

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción

Título del trabajo:

Diseño de una prótesis animal: Caso de estudio de un gato doméstico

Proyecto Integrador

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero Mecánico

Presentado por:

DIEGO FERNANDO MURILLO PUENTE

Guayaquil - Ecuador

Año: 2024

Dedicatoria

El presente proyecto lo dedico a mi esposa, padres y profesores, quienes me han brindado su apoyo incondicional a lo largo de mi carrera.

Agradecimientos

Mi más sincero agradecimiento a mi esposa e hijo, cuyo amor, paciencia y constante apoyo han sido fundamentales durante todo este proceso. Su motivación incondicional me ha impulsado a superar cada desafío y alcanzar mis objetivos.

A mis padres, por haberme inculcado desde siempre los valores del esfuerzo, la dedicación y la perseverancia. Su confianza en mis capacidades ha sido un pilar esencial para la culminación de este proyecto.

Extiendo mi agradecimiento a mi tutor, cuyo conocimiento y guía han sido de vital importancia para la correcta ejecución de este trabajo. Su orientación y valiosos consejos han enriquecido significativamente cada etapa del proyecto.

Declaración Expresa

Yo Diego Fernando Murillo Puente acuerdo y reconozco que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por mí/nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que me/nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de mi/nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique al/los autor/es que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 10 de enero del 2025.

Diego Fernando
Murillo Puente

Evaluadores

Francis Roderich Loayza Paredes

Profesor de Materia

Fausto Andrés Maldonado

Galarza

Tutor de proyecto

Resumen

El presente proyecto aborda el diseño de una prótesis de extremidad anterior para un felino doméstico mediante manufactura aditiva, con el objetivo de mejorar su calidad de vida al proporcionar soporte funcional y estabilidad. La hipótesis establece que una prótesis personalizada puede optimizar la movilidad del animal y prevenir problemas musculoesqueléticos. Se justifica por la necesidad de una solución accesible y adaptada a los requerimientos específicos del animal. En el desarrollo del proyecto, se emplearon herramientas de diseño asistido por computadora (CAD) para el modelo detallado y análisis de elementos finitos (FEM) para la validación estructural. Se utilizaron materiales como Nylon con fibra de vidrio y PLA con fibra de carbono, seleccionados por su resistencia y ligereza. Los resultados mostraron que la prótesis soporta adecuadamente las cargas mecánicas esperadas con factores de seguridad aceptables. Además, se logró un diseño funcional, ligero y de bajo costo. Se concluye que la manufactura aditiva es una alternativa viable para prótesis veterinarias, ofreciendo personalización y accesibilidad económica.

Palabras clave: Biomecánica felina, manufactura aditiva, análisis estructural, prótesis veterinarias.

Abstract

This project focuses on the design of an anterior limb prosthesis for a domestic feline using additive manufacturing, aiming to improve its quality of life by providing functional support and stability. The hypothesis suggests that a customized prosthesis can optimize the animal's mobility and prevent musculoskeletal issues. The project is justified by the need for accessible solutions tailored to the animal's specific requirements. The development involved the use of computer-aided design (CAD) tools for detailed modeling and finite element analysis (FEA) for structural validation. Materials such as nylon with fiberglass and PLA with carbon fiber were used, considering their strength and lightness. The results showed that the prosthesis adequately supports expected mechanical loads with acceptable safety factors. Furthermore, a functional, lightweight, and cost-effective design was achieved. It is concluded that additive manufacturing is a viable alternative for veterinary prostheses, offering customization and economic accessibility.

Keywords: *Feline biomechanics, additive manufacturing, structural analysis, veterinary prostheses.*

Tabla de contenido

RESUMEN.....	I
ABSTRACT	II
ABREVIATURAS	V
ÍNDICE DE FIGURAS	VI
ÍNDICE DE TABLAS	VII
ÍNDICE DE PLANOS	IX
CAPÍTULO 1	1
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	2
1.2 JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA.....	3
1.3 OBJETIVOS	3
1.3.1 <i>Objetivo general</i>	3
1.3.2 <i>Objetivos específicos</i>	3
1.4 MARCO TEÓRICO.....	3
CAPÍTULO 2	12
2. METODOLOGÍA	12
2.1 NECESIDADES DEL CLIENTE.....	13
2.2 ALTERNATIVAS DE DISEÑO	14
2.3 SELECCIÓN DE LA MEJOR ALTERNATIVA	18
2.4 MATRIZ COMPARATIVA DE CRITERIOS.....	19
2.5 MATRIZ NORMALIZADA Y CÁLCULO DE PONDERACIONES	20
2.6 CÁLCULO DE LA PONDERACIÓN	20
2.7 EVALUAR LAS ALTERNATIVAS DE DISEÑO	20
2.8 TABLA DE PUNTUACIÓN TOTAL.....	21
2.9 DISEÑO DETALLADO.....	22
ANÁLISIS PRELIMINAR.....	22
DATOS INICIALES	23
<i>Descripción de partes de la prótesis felina</i>	23
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS	29
PARÁMETROS DE IMPRESIÓN 3D PARA LA PRÓTESIS.....	49
3.2 ESTIMACIÓN DE COSTOS.....	52

<i>Costo de material</i>	52
<i>Tiempo de impresión</i>	52
<i>Costos adicionales</i>	53
3.2.1 <i>Resumen de Costos</i>	54
3.2.2 <i>Costos por escenario</i>	54
3.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS	55
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	57
4.1 CONCLUSIONES	57
4.2 RECOMENDACIONES.....	58
BIBLIOGRAFÍA	60

Abreviaturas

AHP	Analytical Hierarchy Process
ASTM	American Society for Testing and Materials
CAD	Computer-Aided Design
ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
FEA	Finite Element Analysis
FEM	Finite Element Method
PLA	Polylactic Acid
TPU	Thermoplastic Polyurethane
PU	Polyurethane

Índice de figuras

FIGURA 1.1 ANÁLISIS DE ESFUERZOS EN MOVIMIENTO DE EXTREMIDAD DE FELINO.....	5
FIGURA 1.2 PRÓTESIS IMPRESA EN 3D PARA FELINO	6
FIGURA 1.3 MANUFACTURA ADITIVA	6
FIGURA 2.1 DIAGRAMA DE FLUJO DE LA METODOLOGÍA DE DISEÑO	12
FIGURA 2.2 DIAGRAMA DE NECESIDADES DEL CLIENTE	14
FIGURA 2.3 ALTERNATIVA RÍGIDA.....	15
FIGURA 2.4 ALTERNATIVA ANATÓMICA	16
FIGURA 2.5 ALTERNATIVA ARTICULADA	17
FIGURA 2.6 CAZOLETA.....	25
FIGURA 2.7 SECCIÓN MEDIA	26
FIGURA 2.8 BASE EN C.....	27
FIGURA 3.1 (CAZOLETA FEM) ESFUERZOS DE VON MISES	37
FIGURA 3.2 (CAZOLETA FEM) DEFORMACIÓN	38
FIGURA 3.3 (CAZOLETA FEM) FACTOR DE SEGURIDAD	39
FIGURA 3.4 (SECCIÓN MEDIA FEM) ESFUERZOS DE VON MISES.....	40
FIGURA 3.5 (SECCIÓN MEDIA FEM) DEFORMACIÓN.....	41
FIGURA 3.6 (SECCIÓN MEDIA FEM) FACTOR DE SEGURIDAD	42
FIGURA 3.7 (BASE EN C FEM) ESFUERZOS DE VON MISES	43
FIGURA 3.8 (BASE EN C FEM) DEFORMACIÓN	44
FIGURA 3.9 (BASE EN C FEM) FACTOR DE SEGURIDAD	45
FIGURA 3.10 PASADOR ACERO INOXIDABLE AISI 316	46

Índice de tablas

TABLA 1.1 COMPONENTES DE PRÓTESIS PROMEDIO	5
TABLA 1.2 MATERIALES PARA IMPRESIÓN 3D (POZO VILLAR TUTORA & OCHOA MENDOZA, N.D.)	8
TABLA 1.3 PROPIEDADES DE PLA	8
TABLA 2.1 VENTAJAS/DESVENTAJAS ALTERNATIVA #1.....	15
TABLA 2.2 VENTAJAS/DESVENTAJAS ALTERNATIVA #2.....	17
TABLA 2.3 VENTAJAS/DESVENTAJAS ALTERNATIVA #3.....	18
TABLA 2.4 CRITERIOS DE DECISIÓN	18
TABLA 2.5 MATRIZ COMPARATIVA	19
TABLA 2.6 TABLA DE ESCALA DE IMPORTANCIA DE CRITERIOS	19
TABLA 2.7 TABLA DE NORMALIZACIÓN.....	20
TABLA 2.8 TABLA DE PONDERACIÓN	20
TABLA 2.9 TABLA DE EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS	21
TABLA 2.10 PUNTUACIONES FINALES	21
TABLA 2.11 PARÁMETROS DE CAZOLETA.....	25
TABLA 2.12 PARÁMETROS DE SECCIÓN MEDIA	26
TABLA 2.13 PARÁMETROS DE BASE EN C.....	28
TABLA 2.14 RESUMEN DE DATOS.....	28
TABLA 3.1 ESFUERZOS MÍNIMOS Y MÁXIMOS.....	38
TABLA 3.2 DEFORMACIÓN MÍNIMA Y MÁXIMA.....	39
TABLA 3.3 FACTOR DE SEGURIDAD	40
TABLA 3.4 ESFUERZOS MÍNIMOS Y MÁXIMOS.....	41
TABLA 3.5 DEFORMACIÓN MÍNIMA Y MÁXIMA.....	42
TABLA 3.6 FACTORES DE SEGURIDAD	43
TABLA 3.7 ESFUERZOS MÍNIMO Y MÁXIMO	44
TABLA 3.8 DEFORMACIÓN MÍNIMA Y MÁXIMA.....	45
TABLA 3.9 FACTOR DE SEGURIDAD	46
TABLA 3.10 RESISTENCIAS DEL ACERO INOXIDABLE AISI 316	46

TABLA 3.11 RESULTADOS CAZOLETA	48
TABLA 3.12 RESULTADOS SECCIÓN MEDIA	48
TABLA 3.13 RESULTADOS BASE EN C	48
TABLA 3.14 RESULTADOS PASADOR	48
TABLA 3.15 PARÁMETROS 1	49
TABLA 3.16 PARÁMETROS 2	49
TABLA 3.17 PARÁMETROS 3	49
TABLA 3.18 PARÁMETROS 4	50
TABLA 3.19 PARÁMETROS 5	50
TABLA 3.20 PARÁMETROS 6	51
TABLA 3.21 COSTOS ESTÁNDAR	54
TABLA 3.22 COSTOS ECONÓMICOS	54
TABLA 3.23 COSTOS DE ALTA CALIDAD	55

Índice de planos

PLANO 1 Cazoleta

PLANO 2 Sección media

PLANO 3 Base en C

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

La manufactura aditiva, más conocida como impresión 3D, ha transformado significativamente la producción de prótesis, proporcionando soluciones adaptadas y asequibles. En el sector veterinario, esta tecnología se ha convertido en un recurso fundamental para mejorar la calidad de vida de los animales con limitaciones físicas.

La impresión 3D es un proceso que construye objetos tridimensionales mediante la superposición sucesiva de capas de material. Desde su aparición, ha sido implementada en diversas disciplinas como la medicina, la ingeniería y la arquitectura. En el campo veterinario, ha permitido la creación de dispositivos ortopédicos altamente adaptados a las necesidades específicas de cada animal. Gracias a la capacidad de escanear digitalmente las extremidades afectadas, se pueden diseñar prótesis con un ajuste preciso. Empresas como Bionic Pets y DiveDesign han desarrollado métodos eficientes para fabricar soluciones a medida para diferentes especies, incluyendo perros y elefantes (Boone Ashworth, 2020). Estas prótesis no solo favorecen la movilidad, sino que también permiten a los animales llevar una vida diaria con mayor comodidad y reduciendo el dolor.

La selección de los materiales adecuados es un factor clave en la fabricación de prótesis mediante impresión 3D. Materiales como el poliuretano termoplástico (TPU) son ampliamente utilizados debido a su resistencia y flexibilidad. El TPU ofrece un equilibrio idóneo entre rigidez y elasticidad, lo cual es fundamental para garantizar prótesis funcionales y confortables. Además, los avances en los programas de diseño asistido por computadora (CAD) facilitan la creación de modelos precisos, permitiendo un ajuste exacto y un rendimiento eficaz.

Las prótesis fabricadas con impresión 3D han demostrado ser una solución efectiva para mejorar la vida de los animales (Malak et al., 2023). En el caso de felinos, la ausencia de una extremidad puede provocar desequilibrios posturales que afectan su locomoción. Una prótesis diseñada de manera adecuada puede redistribuir el peso de forma equitativa, optimizar la movilidad y minimizar la carga sobre las patas restantes. Esto no

solo permite al animal desenvolverse mejor en sus actividades cotidianas, sino que también contribuye a prevenir problemas musculoesqueléticos a largo plazo.

El desarrollo de prótesis impresas en 3D para uso veterinario presentan un futuro alentador. Con la evolución constante de esta tecnología de fabricación y la mejora continua de los materiales utilizados, se espera que las prótesis sean aún más accesibles y personalizadas. Además, la incorporación de sensores y tecnología inteligente podría permitir una supervisión más detallada del rendimiento y la comodidad de las prótesis. Este progreso tecnológico no solo beneficiará a los animales de forma individual, sino que también impulsará el desarrollo de nuevas estrategias en la medicina veterinaria.

La importancia de este estudio radica en la búsqueda de soluciones eficaces y asequibles para optimizar la calidad de vida de los animales domésticos con limitaciones físicas. La investigación se enfoca en el diseño y evaluación de una prótesis impresa en 3D para un felino doméstico que carece de una de sus patas delanteras. Los objetivos específicos abarcan la creación de un modelo digital detallado de la extremidad ausente, el diseño de una prótesis personalizada con herramientas CAD y posterior validación con elementos finitos FEA. Este estudio no solo pretende mejorar la calidad de vida de un animal en particular, sino también establecer un referente para el diseño de prótesis a medida para otros animales con condiciones similares. La combinación de tecnología innovadora, materiales adecuados y diseño especializado podría revolucionar el cuidado y bienestar animal.

1.1 Descripción del problema

Un felino doméstico (*Felis silvestris catus*) que ha nacido sin una de sus patas delanteras podría obtener importantes ventajas al utilizar una prótesis elaborada mediante impresión 3D. Aunque el animal tiene solo un año de edad y actualmente no enfrenta serias dificultades en su desplazamiento, ya que es capaz de caminar y saltar sin inconvenientes, se ha observado que experimenta complicaciones al escarbar y muestra signos esporádicos de agotamiento. Esta fatiga podría estar relacionada con un desbalance en su columna vertebral debido a la ausencia de la extremidad. Desarrollar una prótesis diseñada a la medida de su peso y tamaño, con mecanismos que le permitan realizar sus actividades habituales, podría mejorar notablemente su bienestar.

A largo plazo, esto podría ser especialmente útil, una prótesis adecuada ayudaría a prevenir trastornos musculoesqueléticos y a preservar su movilidad y comodidad en general.

1.2 Justificación del problema

La implementación de una prótesis impresa en 3D para un gato doméstico nacido sin una extremidad anterior se justifica por sus beneficios en la mejora de la calidad de vida y la prevención de complicaciones a largo plazo. La falta de una extremidad puede llevar a un desgaste asimétrico de las articulaciones y desalineaciones espinales, causando fatiga y dolor crónico.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Diseñar en 3D una prótesis personalizada para un gato doméstico, destinada a su fabricación mediante manufactura aditiva, para mejorar su calidad de vida.

1.3.2 Objetivos específicos

1. Desarrollar la metodología para el diseño de prótesis.
2. Validar el diseño de las partes de la prótesis con cálculos y simulación FEM.
3. Realizar el modelado 3D y planos de construcción.

1.4 Marco Teórico

Biomecánica felina:

La biomecánica de los felinos desempeña un papel esencial en la comprensión de cómo estos animales han desarrollado una anatomía y un sistema muscular especializados para maximizar su velocidad, agilidad y habilidades de caza. Los

felinos son digitígrados, es decir, se desplazan apoyándose en los dedos, lo que incrementa la eficiencia de su locomoción y facilita una mejor absorción del impacto. Esta característica postural, sumada a la notable flexibilidad de su columna vertebral, les permite ejecutar movimientos rápidos y amplios, esenciales para realizar saltos extensos y cambios abruptos de dirección durante la carrera.

