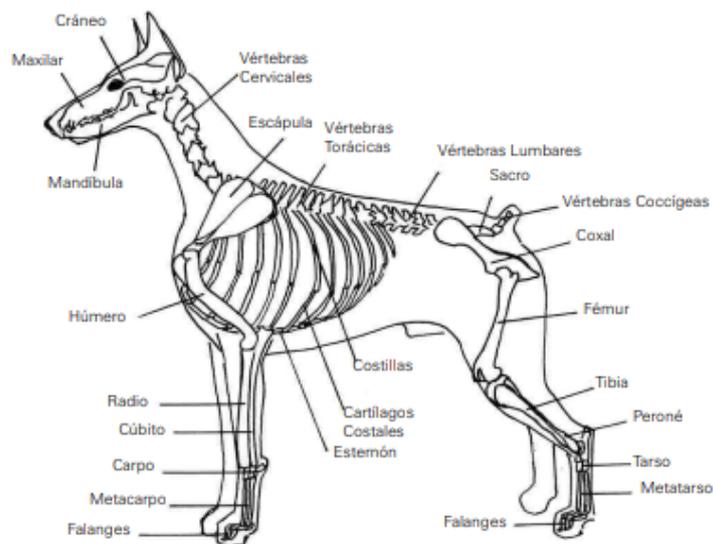


Figura 3. Sistema esquelético canino [9].

El esqueleto de un perro tiene en promedio entre 319 y 321 huesos, pero el número puede variar dependiendo de la raza y la longitud de la cola. Para un mejor estudio el esqueleto se puede dividir de la siguiente manera [9]:

- Esqueleto axial: Cráneo, huesos del tórax (esternón y costillas) y huesos de la columna vertebral.
- Esqueleto apendicular: Está conformado por los huesos de las extremidades.
- Esqueleto visceral o espláncnico: Incluye diversos huesos formados en el parénquima de ciertas vísceras u órganos, como el hueso peneal en los caninos.

V-A6. *Tipos de huesos:* La clasificación de los tipos de huesos es según su forma y su función, se puede contar con los siguientes [9]:

- Huesos largos: Es evidente que el largo predomina en comparación con la longitud y espesor. Se distinguen por su forma cilíndrica y alargada. En general, estos huesos actúan como sostén y algunos de ellos son: fémur, húmero, tibia, peroné, radio, cúbito, metacarpos y metatarsos.
- Huesos cortos: La anchura y el largo son casi idénticos a pesar de no poseer una forma de cubo definida, se parecen. No tienen un predominio evidente en ellos ninguna anchura, ni dimensión, ni grosor, ni longitud. Su función principal parece ser la de amortiguar los impactos y siempre se vinculan entre ellos para establecer áreas donde se requiere un movimiento mínimo. Por ejemplo, las vértebras, el carpo y los huesos del tarso.
- Huesos planos: Son de tamaño medio, su espesor es inferior a su longitud y anchura. Dos de sus dimensiones predominan. Usualmente se utilizan para proteger áreas sensibles: los huesos de la cabeza, la cadera, la escápula y las costillas.

V-A7. *Sistema muscular canino:* El sistema muscular tiene la responsabilidad de generar la fuerza mecánica y los movimientos requeridos para la locomoción, facilitando el manejo de varios objetos, contribuyendo a la circulación sanguínea y al movimiento del alimento a través del tubo digestivo, entre otros procesos relevantes. En el sistema muscular existen más de 650 músculos, como se puede ver en la figura 4, teniendo la finalidad de provocar los movimientos voluntarios e involuntarios [10].



Figura 4. Sistema muscular [11].

V-A8. *Tipos de tejido muscular:* Existen 3 tipos de tejido muscular que se diferencian por como se estructuran sus células y por la apariencia. A continuación los tipos de tejido muscular que existen [12]:

- Músculo esquelético estriado: Es el tipo de músculo que está unido a los huesos por medio de tendones. Como se evidencia en la figura 5 está compuesto por fibras musculares largas, cilíndricas y multinucleadas. Este tejido se encarga del movimiento voluntario del cuerpo, como caminar, correr o mover partes del cuerpo. También participa en el control postural.
- Músculo cardíaco: Este tejido muscular se encuentra exclusivamente en el corazón. Las fibras musculares son ramificadas, tienen un solo núcleo y están unidas entre sí por discos intercalados. La principal función de este músculo es la contracción rítmica e involuntaria que permite el bombeo de sangre por todo el sistema circulatorio.

- **Músculo liso:** Este músculo se encuentra en las paredes de los órganos internos, como el tracto gastrointestinal, los vasos sanguíneos y la vejiga urinaria. Las fibras musculares son fusiformes (en forma de huso) y tienen un solo núcleo central. El músculo liso es el responsable de los movimientos involuntarios dentro de los órganos, como la contracción del intestino para mover los alimentos.

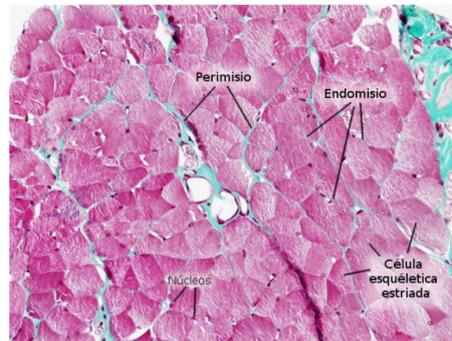


Figura 5. Tejido muscular esquelético [12].

V-A9. *Sistema nervioso canino:* Anatómicamente, como se observa en la figura 6 el sistema nervioso canino se divide en [13]:

1. **Sistema Nervioso Central (SNC):** Este sistema está compuesto por el encéfalo y la médula espinal. El SNC es responsable de la integración y procesamiento de la información sensorial, así como de la coordinación de las respuestas motoras. Está protegido por estructuras óseas, como el cráneo y la columna vertebral, y se organiza en sustancia gris y blanca. El encéfalo se subdivide en:
  - **Cerebro:** Involucrado en funciones cognitivas, motoras y sensoriales.
  - **Cerebelo:** Responsable de la coordinación motora y el equilibrio.
  - **Tronco encefálico:** Regula funciones vitales como la respiración y el ritmo cardíaco.
2. **Sistema Nervioso Periférico (SNP):** Este sistema incluye todos los nervios y ganglios que se extienden desde el SNC hacia el resto del cuerpo, conectando el SNC con los tejidos periféricos. El SNP se encarga de la transmisión de impulsos nerviosos hacia y desde el cuerpo, facilitando la comunicación entre el SNC y los órganos efectores.

El sistema nervioso en caninos se clasifica funcionalmente en dos grandes sistemas [13]:

1. **Sistema Nervioso Somático:** Este sistema controla las funciones voluntarias del organismo, es decir, aquellas acciones que son conscientes y que implican la activación de músculos esqueléticos. Permite la percepción de estímulos externos y la respuesta a ellos mediante movimientos voluntarios.
2. **Sistema Nervioso Autónomo:** Este sistema regula las funciones involuntarias, que son aquellas que ocurren sin necesidad de un control consciente. Se encarga de gestionar las actividades de los órganos internos y glándulas, y se subdivide en dos ramas:
  - **Sistema Simpático:** Responsable de las respuestas de "lucha o huida", que preparan al organismo para situaciones de estrés o emergencia.
  - **Sistema Parasimpático:** Regula los procesos de reposo y digestión", promoviendo la conservación de energía y la realización de funciones de mantenimiento del cuerpo.



V-A12. *Rango de movimiento en las articulaciones caninas:* Los parámetros del rango de movimiento y los ángulos articulares son cruciales para entender el funcionamiento de las articulaciones del perro durante la locomoción y otras actividades físicas. El espectro de movimiento hace referencia a la mayor amplitud que una articulación puede lograr desde su posición de flexión más cerrada hasta su extensión más abierta, medida en grados. Los ángulos articulares representan las posiciones concretas que las articulaciones adoptan en un instante específico, ya sea en estado de reposo o en movimiento.

Estos parámetros se ven afectados por elementos como la anatomía del perro, el propósito de cada articulación, la raza, la edad, la condición física y eventuales condiciones patológicas. En circunstancias habituales, un rango de movimiento apropiado garantiza que las fuerzas producidas durante el movimiento se repartan de manera eficaz, evitando lesiones y promoviendo un movimiento fluido y estable.

V-A13. *Articulaciones principales y ángulos caninos:*

- **Articulación escapulohumeral (hombro):**  
Movimiento: Flexión, extensión, abducción y rotación.  
Rango aproximado: Flexión (50°), Extensión (150°).  
Importancia: Proporciona movilidad y soporte en las extremidades delanteras.
- **Articulación del codo (femororadioulnar):**  
Movimiento: Flexión y extensión.  
Rango aproximado: Flexión (40°), Extensión (160°).  
Importancia: Absorbe impactos y facilita la propulsión.
- **Articulación del carpo (muñeca):**  
Movimiento: Flexión y extensión.  
Rango aproximado: Flexión (35-40°), Extensión (190°).  
Importancia: Amortigua y estabiliza al caminar o correr.
- **Articulación coxofemoral (cadera):**  
Movimiento: Flexión, extensión, abducción, aducción y rotación.  
Rango aproximado: Flexión (50°), Extensión (160°).  
Importancia: Genera fuerza para la propulsión.
- **Articulación de la rodilla (femorotibial):**  
Movimiento: Flexión y extensión.  
Rango aproximado: Flexión (40-50°), Extensión (130-150°).  
Importancia: Soporte y estabilidad durante movimientos rápidos.
- **Articulación del tarso (tobillo):**  
Movimiento: Flexión y extensión.  
Rango aproximado: Flexión (40°), Extensión (165°).  
Importancia: Impulso en actividades como el salto y el galope.

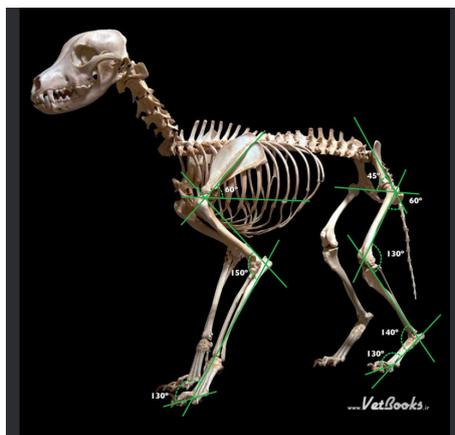


Figura 8. Articulaciones y ángulos caninos [18].

La figura 8 muestra un esqueleto de perro en posición estática, con ángulos articulares destacados en varias articulaciones principales del cuerpo. Estos ángulos representan las posiciones estándar o funcionales de las articulaciones en una postura normal.

#### V-B. Zoometría

La zoometría es una herramienta que permite caracterizar a una especie o raza de animal por medio de sus formas y dimensiones [19]. Por otro lado, se define a la zoometría como “el estudio de las formas de los animales mediante mediciones corporales concretas que nos permiten cuantificar la conformación corporal [20].”

Durante el proceso de la zoometría es común obtener los parámetros observados en la Figura 6 como: longitud del dorso, cuello, alzada a la cruz y perímetro del tórax.

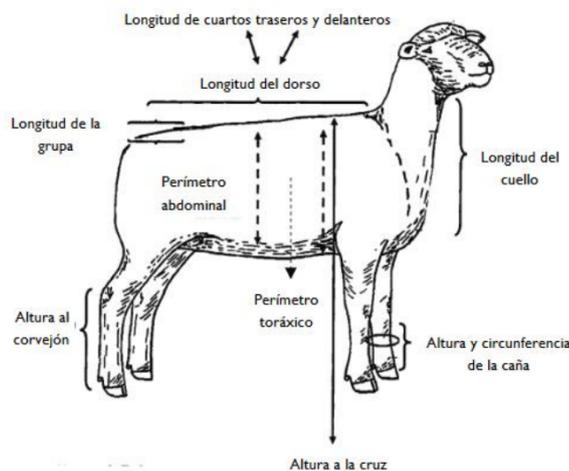


Figura 9. Zoometría [20].

V-B1. *Metodología de obtención de medidas:* En dependencia de la especie o raza el proceso de obtención de medidas puede variar ligeramente. Es importante que las medidas lineales sean obtenidas sobre planos horizontales y con el animal cuadrado, esto significa que sus cuatro extremidades sobre el suelo formen un rectángulo equilibrado [19].

El equipamiento comúnmente utilizado durante este proceso es:

- Cinta métrica.
- Compás de brocas.
- Bastón hipométrico.
- Pelvímetro.
- Calibrador.
- Goniómetro.

*V-B2. Medidas habituales:* Las medidas que pueden obtenerse se dividen en: medidas lineales, anchuras y perímetro. De la misma forma, las medidas lineales suelen dividirse en: medidas de alzada (medidas del esqueleto axial y del cinturón torácico), longitud (diámetros longitudinales), anchura (diámetros transversales) y profundidad [19].

#### *V-C. Causas comunes de pérdida de extremidades en perros y necesidad de prótesis*

La pérdida de extremidades en perros puede ser un evento devastador tanto para el animal como para su dueño. Existen diversas causas que pueden llevar a la necesidad de una amputación, siendo las más comunes los tumores, traumas severos, infecciones crónicas como la osteomielitis que se observa en la Figura 10, y condiciones neurológicas que afectan la movilidad. Los tumores óseos, en particular, son una de las razones más frecuentes para la amputación, ya que pueden comprometer la salud y calidad de vida del animal. [21]

Además de las causas médicas, la amputación puede ser necesaria en casos de lesiones irreparables, como fracturas complejas que no responden a tratamientos conservadores. La decisión de amputar a menudo se toma cuando se considera que la calidad de vida del perro se vería gravemente afectada por la condición de la extremidad afectada.[21]

Tras la amputación, muchos perros pueden adaptarse sorprendentemente bien a su nueva situación, pero algunos pueden requerir prótesis para mejorar su movilidad y calidad de vida. Las prótesis pueden ayudar a restaurar la función y permitir que los perros realicen actividades cotidianas con mayor facilidad. Sin embargo, la adaptación a una prótesis puede ser un proceso que requiere tiempo y paciencia, tanto para el animal como para su dueño. La disponibilidad de opciones de rehabilitación y el apoyo veterinario son cruciales para facilitar esta transición y asegurar que el perro pueda llevar una vida activa y feliz después de la pérdida de una extremidad [21].



Figura 10. Osteomielitis crónica [22].

En perros, la pérdida de una extremidad puede ser resultado de accidentes traumáticos, siendo esta una de las razones más habituales. Los accidentes de tránsito suelen causar lesiones severas que, en ciertas situaciones, requieren la amputación para salvaguardar la vida del animal. Adicionalmente, incidentes en el hogar, como caídas graves o atrapamiento en objetos, pueden provocar daños irreparables. Las agresiones de otros animales, especialmente cuando las mordeduras impactan huesos o tejidos profundos, constituyen otra causa común de la pérdida de una pata.

Las afecciones degenerativas constituyen otra causa importante. Frecuentemente, enfermedades como el osteosarcoma, una forma de cáncer óseo, necesitan la amputación de una extremidad como parte de la terapia. Igualmente, la artritis grave o las afecciones crónicas de las articulaciones pueden provocar la incapacidad de una pata, volviéndola dolorosa o inútil. En situaciones más avanzadas, las infecciones óseas sin tratamiento, como la osteomielitis, pueden provocar problemas que puedan llevar a la amputación.

Para que un paciente canino pueda usar una prótesis delantera de manera efectiva, es necesario que conserve al menos entre el 30 % y el 40 % del radio y la ulna, ya que una cantidad menor dificultaría el control del dispositivo. Además, el paciente debe tener una articulación del codo funcional, con pleno control muscular y en condiciones adecuadas para soportar peso durante el uso de la prótesis. Por último, la prótesis debe poder sujetarse y suspenderse correctamente desde el húmero, lo que requiere acceso a la parte medial del húmero, cerca de la axila del paciente [23].

Por otro lado, para una prótesis trasera el canino debe conservar al menos el 30%-40 % de la tibia y el peroné; de lo contrario, no podrá manejar la longitud del encaje. Además, es esencial que la articulación de la rodilla y la cadera sean funcionales para soportar peso. Si la amputación o deformidad está por encima del tarso, la prótesis se sujetará a la columna lumbar y un manguito femoral contralateral, requiriendo acceso medial a ambos fémures y el uso de un arnés torácico. Si está por debajo del tarso, la prótesis se fijará sobre los maléolos medial y lateral y el calcáneo, esto se puede observar en la Figura 11 [23].

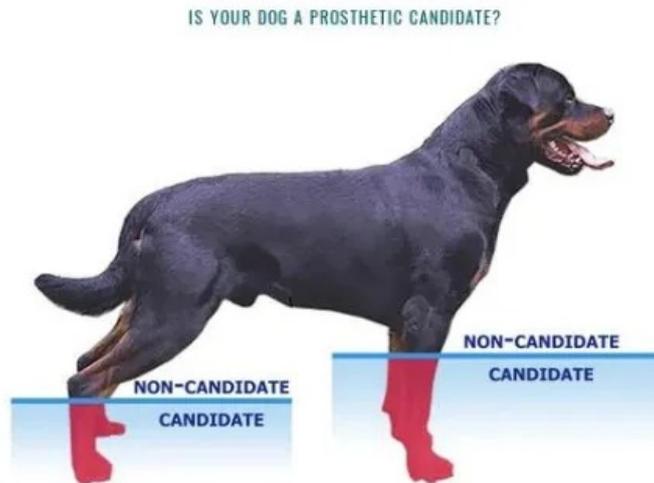


Figura 11. Aptitud de prótesis canina [22].

Como se evidencia en la Figura 12 las deformidades congénitas son igualmente las causas de la necesidad de prótesis en perros. Algunos nacen con extremidades ausentes o deformadas, lo que restringe su habilidad para desplazarse de forma correcta desde sus primeros días de vida. Los síndromes genéticos que inciden en el crecimiento óseo o articular también pueden provocar irregularidades que obstaculicen el funcionamiento de la pata afectada. Estas situaciones generalmente necesitan intervenciones precoces para optimizar la calidad de vida del animal.

