

Design and fabrication of a semi-flexible front prosthesis for dogs up to 15 kilograms through 3D printing

Diseño y fabricación de una prótesis delantera semiflexible para canes de hasta 15 kilogramos mediante impresión 3D

Sandy Valeria Maliza Laguna¹ Diego Xavier Bustos Cervantes²

¹Investigador Instituto Superior Universitario Central Técnico, Quito, Ecuador

E-mail: smalizal@istct.edu.ec

²Investigador Instituto Superior Universitario Central Técnico, Quito, Ecuador

E-mail: dbustos@istct.edu.ec

Recibido: 31/05/24

Aceptado: 11/06/24

Publicado: 30/06/24

RESUMEN

La presente investigación, consiste en la elaboración de una prótesis delantera para canes de hasta 15 kilogramos, mediante diseño CAD (diseño asistido por computadora) e impresión 3D y la implementación del diseño generativo con el uso de material disponible en el país y de bajo costo con el objetivo de mejorar el bienestar de los canes que se encuentran en condiciones de discapacidad física. La metodología de fabricación empleada hace referencia al diseño CAD en los softwares Inventor Professional y Fusion 360; y la fabricación en impresión 3D con 2 materiales distintos: PETG y TPU, los cuales hacen que la prótesis sea funcional y segura para el can. Para la presentación final, se ha de probar su efectividad, comparando diversas propuestas de diseño y características de impresión, mejorando así los procesos relacionados a esta prótesis. Para esto, se propone un proceso de diseño que combina con tecnologías computacionales donde se presentan alternativas de mecanismos y formas mediante el diseño generativo para luego seleccionar jerárquicamente las más adecuadas según los requerimientos planteados.

Palabras clave: Canes; Impresión 3D; Prótesis TPU; PETG; Software.

ABSTRACT:

The present research consists of the development of a front prosthesis for dogs of up to 15 kilograms, through CAD design (computer-aided design) and 3D printing and the implementation of the generative design with the use of material available in the country and at low cost. . with the aim of improving the well-being of dogs that are physically disabled. The manufacturing methodology used refers to CAD design in the Inventor Professional and Fusion 360 software; and 3D printing manufacturing with 2 different materials: PETG and TPU, which make the prosthesis functional and safe for the dog. For the final presentation, its effectiveness must be tested, comparing various design proposals and printing characteristics, thus improving the processes related to this prosthesis. For this, a design process is proposed that combines computational technologies where alternative mechanisms and forms are presented through generative design and then hierarchically select the most appropriate ones according to the

requirements set.

Index terms: Keywords: Dogs; 3d Print; TPU Prosthesis; PETG; Software.

1. INTRODUCCIÓN

En Ecuador, sobre todo en la ciudad de Quito, EMASEO, a través de su programa Animales al cielo, retira a diario 20 cuerpos de las vías. Los canes que son propensos a accidentes en las calles son abandonados, algunos de ellos fallecen, otros quedan gravemente heridos y pierden sus extremidades. Pues la pérdida de una extremidad afecta la calidad de vida del animal y tienen dificultad para realizar sus actividades diarias. (Emaseo EP, 2017)

Para resolver este problema social, inicialmente las prótesis, sillas de ruedas, arnés, se elaboran con productos de reciclaje que son donadas a fundaciones animalistas o rescatistas independientes, por lo regular eran artesanales, hechas con tubos de PVC. Pero esto se ha ido perfeccionando por la razón que debe ser a medida del can. Hoy en día, en el país los dispositivos de recuperación son limitados, pues al ser equipos importados los precios representan un alto costo que oscilan entre los \$100 y \$300, por lo que su obtención y fabricación resulta muy complicada. (Fundación Almanimal, 2019)

Al implementar el diseño CAD (diseño asistido por computadora) e impresión en 3D para la fabricación de la prótesis, es una alternativa rápida y accesible para que el can tenga una vida óptima.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. PRÓTESIS

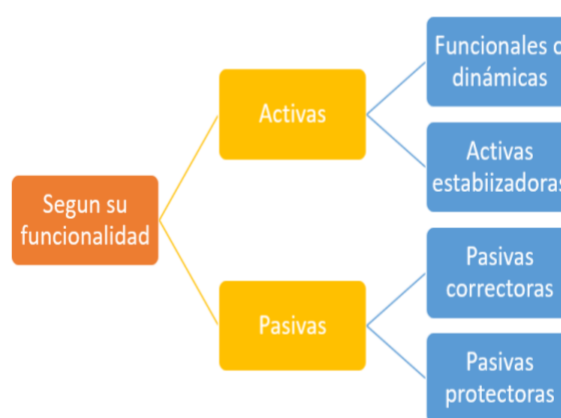
Según la normativa ISO 22523:2007 recoge una prótesis como un apoyo o dispositivo externo (aparato) aplicado al cuerpo para modificar los aspectos funcionales o estructurales del sistema neuromusculoesquelético. (ISO, 2007)

La función de una prótesis está diseñada para reemplazar una parte faltante del cuerpo o para hacer que una parte del cuerpo trabaje mejor. Las articulaciones faltantes o enfermas comúnmente son reemplazadas por dispositivos protésicos.