Una de las particularidades más destacadas de los felinos es su columna vertebral, la cual exhibe una gran flexibilidad, con una considerable capacidad de extensión y contracción. Esto les permite estirar su cuerpo mientras corren, incrementando la longitud de su zancada y, por ende, su velocidad. Además, la presencia de clavículas flotantes, que no están rígidamente unidas al resto del esqueleto, contribuye a una mayor libertad de movimiento en las extremidades delanteras, un factor clave en su capacidad de caza y desplazamiento a gran velocidad.

Las patas de los felinos están dotadas de una musculatura altamente desarrollada, que les proporciona la potencia necesaria para correr y saltar. Sus ligamentos, especialmente en las muñecas y codos, son lo suficientemente resistentes como para absorber el impacto al aterrizar. Por otro lado, las almohadillas plantares cumplen una doble función: actúan como amortiguadores y distribuyen uniformemente las fuerzas, lo que les permite desplazarse de manera sigilosa, una ventaja crucial para la caza. A su vez, las garras retráctiles ofrecen tracción adicional al correr y escalar, brindando un mayor control y precisión en cada movimiento.

Otro aspecto clave de la biomecánica felina es el uso de la cola como un instrumento estabilizador durante los saltos y giros repentinos. La cola les ayuda a mantener el equilibrio en el aire y a ajustar su postura para caer correctamente, un mecanismo conocido como "reflejo de enderezamiento" (Dev et al., 2020). Gracias a esta capacidad y a su conjunto de adaptaciones biomecánicas, los felinos no solo logran ser rápidos y eficaces en sus desplazamientos, sino también extremadamente ágiles y sigilosos en su entorno, lo que les permite desempeñarse como depredadores altamente efectivos en la naturaleza (Wang et al., 2021).

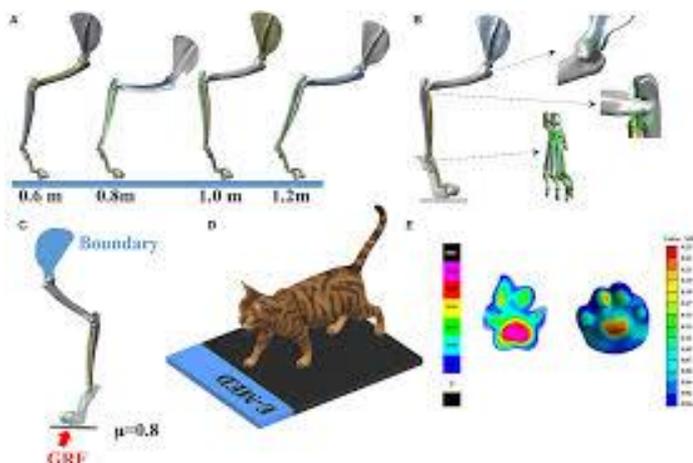


Figura 1.1 Análisis de esfuerzos en movimiento de extremidad de felino

Las prótesis para animales son soluciones diseñadas a medida que sustituyen extremidades ausentes o deterioradas, permitiendo a las mascotas recuperar su movilidad y, en consecuencia, mejorar notablemente su calidad de vida. Estos dispositivos están concebidos para ajustarse a la morfología y requerimientos particulares de cada animal, utilizando materiales que garantizan biocompatibilidad y durabilidad.

Las prótesis están conformadas por:

Tabla 1.1 Componentes de prótesis promedio

Socket	Pieza que se adapta a un muñón
Sección media	Parte protésica que reemplaza casi en su totalidad la longitud de la extremidad
Base	Pieza que asegura su estabilidad en el suelo
Sistema de suspensión	Sistema que se aplica para evitar colapsos en la estructura.

El proceso de diseño y fabricación de prótesis para animales implica una evaluación exhaustiva del paciente, la obtención de medidas precisas y la aplicación de tecnologías innovadoras, como la impresión 3D. Estas herramientas permiten crear dispositivos altamente personalizados que se ajustan a las necesidades específicas de cada animal, como se muestra en la Figura 1.2. El uso de prótesis en animales proporciona múltiples beneficios, entre los que se destacan una mayor libertad de movimiento, la disminución

del dolor, la prevención de posibles lesiones secundarias y, en términos generales, una mejora significativa en su bienestar y calidad de vida.

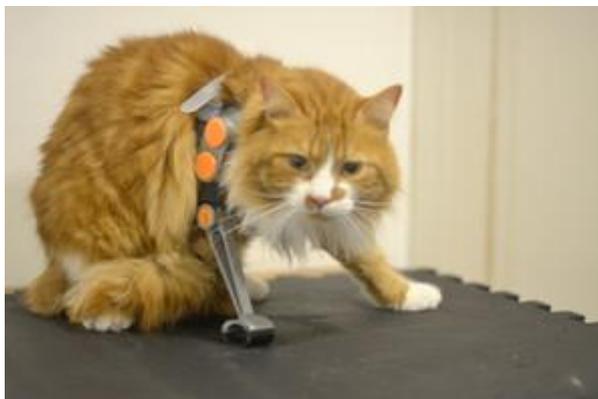


Figura 1.2 Prótesis impresa en 3D para felino

La manufactura aditiva, comúnmente conocida como impresión 3D, es una técnica de fabricación que crea objetos mediante la adición de material capa por capa a partir de un diseño digital en tres dimensiones. A diferencia de la manufactura sustractiva, que consiste en eliminar material de un bloque sólido para obtener la forma deseada, la manufactura aditiva utiliza solo la cantidad necesaria de material en cada sección, lo que reduce significativamente los residuos. Esta tecnología es valorada por su capacidad para producir geometrías complejas y detalles intrincados que serían difíciles o imposibles de lograr con métodos tradicionales (Mariela Laksman, 2023).

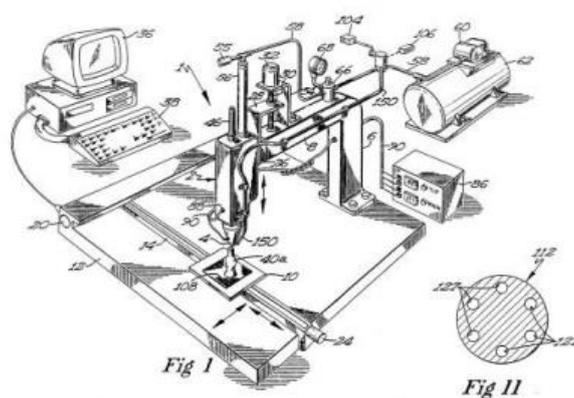


Figura 1.3 Manufactura Aditiva

La manufactura aditiva ha revolucionado el campo de las prótesis, no solo para humanos, sino también para nuestros compañeros animales (Collado et al., 2022). Gracias a esta

tecnología, es posible crear prótesis personalizadas y altamente funcionales que permiten a animales con discapacidades recuperar su movilidad y mejorar su calidad de vida (Shahrubudin et al., 2019). Para lo cual estas cumplen con las siguientes características:

- **Personalización:** Al igual que en las prótesis humanas, las prótesis animales se diseñan específicamente para cada individuo, teniendo en cuenta su tamaño, peso, nivel de actividad y tipo de amputación
- **Materiales Biocompatibles:** Se utilizan materiales ligeros, resistentes y biocompatibles para evitar irritaciones o alergias en la piel del animal. Algunos materiales comunes incluyen plásticos de ingeniería, aleaciones de titanio y compuestos de fibra de carbono.
- **Diseño Ergonómico:** Las prótesis se diseñan para adaptarse a la anatomía del animal y permitir un movimiento natural y cómodo.
- **Facilidad de Uso:** Las prótesis deben ser fáciles de poner y quitar, y deben permitir al animal realizar sus actividades diarias con facilidad.

Materiales:

La selección de materiales es crucial para garantizar funcionalidad y durabilidad. Entre los materiales más usados debido a su disponibilidad y propiedades mecánicas adecuadas para aplicaciones veterinarias, se encuentran (Pozo Villar Tutora & Ochoa Mendoza, n.d.):

Tabla 1.2 Materiales para Impresión 3D

PLA (Ácido poliláctico) + fibra de carbono	Ligero, rígido y de fácil fabricación mediante impresión 3D (PLA PRO HT, 20 19).	
Nylon + fibra de vidrio	Alta resistencia mecánica y flexibilidad moderada, ideal para soportar esfuerzos repetitivos (Callister, 2018).	
TPU (Poliuretano termoplástico)	Alta elasticidad, apta para impresión 3D, ideal para piezas flexibles. (A Guide to Thermoplastic Polyurethanes (TPU)®, n.d.).	

Tabla 1.3 Propiedades de PLA

Physical Properties	Standard	Unit	Typical Value
Density	ISO 1183	g/cc	1.29

Mechanical Properties	Standard	Unit	Typical Value
Tensile Strength, Break	ISO 527	MPa	48
Tensile Modulus	ISO 527	MPa	4950
Tensile Elongation, Break	ISO 527	%	2
Flexural Strength	ISO 178	MPa	89
Flexural Modulus	ISO 178	MPa	6320

Thermal Properties	Standard	Unit	Typical Value
Glass Transition Temperature (T _g)	DSC	°C	60
Deflection Temperature at 0.45 MPa (66psi)	ISO 75	°C	91

Electrical Property	Standard	Unit	Typical Value
Surface Resistance	ASTM D257	Ω /sq	>10 ⁹

Print Recommendation	
Nozzle Temperature	190 -220 °C
Bed Temperature	0-60 °C
Print Speed	30-70 mm/s
Chamber Temperature	0-40 °C
Cooling Fan	50-100%

Para el diseño de la prótesis basada en manufactura aditiva es necesario realizar cálculos básicos, para lo cual se emplearán las siguientes ecuaciones:

Peso (Fuerza gravitacional)

$$F = m * g$$

F	<i>Peso o fuerza gravitacional [N]</i>
m	<i>masa de objeto [Kg]</i>
g	<i>Aceleración gravitacional = $9.8[\frac{m}{s^2}]$</i>

Se usa para calcular el peso de un objeto en función de su masa y la aceleración gravitacional.

Esfuerzo normal

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

σ	<i>Esfuerzo normal [Pa o MPa].</i>
F	<i>Fuerza aplicada [N].</i>
A	<i>Área sobre la cual actúa la fuerza [m²]</i>

Mide la tensión en un material debido a una fuerza aplicada perpendicularmente a su área.

Área de la pared de un cono truncado

$$A = \frac{\pi}{4} (d_b^2 - d_t^2)$$

A	<i>Area de la pared [m²]</i>
d_b	<i>Diámetro de la base [m]</i>
d_t	<i>Diámetro del extremo superior [m]</i>

Se usa para calcular el área efectiva de la pared de un cono truncado con diámetros base y extremo superior.

Momento flector máximo

$$M = F * \frac{L}{2}$$

<i>M</i>	<i>Momento flector máximo [N * m]</i>
<i>F</i>	<i>Fuerza aplicada [N]</i>
<i>L</i>	<i>Longitud de la viga [m]</i>

Se utiliza para determinar el momento máximo en una viga con carga concentrada en su extremo libre.

Momento de inercia para un cilindro hueco

$$I = \frac{\pi}{64} (d_e^4 - d_i^4)$$

<i>I</i>	<i>Momento de inercia [m⁴]</i>
<i>d_e</i>	<i>Diámetro exterior [m]</i>
<i>d_i</i>	<i>Diámetro interior [m]</i>

Calcula la resistencia de una sección cilíndrica hueca a la flexión.

Esfuerzo máximo en flexión

$$\sigma = \frac{M * c}{I}$$

<i>σ</i>	<i>Esfuerzo máximo [Pa o MPa]</i>
<i>M</i>	<i>Momento flector [N * m]</i>
<i>c</i>	<i>Distancia al eje nentro [m]</i>
<i>I</i>	<i>Momento de inercia [m⁴]</i>

Se utiliza para determinar el esfuerzo máximo en una sección transversal sometida a flexión (Mott, n.d.).

Espesor mínimo requerido

$$t = \frac{F}{\sigma_y * A}$$

σ	<i>Esfuerzo máximo [Pa o MPa]</i>
M	<i>Momento flector [N * m]</i>
c	<i>Distancia al eje nentro [m]</i>
I	<i>Momento de inercia [m]</i>

Se utiliza para determinar el esfuerzo máximo en una sección transversal sometida a flexión (Mott, n.d.).

Análisis por elementos finitos:

El análisis por elementos finitos (FEM) es un método computacional utilizado para simular cómo se comporta un objeto o sistema físico bajo diferentes condiciones de carga, presión o tensión. En este análisis, el objeto se divide en una malla de pequeños elementos interconectados, también conocidos como nodos, y para cada uno se aplican las ecuaciones de equilibrio mecánico. Esto permite calcular cómo las fuerzas, deformaciones, y otros factores de estrés se distribuyen dentro del material. FEM es especialmente útil en ingeniería y biomecánica, donde permite modelar estructuras complejas, como huesos o prótesis, y predecir su resistencia y comportamiento ante cargas reales (Wang et al., 2021). Es una herramienta poderosa para optimizar diseños, reducir riesgos de falla y realizar estudios detallados de durabilidad y estabilidad sin requerir pruebas físicas exhaustivas (Karmankar & Karmankar, 2018).

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

En este trabajo el diseño de la prótesis mediante manufactura aditiva se divide en varias etapas clave, que integran alternativas de solución en cada fase para optimizar el resultado final. El proceso inicia al realizar un análisis metrológico (dimensional) de la extremidad afectada y de la estructura opuesta (extremidad completa), lo cual se logra usando instrumentos de medición. Una vez obtenido el bosquejo dimensional, se procede al diseño (modelado 3D) de la prótesis mediante software CAD, que permite personalizar la estructura y probar diferentes configuraciones para mejorar el ajuste y la funcionalidad. Autodesk Inventor fue escogida por contar con potentes herramientas de modelado 3D para piezas complejas con alta precisión, además, permite ajustar fácilmente las dimensiones de la prótesis bajo diferentes condiciones, asegurando así su funcionalidad. La Figura 2.1 presenta la metodología de diseño.

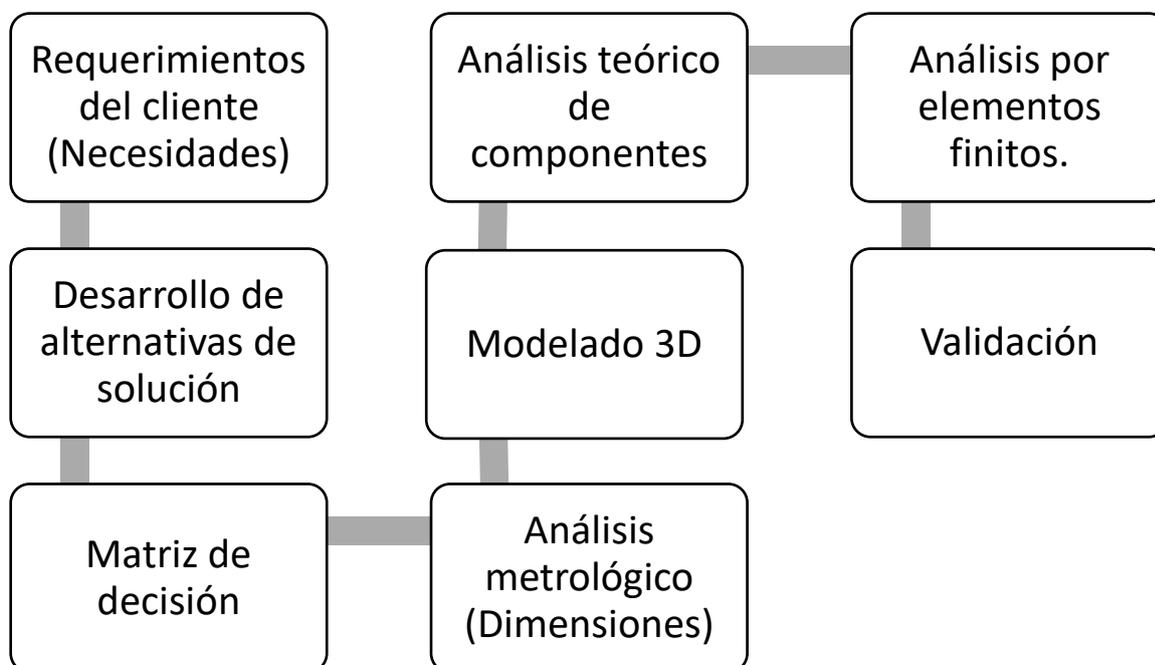


Figura 2.1 Diagrama de flujo de la metodología de diseño

El diseño se someterá a un análisis por elementos finitos (FEM) para simular la distribución de fuerzas y evaluar puntos de estrés, esto permite identificar posibles fallos antes de la impresión física y ajustar el diseño según los resultados obtenidos (Tomás & Lizarza, n.d.). Para ello, es fundamental optar por materiales con propiedades mecánicas adecuadas, según las necesidades específicas y tipo de actividad que realizará el animal. Alternativamente, se podrían utilizar materiales compuestos o mezclas de polímeros con mayor resistencia a impactos y deformaciones. El PLA con fibra de carbono destaca por su Módulo de Young de aproximadamente 10,000 MPa y una Relación de Poisson de 0.3, ofreciendo alta rigidez y resistencia, además de buena biocompatibilidad y baja absorción de humedad, ideal para estructuras rígidas como los huesos (Collado et al., 2022). Otra opción es el Nylon con fibra de vidrio, con un Módulo de Young entre 6000 y 10,000 MPa y una Relación de Poisson de 0.4, que proporciona un balance óptimo entre rigidez y flexibilidad, adecuado para huesos que necesitan soportar impacto y flexión (Collado et al., 2022). En aplicaciones de mayor flexibilidad, se puede considerar la resina de poliuretano siendo reconocida por su óptima relación entre flexibilidad, durabilidad y alta resistencia mecánica, lo que es más que adecuado para aplicaciones destinadas a la absorción de impactos y resistencia a la fatiga (Gordillo-Delgado et al., 2020).