En cambio, las dificultades vinculadas a la edad también contribuyen a la pérdida de extremidades. En perros de edad avanzada, un severo deterioro físico y enfermedades como la osteoporosis pueden causar fracturas irremediabiles. En circunstancias tales, una amputación podría ser la única opción para prevenir el dolor constante del animal. Además, la movilidad restringida en perros de edad avanzada frecuentemente puede ser mejorada con el uso de prótesis creadas específicamente para su uso.

En última instancia, la negligencia o el maltrato son factores que, a pesar de ser desafortunados, también justifican la pérdida de extremidades en perros. Las lesiones que no se tratan inmediatamente debido al desamparo o maltrato físico pueden resultar en daños irremediabiles. En estas situaciones, las prótesis no solo desempeñan un papel físico, sino que también facilitan a los perros la recuperación de su independencia y, en numerosas ocasiones, superar el trauma emocional vinculado.



Figura 12. Malformación congénita-Hemimelia radial [24].

Existen problemas de autonomía que puede llegar a tener el canino, empezando por el impacto psicológico y emocional que de cierta forma cambia el comportamiento del animal debido a la falta de movilidad, por consiguiente causando ansiedad, depresión y agresividad.

La ausencia de una extremidad en un canino no solo representa una dificultad al caminar o correr, sino que también afecta su equilibrio general. Esta condición limita la interacción del perro con su entorno, ya que actividades como subir escaleras, jugar con objetos o relacionarse con otros animales se vuelven más complicadas debido al reducido rango de movimiento. Estas limitaciones pueden generar estrés físico y emocional, lo que contribuye a un menor nivel de exploración del entorno, aislamiento social y posible fatiga en las patas restantes.

Por ultima instancia, la carga desigual en las extremidades puede ocasionar problemas a largo plazo provocando dolor, lesiones y es posible que llegue a desencadenar una enfermedad ya sea artritis u otros problemas musculoesqueléticos.

#### V-D. Prótesis

V-D1. *Antecedentes de las prótesis en humanos:* Las prótesis poseen un historia que se extiende hasta el tiempo de los egipcios antes de cristo. Durante esa época, el desarrollo de las prótesis inició como una forma de sentimiento de plenitud psico-espiritual, puesto que el hecho de no contar con una parte corporal era recibido con terror. Dentro de sus creencias, un individuo con amputación no solo verá afectada su vida en la Tierra, si no incluso después de la muerte. Estas creencias se evidenciaron con el descubrimiento de momias egipcias, donde utilizaban materiales como cuero para el desarrollo de prótesis de dedo, tal y como se manifiesta en la Figura 13. Posterior a eso, se empezó a considerar el uso de prótesis por su uso cosmético y funcional [25].



Figura 13. Prótesis antigua [26].

Las primeras rehabilitaciones y uso de prótesis documentadas y verificadas inician a partir del 484 antes de cristo, donde un soldado persiano prisionero se amputó la pierna derecha con el fin de escapar, posteriormente su pierna fue reemplazada por una prótesis de madera como puede apreciarse en la Figura 14.

Además de su uso funcional, las prótesis fueron utilizadas estéticamente para esconder deformidades físicas producto de las guerras. Los materiales principalmente utilizados fueron madera, metal y cuero.



Figura 14. Prótesis de pierna [25].

En siglos posteriores, uno de los mayores exponentes en el desarrollo de las prótesis fue Ambroise Paré, un doctor activo durante los años 1530 a 1590. Uno de sus descubrimientos y contribuciones fue el proceso de ligadura de vasos sanguíneos con el fin de prevenir hemorragias durante las amputaciones. Por otro lado, entre sus inventos protésicos más representativos se encuentran una mano mecánica que funcionaba en base a pestillos y resortes, además de una prótesis ubicada por encima de la rodilla que permitía a la persona arrodillarse por medio del uso de una clavija. Tenía una posición equina fija, una rodilla con bloqueo y un arnés de suspensión, características que todavía se utilizan en la actualidad [25].

A partir de estos hechos, grandes representantes en el desarrollo de prótesis empezaron a surgir:

- Pieter Verduyn desarrolló en 1696 la prótesis de rodilla baja sin mecanismo de bloqueo, la cual guarda una notable similitud con las prótesis modernas de muslo con corsé. Al igual que las prótesis con articulación y corsé, estaba compuesta por bisagras externas y un brazaletes de cuero que soportaba el peso. La cavidad del brazaletes estaba forrada con cuero, tenía una cubierta de cobre y un pie de madera.
- James Pott London en 1800 desarrolló una prótesis para el primer Marqués de Anglesey Henry William. Esta prótesis de pierna fue construida utilizando madera, consistía de un eje y una cavidad de madera, una articulación de rodilla de acero y un pie articulado que se controlaba mediante tendones de cuerda de tripa conectados desde la rodilla hasta el tobillo.

En la modernidad se han refinado los procesos médicos en áreas como la anestesia, cirugía (amputaciones) y prótesis. A partir de las dos guerras mundiales y la evolución tecnológica las prótesis han obtenido grandes mejoras cualitativas.

V-D2. *Antecedentes de las prótesis en animales:* Aunque a partir de 1783 era posible observar animales de granja con prótesis de madera, las prótesis en animales comienzan a desarrollarse al mismo tiempo que la medicina veterinaria es más tomada en consideración, siendo esto a partir del siglo 19.

Lamentablemente, la medicina veterinaria era vista bajo distintas lentes sociales, lo cuál dificultó una evolución más óptima de la misma. Por una parte, los animales, especialmente el ganado, eran considerados principalmente como recursos económicos. Su productividad era fundamental para la agricultura y la economía en general. Esto llevó a que se buscara mantener a los animales en condiciones óptimas de salud para maximizar su rendimiento, lo que justificaba la experimentación con tratamientos como las prótesis. A pesar de este cambio hacia una mayor consideración por el bienestar animal, existían críticas hacia el hecho de sentimentalizar a los animales [27].

Es a partir del siglo XX, de la mano de la veterinaria moderna, donde al animal es otorgado un estatus de sujeto en las interacciones clínicas. El enfoque únicamente económico se expande, y la preocupación por los animales de compañía aumenta, perros y gatos tal como se percibe en la Figura 15.



Figura 15. Prótesis canina siglo XX [28].

V-D3. *Prótesis de animales en la actualidad:* Una vez que los animales son considerados agentes merecedores de tratamientos se empieza a establecer un paralelismo entre la medicina humana y la medicina veterinaria. De esta forma, la tecnología médica humana empieza a implementarse en la medicina veterinaria, adaptando procesos quirúrgicos en el desarrollo de prótesis animal [29].

Posteriormente comienza a ser importante tener en cuenta los materiales adecuados, diseño, construcción, alineación, adaptación y rehabilitación. Así mismo se definen claramente los objetivos de las prótesis caninas [29]:

- Mejorar la calidad de vida.
- Evitar deformaciones adicionales y la degeneración de las articulaciones existentes.
- Reducir las discrepancias en la longitud de las extremidades.
- Aumentar los niveles de ejercicio y actividad.
- Proporcionar un medio para participar en terapias de rehabilitación.
- Permitir la ejecución de actividades cotidianas.

De la misma forma, se establecen los parámetros que deben cumplir las prótesis para que sean completamente funcionales [29]:

- Soporte corporal.
- Absorción de impacto.
- Flexibilidad.
- Almacenamiento y retorno de energía.
- Consideración de aspectos biomecánicos (fuerzas de acoplamiento, comprensión de la locomoción cuadrúpeda y la marcha).

*V-D4. Clasificación de prótesis en animales:* Existen 2 tipos de prótesis para animales: exo-prótesis y endo-prótesis. De forma general, las prótesis mayormente encontradas en el mercado son las exo-prótesis. Las exo-prótesis se basan en encajes externos y sistemas de suspensión. Por otro lado, las endo-prótesis hacen uso de conceptos como osteointegración para unir el hueso restante del canino con la prótesis [29].



Figura 16. Exo-prótesis canina [29].

Los componentes más importantes que se encuentran en una exo-prótesis de acuerdo en la Figura 16 son: encaje, sistema de suspensión, estructura amortiguadora de impactos y revestimiento. Sus funciones principales son [29]:

- Encaje: Provee al canino de estabilidad, transmisión adecuada de cargas, comodidad y control efectivo de la movilidad.
- Sistema de suspensión: Sistema de soporte para el encaje.
- Revestimiento: Rellenar las fuerzas residuales con un material suave y cómodo. Entre los materiales más utilizados se encuentran: polímeros elásticos, espuma, silicona, caucho.
- Estructura amortiguadora de impactos: Elemento protésico destinado a reducir las fuerzas de choque generadas durante la ejecución de distintas actividades de alto impacto.

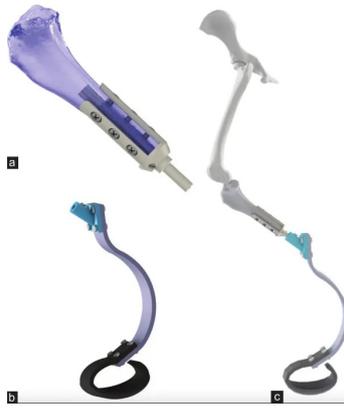


Figura 17. Endo-prótesis canina [29].

Uno de los componentes más importantes de las endo-prótesis conforme se aprecia en la Figura 17 es la osteointegración. La osteointegración se basa en un proceso en el que un implante de metal, generalmente de titanio, se integra directamente con el hueso del animal, sin la necesidad de tejido blando intermedio como soporte. Este enfoque se utiliza principalmente en casos de amputaciones, para proporcionar una conexión estable y funcional entre el cuerpo del perro y la prótesis externa [29].

*V-D5. Diferencias entre órtesis y prótesis:* En muchas ocasiones es posible confundir entre prótesis y órtesis, sin embargo, cada una cumple funciones específicas y dan soporte de diversas formas al individuo que las utilice, sea este humano o no humano. Así mismo, existirán situaciones donde serán requeridos ambos componentes para darle una buena calidad de vida al usuario, este ejemplo puede observarse en la Figura 18 [30].



Figura 18. Prótesis y órtesis canina [30].

Por una parte, tal como se puede ver en la Figura 19 una órtesis es un dispositivo ortopédico que tiene como función dar soporte a una extremidad o parte corporal debilitada mitigando de esta forma el dolor. Las patologías musculoesqueléticas más comunes que requieren del uso de una órtesis en caninos son: contracturas, inestabilidad articular o insuficiencia de ligamento. Las órtesis pueden ser diseñadas para ser rígidas de forma que la articulación quede completamente inmovilizada o pueden ser diseñadas con bisagras de forma que la articulación puede realizar movimientos dinámicos dentro de un rango determinado. Por otro lado, las órtesis también son utilizadas para la protección, posicionamiento y alineación correcta de la extremidad o de un segmento de la misma. Por último, las órtesis pueden ser recomendadas para sean utilizadas de formas temporal (por ejemplo, para facilitar la recuperación de la extremidad) o a largo plazo [30].



Figura 19. Órtesis de cadera canina [31].

A diferencia de las órtesis, las prótesis tienen la función de sustituir una extremidad o una parte de ella, le permiten al canino recuperar su movilidad cuadrúpeda. El caso más óptimo para el uso de una prótesis canina es si queda suficiente miembro residual para lograr una suspensión adecuada. Están diseñadas para ofrecer una estructura que permita distribuir el peso de manera eficiente y brindar protección al miembro residual como es visible en la Figura 20 [30].



Figura 20. Prótesis de extremidad canina [30].

### V-E. Materiales

La impresión 3D ha revolucionado el desarrollo de prótesis al permitir la fabricación de dispositivos personalizados, accesibles y de bajo costo. Gracias a la diversidad de materiales disponibles, es posible diseñar prótesis funcionales que se adaptan a las necesidades específicas de cada usuario. Materiales como PLA y PETG son utilizados por su facilidad de impresión y biocompatibilidad, mientras que TPU permite la creación de componentes flexibles, esenciales para mejorar la comodidad y movilidad. Además, el uso de filamentos solubles como PVA facilita la impresión de estructuras complejas. Esta tecnología no solo reduce los costos de producción, sino que también acelera el desarrollo de soluciones médicas innovadoras y accesibles [32].

Tabla I  
MATERIALES PARA IMPRESIÓN ADITIVA

| Materiales | Flexibilidad (Módulo de elasticidad) | Durabilidad (Resistencia a la tracción) | Biocompatibilidad | Desecho  | Temperatura de impresión (°C) |
|------------|--------------------------------------|---|-------------------|--|-------------------------------|
| ABS        | 1,5 - 2,5 GPa                        | 30 - 45 MPa                             | No                | Difícil de reciclar, no biodegradable                  | 220 - 250                     |
| PLA        | 2,5 - 3,5 GPa                        | 50 - 70 MPa                             | Sí                | Biodegradable, compostable en condiciones industriales | 180 - 220                     |
| PETG       | 1,9 - 2,5 GPa                        | 40 - 55 MPa                             | Sí                | Reciclable, pero no biodegradable                      | 220 - 250                     |
| TPU        | 10 - 50 MPa (muy bajo, muy flexible) | 10 - 30 MPa                             | Sí                | Difícil de reciclar, no biodegradable                  | 200 - 240                     |
| PVC        | 2,5 - 4 GPa                          | 50 - 60 MPa                             | No                | Tóxico al quemarse, difícil de reciclar                | 200 - 220                     |
| Nylon      | 1,0 - 2,5 GPa                        | 60 - 80 MPa                             | No                | Difícil de reciclar, no biodegradable                  | 240 - 270                     |
| PVA        | 0,1 - 0,3 GPa (bajo, flexible)       | 10 - 20 MPa                             | Sí                | Soluble en agua, biodegradable                         | 190 - 220                     |

- ABS: Es un material resistente a impactos y a temperaturas moderadamente altas, lo que lo hace ideal para piezas mecánicas y prototipos funcionales. Sin embargo, es propenso a la deformación durante la impresión si no se usa una cámara cerrada. Su impresión genera vapores que pueden ser tóxicos, por lo que se recomienda trabajar en un área bien ventilada.
- PLA: Es uno de los filamentos más utilizados en impresión 3D debido a su facilidad de uso y acabado superficial suave. No requiere cama caliente, pero puede volverse frágil con el tiempo y no soporta temperaturas elevadas, lo que limita su uso en aplicaciones mecánicas.
- PETG: Combina la facilidad de impresión del PLA con la resistencia del ABS, siendo menos propenso a deformarse. Es ideal para piezas que requieren durabilidad y resistencia química, como envases o componentes expuestos a humedad.
- TPU: Se distingue por su gran elasticidad y resistencia a la abrasión, lo que lo hace ideal para imprimir piezas flexibles como juntas, cubiertas protectoras y calzado. Requiere ajustes específicos en la impresora para evitar atascos debido a su naturaleza flexible.
- PVC: Aunque no es común en impresión 3D debido a su toxicidad al quemarse, es un material ampliamente utilizado en aplicaciones industriales. Su alta rigidez y resistencia lo hacen ideal para estructuras, pero su uso en impresión requiere precauciones especiales.
- Nylon: Es un material de alto rendimiento utilizado en aplicaciones industriales y mecánicas. Tiene excelente resistencia al desgaste y baja fricción, por lo que se usa en engranajes y piezas sometidas a esfuerzo. Sin embargo, absorbe humedad con facilidad, lo que puede afectar la calidad de impresión si no se almacena correctamente.
- PVA: Se utiliza principalmente como material de soporte para impresiones complejas con doble extrusión, ya que se disuelve en agua. No es adecuado para piezas estructurales, pero es indispensable en combinaciones con otros materiales como PLA y PETG.

#### V-F. *Software de diseño y simulación*

El avance en los software de diseño y simulación ha revolucionado el desarrollo de productos y soluciones en diversos campos, desde la ingeniería y la arquitectura hasta la medicina y la manufactura. Estos programas permiten crear modelos virtuales en 2D y 3D, probar su funcionalidad y simular condiciones reales antes de pasar a la fabricación o implementación. Esto no solo reduce costos y tiempos de desarrollo, sino que también mejora la precisión y la calidad del producto final.

En este campo, existen dos categorías fundamentales de software:

1. **Software de Diseño (CAD - Computer-Aided Design):** Estos programas se enfocan en el desarrollo de modelos geométricos exactos que simbolizan objetos físicos. Facilitan el diseño desde componentes sencillos hasta estructuras complejas. Los programas CAD son fundamentales para sectores como el automovilístico, aeroespacial y de diseño de prótesis, dado que proporcionan instrumentos sofisticados para personalizar y perfeccionar los modelos de acuerdo a las demandas particulares [33].
2. **Software de Simulación (CAE - Computer-Aided Engineering):** Además de los CAD, permiten el análisis del comportamiento de los modelos bajo diversas circunstancias. Simulan elementos como la resistencia estructural, la dinámica de los fluidos y la transferencia de calor, elementos esenciales para validar y perfeccionar diseños previo a su producción.

*V-F1. AutoCAD:* Es un programa de diseño asistido por computadora (CAD) creado por Autodesk, muy empleado para elaborar planos técnicos, ilustraciones 2D y modelos 3D. Es un instrumento adaptable que posibilita a arquitectos, ingenieros y diseñadores crear diseños exactos y minuciosos, simplificando la representación y modificación de proyectos en áreas como la arquitectura, la edificación, la ingeniería mecánica y el diseño industrial.

*V-F2. SolidWorks:* Es un software CAD desarrollado por Dassault Systemes, reconocido por su enfoque en el diseño 3D paramétrico y su uso en la ingeniería mecánica y el desarrollo de productos. Este programa permite crear modelos tridimensionales precisos de piezas y ensamblajes, así como generar planos técnicos asociados. Además, incluye herramientas para realizar simulaciones que analizan el rendimiento estructural, térmico y dinámico de los diseños. Su facilidad de uso y versatilidad lo hacen ideal para optimizar procesos de diseño, validación y fabricación en proyectos de ingeniería y manufactura.

*V-F3. Fusion360:* Es un programa para diseño, modelado, simulación y producción en 3D, creado por Autodesk. Se enfoca en el desarrollo de modelos y prototipos para proyectos de ingeniería, diseño industrial y producción. En contraposición a otras aplicaciones CAD, Fusion 360 combina múltiples herramientas en una única plataforma, facilitando la realización de desde el diseño paramétrico hasta el análisis de elementos finitos (FEA) y simulaciones dinámicas. Además, su habilidad para trabajar en conjunto en línea lo convierte en perfecto para equipos de trabajo dispersos. Fusion 360 resulta particularmente beneficiosa en procedimientos de prototipado rápido y creación de productos complejos, mejorando tanto el proceso laboral como la interacción entre diseñadores y productores.