Las prótesis se pueden clasificar según sus funciones como se muestra en la figura 1:

Figura 1

Clasificación de prótesis para canes.



Nota. El gráfico representa la clasificación de prótesis para canes. Tomado de Ortoprono. (2022).

2.1.1. Prótesis en canes

El uso de prótesis en canes da un soporte físico ayudando al correcto posicionamiento del grupo muscular, es decir que no exista una sobre fatiga. El uso de la prótesis en canes que han perdido algún miembro produce los siguientes resultados:

- Disminución del umbral del dolor.
- Aceleración del proceso de curación de tejidos.
- Aumento de la flexibilidad de tejidos, especialmente si se realiza ejercicios a los pocos minutos de llevar la órtesis.
- Aumento del arco de movilidad y rigidez articular.

En la figura 2 se muestra los tipos de prótesis activas y pasivas que puede tener un can.

Figura 2

Tipos de órtesis para canes.



Nota. El gráfico representa tipos de órtesis para canes. Tomado de Ortoprono. (2022).

2.2. ANÁLISIS DEL MIEMBRO DELANTERO

Con el fin de modelar mecánicamente el miembro delantero de los perros es necesario un estudio previo del mismo para comprender su estructura como se muestra en la figura 3.

- **Escápula:** Es un hueso plano cuya forma se asemeja a un triángulo. Está formada por dos caras, una interna que se encuentra en contacto con las costillas y sirve de inserción al músculo subescapular y una cara externa que es útil como punto de referencia para nuestro estudio.
- **Húmero:** Se trata de uno de los huesos largos que conforman el miembro anterior que en su extremo superior tiene una superficie articular redondeada a la que llamamos cabeza.
- **Radio y Cúbito:** Son dos huesos largos estando el radio por delante y el cúbito por detrás. Ambos se encuentran parcialmente fusionados. El radio se articula con el húmero por arriba y en la parte superior con el cúbito.
- **Carpo y metacarpo:** El carpo está formado por siete huesos, tres en la fila proximal cuatro en la distal. Los huesos del carpo se articulan por arriba con el radio y cúbito y por abajo con los metacarpianos.
- **Falanges:** Son huesos que se encuentran en los dedos de las manos, los pies, las patas, las alas, los cascos y las aletas de los animales. Estos son huesos largos cuya longitud excede su ancho. (Sabater, 2019).

Figura 3

Esqueleto de un can



Nota. El gráfico representa el esqueleto de un can. Tomado de Sabater. (2019).

2.3. PROPUESTAS DE DISEÑO:

A continuación, se detallan los procesos implicados en el diseño y desarrollo de la prótesis como se muestra en la tabla 1, exponiendo el proceso evolutivo, conceptos, mecanismos y pruebas que influyeron en el diseño final.

Tabla 1

Propuestas de diseño realizadas en la investigación.

Propuesta 1	Ventajas	Desventajas
	Base de apoyo tipo ballesta	No tomar en cuenta la anatomía del animal para realizar la inclinación de la base
	Altura regulable	Posible rotura del material al haber juego al regular la altura
	Facilidad de impresión por su modelo desarmable	Las tolerancias del material no fueron tomadas en cuenta en el diseño.
Propuesta 2		Frágil
	No se debe ensamblar	En caso de rotura se debe reemplazar toda la prótesis
	Diseño basado en la anatomía del animal	No tiene buena sujeción

Al analizar las necesidades del usuario y alternativas que podrían solucionar estos problemas, se elabora una tercera propuesta de diseño como se muestra en la figura 4, obteniendo las siguientes características:

- Adaptable a las extremidades delanteras de cualquier can con un diseño paramétrico
- Funcional en pisos planos e irregulares debido a que posee una base flexible con un diseño tipo balancín y vaciada en el centro con la finalidad de garantizar el contacto con el suelo durante toda la pisada. El hecho de que la geometría esté vaciada por el centro aporta flexibilidad y reduce el uso de material una vez que se fabrique la prótesis.

Figura 4

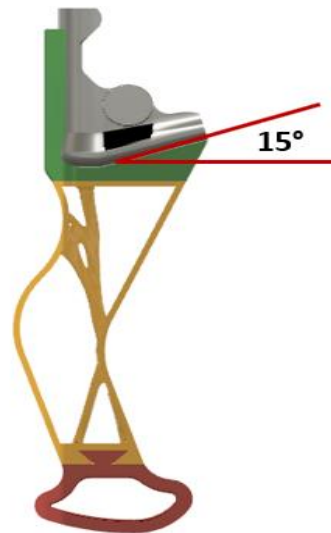
Propuesta de diseño 3



Otro de los factores a tomar en cuenta es la inclinación hacia los 15°, la misma está referenciada en la figura 5, donde se describe la parte de apoyo humeral para evitar que el codo vaya a deslizarse hacia adelante, generando una incomodidad en el movimiento de los canes.