2.1 Necesidades del Cliente

En base a la definición del problema y la justificación del proyecto se conoce de manera detallada la razón del diseño a realizar, sin embargo, fue necesario conocer las prioridades del cliente, en este caso, el gato y sus cuidadores. Las necesidades se centraron en mejorar la calidad de vida del gato mediante una prótesis que sea cómoda, duradera y funcional para sus actividades diarias.

Requerimientos específicos

Una vez definida y justificada la problemática del proyecto, se entiende claramente el motivo detrás del diseño a realizar. Sin embargo, es crucial identificar las prioridades de diseño del cliente. Para ello, se realizó un análisis detallado con el cliente de cada uno de los objetivos de diseño presentados en la figura a continuación:

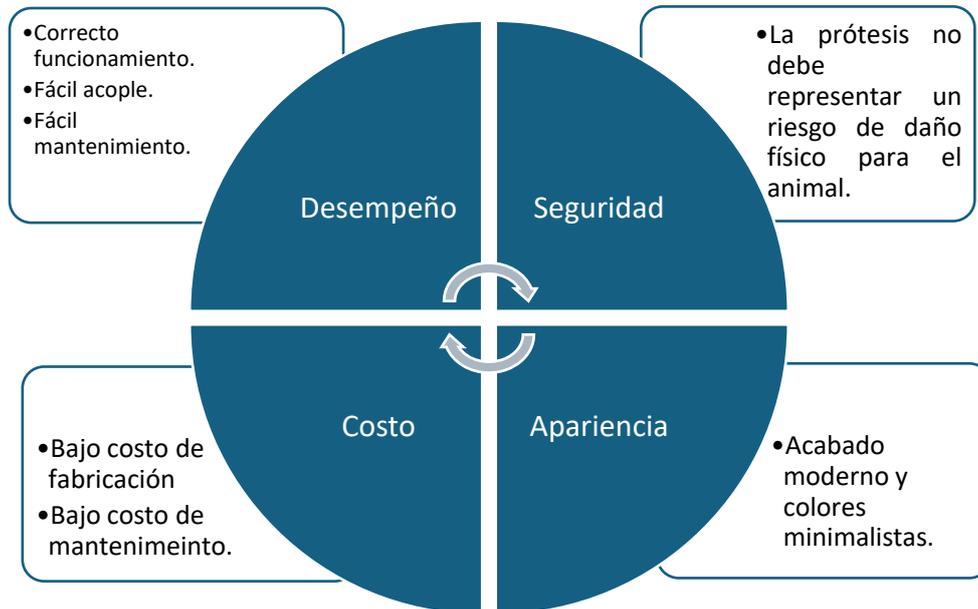


Figura 2.2 Diagrama de necesidades del cliente

2.2 Alternativas de Diseño

Alternativa #1

Este diseño consta de una cazoleta parcial en cuya sección posterior cuenta con un ajuste de correa. Se encuentra conectada por interferencia a una estructura rígida hecha en su totalidad de PLA con refuerzo de fibra de carbono, posee una ligera curvatura en su parte inferior para brindar movilidad, es un diseño de fácil ensamblaje que prioriza la estabilidad por sobre la flexibilidad. Más robusta y adecuada para cuando se necesite una mayor resistencia al impacto.

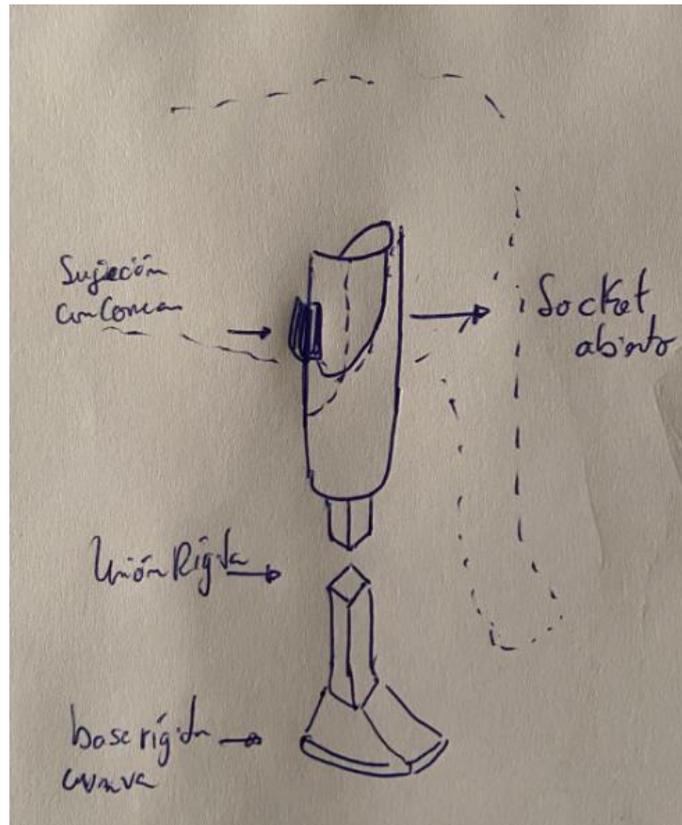


Figura 2.3 Alternativa rígida

Tabla 2.1 Ventajas/Desventajas Alternativa #1

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Diseño simple, económico y fácil de fabricar. • Peso reducido, minimizando la carga sobre el animal. • Alta resistencia a la deformación bajo carga estática. 	<ul style="list-style-type: none"> • Falta de flexibilidad que puede afectar la adaptación al movimiento natural del gato. • Menor confort debido a la rigidez de los materiales y el diseño. • Adaptabilidad limitada al terreno y menor amortiguación de impactos.

Alternativa #2

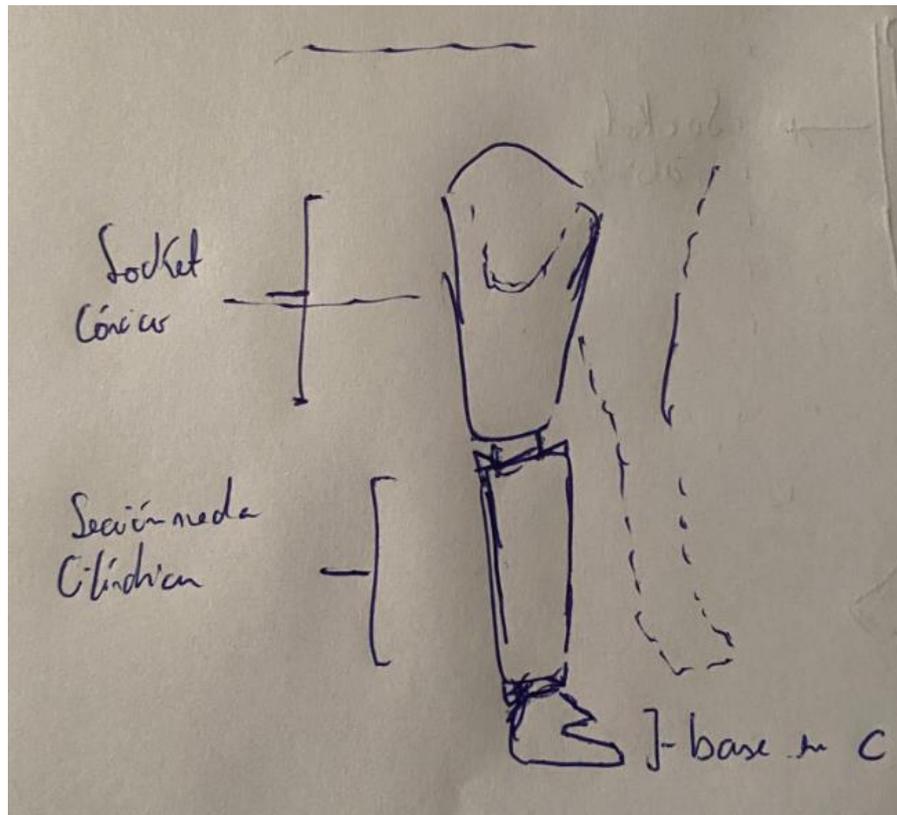


Figura 2.4 Alternativa anatómica

El diseño sigue la forma anatómica de la extremidad delantera opuesta del gato, utilizando Nylon con fibra de vidrio, PLA y resina de Poliuretano (PU) con fibra de carbono para proporcionar un equilibrio óptimo entre rigidez y flexibilidad. Este diseño combina una cazoleta personalizada para adaptarse al muñón del gato, un cilindro central que aporta estabilidad, y una base en forma de C que proporciona flexibilidad durante la pisada. Destaca por su capacidad de adaptación al movimiento natural del animal y su distribución uniforme de las cargas, lo que garantiza comodidad y funcionalidad. Aunque su fabricación puede ser más compleja y su peso es ligeramente mayor, ofrece un equilibrio ideal entre resistencia y adaptabilidad.

Tabla 2.2 Ventajas/Desventajas Alternativa #2

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Alta flexibilidad durante la pisada. • Excelente adaptación al terreno. • Distribución uniforme de las cargas, mejorando la comodidad del gato. 	<ul style="list-style-type: none"> • Mayor complejidad en la fabricación debido a la base en C. • Peso ligeramente superior comparado con el diseño completamente rígido.

Alternativa #3

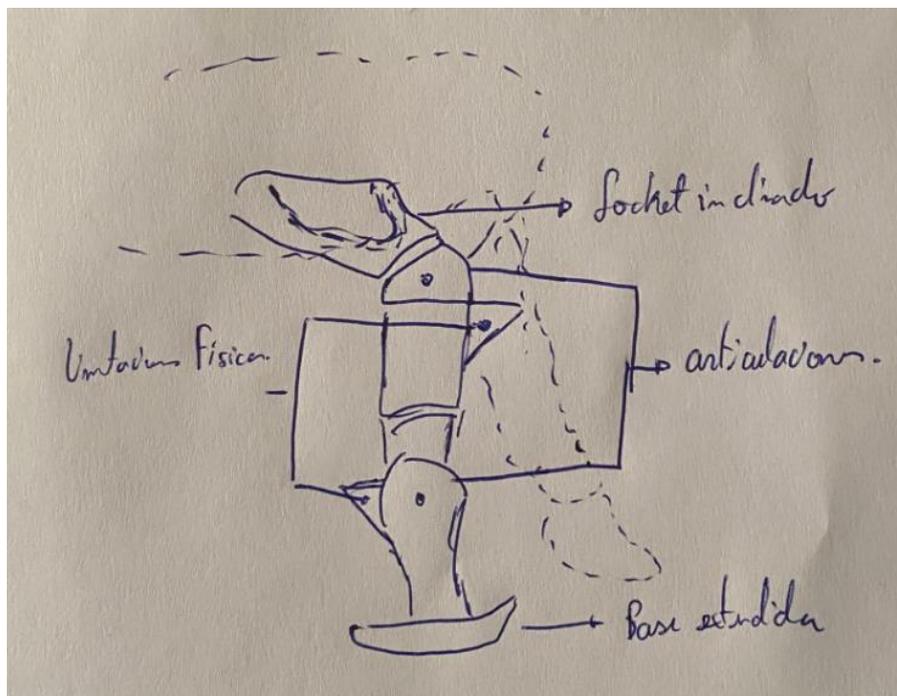


Figura 2.5 Alternativa articulada

El diseño se presenta como una prótesis modular, que permite la sustitución de componentes individuales según sea necesario. Utiliza una combinación de PLA con fibra de carbono para las partes estructurales y silicona para las zonas de contacto con la piel del gato, asegurando tanto durabilidad como confort. La prótesis modular se caracteriza por su diseño desmontable, que facilita el mantenimiento y reemplazo de componentes. Integra una articulación flexible que mejora la capacidad de ajuste. Sin

embargo, las uniones articuladas pueden comprometer su resistencia estructural y acumular suciedad con el tiempo. Además, el costo de fabricación es mayor debido a la complejidad del diseño.

Tabla 2.3 Ventajas/Desventajas Alternativa #3

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Modularidad que facilita el reemplazo de componentes dañados. • Facilidad para ajustar o personalizar elementos específicos. • Flexibilidad aceptable gracias a la articulación. 	<ul style="list-style-type: none"> • Menor resistencia estructural en las articulaciones. • Mayor costo de fabricación debido al diseño complejo y piezas múltiples. • Riesgo de excesiva acumulación de suciedad en las uniones, reduciendo su durabilidad.

2.3 Selección de la mejor alternativa

Para determinar la mejor alternativa de diseño, se empleó el análisis comparativo de factores influyentes, determinados según la relevancia de su aporte en el diseño final, dicha evaluación fue aplicada mediante el uso de la herramienta matriz de decisión aplicando el concepto de jerarquía analítica (AHP). Para la construcción de la matriz, se toma en consideración los siguientes factores:

Tabla 2.4 Criterios de decisión

Criterio	Descripción
Funcionalidad	Mide la capacidad del diseño para adaptarse al movimiento natural del gato y ofrecer comodidad.
Resistencia	Evalúa la capacidad del diseño para soportar cargas estáticas y dinámicas sin fallar.
Peso	Considera la ligereza del diseño, lo que impacta la comodidad y el uso prolongado.
Costo	Analiza el costo de fabricación, incluyendo materiales y procesos.

Facilidad de fabricación	Valora la simplicidad del diseño en términos de tiempo y tecnología necesaria para fabricarlo.
---------------------------------	--

2.4 Matriz comparativa de criterios

La siguiente tabla muestra la comparación de los criterios utilizando una escala de 1 a 5, donde 1 indica igual importancia y 5 indica que un criterio es extremadamente más importante que otro.

Tabla 2.5 Matriz comparativa

Criterio	Funcionalidad	Resistencia	Peso	Costo	Facilidad de fabricación
Funcionalidad	1	2	3	4	5
Resistencia	0.5	1	2	3	4
Peso	0.33	0.5	1	2	3
Costo	0.25	0.33	0.5	1	2
Facilidad de fabricación	0.2	0.25	0.33	0.5	1

Tabla 2.6 Tabla de escala de importancia de criterios

Escala numérica	Definición	Descripción
1	Igual Importancia	El criterio de fila es igual de importante que el criterio de columna.
2	Importancia moderada	Ligera importancia del criterio de fila sobre el de columna.
3	Importancia fuerte	Fuerte importancia del criterio de fila sobre el de columna.
4	Importancia fuertemente demostrada	El criterio de fila domina fuertemente al criterio de columna.
5	Importancia Extrema	Criterio de fila domina fuertemente con un orden de magnitud considerable al criterio de columna.

2.5 Matriz normalizada y cálculo de ponderaciones

Sumamos los valores de cada columna para obtener los valores de normalización y luego dividimos cada valor individual por la suma de su columna.

Tabla 2.7 Tabla de normalización

Criterio	Funcionalidad	Resistencia	Peso	Costo	Facilidad de fabricación	Suma
Funcionalidad	0.37	0.4	0.43	0.44	0.42	2.06
Resistencia	0.18	0.2	0.29	0.33	0.33	1.33
Peso	0.12	0.1	0.14	0.22	0.25	0.83
Costo	0.09	0.07	0.07	0.11	0.17	0.51
Facilidad de fabricación	0.08	0.05	0.05	0.06	0.08	0.32

2.6 Cálculo de la ponderación

Tabla 2.8 Tabla de ponderación

Criterio	Suma normalizada	Ponderación %
Funcionalidad	2.06	41.2
Resistencia	1.33	26.6
Peso	0.83	16.6
Costo	0.51	10.2
Facilidad de fabricación	0.32	6.4
Total	5.00	100

2.7 Evaluar las alternativas de diseño

Evaluamos cada alternativa en función de los criterios establecidos, utilizando una escala de 1 a 5, donde 5 es la mejor calificación.