*V-F4. Blender:* Es una aplicación de software libre creada para el modelado, animación y renderizado en 3D. Pese a ser ampliamente utilizado en la producción de contenido artístico, como películas de animación y videojuegos, también es un instrumento eficaz para el diseño de prototipos y productos. Blender incorpora características sofisticadas para el esculpido, la simulación de fluidos y tejidos, además de herramientas de renderizado realista a través de motores como Cycles y Eevee. Su énfasis en la personalización y su comunidad dinámica lo hacen una alternativa adaptable tanto para diseñadores técnicos como para creadores de contenido digital.

V-F5. *Autodesk Maya*: Es un programa de Autodesk que permite modelar, animar y realizar renders en 3D. Se utiliza extensamente en el sector cinematográfico, de videojuegos y de animación debido a sus potentes instrumentos para elaborar modelos minuciosos, efectos visuales y animaciones complejas. Maya se distingue por su habilidad para producir simulaciones sofisticadas, tales como dinámicas de fluidos, partículas y tejidos, y también proporciona un elevado grado de personalización a través de scripting. Su adaptabilidad y excelencia profesional lo hacen una herramienta esencial para proyectos que demandan un diseño visual de gran influencia.

V-F6. *ANSYS*: ANSYS es un programa de simulación de ingeniería muy empleado para examinar y mejorar el desempeño de diseños en diferentes áreas, tales como la ingeniería mecánica, aeroespacial, eléctrica y civil. Este software utiliza técnicas sofisticadas, como el estudio de elementos finitos (FEA) y la dinámica computacional de fluidos (CFD), para valorar elementos como la resistencia estructural, la transferencia de calor, la aerodinámica y el comportamiento electromagnético. ANSYS se distingue por su exactitud y habilidad para replicar situaciones reales, lo que contribuye a disminuir gastos y tiempo en la creación de productos al verificar los diseños previos a la producción.

V-F7. *ZBrush*: ZBrush es un programa de modelado en 3D, escultura y pintura digital que representa un revolucionario paradigma en el campo de la producción de imágenes de síntesis debido a su innovadora estructura de su proceso de creación. Actualmente, ZBrush está en la versión 2021.

V-F8. *COMSOL Multiphysics*: Es un programa sofisticado de simulación que facilita el modelado y análisis de fenómenos físicos complejos en diversas áreas de la ingeniería y la ciencia. Es particularmente reconocido por su habilidad para llevar a cabo simulaciones de múltiples usos, incorporando efectos fusionados como la transferencia de calor, la dinámica de los fluidos, la mecánica estructural y el electromagnetismo. COMSOL se caracteriza por su interfaz fácil de usar y su capacidad para ajustar ecuaciones y parámetros, lo que lo convierte en la opción perfecta para investigadores y diseñadores que se ocupan de problemas concretos y no lineales. Adicionalmente, contiene instrumentos para la elaboración de aplicaciones a medida, simplificando la cooperación y la puesta en marcha de soluciones personalizadas en proyectos de ingeniería y desarrollo de productos.

## VI. MARCO METODOLÓGICO

### VI-A. Enfoque general

El diseño y simulación de la prótesis de pata delantera para perro sigue un enfoque multidisciplinario, que integra conocimientos de ingeniería mecánica, biomecánica, veterinaria y diseño asistido por computadora (CAD). El proceso metodológico está basado en una iteración continua que incluye fases de investigación, diseño conceptual, simulación, prototipado y validación, con un fuerte enfoque en la comodidad, funcionalidad y la adaptación a las necesidades específicas del perro.

### VI-B. Desarrollo de la solución

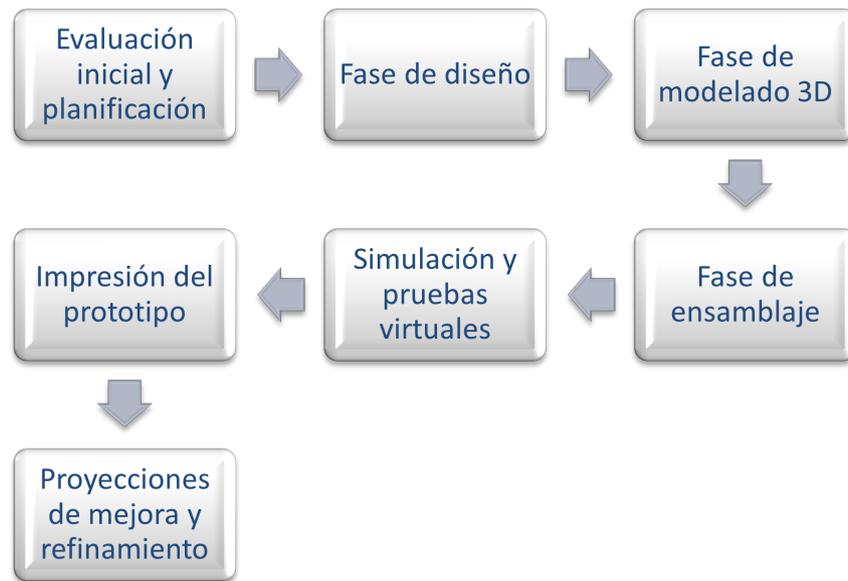


Figura 21. Etapas del proyecto, Autor propio.

Con base a la figura 21 se describirán las fases del diseño y simulación del proyecto.

**VI-B1. Evaluación inicial y planificación:** En esta fase se realiza un análisis de las necesidades específicas del perro, teniendo en cuenta su anatomía, tipo de lesión y requisitos para una movilidad adecuada. Se recopila información sobre el tamaño, peso y nivel de actividad del perro, además de definir las características necesarias para que la prótesis brinde soporte y comodidad. Esta etapa incluye la creación de un plan de acción que cubre el alcance del diseño, el cronograma y los recursos necesarios, asegurando una comprensión clara de los objetivos y limitaciones del proyecto.

**VI-B2. Fase de diseño:** En esta etapa se desarrolla el diseño digital de la prótesis, teniendo en cuenta tanto la funcionalidad como la ergonomía. Utilizando software de diseño en 3D, se crean bocetos en 2D dentro del software estableciendo contornos, orificios y curvaturas clave. Este diseño inicial incluye consideraciones sobre el ajuste, el soporte y los materiales adecuados para lograr comodidad y durabilidad.

**VI-B3. Fase de modelado 3D:** Una vez definidos los bocetos en 2D, el siguiente paso en la fase de modelado 3D consiste en transformar esas representaciones planas en volúmenes tridimensionales dentro del software CAD. Utilizando herramientas de extrusión, revolución y operaciones booleanas, se generan las distintas piezas de la prótesis, asegurando que cada componente tenga la forma y dimensiones adecuadas. Se aplican fileteados y suavizados en los bordes para mejorar la ergonomía y reducir puntos de presión. Además, se agregan detalles

como orificios para ensamblaje, ranuras de ajuste y superficies de contacto optimizadas para su integración con la extremidad del perro. A lo largo del proceso, se realizan ajustes en el diseño para garantizar que las proporciones sean correctas y que las piezas encajen de manera precisa. Finalmente, se refina el modelo tridimensional mediante herramientas de edición de mallas y optimización geométrica, preparando el archivo en formatos compatibles para su posterior fabricación mediante impresión 3D o mecanizado.

*VI-B4. Fase de ensamblaje:* En esta etapa, se importan los componentes individuales y se alinean utilizando restricciones geométricas como coincidencia, paralelismo y concéntricas, asegurando que cada pieza se posicione de manera precisa según el diseño original. Se configuran los grados de libertad de las partes móviles, como las articulaciones, para simular el comportamiento mecánico de la prótesis y evaluar su rango de movimiento. Además, se realizan pruebas de interferencia para identificar posibles colisiones entre piezas y se ajustan tolerancias para garantizar un ensamblaje sin fricciones ni holguras excesivas. También se añaden elementos de fijación, como pernos o ejes, para visualizar cómo se unirán físicamente las piezas. Una vez ensamblado el modelo digital, se genera un análisis visual y funcional del diseño, permitiendo detectar y corregir posibles errores antes de la fabricación.

*VI-B5. Simulación y pruebas virtuales:* Con el modelo 3D desarrollado se realizan simulaciones y pruebas virtuales que permiten evaluar la resistencia, comodidad y seguridad de la prótesis en diferentes situaciones. Las simulaciones ayudan a identificar posibles puntos de presión, debilidades estructurales o problemas de diseño que puedan afectar la efectividad de la prótesis. Esta fase es fundamental para prever el comportamiento de la prótesis sin necesidad de un prototipo físico.

*VI-B6. Impresión del prototipo:* Con el diseño final, se procede a la fabricación de un prototipo físico mediante impresión 3D. Este prototipo permite probar la funcionalidad de la prótesis, verificando que el diseño cumple con los objetivos de movilidad y comodidad.

*VI-B7. Proyecciones de mejora y refinamiento:* A partir de los datos recopilados en las simulaciones y pruebas virtuales, se identifican áreas clave para futuras mejoras en el diseño.

### VI-C. Evaluación inicial

El primer paso en el diseño de la prótesis consistió en identificar y analizar la zoometría del perro como se manifiesta en la Tabla 1, se emplea un sujeto de prueba como se evidencia en la Figura 22 con ambas patas delanteras completas, a partir de este modelo se determinarán las dimensiones y características necesarias para la solución de este proyecto.

- Nombre: Ares
- Edad: 5 años



Figura 22. Sujeto de prueba, Autor propio

Tabla II  
MEDIDAS ZOOMÉTRICAS RECOLECTADAS DEL CANINO

| <b>Medida</b>                 | <b>Valor</b> |
|-------------------------------|--------------|
| Peso                          | 19,30 kg     |
| Altura                        | 40,64 cm     |
| Altura piso-codo              | 27,94 cm     |
| Altura piso-muñón             | 10 cm        |
| Circunferencia del muñón      | 10,40 cm     |
| Circunferencia cerca del codo | 13,74 cm     |
| Ancho de la pata              | 4 cm         |

Este análisis se realizó utilizando herramientas como una cinta métrica que se puede ver en la Figura 23, para medir la longitud y circunferencia de la extremidad afectada, y un goniómetro como se precisa en la Figura 24, que permitió registrar los ángulos de flexión y extensión naturales de las articulaciones cercanas al muñón. Dichas mediciones se tomaron tanto en estado de reposo como en movimiento controlado, asegurando la precisión de los datos necesarios para un diseño ergonómico.



Figura 23. Mediciones con cinta métrica, Autor propio



Figura 24. Mediciones con Goniómetro, Autor propio

La incorporación de una prótesis articulada representa un avance significativo en la mejora de la calidad de vida del perro. Al imitar los movimientos naturales del carpo, la prótesis permite que el animal recupere su movilidad y mejore su postura, reduciendo el impacto sobre las demás extremidades y previniendo posibles lesiones secundarias asociadas con la compensación postural.

El diseño articulado no solo favorece un desplazamiento más equilibrado, sino que también facilita la adaptación del perro al dispositivo, ya que le ofrece una experiencia más natural al caminar, sentarse o estirarse. Asimismo, las modificaciones realizadas al modelo original aseguran un ajuste preciso y ergonómico, promoviendo tanto la funcionalidad como la comodidad del perro.

El diseño de una prótesis para una pata delantera de perro requiere un análisis cuidadoso de las fuerzas que actúan sobre cada extremidad. Para ello, es fundamental entender cómo se distribuye el peso del perro y cómo reaccionan las patas al soportarlo. Este análisis permitirá diseñar una prótesis funcional que no genere incomodidades ni desbalances adicionales en el perro.

Para realizar este análisis, se considera un modelo de cuerpo libre que representa las fuerzas aplicadas en cada una de las cuatro patas del perro. Como se muestra en la Figura 25, este modelo permite visualizar la distribución del peso del cuerpo y las fuerzas de reacción del suelo.

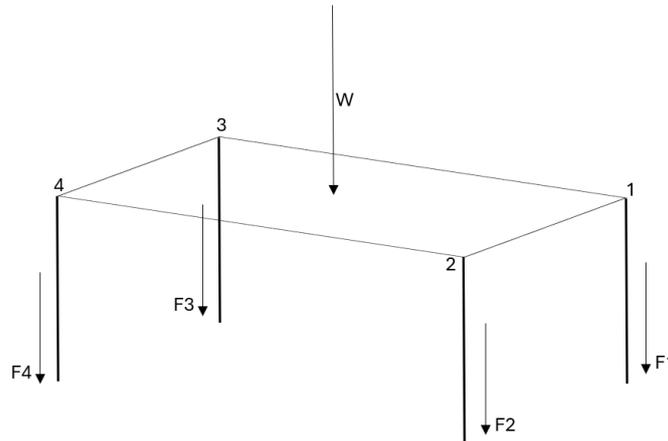


Figura 25. Diagrama de cuerpo libre, Autor propio

Dado que el perro tiene cuatro patas y se asume una distribución uniforme del peso corporal, cada extremidad soportará una fracción equitativa del peso total. El cálculo de estas fuerzas se detalla a continuación.

El peso de un objeto es la fuerza gravitacional que actúa sobre su masa. Se calcula utilizando la ecuación:

$$W = m \cdot g \quad (1)$$

Donde:

- W es el peso en Newtons (N).
- m es la masa en kilogramos (kg).
- g es la aceleración gravitatoria terrestre, que tiene un valor aproximado de  $9,81 \text{ m/s}^2$ .

Sustituyendo los valores proporcionados sabiendo que el peso del perro es 19,30kg:

$$W = 19,30 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$W = 189,14 \text{ N}$$

Este resultado indica que el peso total del perro es de 189,14 N.

El análisis del peso en cada pata del perro no solo es un cálculo matemático, sino que también está fundamentado en principios físicos, específicamente en la primera Ley de Newton (también conocida como la ley de la inercia). Para comprender mejor cómo se distribuye el peso en las patas, es importante analizar la estática del sistema y cómo las fuerzas actúan en equilibrio.

La primera Ley de Newton establece que un cuerpo permanecerá en reposo o en movimiento rectilíneo uniforme a menos que una fuerza externa neta actúe sobre él. Matemáticamente, se expresa como:

$$\sum F = 0 \quad (2)$$

Esto significa que, si el perro está parado sin moverse, todas las fuerzas que actúan sobre él deben estar en equilibrio. En otras palabras, la suma de todas las fuerzas que actúan sobre su cuerpo es igual a cero.

Cuando el perro está de pie, hay dos fuerzas principales en juego:

1. El peso del perro ( $W$ ): Es la fuerza gravitacional que actúa hacia abajo y se calcula de la siguiente forma utilizando la ecuación (1):

$$W = m \cdot g$$

2. Las fuerzas de reacción del suelo ( $F_1, F_2, F_3, F_4$ ): Son las fuerzas que el suelo ejerce hacia arriba en respuesta al peso del perro.

Para que el perro permanezca en equilibrio estático, la suma de las fuerzas en la dirección vertical debe ser igual a cero:

$$\sum F_y = 0 \quad (3)$$

Dado que la única fuerza descendente es el peso  $W$ , y las fuerzas ascendentes son las reacciones del suelo en cada pata, tenemos:

$$W - (F_1 + F_2 + F_3 + F_4) = 0 \quad (4)$$

Reordenando la ecuación:

$$W = (F_1 + F_2 + F_3 + F_4) \quad (5)$$

Esto significa que la suma de las fuerzas de reacción del suelo debe ser igual al peso del perro para que este se mantenga en equilibrio sin moverse.

En muchos mamíferos cuadrúpedos, incluido el perro, el peso del cuerpo no siempre se distribuye de manera completamente uniforme entre las patas delanteras y traseras. Sin embargo, en este análisis inicial, asumimos una distribución equitativa del peso entre las cuatro patas.

Si asumimos que cada pata soporta una fracción igual del peso total del perro, entonces cada una de las cuatro patas recibe:

$$(F1 + F2 + F3 + F4) = \frac{W}{4} \quad (6)$$

Sustituyendo el valor del peso total del perro que ya conocemos:

$$(F1 + F2 + F3 + F4) = \frac{189,14 \text{ N}}{4}$$

$$(F1 + F2 + F3 + F4) = 47,285 \text{ N}$$

Este cálculo indica que cada pata soporta aproximadamente 47,29 N de peso.

#### VI-D. Fase de diseño

Para el diseño de la prótesis y con base en las necesidades del perro, en las medidas y evaluación inicial, se comenzó con la creación de bocetos como se observa en la figura 26, estos bocetos ayudaran a tener una mejor idea a la hora de hacer el diseño en el software que se elegirá a medida que se obtenga un boceto final.

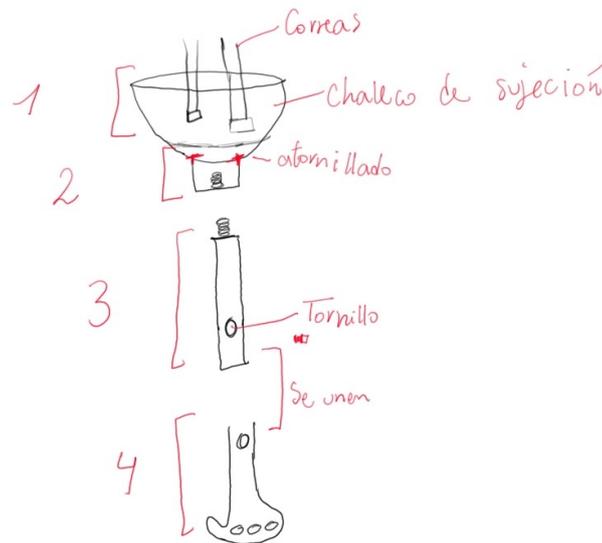


Figura 26. Boceto 1, Autor propio

El muñón del perro se decidió que sea a la altura del carpo del perro, lo que presentó desafíos específicos en cuanto al ajuste y la funcionalidad de la prótesis. Inicialmente, se evaluó si el diseño incluiría o no una articulación. Tras la investigación precedente del análisis de las necesidades del animal y las limitaciones biomecánicas, se optó por un diseño articulado, ya que permitiría replicar el movimiento del carpo (muñeca), proporcionando mayor naturalidad en sus actividades cotidianas, llegando a un boceto final tal como se aprecia en la Figura 27.