Tabla 2.9 Tabla de evaluación de alternativas

Criterio	Alternativa #1	Alternativa #2	Alternativa #3
Funcionalidad	3	5	4
Resistencia	4	5	4
Peso	5	4	3
Costo	5	4	3
Facilidad de fabricación	5	4	3

2.8 Tabla de puntuación total

Multiplicamos cada calificación por la ponderación del criterio correspondiente y sumamos los resultados para obtener la puntuación total de cada alternativa.

Tabla 2.10 Puntuaciones finales

Alternativa	Puntaje Ponderado
Alternativa #1	4.15
Alternativa #2	4.55
Alternativa #3	3.75

El diseño de la alternativa #2 obtiene el puntaje más alto debido a su funcionalidad y resistencia. Las alternativas ofrecen ventajas en peso y costo, pero comprometen la funcionalidad, que es crítica para el éxito del proyecto.

2.9 Diseño detallado

En esta sección se realiza un análisis preliminar para determinar cargas a considerar en el diseño final y las debidas justificaciones de la forma y dimensiones de cada una de las piezas a emplear. Para esto se realizó un análisis metrológico del felino con uso de instrumentos de medición.

Para el diseño de la prótesis, se consideraron las dimensiones anatómicas del muñón del gato, teniendo una cita con el cliente para realizar las debidas mediciones del felino. Estas medidas aseguran un ajuste óptimo y evitan molestias o restricciones en el movimiento del animal. Se tomaron en cuenta parámetros específicos: diámetro del muñón, longitud, ángulos de apoyo, etc. Garantizando una estructura funcional y ergonómica.

Análisis preliminar

Para el análisis preliminar usando ecuaciones físicas y determinar los esfuerzos en las partes de la prótesis, se dividió en tres secciones principales, similares a una extremidad felina común.

- Sección proximal (Unión con el muñón)
- Sección media (Simulando el húmero)
- Sección distal (Simulando la pata)

Los gatos tienen una marcha digitígrada, que significa, caminan sobre los dedos de los pies. Durante la marcha, las patas no se apoyan simultáneamente, sino que se alternan en un patrón de movimiento conocido como "marcha cuadrúpeda". En este análisis, consideraremos la pata delantera durante un evento crítico, como el aterrizaje después de un salto.

Al aterrizar después de un salto, la pata delantera puede experimentar fuerzas significativamente mayores que durante la marcha normal. Asumimos que la fuerza de impacto es aproximadamente 4 veces el peso del gato debido al impulso del aterrizaje.

Datos Iniciales

- **Distribución del peso en cuatro extremidades:**

Al ser un mamífero de cuadrúpedo la distribución del peso total se puede distribuir equitativamente en sus 4 extremidades.

- **Ángulo de inclinación de la pata delantera respecto a la vertical:**

20° (aproximación típica para patas delanteras de gatos en posición normal)

- **Fuerza aplicada en cada pata (en aterrizaje):**

$$P = 4(m \cdot g) \quad (2.1)$$

Donde:

$m = 4$ [Kg] (Masa del gato)

$$g = 9.81 \left[\frac{m}{s^2} \right]$$

$$P = 4 \cdot (4[Kg]) \cdot \left(9.81 \left[\frac{m}{s^2} \right] \right)$$

$$P = 156.96[N]$$

Descripción de partes de la prótesis felina

- **Cazoleta (Componente superior)**

La cazoleta es el componente superior de la prótesis, diseñado para ajustarse cómodamente al muñón del gato. Tiene una forma cóncava para proporcionar un soporte seguro y distribuir la carga uniformemente. Su geometría troncocónica le permite una adaptación precisa no solo al muñón sino un soporte significativo al cuerpo del animal distribuyendo las fuerzas de contacto de manera uniforme, minimizando así la presión localizada, esto a su vez previene lesiones o incomodidad. Este elemento será validado por criterios de diseño teóricos y análisis por elementos finitos.

- **Sección media (Componente cilíndrico medio)**

El componente cilíndrico es el elemento que conecta la cazoleta con la base de la prótesis. Está diseñada para ser rígida y resistente, soportando el peso y el movimiento del gato.

El diseño de la sección media como un cilindro sólido permite que actúe eficientemente como columna sometida a compresión, distribuyendo las cargas de manera uniforme y proporcionando una elevada rigidez estructural. El material seleccionado, Nylon reforzado con fibra de carbono, ofrece un límite de elasticidad alto y un módulo elástico elevado lo que lo hace resistente al pandeo y a las cargas dinámicas generadas por el movimiento del animal. Este material también proporciona un bajo peso, evitando sobrecargar al gato y su resistencia a impactos asegura durabilidad a largo plazo.

Este elemento será validado con criterios de diseño para una columna sometida al pandeo.

- **Base en C (Componente inferior)**

La base de la prótesis es la parte que entra en contacto con el suelo. Está diseñada para ser ancha y plana, proporcionando estabilidad y un área de contacto adecuada. Además, será la encargada de absorber los impactos de manera adecuada proporcionando mayor comodidad para el usuario animal, este componente será elaborada a base de resina de poliuretano para mayor flexibilidad. Esta pieza será validada con análisis teórico y por FEM.

- **Pasadores**

Los pasadores son los elementos que permiten la articulación entre los componentes. Están diseñados para ser insertados a presión, asegurando una conexión fuerte y duradera. Se validarán con criterio de elemento sometido a esfuerzo cortante. La forma cilíndrica permite una rotación suave y controlada, necesaria para imitar el movimiento natural del gato. Como material se empleará acero inoxidable que proporciona la resistencia necesaria para soportar el movimiento repetitivo sin deformarse.

Sección proximal (Cazoleta):**Material:** Nylon + fibra de vidrio**Figura 2.6 Cazoleta****Tabla 2.11 Parámetros de Cazoleta**

Variables	Valores
Altura (h)	$1350 \left[\frac{Kg}{m^3} \right]$
Diámetro base (d_b)	$0.015[m]$
Diámetro superior (d_s)	$0.0125[m]$

Volumen (Troncocónico):

$$V = \frac{\pi \cdot h}{3} * (r_b^2 + r_b * r_s + r_s^2) \quad (2.2)$$

$$V = \frac{\pi \cdot (0.05)}{3} * ((0.015)^2 + (0.015 * 0.0125) + (0.0125)^2)$$

$$V = \frac{\pi \cdot (0.05)}{3} * 5.6875 \times 10^{-4} = 2.98 \times 10^{-5} [m^3]$$

$$V = 2.98 \times 10^{-5} [\text{m}^3]$$

Peso:

$$P = V * \rho * g \quad (2.3)$$

$$P = 2.98 \times 10^{-5} [\text{m}^3] * 1350 \left[\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right] * 9.81 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right]$$

$$P = 0.0394 [\text{N}]$$

Sección media:

Material: PLA+ fibra de carbono



Figura 2.7 Sección media

Tabla 2.12 Parámetros de sección media

Variables	Valores
<i>Longitud (L)</i>	11[cm] = 0.11[m]
<i>Diámetro (d)/radio(r)</i>	0.025m /0.0125[m]

Volumen:

$$V = \pi * r^2 * L \quad (2.4)$$

$$V = \pi * 1.5625 \times 10^{-4} * 0.11$$

$$V = 5.39 \times 10^{-5} [m^3]$$

Peso:

$$P = V * g \quad (2.5)$$

$$P = 5.39 \times 10^{-5} [m^3] * \left(1350 \left[\frac{Kg}{m^3} \right] \right) * 9.81 \left[\frac{m}{s^2} \right]$$

$$P = 0.714 [N]$$

Sección distal (Base en C)

Material: Nylon + fibra de vidrio

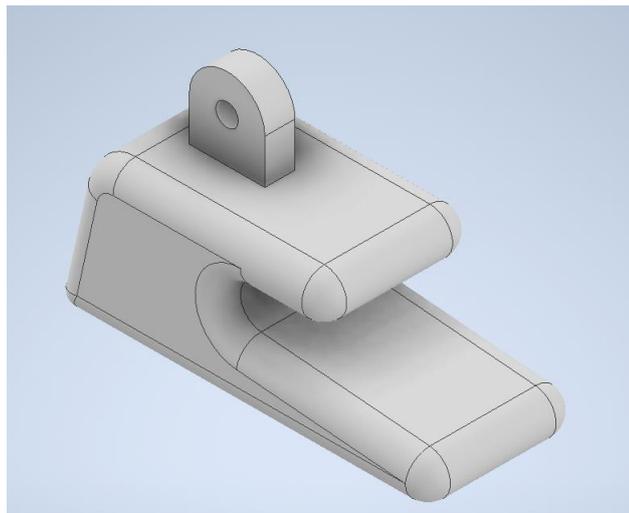


Figura 2.8 Base en C

Tabla 2.13 Parámetros de base en C

Variables	Valores
Longitud (L)	0.03[m]
Ancho (b)	0.02[m]
Grosor (t)	0.005[m]

Volumen (Paralelepípedo):

$$V = L * b * t \quad (2.6)$$

$$V = 0.03 * 0.02 * 0.005$$

$$V = 3 \times 10^{-6} [m^3]$$

Peso:

$$P = V * \rho * g \quad (2.7)$$

$$M = 3 \times 10^{-6} [m^3] \cdot 1.3 \left[\frac{g}{cm^3} \right] * 9.81 \left[\frac{m}{s^2} \right]$$

$$P = 0.0382 [N]$$

Tabla 2.14 Resumen de datos

Componente	Volumen (m ³)	Peso (N)	Masa (g)
Cazoleta	2.98x10 ⁻⁵	0.394	40
Sección media	5.39x10 ⁻⁵	0.714	72
Base en C	3x10 ⁻⁶	0.0382	4

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este capítulo se describen los resultados obtenidos durante el desarrollo del proceso de diseño de la prótesis para el gato doméstico, incluyendo el comportamiento mecánico de la estructura basado en un análisis estático y dinámico para estimar un tiempo de vida de acuerdo con la cantidad de pasos promedio de un felino doméstico en condiciones normales, lo que resulta en un aproximado de 3.65×10^6 ciclos. Adicionalmente, se muestra la validación final a través del uso de Autodesk Inventor con licencia estudiantil, como software CAD integrado de elementos finitos.

Validación de elementos por criterios de diseño

- **Cazoleta**

Primero Calculamos el área de la base para poder calcular el esfuerzo axial, al cual va a estar sometida la pieza, luego de eso se debe comparar con la resistencia a la cedencia del material, posterior a eso se determinó un factor de seguridad.

Análisis estático

Área de la base:

$$A_{cazoleta} = \pi * r_b^2$$

$$A_{cazoleta} = \pi * (0.0275)^2$$

$$A_{cazoleta} = 2.375 \times 10^{-3} [m^2]$$

Esfuerzo axial:

$$\sigma_{Cazoleta} = \frac{F}{A_{cazoleta}}$$

$$\sigma_{Cazoleta} = \frac{156.96}{2.375 \times 10^{-3}}$$

$$\sigma_{Cazoleta} = 66.06 [MPa]$$

Factor de seguridad:

$$FS = \frac{\sigma_y}{\sigma_{cazoleta}}$$

$$FS = \frac{150}{66.06}$$

$$FS = 1.74$$

Análisis dinámico

Carga máxima (Impacto): $F_{m\acute{a}x} = 156.96 [N]$

Carga mínima (Reposo): $F_{min} = 39.24 [N]$

Resistencia a la fatiga: $\sigma'_f = 25 [MPa]$

Cálculo de esfuerzos:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{F_{m\acute{a}x}}{A}$$

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{156.96}{0.002}$$

$$\sigma_{m\acute{a}x} = 78.48 [KPa]$$

$$\sigma_{min} = \frac{F_{min}}{A}$$

$$\sigma_{min} = \frac{39.24}{0.002}$$

$$\sigma_{min} = 19.62 [KPa]$$

$$\sigma_{med} = \frac{\sigma_{m\acute{a}x} + \sigma_{min}}{2}$$

$$\sigma_{med} = \frac{78.48 + 19.62}{2}$$

$$\sigma_{med} = 49.05[KPa]$$

$$\sigma_{alt} = \frac{\sigma_{m\acute{a}x} - \sigma_{min}}{2}$$

$$\sigma_{alt} = \frac{78.48 - 19.62}{2}$$

$$\sigma_{alt} = 29.43[KPa]$$

Cálculo de vida con respecto a la fatiga:

$$N_f = \left(\frac{\sigma'_f}{\sigma_{alt}} \right)^{\frac{1}{b}}$$

Donde:

σ'_f = Resistencia a la fatiga del material [MPa]

σ_{alt} = Esfuerzo alternante [MPa]

b = Esponente de fatiga (adimensional)

$$N_f = \left(\frac{25}{0.02943} \right)^{\frac{1}{0.1}}$$

$$N_f = 1.95 \times 10^{29}$$

Tiempo de vida estimado:

$$t_v = \frac{1.95 \times 10^{29}}{3.65 \times 10^6}$$

$$t_v = 5.36 \times 10^{22}$$

- **Sección media**

Validación del diseño de la sección media por criterio de diseño (columna sometida a pandeo).

Área transversal:

$$A_{cilindro} = \pi * r_{cilindro}^2$$

$$A_{cilindro} = \pi * (0.04)^2$$

$$A_{cilindro} = 1.25 * 10^{-4} [m^2]$$

Esfuerzo de compresión:

$$\sigma_{cilindro} = \frac{F}{A_{cilindro}}$$

$$\sigma_{Cazoleta} = \frac{156.96}{1.25 * 10^{-4}}$$

$$\sigma_{Cazoleta} = 124904.5 [Pa]$$

$$\sigma_{Cazoleta} = 124 [KPa]$$

Inercia de un cilindro:

$$I = \frac{\pi}{4} * r_{cilindro}^4$$

$$I = \frac{\pi}{4} * (0.02)^4$$

$$I = 1.25 * 10^{-7} [m^4]$$

Carga crítica de pandeo:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 * E * I}{L^2}$$

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 * (6 * 10^9) * 1.25 * 10^{-7}}{0.11^2}$$

$$P_{cr} = 12363.49 [N]$$

Factor de seguridad:

$$FS = \frac{P_{cr}}{F}$$

$$FS = \frac{12363.49}{156}$$

$$FS = 79.25$$

Análisis dinámico

Carga máxima (Impacto): $F_{m\acute{a}x} = 157[N]$

Carga mínima (Reposo): $F_{min} = 39.24 [N]$

Resistencia a la fatiga: $\sigma'_f = 45 [MPa]$

Cálculo de esfuerzos:

$$\begin{aligned}\sigma_{m\acute{a}x} &= \frac{F_{m\acute{a}x}}{A} \\ \sigma_{m\acute{a}x} &= \frac{156.96}{0.002} \\ \sigma_{m\acute{a}x} &= 78.5 [KPa]\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sigma_{min} &= \frac{F_{min}}{A} \\ \sigma_{min} &= \frac{39.24}{0.002} \\ \sigma_{min} &= 19.62 [KPa]\end{aligned}$$

$$\sigma_{med} = \frac{\sigma_{m\acute{a}x} + \sigma_{min}}{2}$$

$$\sigma_{med} = \frac{78.5 + 19.62}{2}$$

$$\sigma_{med} = 49.05 [KPa]$$

$$\sigma_{alt} = \frac{\sigma_{m\acute{a}x} - \sigma_{min}}{2}$$

$$\sigma_{alt} = \frac{78.48 - 19.62}{2}$$

$$\sigma_{alt} = 30[KPa]$$

Cálculo de vida con respecto a la fatiga:

$$N_f = \left(\frac{\sigma_f'}{\sigma_{alt}} \right)^{\frac{1}{b}}$$

Donde:

σ_f' = Resistencia a la fatiga del material [MPa]

σ_{alt} = Esfuerzo alternante [MPa]

b = Esponente de fatiga (adimensional)

$$N_f = \left(\frac{45}{0.03} \right)^{\frac{1}{0.1}}$$

$$N_f = 5.76 \times 10^{31}$$

Tiempo de vida estimado:

$$t_v = \frac{5.76 \times 10^{31}}{3.65 \times 10^6}$$

$$t_v = 1.57 \times 10^{25}$$

- **Base en C**

Momento máximo:

$$M = F * L$$

$$M = 156.96 * 0.03$$

$$M = 4.71[N * m]$$

Momento de inercia:

$$I_{base} = \frac{b * t^3}{12} = \frac{0.02 * (0.0045)^3}{12}$$

$$I_{base} = \frac{0.02 * (0.0045)^3}{12}$$

$$I_{base} = 1.518 \times 10^{-8} [m^4]$$

Esfuerzo de flexión:

$$\sigma_{flexión} = \frac{M * c}{I}$$

$$\sigma_{flexión} = \frac{4.71 * (0.0045/2)}{1.518 \times 10^{-8}}$$

$$\sigma_{flexión} = 697.82 [kPa]$$

$$\sigma_{flexión} = 0.7 [Mpa]$$

Factor de seguridad:

$$FS = \frac{\sigma_b}{\sigma_{flexión}}$$

$$FS = \frac{45}{0.7}$$

$$FS = 64.28$$

Análisis dinámico

Carga máxima (Impacto): $F_{máx} = 157 [N]$

Carga mínima (Reposo): $F_{min} = 39.24 [N]$

Resistencia a la fatiga: $\sigma'_f = 12 [MPa]$

Cálculo de esfuerzos:

$$\sigma_{máx} = \frac{F_{máx}}{A}$$

$$\sigma_{máx} = \frac{156.96}{0.002}$$

$$\sigma_{máx} = 78.5 [KPa]$$

$$\sigma_{min} = \frac{F_{min}}{A}$$

$$\sigma_{min} = \frac{39.24}{0.002}$$

$$\sigma_{min} = 19.62 [KPa]$$

$$\sigma_{med} = \frac{\sigma_{m\acute{a}x} + \sigma_{min}}{2}$$

$$\sigma_{med} = \frac{78.5 + 19.62}{2}$$

$$\sigma_{med} = 49.05 [KPa]$$

$$\sigma_{alt} = \frac{\sigma_{m\acute{a}x} - \sigma_{min}}{2}$$

$$\sigma_{alt} = \frac{78.48 - 19.62}{2}$$

$$\sigma_{alt} = 30 [KPa]$$

Cálculo de vida con respecto a la fatiga:

$$N_f = \left(\frac{\sigma'_f}{\sigma_{alt}} \right)^{\frac{1}{b}}$$

Donde:

σ'_f = Resistencia a la fatiga del material [MPa]

σ_{alt} = Esfuerzo alternante [MPa]

b = Esponente de fatiga (adimensional)

$$N_f = \left(\frac{12}{0.03} \right)^{\frac{1}{0.1}}$$

$$N_f = 1.04 \times 10^{26}$$

Tiempo de vida estimado:

$$t_v = \frac{1.04 \times 10^{26}}{3.65 \times 10^6}$$

$$t_v = 2.87 \times 10^{19} \text{ [años]}$$

Validación de piezas usando análisis por elementos finitos

- Cazoleta

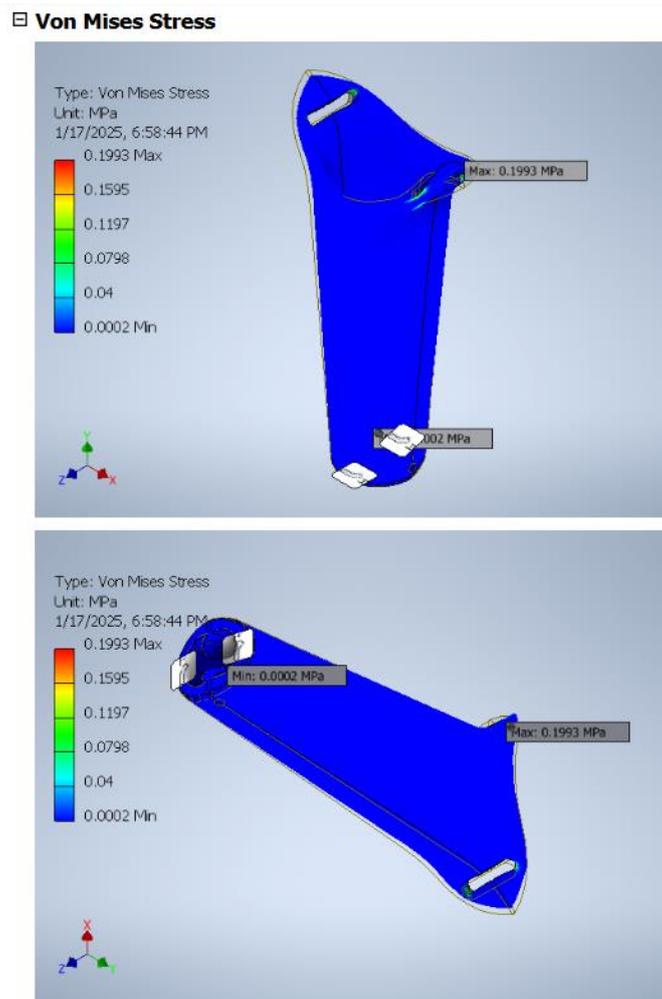


Figura 3.1 (Cazoleta FEM) Esfuerzos de Von Mises

Tabla 3.1 Esfuerzos mínimos y máximos

<i>Mínimo</i>	0.000153158 [MPa]
<i>Máximo</i>	0.199333 [MPa]

El esfuerzo máximo de Von Mises es significativamente bajo, indicando que la cazoleta está operando muy por debajo del límite elástico del material. Esto sugiere que, bajo las condiciones de carga actuales, la pieza no está en riesgo de deformación plástica o falla por cedencia.

▣ Displacement

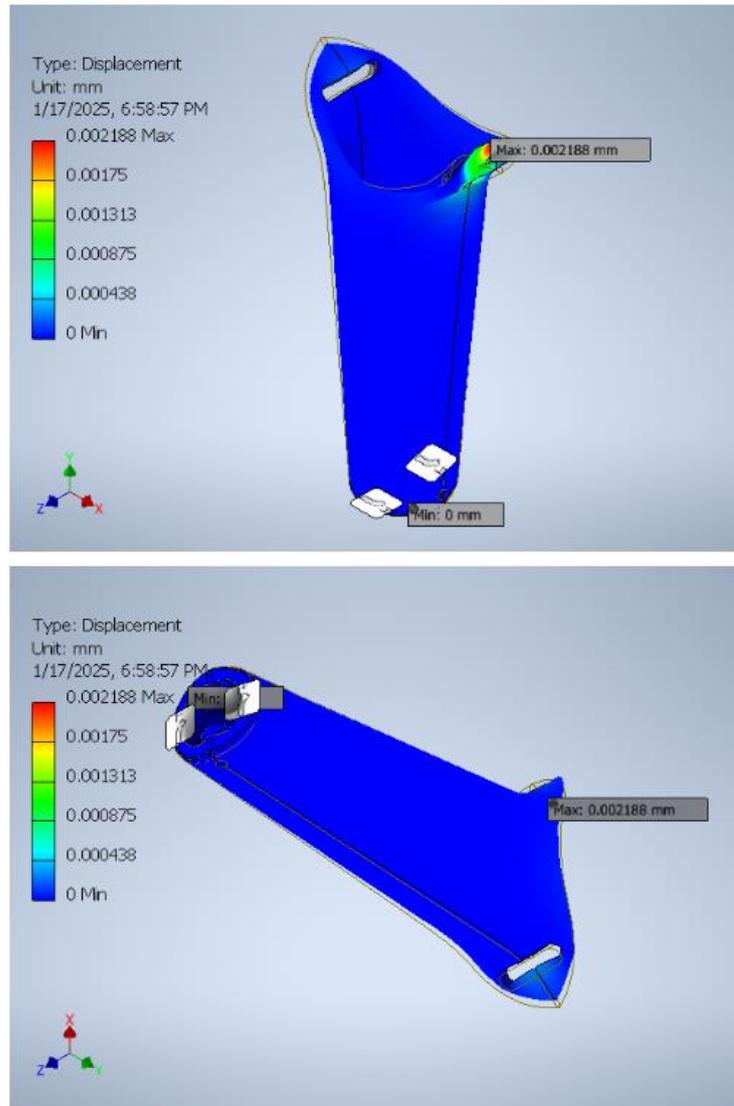
**Figura 3.2 (Cazoleta FEM) Deformación**

Tabla 3.2 Deformación mínima y máxima

<i>Mínimo</i>	0 [mm]
<i>Máximo</i>	0.00218779 [mm]

La deformación máxima es extremadamente pequeña, lo que indica que la cazoleta mantiene su forma y funcionalidad sin sufrir deformaciones significativas bajo las cargas aplicadas.

☐ **Safety Factor**

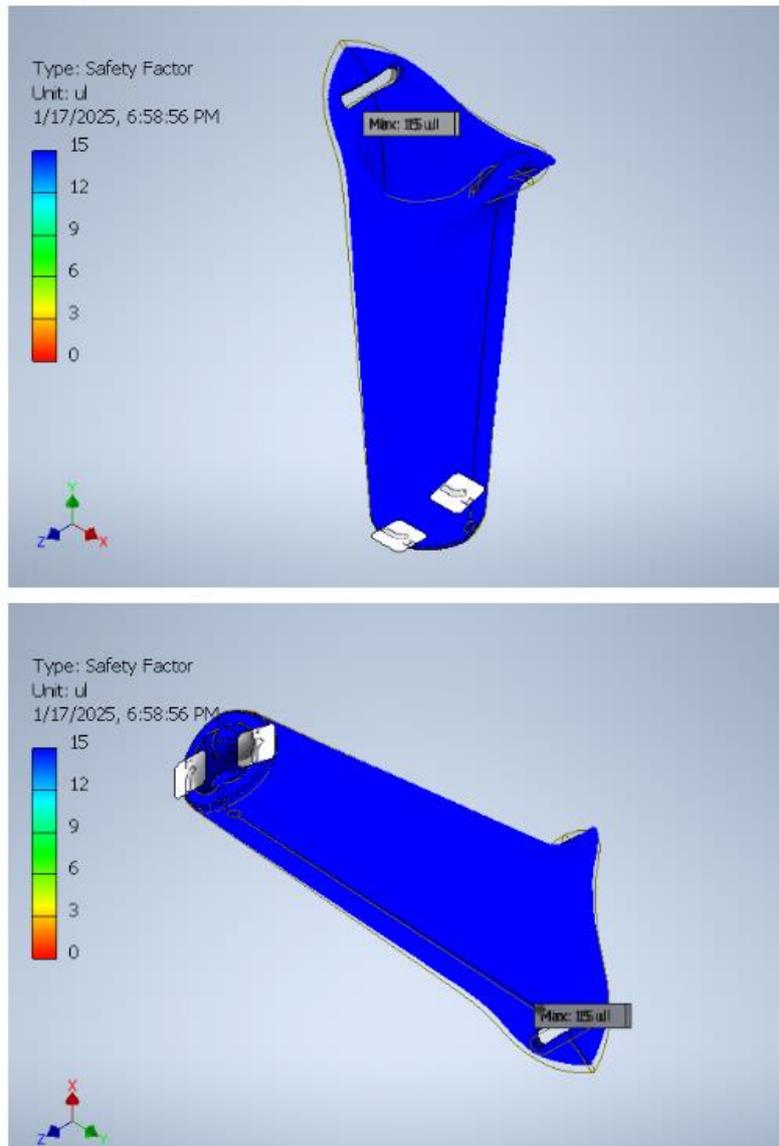


Figura 3.3 (Cazoleta FEM) Factor de seguridad

Tabla 3.3 Factor de seguridad

<i>Valor constante</i>	<i>15 (En toda la pieza)</i>
------------------------	------------------------------

Un factor de seguridad de 15 es considerablemente alto, lo que implica que la cazoleta tiene una capacidad de carga muy superior a las solicitaciones actuales. Esto proporciona una amplia margen de seguridad, aunque podría ser indicativo de un diseño conservador.

- **Sección media**

☐ **Von Mises Stress**

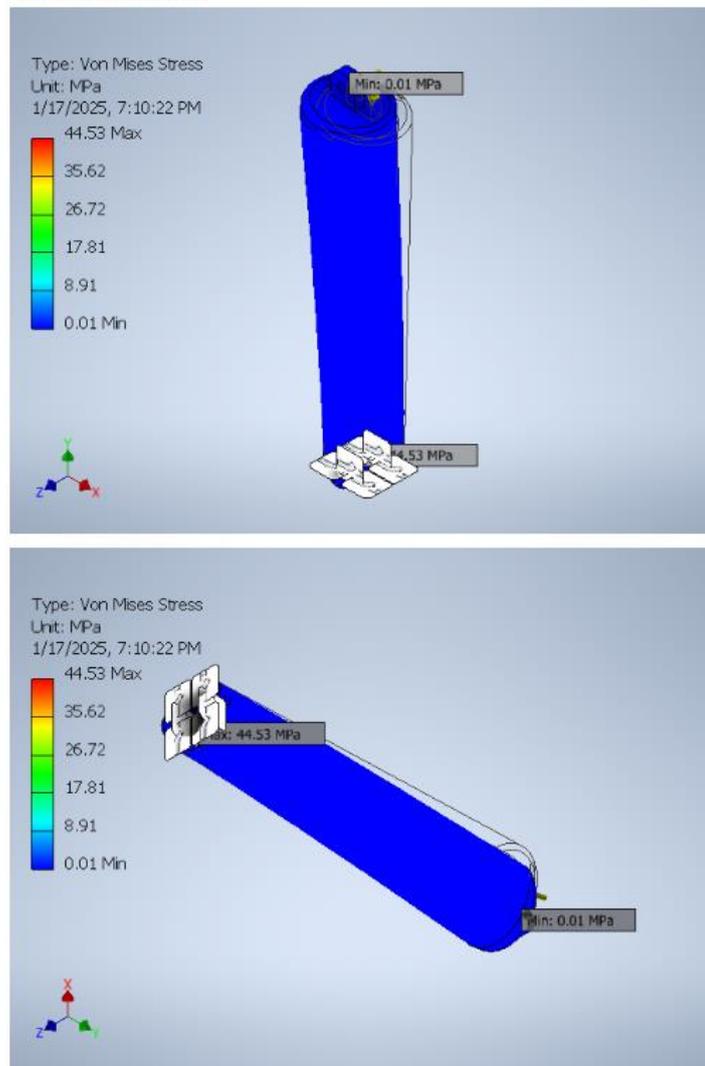


Figura 3.4 (Sección media FEM) Esfuerzos de Von Mises

Tabla 3.4 Esfuerzos mínimos y máximos

<i>Mínimo</i>	00.005516 [MPa]
<i>Máximo</i>	44.5266 [MPa]

El esfuerzo máximo es significativamente mayor que en el análisis de la cazoleta. Sin embargo, el valor de 44.5266 MPa sigue siendo seguro si el material tiene un límite elástico adecuado. Por lo que se puede considerar como un diseño seguro.

☐ **Displacement**

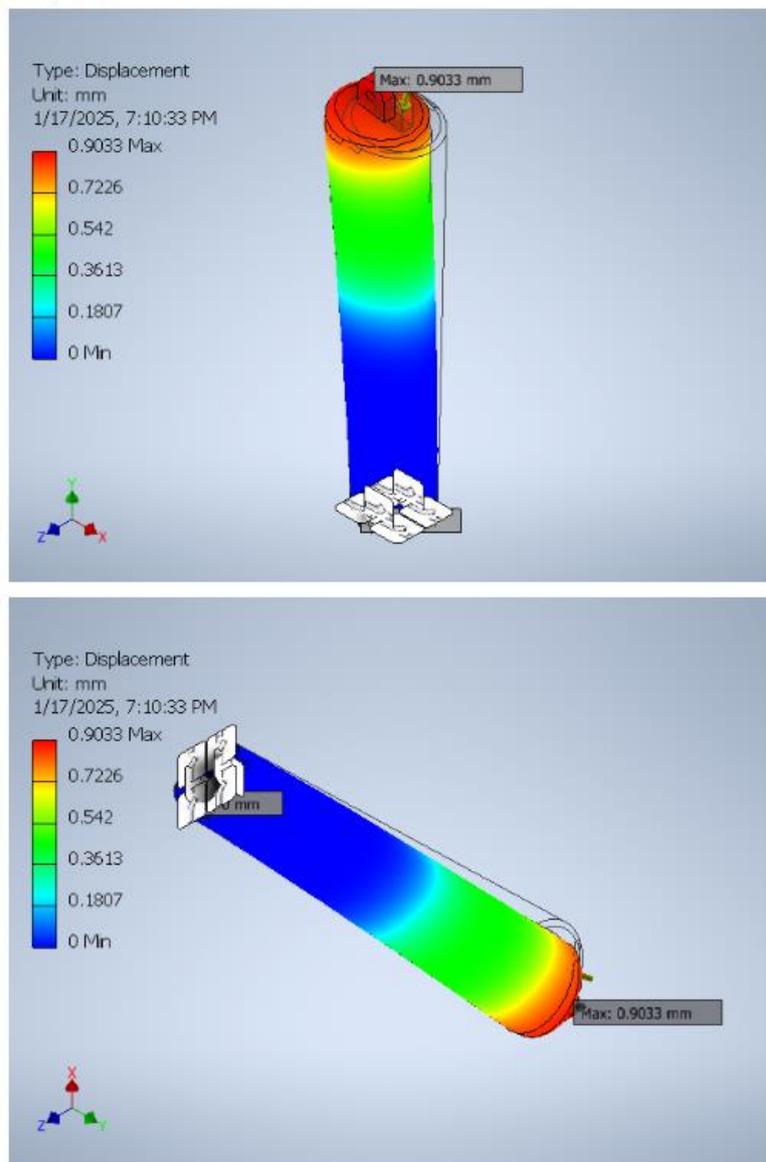


Figura 3.5 (Sección media FEM) Deformación

Tabla 3.5 Deformación mínima y máxima

<i>Mínimo</i>	0 [mm]
<i>Máximo</i>	0.903305 [mm]

La deformación máxima es considerablemente mayor que en la cazoleta. Esto puede deberse a la geometría del cilindro o a las condiciones de carga aplicadas. Aunque la deformación está por debajo de 1 mm, podría afectar la funcionalidad si el cilindro necesita mantener alta precisión en su forma o alineación, pero dado que la prótesis está diseñada para estar en constante movimiento se considera aceptable.