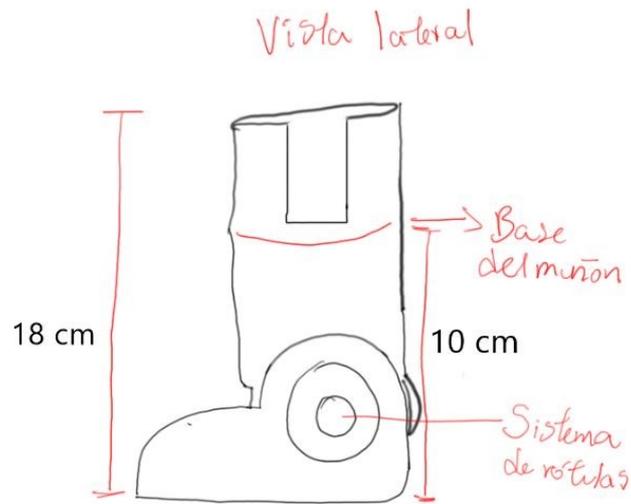


Figura 27. Boceto Final, Autor propio

El diseño de la prótesis se basó en un modelo preexistente, el cual sirvió como referencia para establecer una estructura inicial. Sin embargo, se realizaron modificaciones significativas en cuanto a las medidas, los mecanismos y la parte estética, con el objetivo de personalizarla según las necesidades específicas del perro. Estas adaptaciones incluyeron ajustes en los componentes articulados para garantizar un rango de movimiento adecuado y cambios en el diseño externo para mejorar la comodidad y funcionalidad [34].

La prótesis articulada fue concebida para replicar el movimiento del carpo, permitiendo que el perro recupere la capacidad de caminar, sentarse, estirarse y realizar otras actividades esenciales de manera fluida. Este enfoque busca garantizar que el dispositivo no solo cumpla con los requisitos funcionales, sino que también ofrezca un diseño estéticamente agradable y cómodo.

La fabricación de la prótesis se planteó mediante impresión 3D, lo que permitió desarrollar un dispositivo personalizado y ajustado a las necesidades del perro. Los materiales seleccionados incluyeron PLA, ABS y PETG, cada uno elegido por sus características específicas. El PLA, por su rigidez y facilidad de impresión, fue considerado para los prototipos iniciales. El ABS, gracias a su resistencia al impacto y durabilidad, se propuso para las piezas sometidas a mayores exigencias mecánicas. Finalmente, el PETG, con su flexibilidad y resistencia química, fue elegido para componentes que podrían estar expuestos a mayor desgaste o condiciones externas más agresivas.

El mecanismo diseñado para imitar el movimiento del carpo se basó en un sistema de rótulas como se aprecia en la Figura 28, desarrollado específicamente para este proyecto. A diferencia del diseño de referencia, que utilizaba un sistema de engranajes, se decidió optar por rótulas debido a su capacidad para proporcionar movimientos multidireccionales y fluidos, replicando con mayor precisión la funcionalidad del carpo. Este enfoque ofreció una solución más sencilla y eficiente para el propósito biomecánico del dispositivo.



Figura 28. Sistema de rótulas, Autor propio

Las dimensiones de las rótulas fueron definidas tomando en cuenta las medidas específicas del perro, capturadas durante la etapa de análisis de zoometría. Este diseño desde cero garantizó que el mecanismo se integrara de manera óptima con la prótesis, permitiendo que el animal realice movimientos naturales al caminar, sentarse y estirarse, mejorando su adaptación al dispositivo.

Para el diseño de la prótesis se utilizó el software Fusion 360, se establecieron las dimensiones y parámetros precisos de las piezas, asegurando que las medidas obtenidas del perro se reflejarán correctamente en el modelo digital.

Las principales herramientas utilizadas dentro del desarrollo del boceto de la pata, como se puede apreciar en la figura 29, fueron:

- Circunferencia: permitió replicar los cilindros del sistema de rótulas de forma que la articulación pueda ser replicada de forma adecuada.
- Rectángulo: Permitted establecer la forma inicial de la pata que posteriormente sería empalmada con el de fin de diseñar una estructura parecida a una pata de perro.
- Empalme: Permitted realizar arcos en la intersección de las líneas rectas encontradas en el rectángulo.
- Coincidente: Se utilizó para asegurar que todos los puntos del boceto coincidan entre sí, de forma que no hayan problemas durante el modelado 3D.

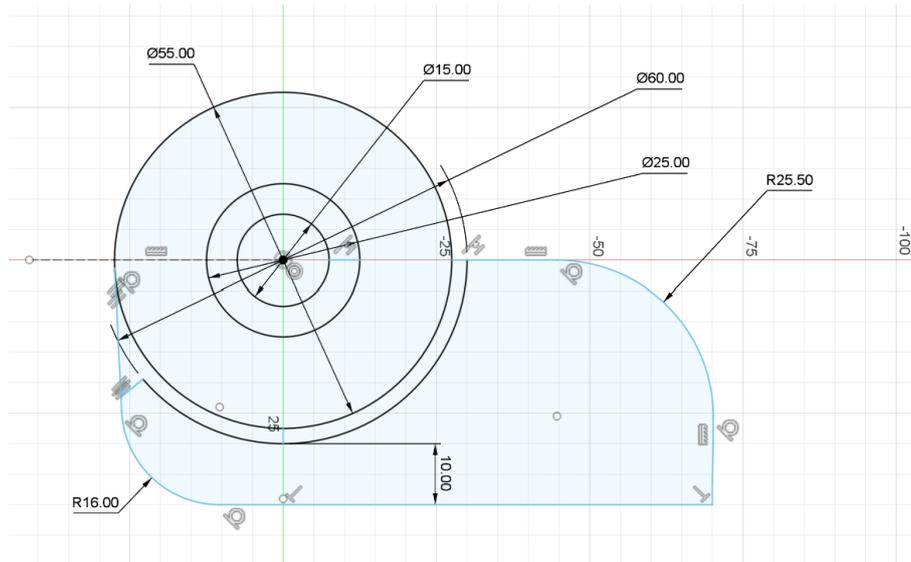


Figura 29. Fusion 360, Autor propio

Por otro lado, tal como se observa en la figura 30, las principales herramientas utilizadas dentro del desarrollo del boceto de la estructura donde irá el muñón fueron:

- Circunferencia: permitió replicar los espacios cilíndricos del sistema de rótulas de forma que la articulación pueda ser replicada de forma adecuada. Así mismo, esta herramienta permitió bocetear el espacio donde irá el muñón del canino.
- Rectángulo: Permitted establecer la forma inicial del muñón que posteriormente sería empalmada con el de fin de diseñar una estructura adecuada para asegurar el muñón del perro.
- Empalme: Permitted realizar arcos en la intersección de las líneas rectas encontradas en el rectángulo.
- Coincidente: Se utilizó para asegurar que todos los puntos del boceto coincidan entre sí, de forma que no hayan problemas durante el modelado 3D.
- Boceto: Para el desarrollo de esta pieza fue necesario realizar 2 bocetos sobre la misma pieza. El primero para establecer la estructura de la pieza y el segundo para establecer el espacio donde el muñón del perro se asegurará.

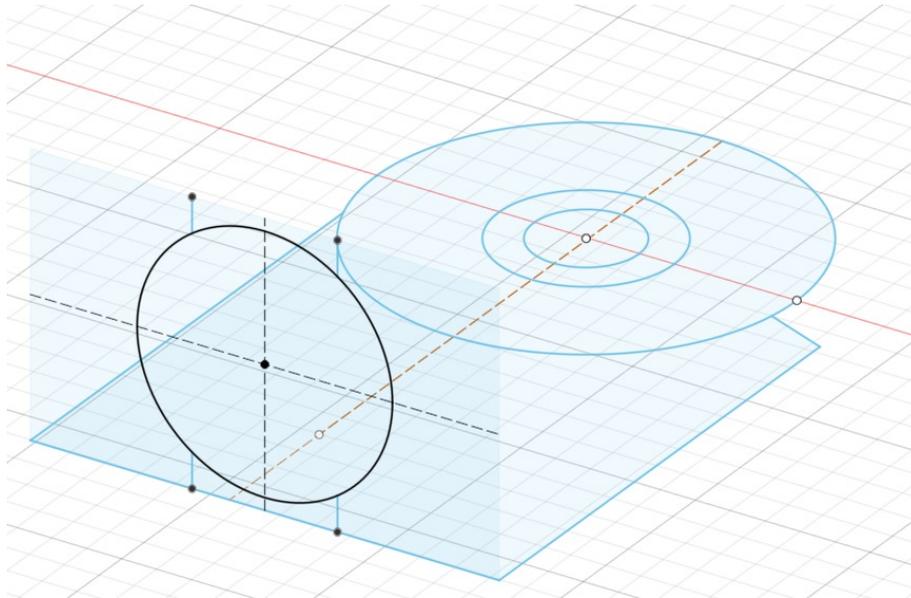


Figura 30. Boceto de estructura para muñón, Autor propio

#### VI-E. Fase de modelado 3D

Posteriormente, con los bocetos diseñados en el software, se prosiguió con el modelado en 3D, haciendo pieza por pieza tal como se puede observar en la Figura 31. La herramienta de mayor uso durante el modelado 3D fue la extrusión. Se llevó a cabo una extrusión tomando en consideración cada zona de las piezas. La estructura final de cada pieza tendrá un ancho de 4 cm en su totalidad, esto quiere decir que, una vez que ambas piezas se ensamblen tendrán un ancho de 4 cm en conjunto, siendo esta medida utilizada tomando en consideración el ancho de la pata del perro, el sistema de rótulas y el espacio necesario para el muñón del perro.

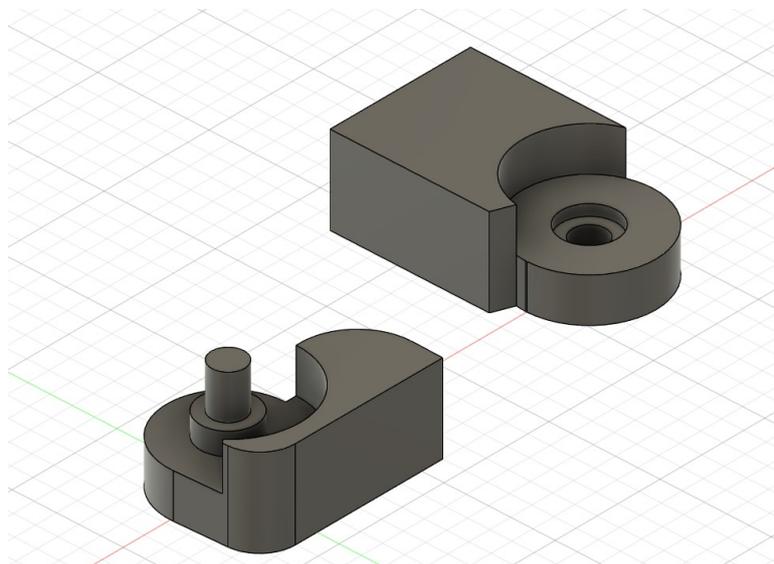


Figura 31. Uso de herramienta extrusión, Autor propio

Uno de los pasos finales llevado a cabo durante el modelado 3D fue trabajar en el segundo boceto que se realizó en la estructura del muñón, con el fin de modelar el espacio del muñón y la forma hueca esférica que tendrá su base. Para ello, se dibujó un círculo en la base superior de la pieza, teniendo en cuenta la circunferencia del muñón y la circunferencia cerca del codo. Como se observa en la figura 32, una vez dibujado el círculo considerando las medidas adecuadas, se procedió a realizar una extrusión.

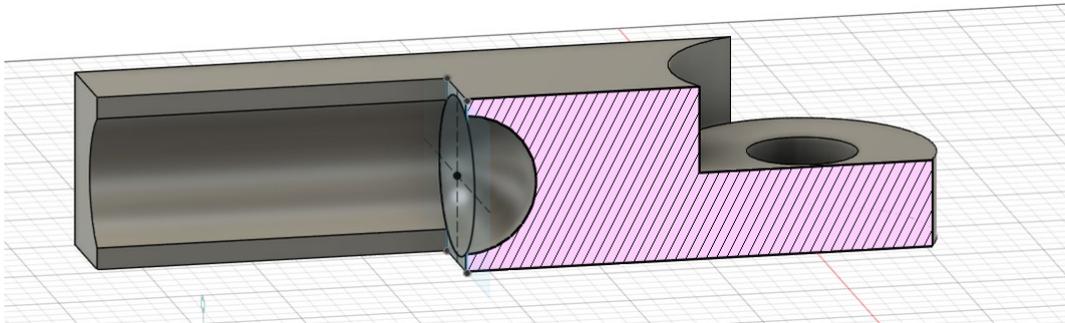


Figura 32. Uso de herramienta extrusión para modelado del espacio del muñón, Autor propio

Para concluir, se llevaron a cabo unas últimas modificaciones durante la fase de modelado 3D, dichas modificaciones fueron pequeñas pero de gran importancia. Una de ellas, fue realizar un tope en la cara trasera de la pata, con el fin de limitar el rango de movimiento de la articulación una vez que las piezas se ensamblen. Para llevar a cabo este paso fue necesario iniciar un boceto en el espacio donde se ubicará el tope. Luego, se estableció el área rectangular que representará el tope entre la pieza de la pata y la pieza donde irá ubicado el muñón. El boceto tope puede verse representado en la figura 33. Últimamente, se procedió a extruir él area rectangular.

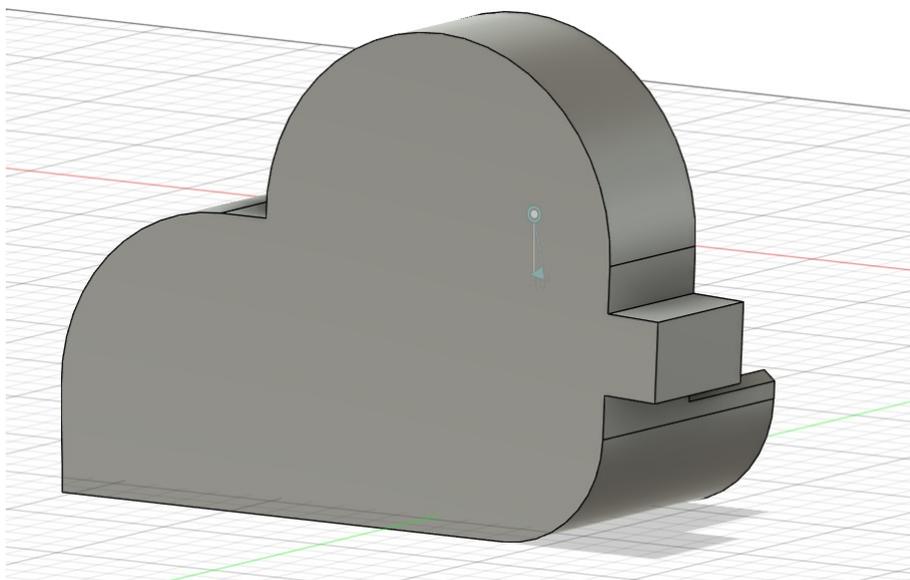


Figura 33. Tope para limitar movimiento de articulación, Autor propio

La segunda modificación realizada fue añadir los espacios por dónde se ubicarían los belcros para asegurar la prótesis al perro. Como se observa en la figura 34, dichos espacios se colocaron en caras anterior y posterior de la pieza donde va el muñón.

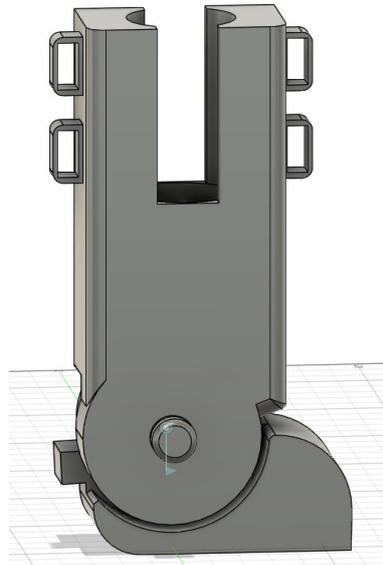


Figura 34. Espacios para asegurar la prótesis, Autor propio

Por último, en el cilindro más largo de la pieza de la pata, se realizó una hendidura de 2 mm de ancho y 2 mm de profundidad a lo largo de todo el cilindro. Para realizar la hendidura se tomó como se referencia una de las caras de la pieza para el muñón, y se boceteó un círculo de 13 mm de diámetro, 2 mm menos que el diámetro del cilindro. Posteriormente, se procedió a realizar una extrusión que cortó al cilindro, tal y como se muestra en la figura 35. Es en esta hendidura donde irá ubicada una vincha de retención de la misma profundidad. Dicha vincha asegurará el ensamblaje de las piezas y las mantendrá en su lugar evitando que se separen.

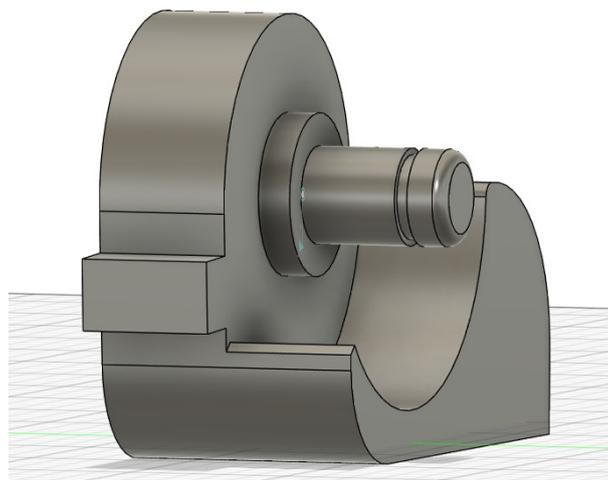


Figura 35. Hendidura para vincha de retención, Autor propio

## VI-F. Fase de ensamblaje

Una vez realizadas la fase de modelado 3D, se procedió con la fase de ensamblaje. El primer paso a tomar durante el proceso de ensamblaje en Fusion360 es seleccionar como componentes las piezas creadas durante el modelado 3D. Esta herramienta se encuentra ubicada en el apartado de ensamblaje en la barra de herramientas. Una vez seleccionadas las piezas, se hará un componente a partir de cada una de ellas, como se muestra en la Figura 36, donde se evidencia la creación del componente PATA y el componente MUÑÓN.