☐ Safety Factor

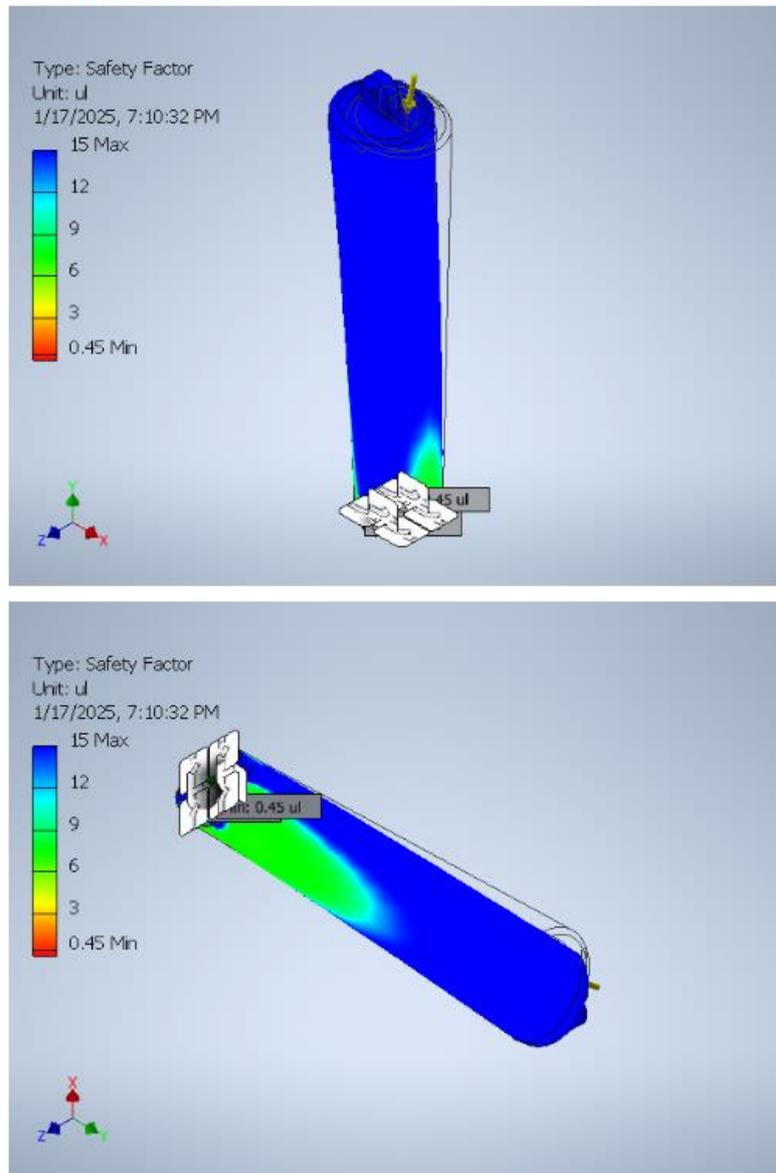
**Figura 3.6 (Sección media FEM) Factor de seguridad**

Tabla 3.6 Factores de seguridad

<i>Mínimo</i>	0.45
<i>Máximo</i>	15

La región con un FS mínimo de 0.45 es crítica, ya que indica que esas áreas están operando muy cerca del límite elástico del material. Aunque el FS máximo es alto en otras áreas, las zonas críticas con FS bajo, no comprometen el uso de prótesis, ya que como se indicó se diseña para el escenario más crítico.

- **Base en C**

☐ **Von Mises Stress**

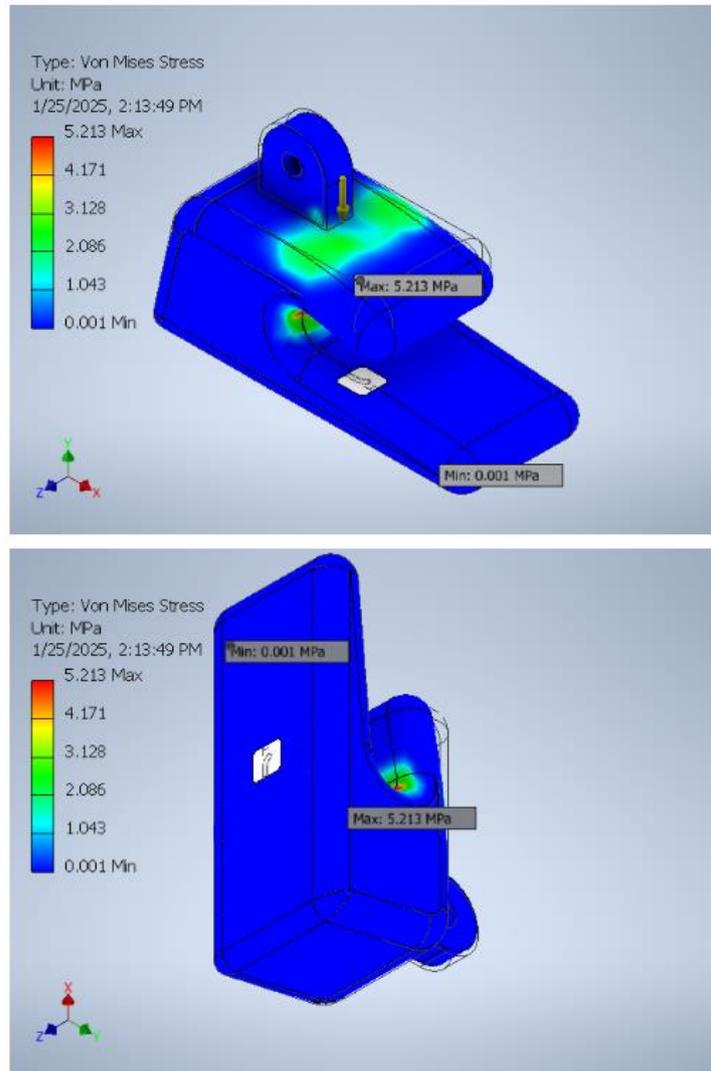


Figura 3.7 (Base en C FEM) Esfuerzos de Von Mises

Tabla 3.7 Esfuerzos mínimo y máximo

<i>Mínimo</i>	0.000963485[MPa]
<i>Máximo</i>	5.21324 [MPa]

El esfuerzo máximo de Von Mises es bajo, indicando que la base opera de manera segura dentro de los límites del material, siempre que el límite elástico sea mayor a 5.3 MPa. Esto muestra que la base tiene suficiente capacidad para soportar las cargas aplicadas sin riesgo de deformación plástica.

☐ **Displacement**

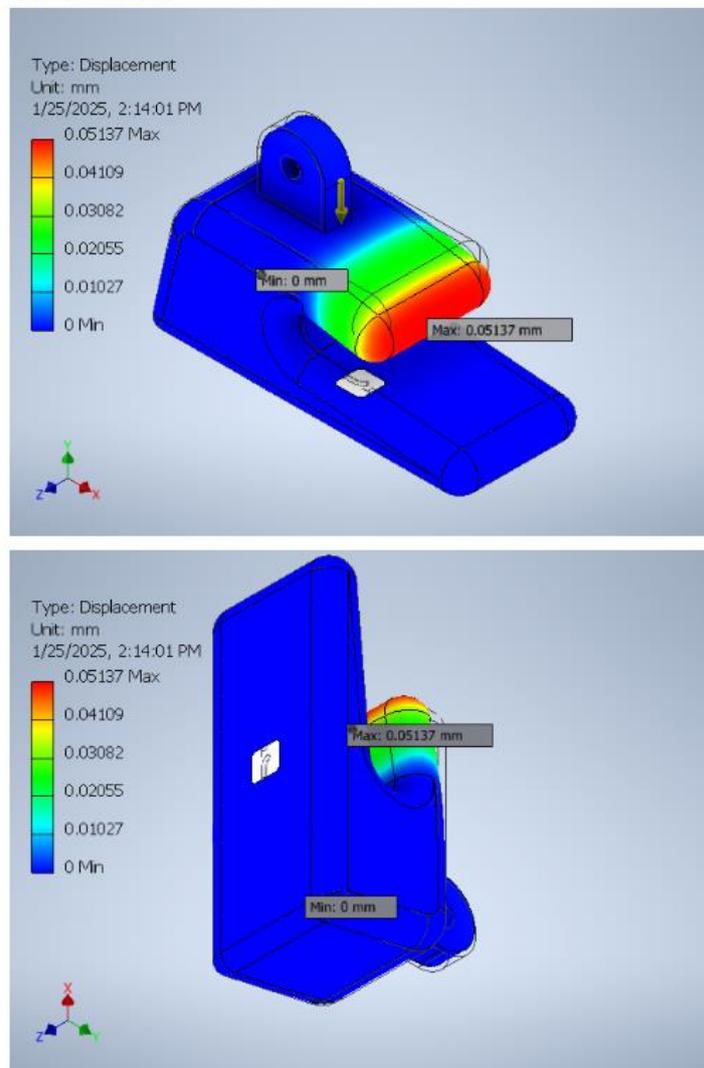


Figura 3.8 (Base en C FEM) Deformación

Tabla 3.8 Deformación mínima y máxima

<i>Mínimo</i>	0 [mm]
<i>Máximo</i>	0.051368 [mm]

La deformación máxima es muy pequeña, indicando una buena rigidez de la base. Este nivel de desplazamiento es insignificante en la mayoría de los escenarios funcionales, lo que asegura que la base mantenga su forma y desempeño sin problemas.

☐ **Safety Factor**

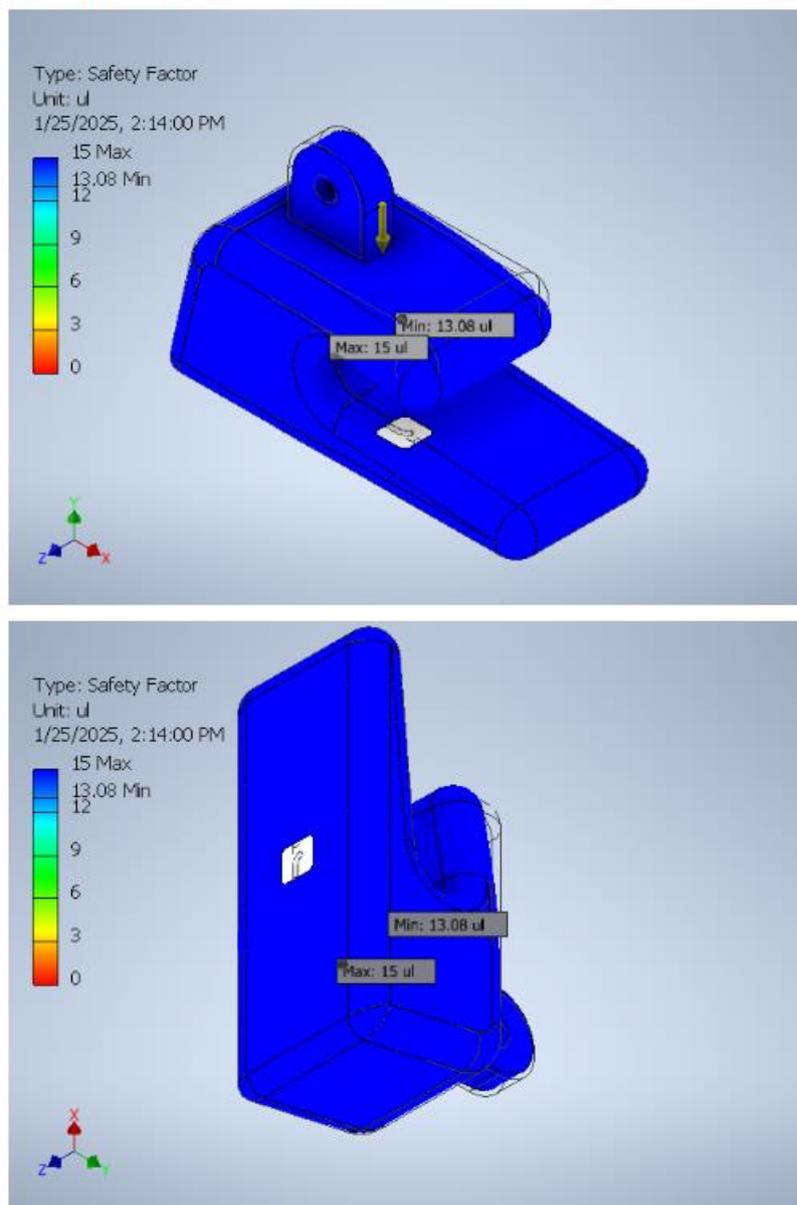


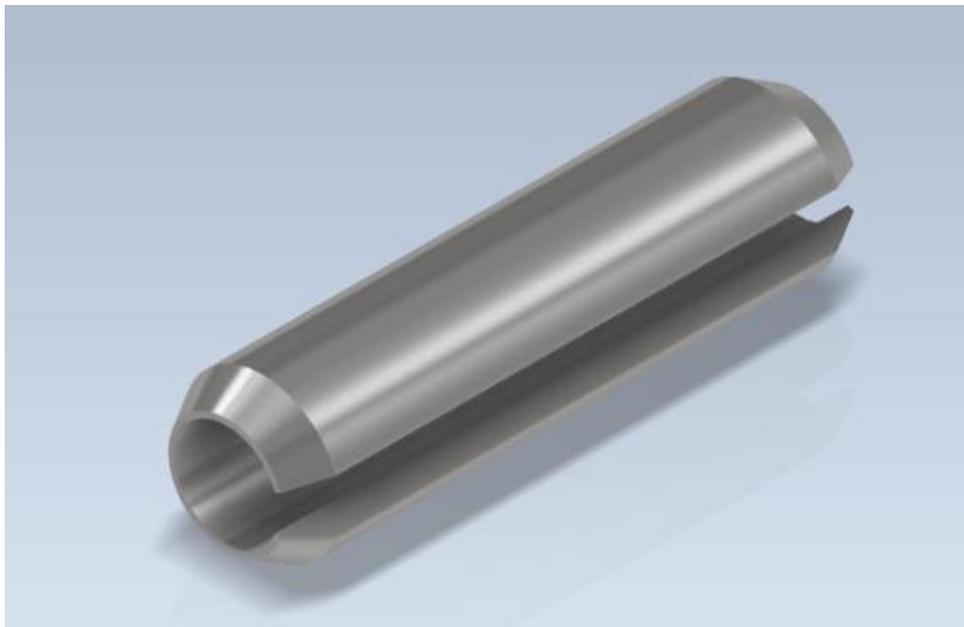
Figura 3.9 (Base en C FEM) Factor de seguridad

Tabla 3.9 factor de seguridad

<i>Mínimo</i>	13
<i>Máximo</i>	15

Un factor de seguridad mínimo de 13 y máximo de 15 indica que la base está operando con una capacidad mucho mayor a la necesaria. Esto garantiza que la pieza es extremadamente segura, pero también puede implicar un diseño sobredimensionado.

- **Pasador**

**Figura 3.10 pasador Acero Inoxidable AISI 316**

Para el pasador de diámetro 3 mm y de espesor 5 mm se seleccionó el uso del material metálico “Acero inoxidable AISI 316” el cual cuenta con las siguientes propiedades:

Tabla 3.10 Resistencias del Acero Inoxidable AISI 316

<i>Resistencia al esfuerzo cortante ($\tau_{admisible}$)</i>	200 [MPa]
<i>Resistencia a la compresión ($\sigma_{admisible}$)</i>	300 [Mpa]

Esfuerzo cortante:

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

$$A = \frac{\pi * d^2}{4}$$

Se resolvió para encontrar el diámetro idóneo para el pasador (d):

$$d = \sqrt{\frac{4F}{\pi * \tau_{admisible}}}$$

$$d = \sqrt{\frac{4 * (156.96)}{\pi * (200 * 10^6)}}$$

$$d = 2.8mm$$

Esfuerzo de compresión:

$$\sigma_{compresión} = \frac{F}{t * \sigma_{admisible}}$$

$$d = \frac{F}{t * \sigma_{compresión}}$$

$$d = \frac{156.96}{0.005 * 300 * 10^6}$$

$$d = 2.1mm$$

Resumen de resultados:

Tabla 3.11 Resultados Cazoleta

	<i>Area</i> [m ²]	<i>Esfuerzo</i> <i>aplicado</i> [MPa]	<i>Esfuerzo</i> <i>permisible</i> [MPa]	<i>Factor de</i> <i>seguridad</i>
<i>Cazoleta</i>	2.375 x 10 ⁻³	66.06	115	1.74

Tabla 3.12 Resultados sección media

	<i>Area</i> [m ²]	<i>Carga</i> <i>aplicado</i> [N]	<i>Carga</i> <i>Crítica</i> [N]	<i>Factor de</i> <i>seguridad</i>
<i>Sección</i> <i>media</i>	1.25 x 10 ⁻⁴	156.96	12363.49	79.25

Tabla 3.13 Resultados base en C

	<i>Momento</i> <i>máximo</i> [N * m]	<i>Momento</i> <i>de inercia</i> [m ⁴]	<i>Esfuerzo</i> <i>de flexión</i> [KPa]	<i>Factor de</i> <i>seguridad</i>
<i>Base en C</i>	4.71	1.518 x 10 ⁻⁸	0.8	214

Tabla 3.14 Resultados pasador

	<i>Esfuerzo</i> <i>cortante</i> <i>admisible</i> [MPa]	<i>Esfuerzo de</i> <i>compresión</i> <i>admisible</i> [MPa]	<i>Diametro</i> <i>sugerido</i> [mm]
<i>pasador</i>	200	300	2.1 – 2.8

Parámetros de impresión 3D para la prótesis

Material: Nylon + fibra de vidrio

Tabla 3.15 Parámetros 1

Parámetro	Configuración recomendada
Material	Nylon con fibra de vidrio
Temperatura del Hotend	250 – 270 °C
Temperatura de la cama caliente	80 – 100 °C
Tipo de adhesión a la cama	<i>Cinta Kapton o adhesivo especializado</i>

Tabla 3.16 Parámetros 2

Parámetro	Configuración Recomendada
Altura de la capa	0.15 – 0.25[mm]
Anchura de línea	0.4 – 0.5[mm]
Velocidad de impresión	30 – 50 $[\frac{mm}{s}]$
Velocidad de movimiento	120 – 150 $[\frac{mm}{s}]$
Altura de la primera capa	0.2[mm]
Velocidad de la primera capa	20 – 30 $[\frac{mm}{s}]$

Tabla 3.17 Parámetros 3

Parámetro	Configuración Recomendada
Densidad de relleno	80 – 100 %

Tipo de relleno	<i>Cuadrícula o Gyroid</i>
Distancia de retracción	5 – 6 [mm]
Velocidad de retracción	20 – 30 [$\frac{mm}{s}$]
Ventilador de enfriamiento	50%

Material: PLA

Tabla 3.18 Parámetros 4

Parámetro	Configuración recomendada
Material	<i>PLA reforzado con fibra de carbono</i>
Temperatura del Hotend	200 – 220 °C
Temperatura de la cama caliente	50 – 60 °C
Tipo de adhesión a la cama	<i>Borde o Brim</i>

Tabla 3.19 Parámetros 5

Parámetro	Configuración Recomendada
Altura de la capa	0.1 – 0.2 [mm]
Anchura de línea	0.4 [mm]
Velocidad de impresión	40 – 60 [$\frac{mm}{s}$]
Velocidad de movimiento	120 – 150 [$\frac{mm}{s}$]
Altura de la primera capa	0.2 [mm]
Velocidad de la primera capa	20 – 30 [$\frac{mm}{s}$]

Tabla 3.20 Parámetros 6

Parámetro	Configuración Recomendada
Densidad de relleno	100 %
Tipo de relleno	<i>Cuadrícula, Triángulos o Gyroid</i>
Distancia de retracción	4 – 5 [mm]
Velocidad de retracción	25 – 40 [$\frac{mm}{s}$]
Ventilador de enfriamiento	100%

Material: Resina de poliuretano

Tabla 3.21 Parámetros 7

Parámetro	Configuración recomendada
Material	Resina de poliuretano
Tipo de impresión	SLA (Estereolitografía)
Resolución de capa	50 micras (0.05mm)
Exposición de capa	12 segundos
Velocidad de elevación	2 mm/s
Densidad de relleno	100% (Sólido)
Post-procesamiento	Curado UV durante 10 min

3.2 Estimación de costos

Costo de material

El primer componente a considerar es el costo de material. Para este proyecto, se utilizará Nylon + fibra de vidrio, PLA + fibra de carbono y resina de poliuretano biocompatible, materiales comúnmente utilizados en impresión 3D por su facilidad de uso y costo razonable. Dado que la prótesis completa se estima que pesa alrededor de 200 gramos (0.2 kg), Los precios de cada material serán detallados a continuación:

Componente	Material	Peso estimado [g]	Costo/Kg [USD]	Costo estimado [USD]
Cazoleta	Nylon + fibra de vidrio	150	\$50	\$7.5
Sección media	PLA + fibra de carbono	200	\$40	\$8
Base en C	Resina de poliuretano biocompatible	300	\$90	\$27

$$Total = \$7.5 + \$8 + \$27 = \$42.50$$

Tiempo de impresión

El tiempo de impresión es otro factor importante en el costo total. Se estima que cada parte de la prótesis puede tardar entre 10 y 15 horas en imprimirse, dependiendo de la configuración de impresión y la complejidad de las piezas. Asumiendo un costo de \$1.5 por hora de impresión y \$2 para la base en c (considerando el desgaste de la impresora y electricidad), el costo del tiempo de impresión será:

Componente	Tiempo de impresión [h]	Costo/h [USD]	Costo estimado [USD]
Cazoleta	10	\$1.5	\$15
Sección media	12	\$1.5	\$18
Base en c	15 (SLA)	\$2.0	\$30

$$Total = \$15 + \$18 + \$30 = \$63.00$$

Costos adicionales

Además de los costos de material y tiempo de impresión, hay otros gastos a considerar:

Concepto	Costo estimado [USD]
Post-Procesamiento: Lijado, ensamblaje, y ajuste de las piezas	\$10
Adhesivos y soportes	\$5

Costo de diseño

El costo a continuación incluye el valor por hora de trabajo, tomando en cuenta, conocimientos aplicados, mano de obra y licencias de software.

Concepto	Horas	Costo/h [USD]	Costo total [USD]
Diseño (1 iteración)	5	\$20	\$100

3.2.1 Resumen de Costos

Sumando estos componentes, el costo total estimado para la fabricación en Nylon de la prótesis para el felino es:

Tabla 3.21 costos estándar

Concepto	Costo estimado
Material	\$42.50
Tiempo de impresión	\$63.00
Extras	\$15.00
Costo de diseño	\$100.00
Total, estimado:	\$220.50

3.2.2 Costos por escenario

Para proporcionar una visión más completa, consideramos dos escenarios: utilizando Nylon económico y utilizando Nylon de alta calidad.

- **Escenario 1: Uso de Nylon económico**

En este escenario, se consideran materiales más económicos y menor costo de producción.

Tabla 3.22 Costos económicos

Concepto	Costo estimado
Material	\$33.00
Tiempo de impresión	\$51.00
Post Procesamiento	\$12.00
Adhesivos	\$100.00
Total, estimado:	\$196.00

- **Escenario 2: Uso de Nylon de alta calidad**

En este escenario, se consideran materiales de la mejor calidad, con costos de impresión elevados dado el acabado y la modernidad de los equipos.

Tabla 3.23 Costos de alta calidad

Concepto	Costo estimado
Material	\$55.00
Tiempo de impresión	\$75.00
Post Procesamiento	\$18.00
Adhesivos	\$100.00
Total, estimado:	\$248.00

3.3 Análisis de resultados

El desarrollo del diseño de la prótesis para un gato doméstico mediante manufactura aditiva ha arrojado resultados alentadores en términos de viabilidad mecánica, funcionalidad y cumplimiento de especificaciones requeridas. Los cálculos y simulaciones realizados utilizando técnicas de análisis por elementos finitos (FEM) en Autodesk Inventor confirmaron que los componentes de la prótesis: cazoleta, cilindro (sección media) y la base, operan dentro de un margen seguro de esfuerzo y deformación. El esfuerzo máximo de Von Mises registrado fue significativamente menor al límite elástico del material seleccionado (Nylon con fibra de vidrio), indicando una distribución eficiente de las cargas. Esto reveló que la prótesis es capaz de soportar las cargas esperadas durante su uso. Se realizaron simulaciones bajo las condiciones del escenario de carga más crítico, es decir, la caída libre del gato, para asegurar que la estructura de la prótesis no presentara fallas mecánicas. Los resultados mostraron que las áreas de mayor concentración de estrés se encontraban en las uniones, lo cual era esperado. Estos resultados proporcionan una base sólida para la validación del diseño y permiten realizar ajustes menores buscando optimizar aún más la durabilidad y funcionalidad de la prótesis.

En términos de diseño estructural, se logró un factor de seguridad promedio alto (1.74 para la cazoleta y 79.25 para el cilindro), lo que asegura un desempeño confiable en condiciones de carga estática y dinámica. Además, los análisis de pandeo y flexión en elementos como el cilindro y la base mostraron valores de deformación mínimos, lo que se traduce en una excelente rigidez estructural y estabilidad dimensional. Cabe destacar que los parámetros de fabricación mediante impresión 3D, como el tipo de material, configuración de relleno y temperatura, van a contribuir significativamente a mantener estas propiedades mecánicas.

En cuanto la validación por análisis dinámico, se pudo determinar que, la resistencia a la fatiga es muy superior al esfuerzo alternante de cada pieza lo que a su vez demuestra la cantidad de ciclos posibles que soportará durante su funcionamiento, dándonos como resultado tiempos de vida que superan en gran medida la esperanza de vida del animal.

Los costos estimados de producción, que rondan los \$220.50 en un escenario estándar, reflejan la viabilidad económica del proyecto. Este valor incluye material, tiempo de impresión y procesos de post-procesamiento, además, el costo de diseño que incluye precio por hora de trabajo y licencias de los softwares utilizados posiciona al diseño como una solución accesible y escalable, cumpliendo con las expectativas del cliente respecto al precio de la prótesis.

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este capítulo se resumen los hallazgos clave del proyecto, evidenciando cómo se cumplieron los objetivos establecidos y destacando las fortalezas del diseño desarrollado. Además, se presentan recomendaciones estratégicas que exploran posibles mejoras y amplían las aplicaciones del trabajo realizado, con énfasis en abordar limitaciones identificadas y proponer líneas futuras de investigación. Estas reflexiones finales buscan proporcionar una base sólida para optimizar el diseño y fomentar su implementación a mayor escala, contribuyendo al avance en el uso de manufactura aditiva en el ámbito veterinario.

4.1 Conclusiones

1. El diseño de la prótesis cumple con los objetivos generales y específicos planteados, demostrando su capacidad para mejorar la calidad de vida del gato doméstico al ofrecer soporte funcional y estabilidad durante su uso. Los cálculos y simulaciones validan que la prótesis puede operar de manera segura bajo las cargas esperadas sin comprometer la integridad estructural.
2. Las características de los materiales Nylon con fibra de vidrio, PLA con fibra de carbono y resina de poliuretano biocompatible, como su alta resistencia mecánica, flexibilidad y bajo peso, junto con un diseño optimizado mediante FEM, aseguran una solución económica, ligera y funcional. Este material no solo cumple con los requerimientos del cliente de ser fácil de fabricar y mantener, sino que también ofrece una resistencia adecuada para soportar escenarios críticos, como caídas o movimientos bruscos. Esto se traduce en una prótesis duradera, con una vida útil que podría extenderse más allá de las expectativas iniciales, siempre que se realice un mantenimiento adecuado.
3. El proceso de manufactura aditiva permite adaptaciones rápidas y personalizadas al diseño. Esto asegura que se pueden realizar ajustes menores para optimizar el

rendimiento de la prótesis, lo que representa una ventaja significativa en comparación con métodos de fabricación tradicionales. La flexibilidad inherente a este proceso también abre la posibilidad de crear modelos personalizados para otros animales o para atender necesidades específicas de los usuarios, aumentando el impacto potencial del diseño en el campo de la veterinaria.

4. La implementación de simulaciones en escenarios extremos de carga, como caídas o movimientos bruscos, muestra que la prótesis mantiene su funcionalidad, reforzando la confianza en su aplicación real. Los análisis computacionales revelaron que, incluso bajo condiciones severas, los componentes clave de la prótesis permanecen dentro de los límites de seguridad establecidos, garantizando un alto grado de confiabilidad y minimizando riesgos asociados a su uso.
5. La integración de materiales reforzados con fibra no solo mejora la resistencia estructural, sino que también permite una reducción en el peso total, lo cual es esencial para minimizar el impacto en el movimiento natural del animal. Esto es particularmente importante en el caso de gatos, ya que su movilidad y equilibrio son factores críticos para su bienestar. La reducción del peso también contribuye a una menor tensión en las articulaciones y un uso más cómodo y prolongado.
6. Los parámetros de impresión 3D empleados, como el alto porcentaje de relleno y la configuración precisa de capas, han contribuido a lograr una combinación óptima de resistencia y acabado superficial en las piezas. Este enfoque no solo asegura un desempeño mecánico confiable, sino que también mejora la apariencia estética de la prótesis, lo que es un factor clave para la aceptación del cliente y del usuario final.

4.2 Recomendaciones

1. Se recomienda investigar el uso de materiales más innovadores y especializados para manufactura aditiva, tales como mezclas de Nylon con nanopartículas o materiales biodegradables. Este enfoque podría mejorar significativamente las propiedades mecánicas, térmicas y medioambientales del diseño actual. Por