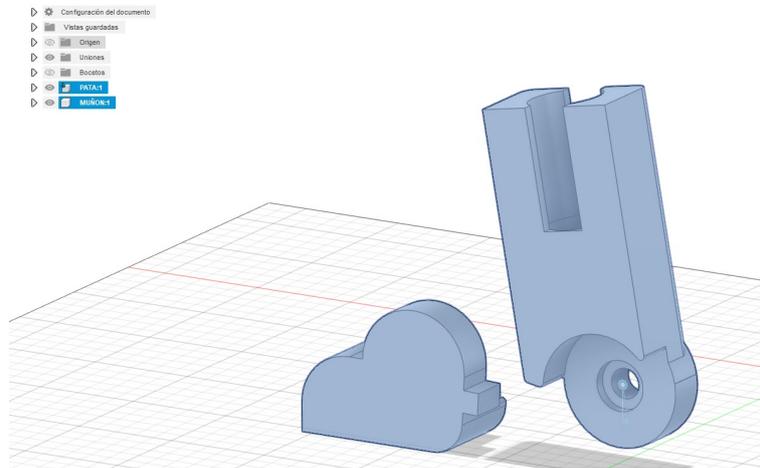


Figura 36. Selección de componentes de ensamblaje, Autor propio

La importancia de seleccionar las piezas como componentes radica en que se habilita la capacidad de aplicar restricciones de ensamblaje (joints) para definir cómo interactúan las piezas, que será el siguiente paso de esta fase de ensamblaje. Al momento de determinar la unión se optó por la unión “entre dos caras” que ofrece Fusion360. Dicha unión consiste en seleccionar dos caras de cada pieza para hacerlas entrar en contacto, a la vez que se selecciona una opción de forzar que se usa para ajustar el comportamiento de la unión, como se evidencia en la Figura 37.

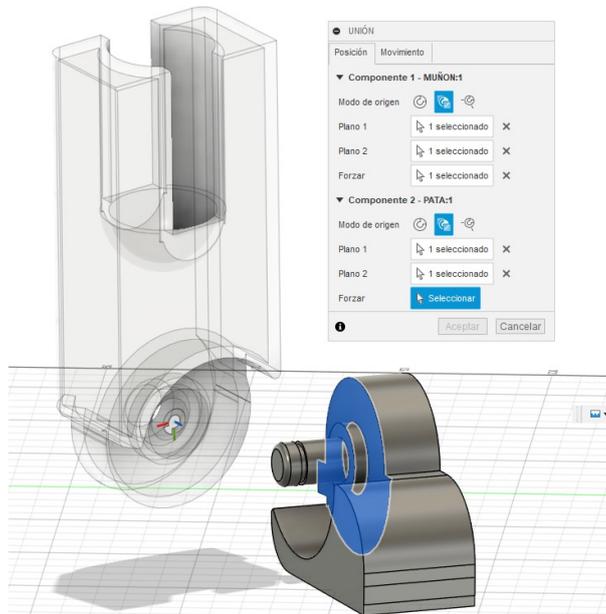


Figura 37. Unión de los componentes, Autor propio

Una vez realizada la selección de caras y los elementos de cada pieza a forzar su unión, se obtiene el resultado observado en la Figura 38.

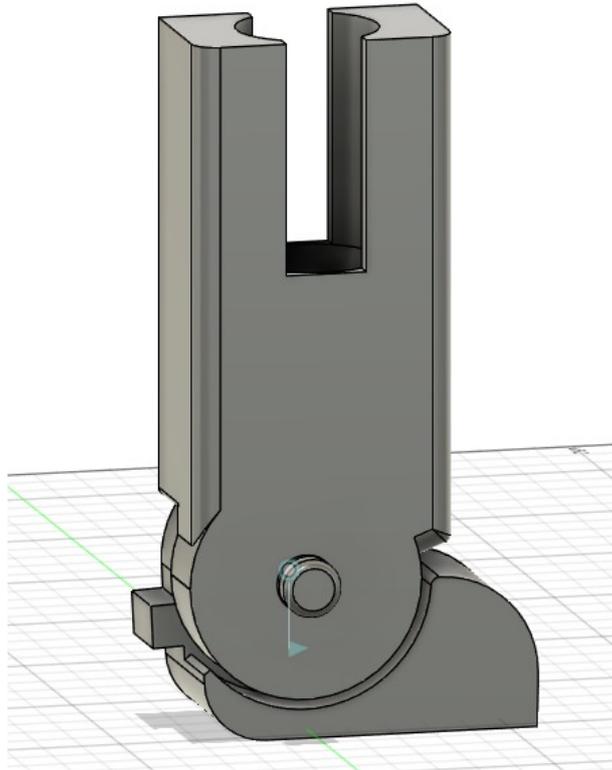


Figura 38. Componentes de prótesis unidos, Autor propio

El siguiente paso consiste en determinar el movimiento que harán los componentes ahora que se encuentran ensamblados. Dentro de la pestaña de Unión es posible encontrar el apartado Movimiento y Límites de movimiento de unión, como se evidencia en la Figura 39, es aquí donde se selecciona que el tipo de movimiento que realizará la prótesis es el de Revolución, haciendo dicho movimiento en el eje Z.

A continuación, será importante establecer los Límites de movimiento de unión en la misma pestaña. El ángulo mínimo establecido es de -10 grados, que permitirá el movimiento de la pieza del muñón hacia adelante. Por otro lado, el ángulo máximo establecido es de 45 grados, lo que permitirá el movimiento de la pieza del muñón hacia atrás justo hasta tocar el tope.

La elección de estos ángulos se fundamentan en la investigación previamente realizada sobre el rango de movimiento de la articulación del carpo de pata delantera de los caninos.

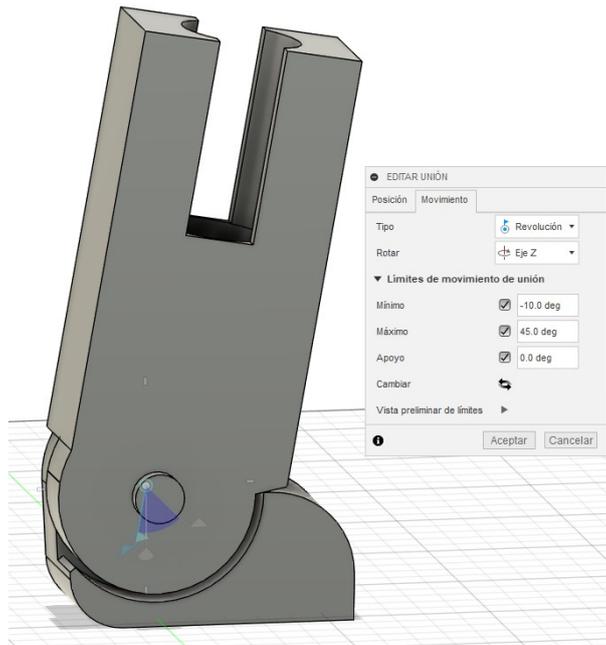


Figura 39. Movimiento y Límite de movimiento de unión, Autor propio

Una vez realizado el ensamblaje y determinada la unión de la prótesis, fue requerido escoger el material de la misma. En este caso, se optó por PETG por sus características previamente mencionadas: biocompatibilidad, resistencia a la tracción, módulo de Young, etc. Lamentablemente, el software Fusion360 no cuenta con el PETG como material dentro sus librerías, por lo que fue necesario descargar de internet el material e importarlo al software, habiendo evaluado las propiedades físicas y mecánicas obtenidos del material descargado. A continuación, en la Figura 40, se muestran dichas propiedades, las cuales serán importantes para efectuar posteriores simulaciones.

| ▼ Térmico básico                   |                           |
|------------------------------------|---------------------------|
| Conductividad térmica              | 1,000E-01 Con (m · K)     |
| Calor específico                   | 1,297 J / (G · ° C)       |
| Coefficiente de dilatación térmica | 0,702 µm / (m · °C)       |
| ▼ Mecánico                         |                           |
| Módulo de Young                    | 2,590 GPa                 |
| Coefficiente de Poisson            | 0,38                      |
| Módulo cortante                    | 1375,000 MPa              |
| Densidad                           | 1,260 g / cm <sup>3</sup> |
| Coefficiente de amortiguamiento    | 0,00                      |
| ▼ Resistencia                      |                           |
| Límite de elasticidad              | 47,600 MPa                |
| Resistencia máxima a tracción      | 41,800 MPa                |

Figura 40. Propiedades térmicas, mecánicas y resistencia del PETG, Autor propio

Habiendo determinado el material a utilizar, se procede a aplicar dicho material al ensamblaje, tal y como se evidencia en la Figura 41.

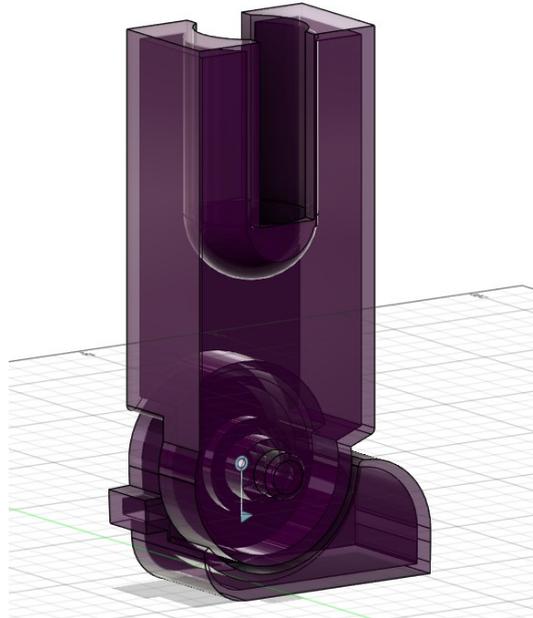


Figura 41. Modelado 3D de las piezas ensambladas con material PETG aplicado, Autor propio

Previo a realizar las simulaciones de fatiga, factor de seguridad y tensión de Von Mises, fue de vital importancia determinar el vaciado que tendría la prótesis. Este vaciado contribuye de varias formas al desarrollo de la prótesis final. Por un lado, optimiza la cantidad de material utilizado, lo que disminuye el peso total de la prótesis, una prótesis más ligera facilita el movimiento del animal y reduce la fatiga muscular. Así mismo, al eliminar material innecesario, se reduce el costo de producción, se minimiza el desperdicio de material y se hace más eficiente el proceso de fabricación. El vaciado aplicado fue de un espesor interno de 3 mm como se observa en la Figura 42.

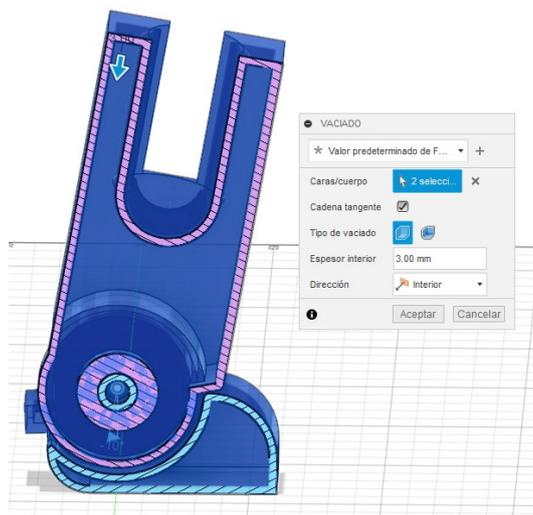


Figura 42. Espesor interno de las piezas, Autor propio

Para concluir con la fase de ensamblaje, el modelo final exhibe una combinación de formas cilíndricas y planas, con superficies redondeadas y ranuras estratégicamente ubicadas, facilitando el ensamblaje por medio de la herramienta “entre dos caras”. La sección cilíndrica principal presenta un eje central que permite la rotación de la articulación, asegurando que la prótesis facilite un movimiento más natural para el animal en los ángulos establecidos.

Este componente constituye la base de la articulación de la prótesis, proporcionando el soporte necesario para conectar la parte inferior y superior del mecanismo. Su estructura permite un acoplamiento eficiente con el resto de las piezas, asegurando una integración mecánica sólida.

El eje visible en la parte frontal del diseño tiene una función clave en la movilidad de la prótesis, sirviendo como pivote para la articulación. El diseño está pensado para trabajar en conjunto con un mecanismo de sujeción (con ayuda de una vincha de retención) que garantice estabilidad sin comprometer la libertad de movimiento del perro.

#### *VI-G. Simulación y pruebas virtuales*

En este análisis se presentan diversas simulaciones de esfuerzos realizadas en Fusion 360 para evaluar el comportamiento estructural de una pieza diseñada en PETG, material con un límite de elasticidad de 47,6 MPa y una resistencia máxima a la tracción de 41,8 MPa. La carga aplicada en la simulación es de 200 N, y se analizan los resultados de la tensión de von Mises, la fatiga y el factor de seguridad.

El criterio de von Mises se emplea ampliamente en las pruebas de simulación debido a su efectividad para predecir el comportamiento de materiales dúctiles bajo cargas complejas. Este modelo, basado en la teoría de la elasticidad, es particularmente útil cuando las cargas aplicadas no son puramente normales o de corte, sino que presentan una combinación de ambas. El criterio de von Mises se enfoca en el análisis del estado de tensiones principales, permitiendo determinar el punto exacto en el cual un material comenzará a experimentar deformación plástica. Debido a su capacidad para representar de manera adecuada las condiciones de fluencia, este modelo se ha consolidado como una herramienta fundamental en la simulación de estructuras y componentes en ingeniería, proporcionando una evaluación precisa de la seguridad y la integridad de los materiales en diversas condiciones de carga.

Previo a llevar a cabo las simulaciones y análisis fue necesario determinar una serie de elementos iniciales: cargas, restricciones, contactos y generación de una vista de malla. La carga como ya se mencionó, fue de 200N, esto debido al deseo de que la prótesis diseñada sea capaz de soportar todo el peso del animal en vez de una sola pata, con el fin de prevenir cualquier situación donde la integridad de la prótesis y el canino se vean comprometidas. Por otro lado, la restricción permitió bloquear la cara inferior de la pata para simular su contacto con el suelo, como se muestra en la Figura 43.

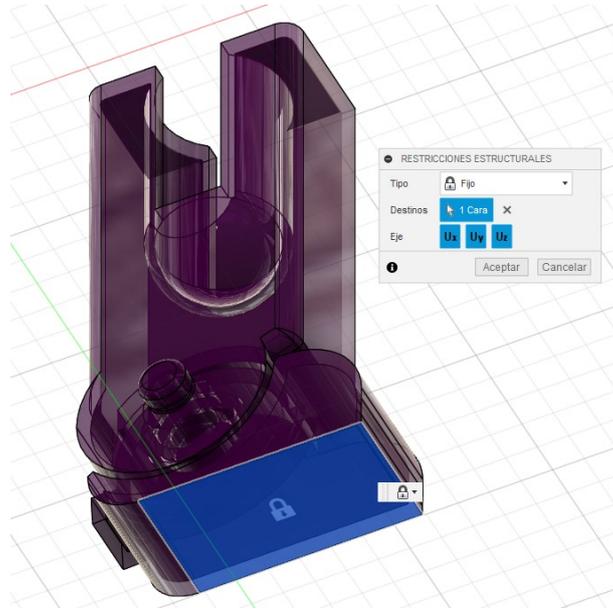


Figura 43. Restricción de la cara inferior de la pata, Autor Propio

El siguiente paso, fue generar los contactos existentes entre las piezas, definir esto fue crucial para obtener resultados realistas y confiables. Sin contactos adecuados, la simulación puede ignorar interacciones clave o generar errores en la distribución de esfuerzos y tensiones. Así mismo, estos contactos guardan conexión con el tipo de unión seleccionada en la fase de ensamblaje, debido a que las caras seleccionadas se encuentran ahora en contacto, como se puede distinguir en la Figura 44.

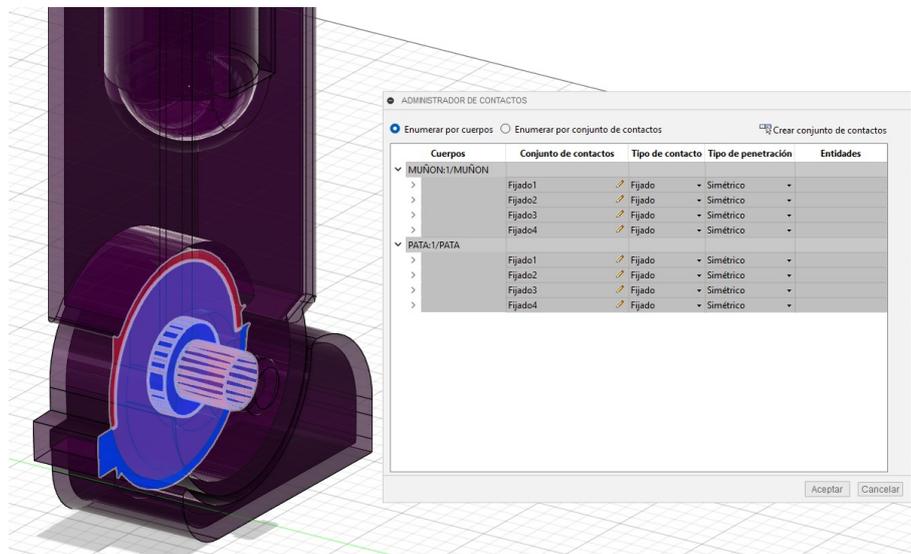


Figura 44. Restricción de la cara inferior de la pata, Autor Propio

Por último, como se aprecia en la Figura 45 se genera la vista de malla con la finalidad de determinar con mayor exactitud las zonas que presenten mayor tensión, fatiga o factor de seguridad bajo. Posteriormente, se prosiguió con las simulaciones, pruebas y análisis respectivo para la tensión, factor de seguridad y fatiga.

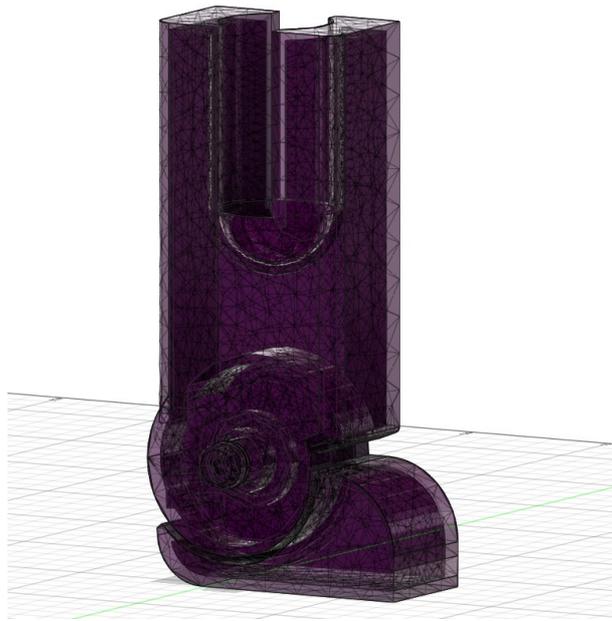


Figura 45. Restricción de la cara inferior de la pata, Autor Propio

- Prueba de tensión de von Mises:

La Figura 46 muestra un análisis de tensiones de von Mises con un ángulo recto realizado en Fusion 360 sobre el diseño de la prótesis para perro. Se ha aplicado una carga en la parte superior, indicada por una flecha azul, y el modelo ha sido mallado con 21.529 nodos y 11.041 elementos. La escala de colores representa la distribución del esfuerzo, donde las zonas azules tienen baja tensión y las rojas muestran valores más altos, alcanzando un máximo de 12,06 MPa un mínimo de 4,82E-07 MPa.

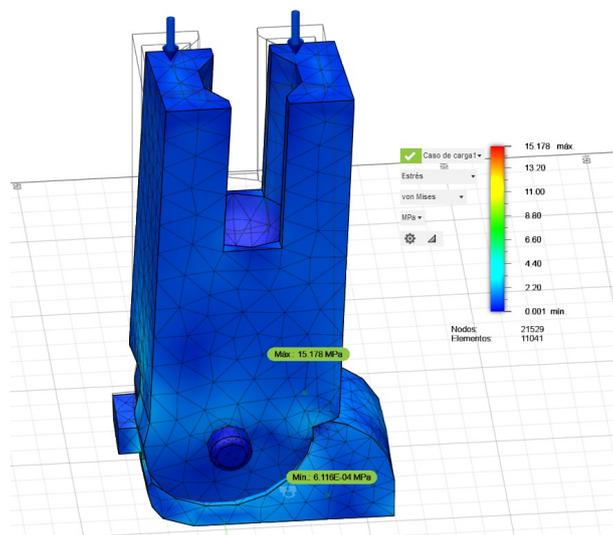


Figura 46. Simulación de tensión de las piezas ensambladas en el ángulo de 90°, Autor propio

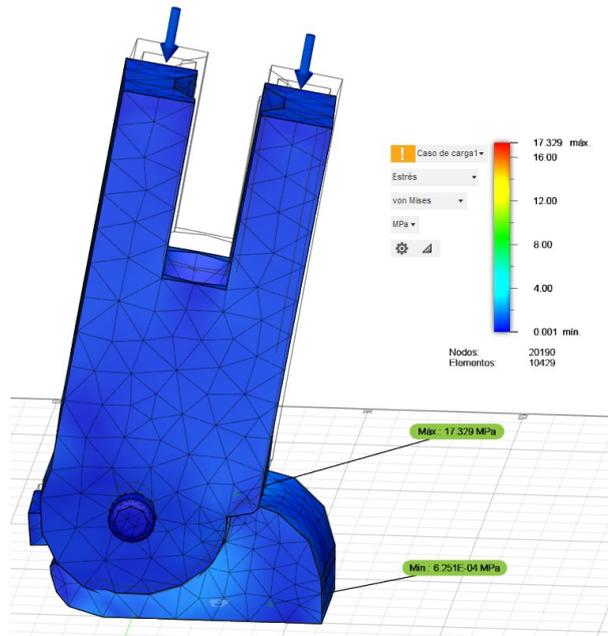


Figura 47. Simulación de tensión de las piezas ensambladas en el ángulo de 10°, Autor propio

Continuando con la Figura 47 se realiza la prueba de tensión de von Mises con un ángulo de 10°, se aplica la carga en la parte superior como indica la flecha azul, el modelo tiene un mallado de 20.190 nodos y 10.429 elementos. Se muestra el maximo de esfuerzo alcanzado de 17,32 MPa y el minimo de 6,25E-04 MPa.

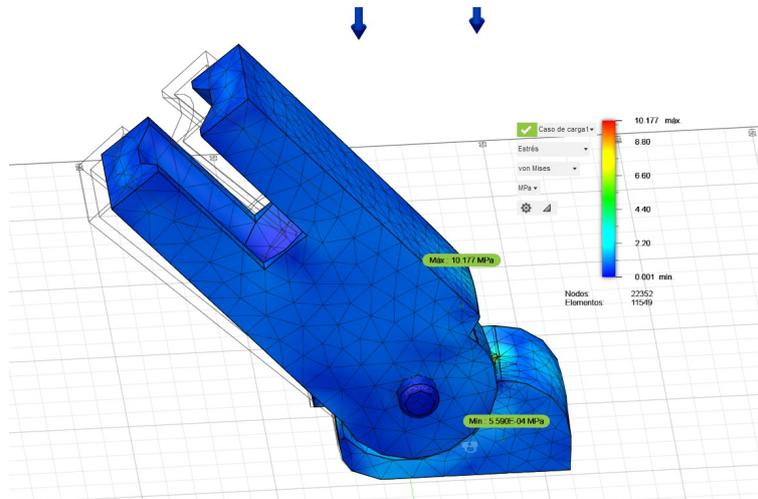


Figura 48. Simulación de tensión de las piezas ensambladas en el ángulo de 135°, Autor propio

Por último, en la Figura 48 se realiza la prueba de tensión de von Mises en un ángulo de 135°, se vuelve a aplicar la carga en la parte superior, se refleja un mallado de 22.352 nodos y 11.549 elementos. En esta ocasión el esfuerzo máximo fue de 10,177 MPa y el mínimo de 5,59E-04 MPa.

- Prueba de Factor de Seguridad:

El factor de seguridad (FS) es una medida que indica cuán sobredimensionado está un diseño en relación con la carga que soportará.

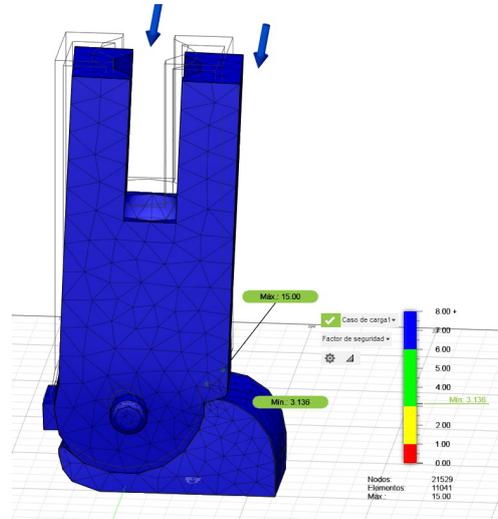


Figura 49. Simulación de Factor de Seguridad, Autor propio

La Figura 49 muestra la prueba de factor de seguridad en Fusion 360, una simulación con 21.529 nodos y 11.041 elementos, evaluando la resistencia de la pieza bajo una carga de 200 N. La escala de colores indica que el FS varía entre 3,136 y 15.

- Prueba de Fatiga:

Las siguientes figuras muestran los resultados de una simulación de fatiga realizada en SOLIDWORKS para evaluar el desempeño de la prótesis articulada diseñada para la pata delantera de un perro. Este análisis permitió determinar la vida útil de la pieza frente a cargas cíclicas repetitivas, teniendo en cuenta que estará sometida a esfuerzos constantes debido al movimiento del animal, la carga aplicada es de 47.285 N, que corresponde a la fuerza real que soportará la prótesis durante su uso.

Para la simulación, se utilizó PETG como material de fabricación, debido a sus buenas propiedades mecánicas, alta resistencia al impacto y flexibilidad, características clave para garantizar la durabilidad y funcionalidad de la prótesis en un entorno dinámico.

En la Figura 50, que representa el porcentaje de daño acumulado, se observa una distribución uniforme con valores entre 10 % y 10,96 %, lo que indica que la pieza no experimenta un deterioro crítico en ninguna zona específica. La predominancia del color azul en la escala sugiere que el material mantiene su integridad estructural a lo largo del tiempo. No obstante, la bifurcación superior es la región con el mayor porcentaje de daño, reforzando la idea de que esta es la zona más vulnerable del diseño.

El análisis de fatiga y daño de la pieza, considerando una carga de 47,28 N y el material PETG, muestra un comportamiento estructural aceptable, aunque con ciertas áreas que podrían mejorarse. En la Figura 51, se observa la distribución de la vida útil en ciclos, con valores que oscilan entre 912.700 y 1.000.000 ciclos. La mayor parte de la pieza se encuentra en la zona de color rojo, lo que indica una alta resistencia a la fatiga. Sin embargo, la bifurcación superior presenta la menor vida útil, lo que sugiere que esta zona experimenta mayores concentraciones de esfuerzo.

El PETG es un material con buena resistencia mecánica y cierta flexibilidad, lo que le permite absorber esfuerzos sin fracturarse de inmediato. Sin embargo, su rigidez es inferior a la de materiales como el ABS o el Nylon reforzado, lo que implica que, aunque pueda soportar una carga elevada, es susceptible a deformaciones progresivas bajo esfuerzos cíclicos prolongados. A pesar de esto, la vida útil obtenida es relativamente alta, lo que sugiere que la pieza podría desempeñar su función sin fallos prematuros, siempre que no se someta a condiciones extremas.

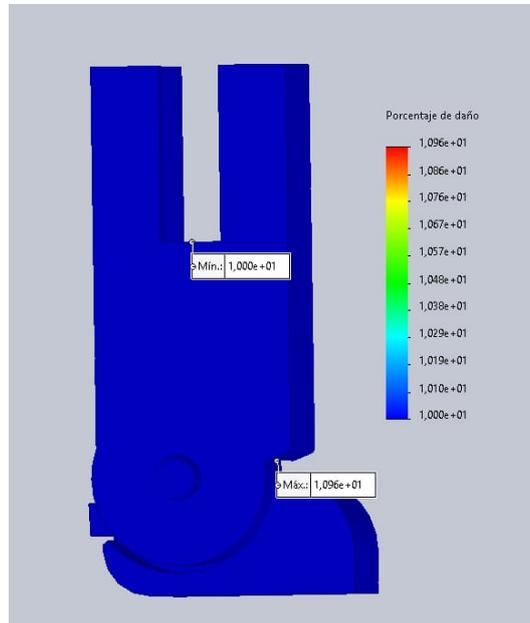


Figura 50. Simulación de Fatiga - Porcentaje de daño, Autor propio

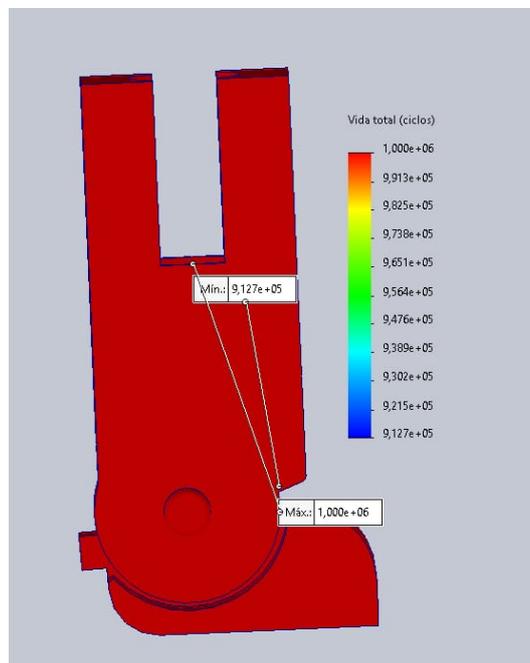


Figura 51. Simulación de Fatiga - Vida útil en ciclos, Autor propio

## VI-H. Impresión de prototipo

Con el diseño finalizado y las simulaciones realizadas se procede a exportar el archivo para imprimirlo en 3D. El programa que se utiliza tiene el nombre de Artillery 3D tal como se aprecia en las Figuras 52 y 53.

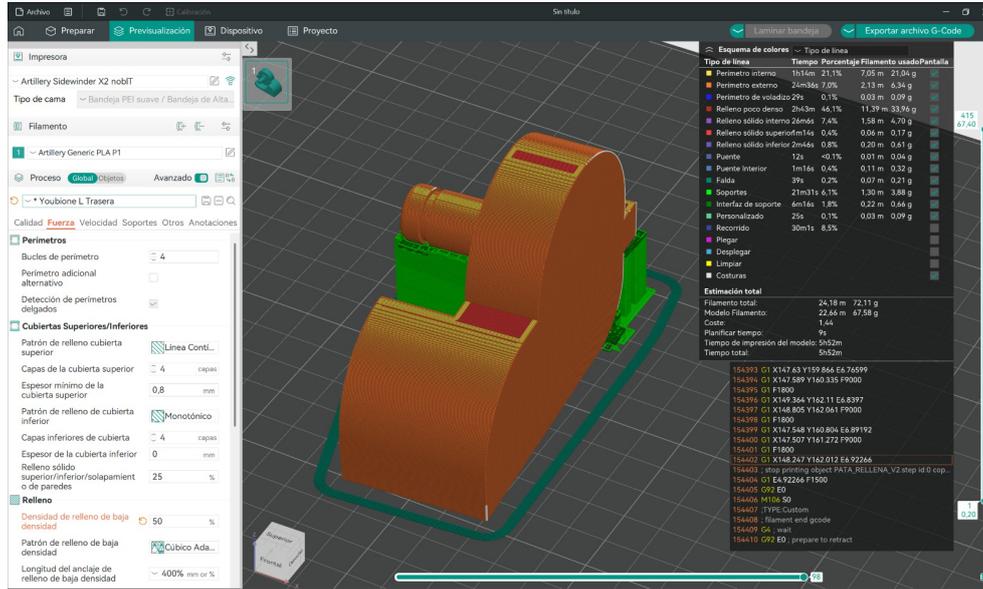


Figura 52. Artillery 3D, Autor propio

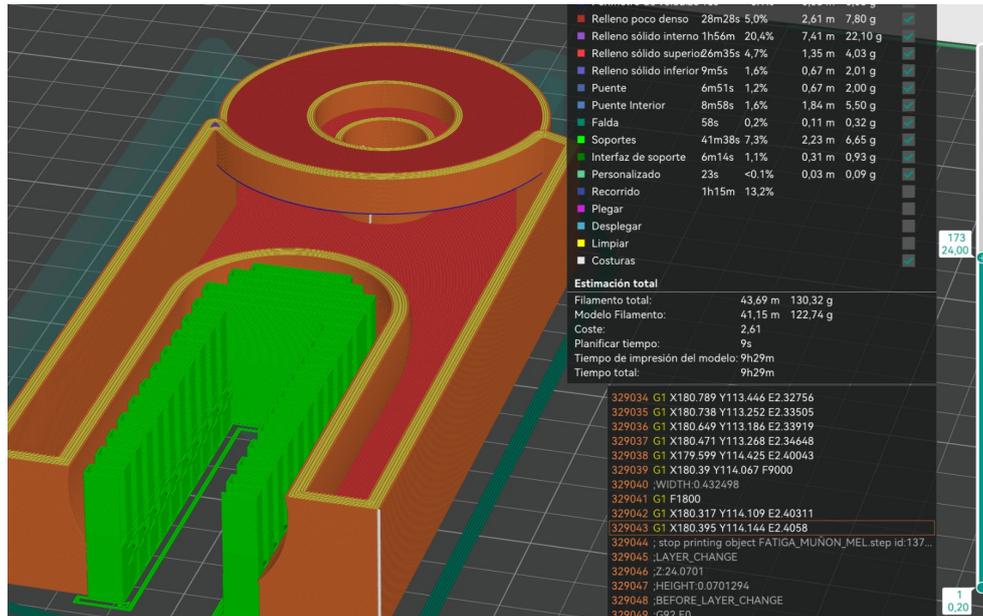


Figura 53. Artillery 3D, Autor propio

La Figura 54 evidencia el diseño final impreso en 3D dando una mejor visión de la funcionalidad de la prótesis.



Figura 54. Prototipo impreso en 3D, Autor propio

#### *VI-I. Proyecciones de mejora y refinamiento*

Con base al diseño finalizado y las simulaciones realizadas, en el futuro se podrían optimizar las áreas de mayor esfuerzo en el diseño como se ha observado en la fase de simulación.

Otra mejora a futuro podría ser el probar con otro tipos de materiales y hacer una comparación de estos en el simulador. Esto ayudaría a tener una mejor visión de la eficiencia de los materiales.

Por otra parte, se podría mejorar la estética del diseño, agregándole más detalles que hagan que se parezca más a una pata de perro, dibujando líneas que simulen los dedos de los perros.

## VII. RESULTADOS

### VII-A. Prueba de tensión von Mises

En las pruebas de tensión de von Mises, en las Figuras 46, 47 y 48 se hizo una comparación de esfuerzos en los ángulos de 90°, 10° y 135°, cada uno exponiendo su máximo y mínimo valor de esfuerzo alcanzado, todos con una carga de 200 N en la parte superior, dando como resultado que en el mayor esfuerzo al que se llegó fue de 17,32 MPa en el ángulo de 10° como se evidencia en la Figura 55, esta tensión máxima es significativamente menor ya que el material utilizado, PETG, tiene una resistencia máxima a la tracción de 41,8 MPa y un límite de elasticidad de 47,6 MPa. Por lo cual diseño se encuentra dentro de un rango seguro y no debería fallar bajo las condiciones evaluadas.