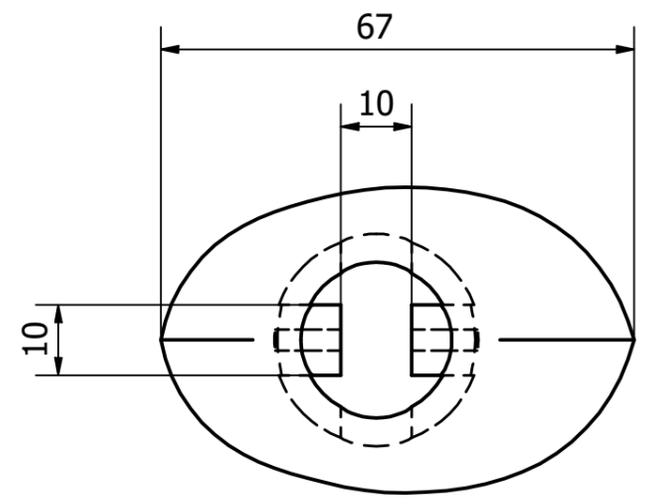
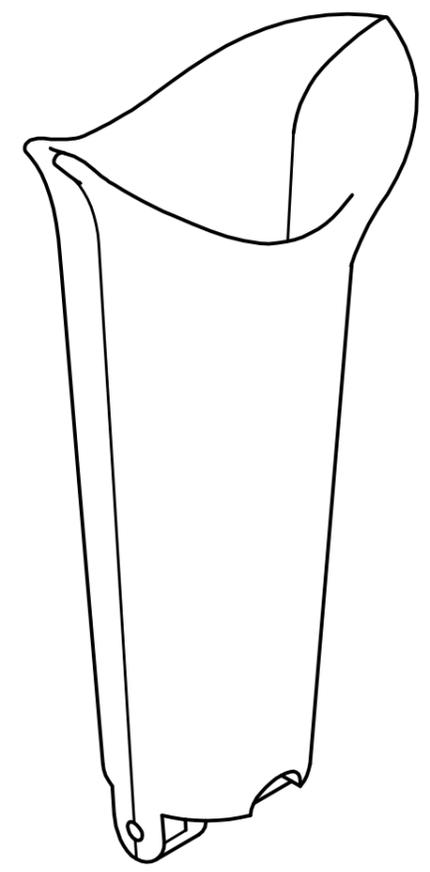
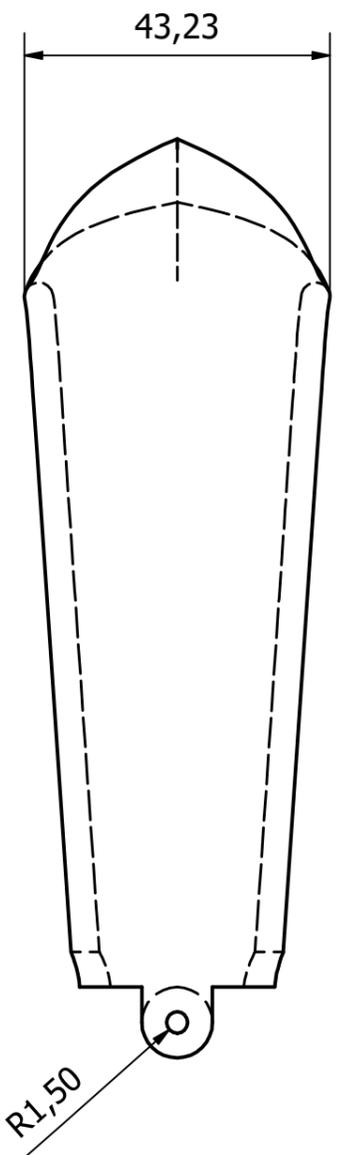
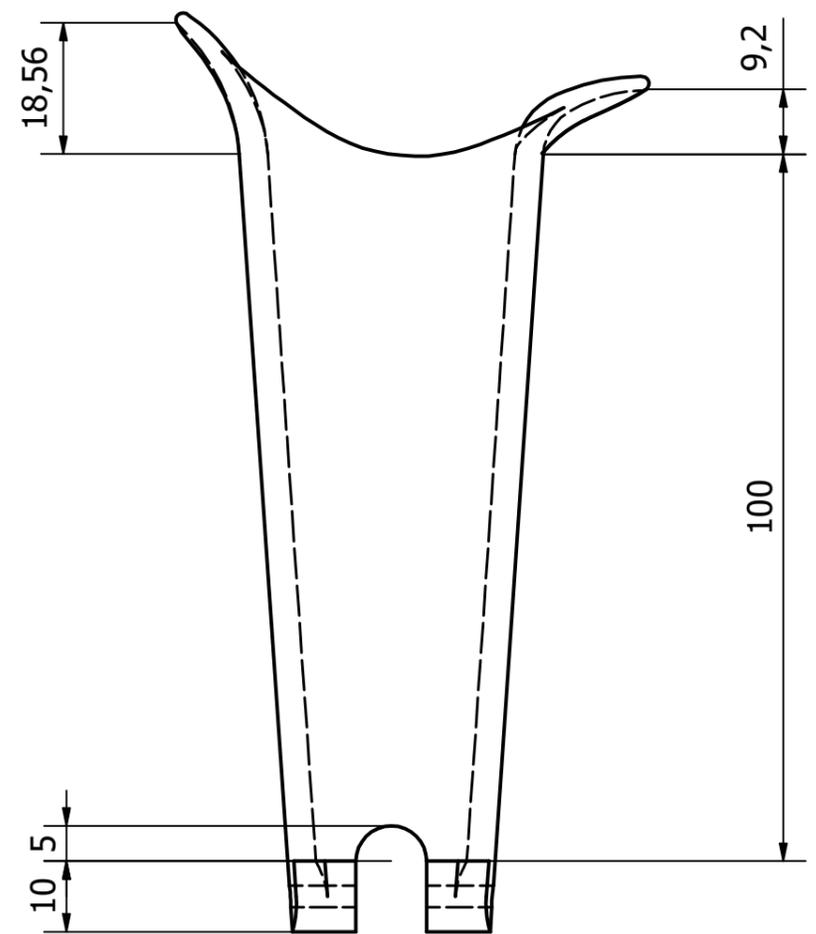
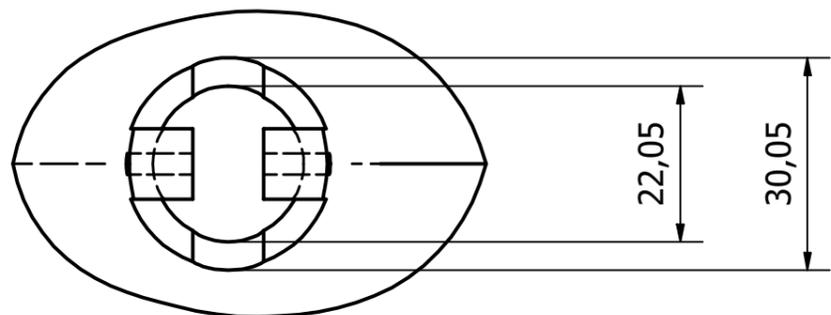
ejemplo, el uso de materiales biodegradables permitiría reducir el impacto ambiental y podría alinearse con objetivos de sostenibilidad en la fabricación. Además, los materiales híbridos, como el Nylon con fibra de carbono, podrían aumentar la rigidez estructural y la resistencia al desgaste, permitiendo que el diseño soporte condiciones de carga más exigentes.

2. Como una posibilidad de dirección futura, el diseño podría enfocarse en desarrollar versiones más complejas, es decir con características más específicas, permitiendo una adaptación rápida a distintos tamaños de animales o requerimientos específicos. Este enfoque sería especialmente útil en aplicaciones veterinarias de mayor escala, donde una misma base modular podría modificarse fácilmente para diferentes especies. La modularidad también podría facilitar el reemplazo o la actualización de piezas específicas, extendiendo la vida útil de la prótesis y reduciendo costos.
3. Es esencial realizar pruebas en condiciones reales de uso que incluyan monitoreos a largo plazo. Estas pruebas permitirían evaluar aspectos como el desgaste de los materiales, la adaptación del animal y la durabilidad bajo diferentes condiciones ambientales. Un estudio experimental con animales podría proporcionar información valiosa sobre la aceptación y el confort de la prótesis, así como guiar mejoras futuras en su diseño.
4. Se sugiere realizar análisis detallados de la interacción entre la prótesis y la biomecánica del animal. Por ejemplo, podría ser relevante estudiar el impacto de la prótesis en la distribución de cargas en las extremidades restantes y la columna vertebral del gato. Estos datos podrían guiar ajustes en el diseño para mejorar la ergonomía y minimizar el riesgo de lesiones secundarias.
5. Si se desea comercializar es necesario evaluar la factibilidad de producción a escala industria. Esto incluiría investigar métodos para optimizar costos de producción sin comprometer la calidad, así como desarrollar un modelo de negocio sostenible. Además, explorar colaboraciones con empresas tecnológicas o veterinarias podría facilitar el acceso a mercados más amplios y fomentar la adopción del producto.

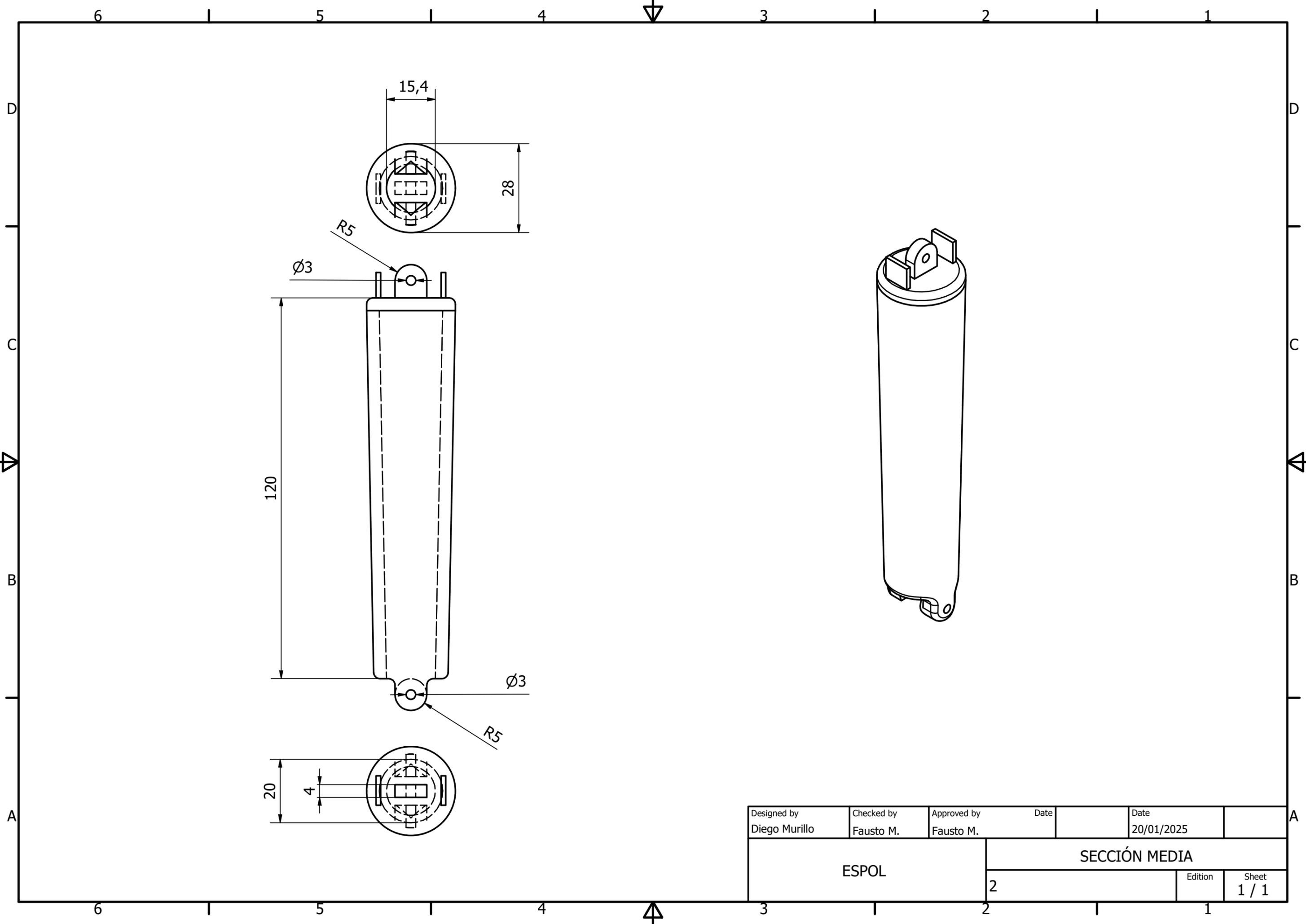
Bibliografía

- A guide to thermoplastic polyurethanes (TPU) ®.* (n.d.).
- Collado, R. B., Sainz, F., & Robles, D. E. (2022). *INVESTIGACIÓN DE MATERIALES PARA IMPRESIÓN 3D DE TEJIDOS.*
- Gordillo-Delgado, F., Bedoya-Pérez, A. F., & Delgado-Osorio, H. D. (2020). Características mecánicas y térmicas de un poliuretano elaborado a partir de aceite de higuera (ricinus communis) para la adhesión de elementos estructurales de guada angustifoliakunth. *Revista UIS Ingenierías*, 19(4), 103–114. <https://doi.org/10.18273/revuin.v19n4-2020009>
- Karmankar, R., & Karmankar, R. G. (2018). ANALYSIS OF VON-MISES-STRESS FOR INTERFERENCE FIT AND PULL-OUT STATES BY USING FINITE ELEMENT METHOD. *International Research Journal of Engineering and Technology*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.26447.79520>
- Mariela Laksman. (2023, November 16). *Conozca 3D Pets, la empresa que crea prótesis innovadoras para animales.* Orato, First Person News.
- Mott, R. L. (n.d.). *Diseño de elementos de máquinas Cuarta edición. PLA PRO HT.* (2019).
- Pozo Villar Tutora, J., & Ochoa Mendoza, A. (n.d.). *ESTUDIO Y CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES UTILIZADOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE PRÓTESIS IMPRESAS MEDIANTE TECNOLOGÍA FDM.*
- Shahrubudin, N., Lee, T. C., & Ramlan, R. (2019). An overview on 3D printing technology: Technological, materials, and applications. *Procedia Manufacturing*, 35, 1286–1296. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.06.089>
- Student, L. W. (n.d.). *Autodesk Inventor-A Beginner's Guide (as fast as possible).*
- Tomás, J., & Lizarza, C. (n.d.). *Método de los Elementos Finitos para Análisis Estructural.*
- Wang, M., Song, Y., Baker, J. S., Fekete, G., Ugbolue, U. C., Li, S., & Gu, Y. (2021). The biomechanical characteristics of a feline distal forelimb: A finite element analysis study. *Computers in Biology and Medicine*, 129. <https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2020.10417>.

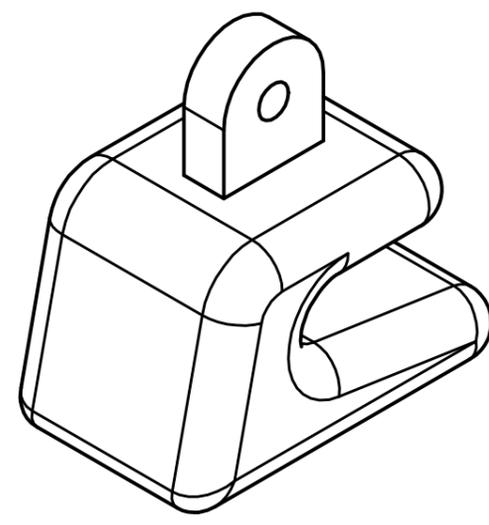
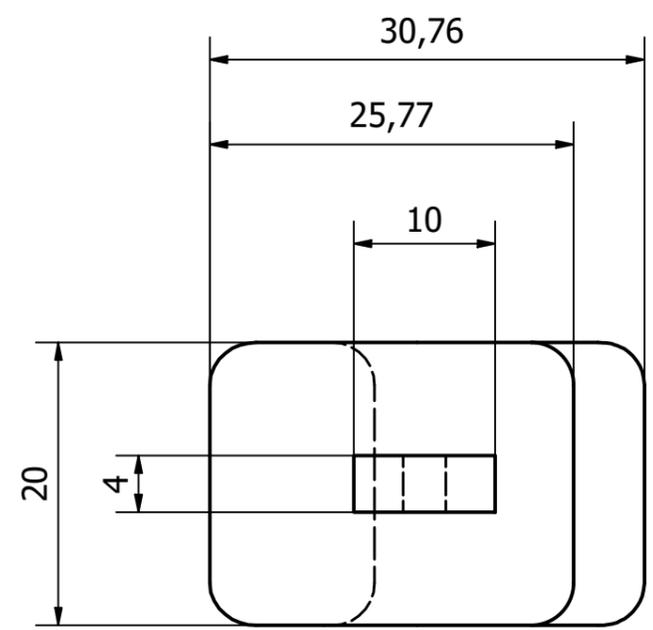
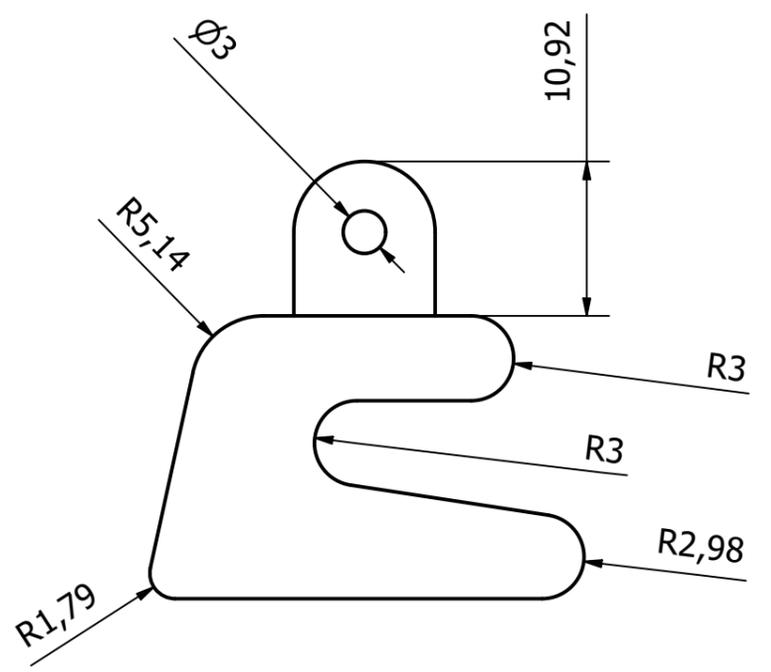
ANEXOS



Designed by Diego Murillo	Checked by Fausto M.	Approved by Fausto M.	Date	Date 20/01/2025
ESPOL		CAZOLETA		
1		Edition		Sheet 1 / 1



Designed by Diego Murillo	Checked by Fausto M.	Approved by Fausto M.	Date	Date 20/01/2025
ESPOL		SECCIÓN MEDIA		
		2	Edition	Sheet 1 / 1



Designed by Diego Murillo	Checked by Fausto M.	Approved by Fausto M.	Date	Date 20/01/2025	
ESPOL		BASE EN C			
		3	Edition		Sheet 1 / 1