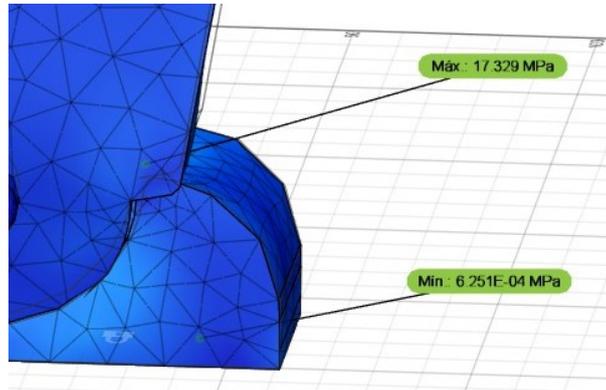


Figura 55. Tensión máxima alcanzada

### VII-B. Pruebas de Factor de seguridad

#### VII-B1. Interpretación del Factor de Seguridad:

- FS menor 1 → Diseño inseguro: la carga aplicada supera la resistencia del material, lo que llevará a fallas estructurales.
- FS = 1 - 2 → Riesgo elevado: el diseño está en el límite de la resistencia del material, con poco margen de seguridad.
- FS = 3 - 6 → Diseño seguro: hay un margen adecuado para variaciones en la carga y posibles defectos en el material.
- FS mayor 6 → Diseño sobredimensionado: el material está siendo subutilizado, lo que puede implicar un exceso de peso o material innecesario.

En la Figura 49 se aprecia el factor de seguridad de la prótesis en 90° es de 3,136 dentro del rango seguro para el diseño. Este factor de seguridad se calcula de la siguiente manera con la fórmula:

$$FS = \frac{\text{Resistencia del Material}}{\text{Esfuerzo máximo aplicado}} \quad (7)$$

- Factor de seguridad en 90°:

$$\begin{aligned} FS &= \frac{47,6 \text{ MPa}}{15,178 \text{ MPa}} \\ &= 3,136 \end{aligned}$$

- Factor de seguridad en 135°:

$$FS = \frac{47,6 \text{ MPa}}{10,177 \text{ MPa}} \\ = 4,677$$

- Factor de seguridad en 10°:

$$FS = \frac{47,6 \text{ MPa}}{17,329 \text{ MPa}} \\ = 2,756$$

Los valores del factor de seguridad obtenidos en los diferentes ángulos analizados indican que el diseño de la prótesis es seguro y estructuralmente confiable, ya que en todos los casos el FS es mayor a 2. Esto significa que el material utilizado soporta adecuadamente los esfuerzos aplicados, garantizando resistencia y estabilidad en su uso. Además, la variación en los factores de seguridad sugiere que el diseño responde bien a diferentes condiciones de carga, manteniéndose dentro de un rango óptimo de seguridad.

### VII-C. Prueba de Fatiga

Los resultados obtenidos en la simulación de fatiga indican que la prótesis articulada para la pata delantera del perro es estructuralmente resistente bajo una carga de 47,28 N. La distribución del daño muestra que no hay zonas críticas con acumulación excesiva de esfuerzo, lo que sugiere que la geometría y el material PETG son adecuados para este diseño. Sin embargo, se observa que la zona inferior de la articulación podría mejorarse para reducir aún más el estrés mecánico acumulado.

En términos de vida útil, la mayor parte de la estructura presenta una resistencia elevada, alcanzando hasta 1,000,000 de ciclos, lo cual es un valor considerablemente alto para condiciones de fatiga. En las zonas más críticas, donde la fatiga tiene un mayor impacto, la vida útil mínima registrada es de 437,300 ciclos. A pesar de esta reducción localizada, la prótesis sigue siendo funcional por un período prolongado antes de que la fatiga pueda generar fallas estructurales significativas.

Además, el porcentaje de daño acumulado en la estructura no es alarmante, lo que confirma que no existen concentraciones extremas de esfuerzo que puedan comprometer su integridad en el corto plazo. Esto indica que la prótesis puede soportar el uso diario del perro sin riesgo inmediato de falla prematura.

En conclusión, los resultados de la simulación con la carga de 47,28 N confirman que la prótesis es segura y adecuada para su propósito. Su diseño y material cumplen con los requisitos mecánicos esperados, proporcionando una buena durabilidad y resistencia a la fatiga. Aunque se podrían realizar ajustes menores para optimizar la distribución de esfuerzos, no se identifican problemas significativos que requieran un rediseño inmediato.

### VIII. CRONOGRAMA

A continuación se muestra el cronograma de trabajo en la siguiente tabla.

Tabla III  
PLANIFICACIÓN DEL PROYECTO

| No | ACTIVIDAD                               | TIEMPO (SEMANAS) |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |
|----|---|------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|
|    |   | 1                | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| 1  | Evaluación inicial y planificación      | ■                |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |
| 2  | Investigación sobre hardware y software |                  | ■ | ■ | ■ |   |   |   |   |   |    |    |    |
| 3  | Etapa de diseño de bocetos              |                  |   |   | ■ | ■ |   |   |   |   |    |    |    |
| 4  | Fase de diseño en software              |                  |   |   |   | ■ | ■ |   |   |   |    |    |    |
| 5  | Simulación y pruebas virtuales          |                  |   |   |   |   |   | ■ |   |   |    |    |    |
| 6  | Ajuste y refinamiento del diseño        |                  |   |   |   |   |   |   | ■ |   |    |    |    |
| 7  | Creación de prototipo                   |                  |   |   |   |   |   |   |   | ■ | ■  |    |    |
| 8  | Prototipo final                         |                  |   |   |   |   |   |   |   |   | ■  | ■  | ■  |

## IX. PRESUPUESTO

| <b>Concepto</b>  | <b>Cantidad</b> | <b>Costo Unitario (USD)</b> | <b>Total (USD)</b> |
|--|-----------------|-----------------------------|--------------------|
| Diseño en Fusion 360                                     | 1               | -                           | \$ 0.00            |
| Simulaciones estructurales                               | 1               | -                           | \$ 0.00            |
| Material de impresión                                    | 1               | \$ 20.00                    | \$ 20.00           |
| Tiempo de impresión (electricidad y desgaste de máquina) | 17 h            | \$ 2.00                     | \$ 34.00           |
| Postprocesado (lijado, ensamble, pruebas básicas)        | 1               | \$ 5.00                     | \$ 5.00            |
| Transporte o envío del prototipo                         | 1               | \$ 10.00                    | \$ 10.00           |
| <b>TOTAL</b>   | -               | -                           | <b>\$ 69.00</b>    |

## X. CONCLUSIONES

Se identificó la zoometría del canino, obteniendo las medidas necesarias para el desarrollo del diseño de la prótesis de pata delantera. Esto permitió generar un modelo ajustado y optimizado, asegurando la precisión en el diseño y la funcionalidad de la prótesis.

A través de la investigación, se identificaron las necesidades específicas de los perros con ausencia de una extremidad, así como los posibles riesgos físicos y psicológicos que esta condición puede generar en su bienestar. Además, se abordaron las implicaciones de la adaptación a una prótesis, considerando el impacto en su movilidad, comportamiento y calidad de vida. Esta comprensión integral permitió enfocar el diseño hacia soluciones que no solo sean funcionales, sino también cómodas y adaptables para el animal.

Se llevaron a cabo pruebas de tensión, fatiga y factor de seguridad, obteniendo resultados detallados que demostraron valores dentro de los rangos adecuados para el diseño de la prótesis. Estos análisis permitieron validar la resistencia y viabilidad del modelo propuesto.

El prototipo del diseño fue fabricado mediante impresión 3D, lo que permitió una mejor visualización del diseño final y una evaluación más precisa de su funcionalidad. Esto facilitó la identificación de posibles mejoras y ajustes.

## XI. RECOMENDACIONES

Es esencial que el diseño de la prótesis sea lo más ergonómico posible, considerando la anatomía de la pata del animal. El modelo debe ajustarse de manera precisa, para evitar áreas que puedan generar incomodidad o interferir con el movimiento. Además, el diseño debe permitir flexibilidad en las zonas clave y emplear materiales que, además de ser resistentes, también ofrezcan una sensación de confort, teniendo en cuenta las fuerzas que se aplican durante el movimiento.

Antes de la fabricación física, es recomendable realizar simulaciones virtuales del diseño utilizando software de análisis estructural y biomecánico. Esto permitirá identificar áreas que puedan estar sujetas a estrés o fatiga durante el uso y realizar ajustes en el diseño para mejorar la resistencia y la eficiencia sin necesidad de imprimir múltiples prototipos.

Es importante equilibrar la estética y la funcionalidad en el diseño de la prótesis. Si bien la principal prioridad debe ser la funcionalidad, también es recomendable que la prótesis tenga un diseño atractivo y menos invasivo, lo que podría aumentar la aceptación y la facilidad de uso, además de contribuir a la adaptación psicológica.

Es recomendable realizar una investigación sobre los materiales más adecuados para el diseño de la prótesis, teniendo en cuenta factores como la resistencia, la flexibilidad, el peso y la durabilidad. Cada tipo de material tiene características específicas que pueden influir directamente en el rendimiento de la prótesis. Este análisis previo permitirá tomar decisiones informadas y garantizar que el material seleccionado sea el más adecuado para el diseño.

## REFERENCIAS

- [1] S. M. Espín-Lagos, E. O. U. Nogales, J. P. G. Toasa, A. M. L. Moreta y D. F. Romero, «Diseño y construcción de una prótesis de pata de can con amputación de extremidad delantera mediante impresión 3D,» 2023.
- [2] L. E. M. Gaitán, J. M. V. Quiroga y L. M. A. Gómez, *DISCAPACIADAD FÍSICA CANINA*. Bogotá, Colombia: UNIVERSIDAD DE BOGOTA JORGE TADEO LOZANO, FACULTAD DE ARTES Y DISEÑO, 2019.
- [3] T.-W. Lu y C.-F. Chang, «Biomechanics of human movement and its clinical applications,» 2012.
- [4] C. Urroz, *Elementos de anatomía y fisiología animal*. Costa Rica: Editorial Universidad Estatal a Distancia, 1996.
- [5] C. L. Plana y P. M. Aparicio, *ATLAS DE ANATOMÍA SECCIONAL EN EL PERRO*. Belém, Brasil: Universidade Federal Rural da Amazônia, 2022.
- [6] CursosOnline, *TEMA 1. ANATOMÍA Y FISIOLOGÍA. 2. TOPOGRAFIA Y MORFOLOGÍA*, Accedido: 26-10-2024, 2021. dirección: <https://cursos.tienda/tema-1-anatomia-y-fisiologia-2-topografia-y-morfologia/>.
- [7] M. Lamping y T. García, *ANATOMIA DE LOS ANIMALES DOMESTICOS*. Managua, Nicaragua: Universidad Nacional Agraria, 1996.
- [8] D. M. V. C. Pereyra, M. V. L. Ruiz, E. M. V. D. Parola y E. M. V. V. Venegas, *Cátedra de Anatomía Descriptiva y Comparada 1era parte*. Rosario, Argentina: Universidad Nacional de Rosario, 2002.
- [9] D. J. Fariña y S. F. Smith, *Anatomía 2*. Buenos Aires, Argentina: FEDERACIÓN CINOLÓGICA ARGENTINA, 2011.
- [10] D. H. S. Sánchez, *SISTEMA MUSCULAR*. Toluca, México: UNIVERSIDAD AUTONOMA DEL ESTADO DE MEXICO, 2019.
- [11] Erik Farina, *El Aparato Locomotor del Perro*, Accedido: 1-11-2024, 2013. dirección: <https://psicolmascot.blogspot.com/2013/08/el-aparato-locomotor-del-perro.html>.
- [12] M. Megías, P. Molist y M. A. Pombal, *Tejidos animales MUSCULAR*. Vigo, España: Departamento de Biología Funcional y Ciencias de la Salud. Facultad de Biología. Universidad de Vigo., 2020.
- [13] R. L. González, «Anatomía y Función del Sistema Nervioso en Caninos y Felinos,» 2024.
- [14] Mascotia, *Sistema Nervioso del Perro*, Accedido: 7-01-2025, 2024. dirección: <https://mascotia.com/perros/enfermedades/neurologicas/sistema-nervioso-del-perro/>.
- [15] M. U. Becerra, «Representación de la locomoción animal terrestre como estrategia de análisis del movimiento para el desarrollo de simuladores biomiméticos,» 2011.
- [16] J. M. A. Sánchez, *Manual para el de rastreo mamíferos silvestres de México*. México: Editorial Impresora Apolo, 2012.
- [17] R. P. ELLIOTT, *Dogsteps — A New Look*. Pennsylvania, Estados Unidos: Companion House Books, 2001.
- [18] J. L. Val, J. G. García, M. G. Domínguez, J. N. Ortín y A. U. Galarza, *Atlas of Canine Arthrology. Updated edition with 3D Animations*. Zaragoza, España: Servet editorial - Grupo Asís Biomedica, SL, 2021.
- [19] P.-M. Parés I Casanova, «Índices de interés funcional en la raza bovina,»
- [20] M. R. I. Coss, *ESTUDIO ZOMÉTRICO EN OVINOS BLACK BELLY DE UN REBAÑO COMERCIAL EN EL ESTADO DE CHIHUAHUA*. Toluca, México: Universidad Autónoma del Estado de México Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, 2023.
- [21] V. Galindo-Zamora, V. von Babo, N. Eberle, D. Betz y P. Wefstaedt, «Kinetic, kinematic, magnetic resonance and owner evaluation of dogs before and after the amputation of a hind limb,» 2016.
- [22] B. D. Sánchez, M. Carmen e I. D. Rivas, «Osteomielitis en el perro: revisión de 36 casos clínicos,» 1995.
- [23] J. J. V. Córdova, *FUNDAMENTOS Y USOS DE LAS PRÓTESIS ORTOPÉDICAS EN PERROS: ESTUDIO DE REVISIÓN*. CDMX, México: FACULTAD DE MEDICINA VETERINARIA Y ZOOTECCIA, 2020.
- [24] USATODAY, *Dog with deformed legs gets second chance*.
- [25] A. J. THURSTON, «PARE ´ AND PROSTHETICS: THE EARLY HISTORY OF ARTIFICIAL LIMBS,» 2007.
- [26] J. Finch, «The art of medicine The ancient origins of prosthetic medicine,» 2011.
- [27] A. Gardiner, «The Animal as Surgical Patient: a Historical Perspective in the 20 th Century,» 2009.

- [28] Wikipedia, *Veterinary prosthesis*, Accedido: 13-01-2025, 2024. dirección: [https://en.wikipedia.org/wiki/Veterinary\\_prosthesis](https://en.wikipedia.org/wiki/Veterinary_prosthesis).
- [29] P. G. Arauz, P. Chiriboga, M.-G. García, I. Kao y E. A. Díaz, «New technologies applied to canine limb prostheses: A review,» 2021.
- [30] C. G. BKin, «Life and Limb: Introduction to the World of Veterinary Orthotics and Prosthetics,»
- [31] Walkin’Pets, *5 Things You Need to Know About Dog Hip Braces*, Accedido: 13-01-2025. dirección: <https://walkinpets.com/blogs/blog/5-things-you-need-to-know-about-dog-hip-braces>.
- [32] J. B. Blanco, *Diseño y fabricación mediante impresión 3D de una prótesis de dedo con sensor de fuerza incorporado*. Valladolid, España: ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES, 2020.
- [33] J. Torres, *Diseño asistido por ordenador*. Granada, España: Dpt. Lenguajes y Sistemas Informáticos ETS. Ingeniería Informática Universidad de Granada.
- [34] N. P. PÉREZ, *Diseño de una prótesis canina para marcha mediante captura de movimiento y simulación numérica*. Coruña, España: Escola Politécnica de Enxeñaría de Ferrol, 2024.



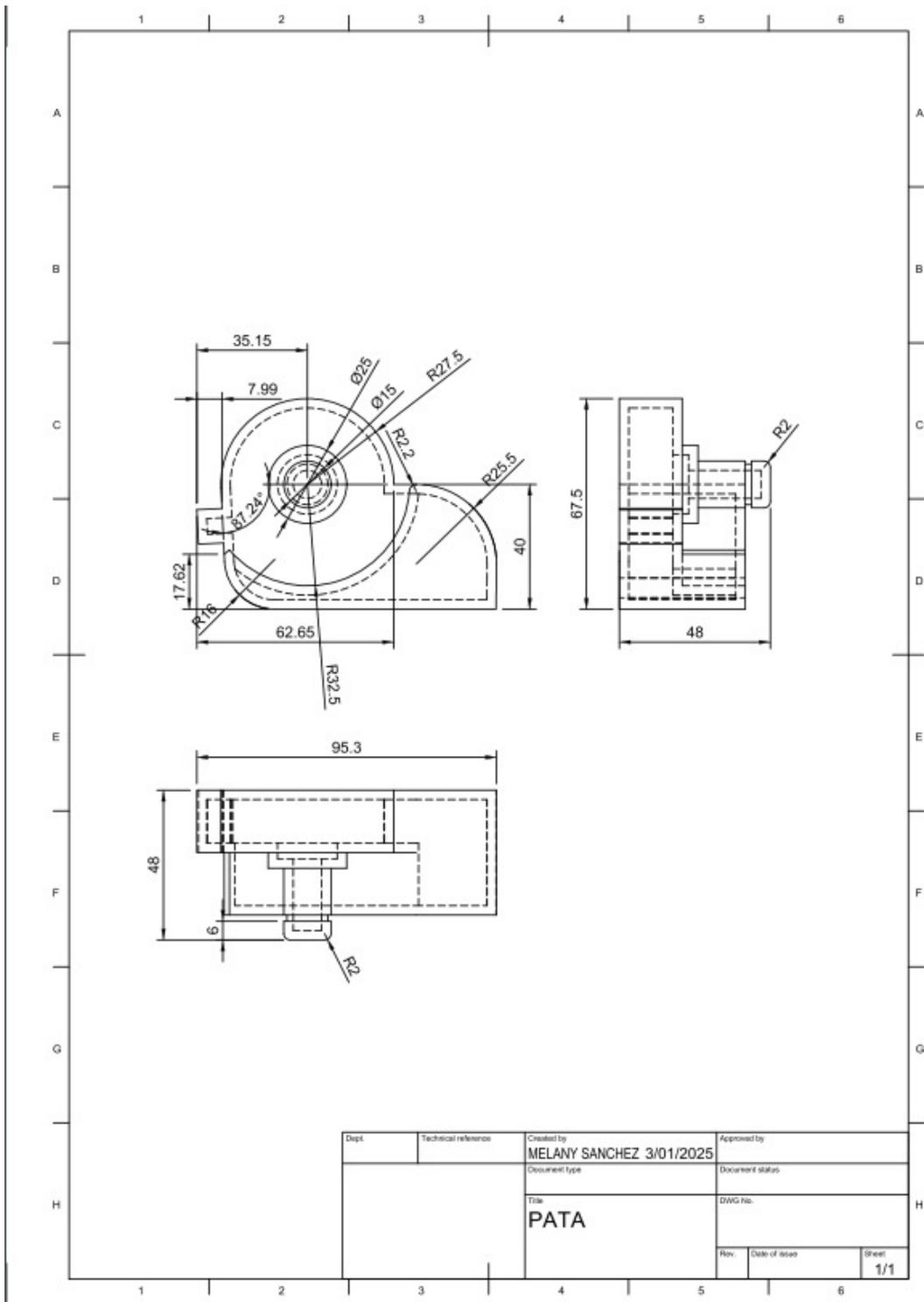


Figura 57. Plano de la pieza pata base, Autor propio

ANEXO B  
HERRAMIENTAS CAD

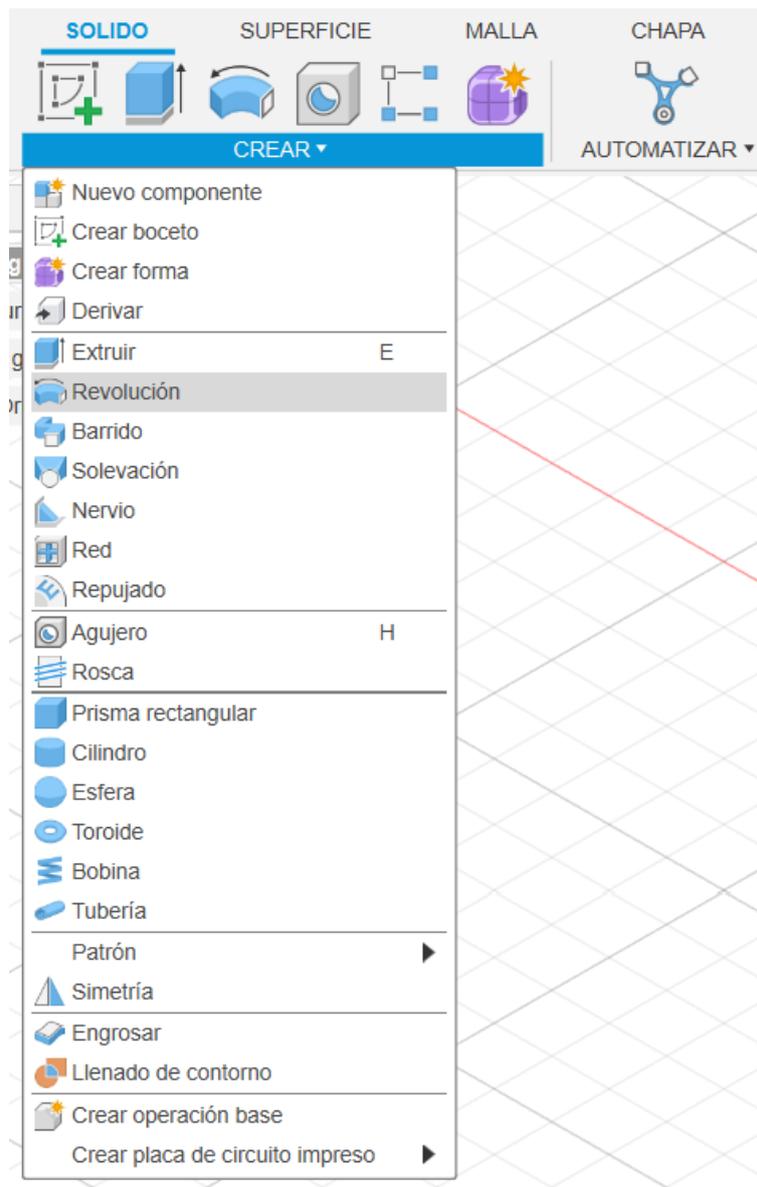


Figura 58. Herramientas utilizadas para el diseño, Fusion 360

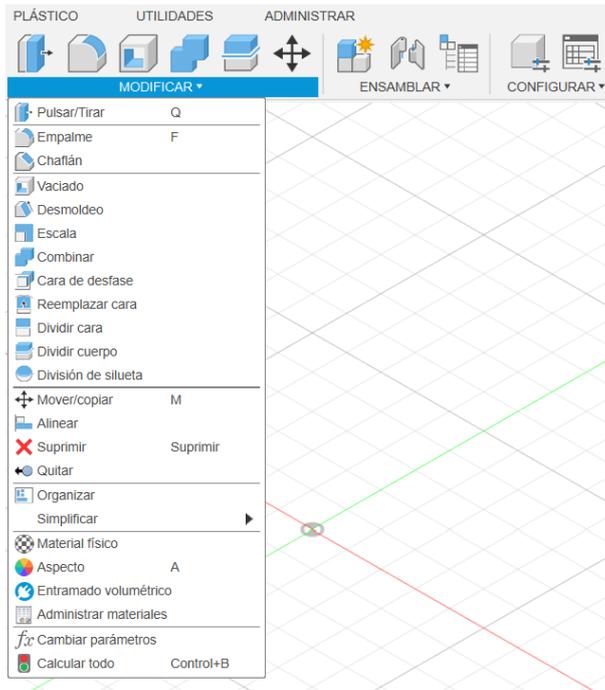


Figura 59. Herramientas utilizadas para el diseño, Fusion 360

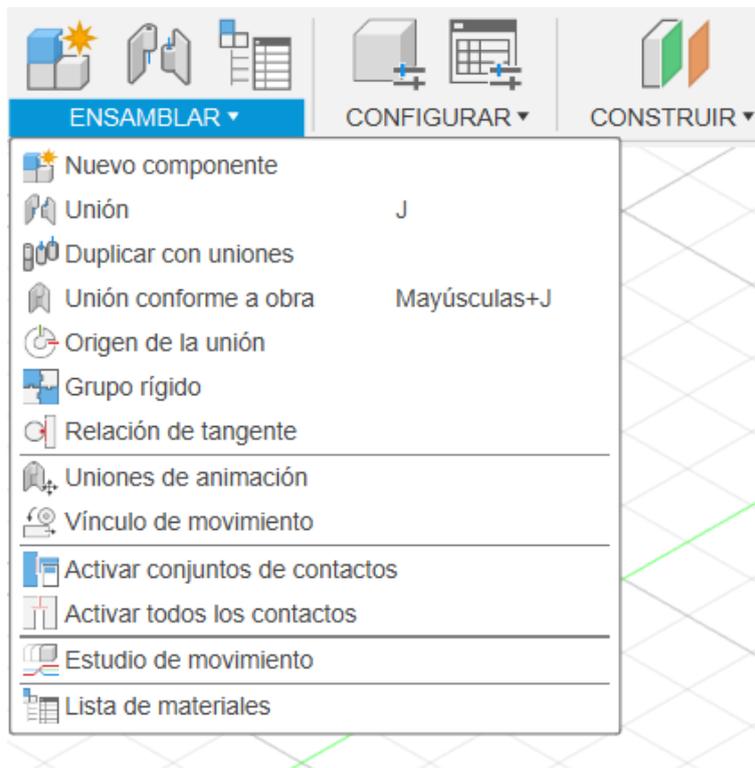


Figura 60. Herramientas utilizadas para el diseño, Fusion 360



Figura 61. Herramientas utilizadas para el diseño, Fusion 360



Figura 62. Estudios de simulación, Fusion 360

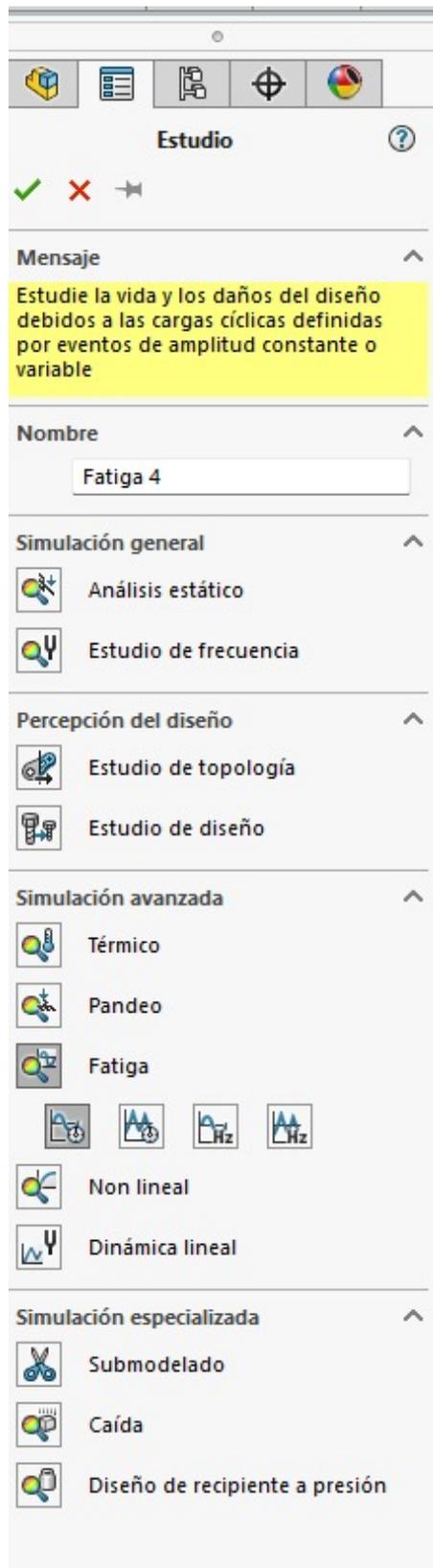


Figura 63. Estudios de simulación, SOLIDWORKS

## ANEXO C PROGRAMA DE IMPRESIÓN EN 3D, ARTILLERY3D

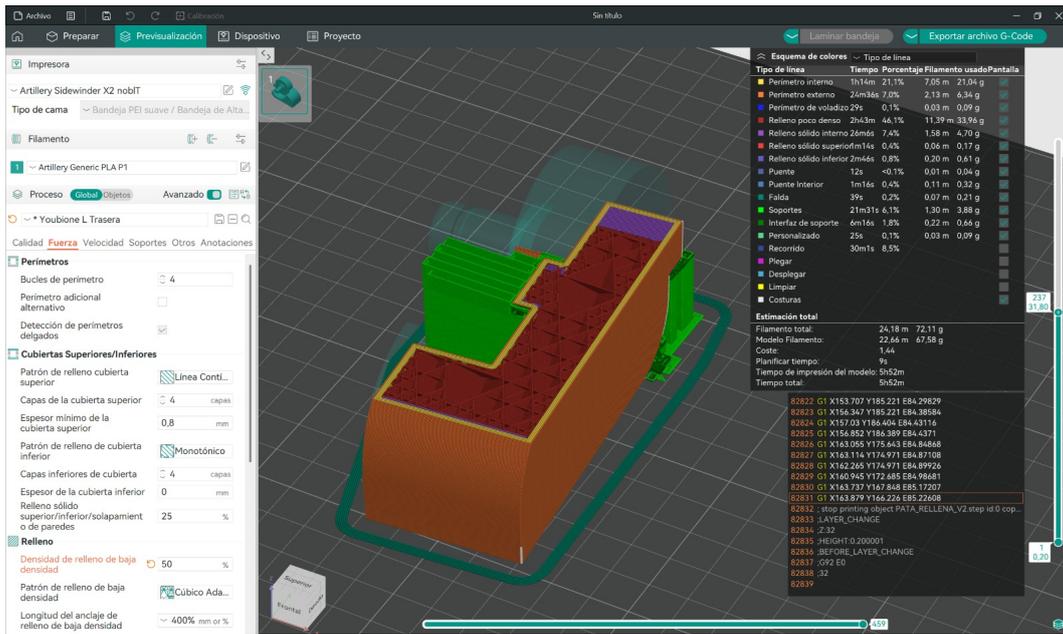


Figura 64. Diseño exportado para imprimir en 3D, Autor propio

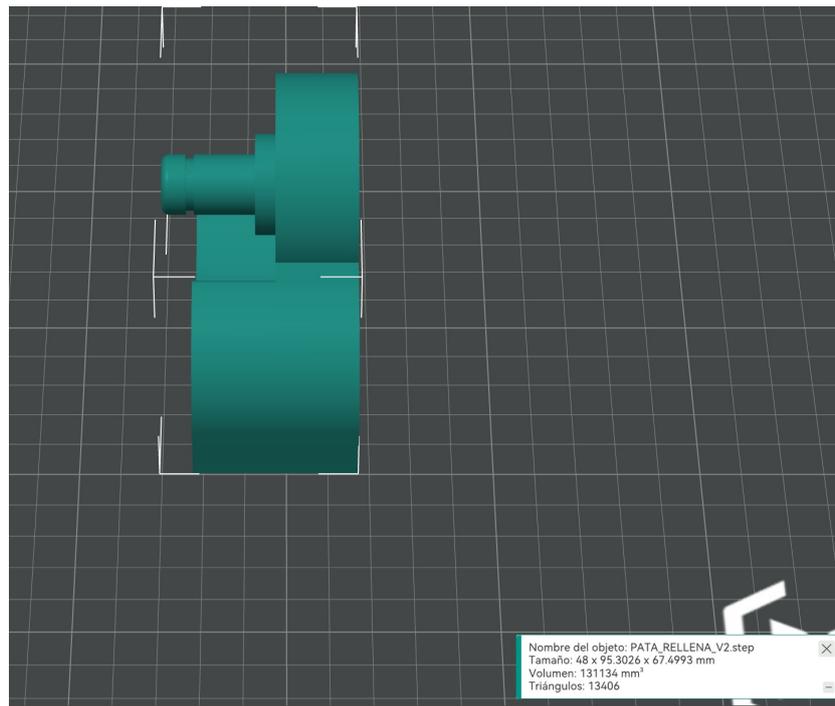


Figura 65. Diseño exportado para imprimir en 3D, Autor propio

ANEXO D  
IMPRESIÓN DEL PROTOTIPO



Figura 66. Proceso de impresión 3D del prototipo, Autor propio



Figura 67. Proceso de impresión 3D del prototipo, Autor propio



Figura 68. Proceso de impresión 3D del prototipo, Autor propio



Figura 69. Proceso de impresión 3D del prototipo, Autor propio



Figura 70. Proceso de impresión 3D del prototipo, Autor propio



Figura 71. Proceso de impresión 3D del prototipo, Autor propio



Figura 72. Prototipo impreso, Autor propio

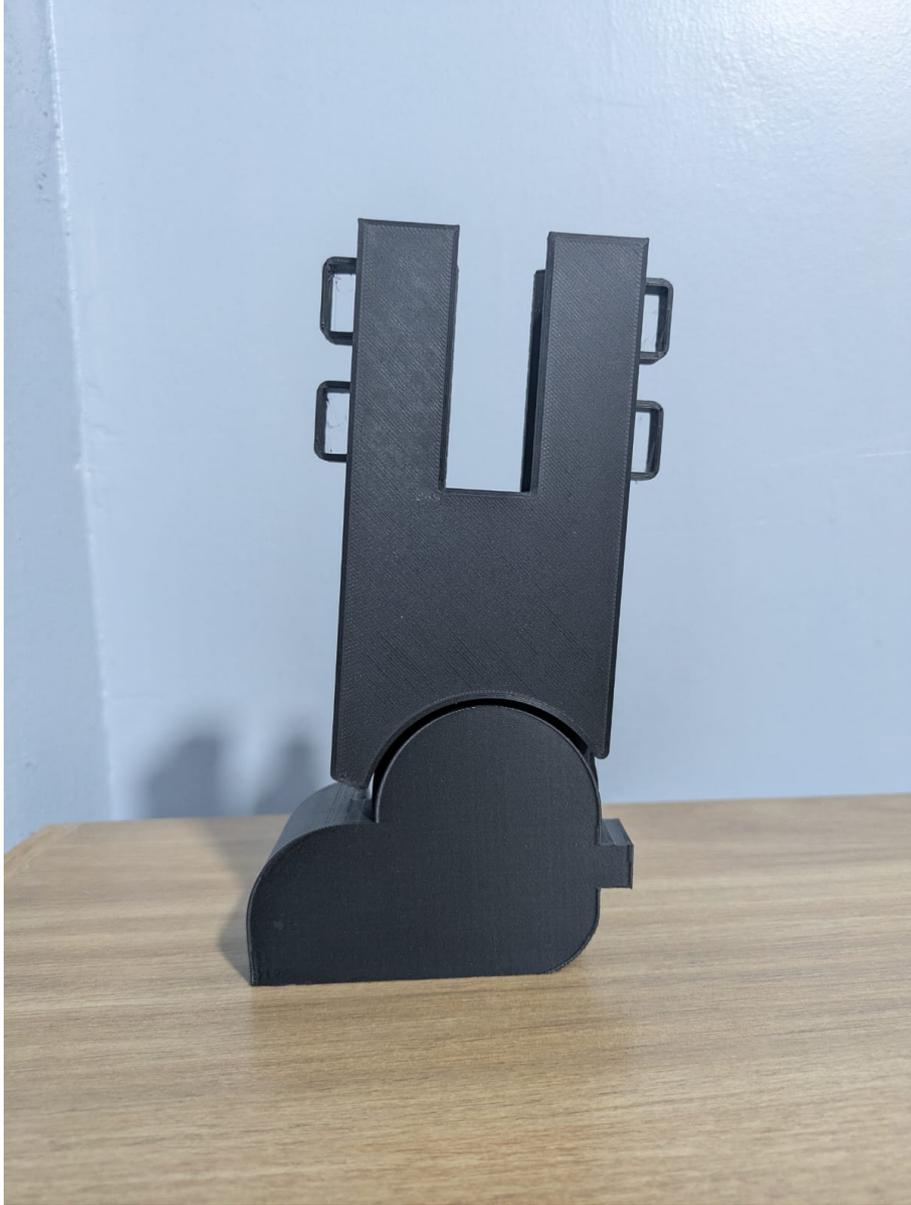


Figura 73. Prototipo impreso, Autor propio



Figura 74. Prototipo impreso, Autor propio