Figura 5

Inclinación apoyo humeral



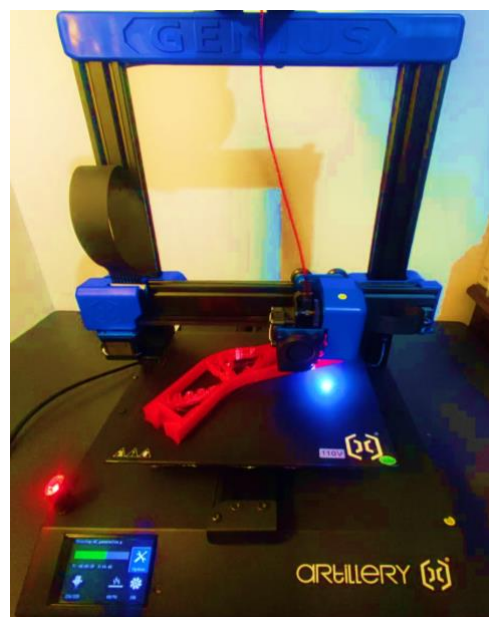
2.4. MATERIALES:

2.4.1. Impresora 3D:

La Impresora Artillery Genius que se muestra en la figura 6, tiene un sistema de extrusión directa, apta para imprimir filamento TPU (flexible) con un área de impresión 22 cm x 22 cm x 25 cm.

Figura 6

Impresora Artillery Genius



2.4.2. Materiales (Filamentos):

Para la investigación, se usan 2 tipos de materiales, PETG y TPU. Los filamentos usados son de tipo polímero (plásticos). Como parte de las características de los polímeros destaca su resistencia en distintas aplicaciones, sus componentes permiten utilizarlos en piezas industriales como son los engranes, no se oxidan por ser plásticos y por ende no reacciona químicamente con agentes que rodean el ambiente natural, y al no haber reacción química, no hay contaminación, haciéndolos aptos para ser usados en la investigación. (Plastics Technology MEXICO,2018).

Las características mecánicas que tiene los materiales se exponen en la Tabla 2:

Tabla 2

Características de los filamentos.

Propiedades mecánicas	PETG	TPU
Tensión de rotura (MPa)	49	39
Alargamiento por rotura	228%	580%
Resistencia a la flexión (MPa)	68	4.3
Módulo de elasticidad (MPa)	2027	26
Resistencia de impacto (KJ/m ³)	8	34.4
Densidad (g/m ³)	1.27 g/cm ³	1.23 g/cm ³
Temperatura de distorsión	65°C	65°C
Alargamiento por deformación	25%	55%

Nota. Esta tabla muestra cómo las propiedades mecánicas de las características de los filamentos. Tomado de (Ultimaker, 2017) ;(ColorPlus3D, 2020).

2.5. REQUERIMIENTOS PARA EL DISEÑO Y FABRICACIÓN DE LA PRÓTESIS

2.5.1. Requerimientos del material:

- No tóxico
- Resistente a los impactos
- Económico
- Ligero
- Facilidad de impresión

2.5.2. Requerimientos funcionales:

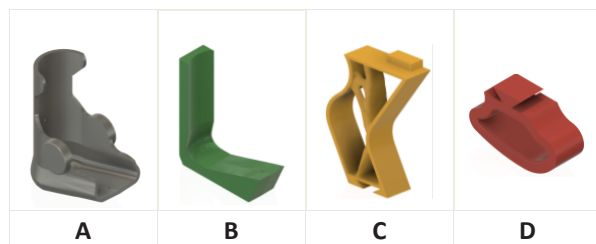
- Adaptable a cualquier tipo de raza basado en un diseño paramétrico dispuesto a modificar cualquier medida y personalizarla al animal.
- Aportar comodidad, mediante el diseño ergonómico

2.6. DISEÑO Y CREACIÓN DE PIEZAS:

Para el diseño de la prótesis se toma la decisión de dividirla en cuatro partes: apoyo del húmero, estabilizador, cuerpo generativo y base semiflexible, ver la figura 7:

Figura 6

Componentes de la prótesis.



A) Apoyo húmero: Brinda soporte al miembro amputado del can, está diseñada para ser ajustada de manera gradual, tiene un sistema de acolchonamiento a través de Etilvinilacetato (EVA).

B) Estabilizador para apoyo del húmero: Ayuda a evitar deformaciones al momento de ser usada por el can.

C) Cuerpo generativo: Es donde se va a ejercer la fuerza, cargas y peso del can. Tiene un largo de cúbito de 205 mm. Está unido al estabilizador y a la base semiflexible por medio de prisioneros.

Los componentes **A**, **B** y **C** son fabricados con filamento PETG, aportando la característica principal de resistencia al impacto y a la carga definida.

D) Base semiflexible: La base semiflexible soporta cargas de rozamiento y desgaste, por lo que tiene una parte antideslizante mejorando su vida útil y funcionalidad. Está fabricada con filamento TPU,

otorgando la característica principal de flexibilidad. Está diseñada para soportar una carga de 132,3 N además que, con este diseño, se minimiza las fuerzas ejercidas en el eje x y z al mínimo posible.

2.7. ANÁLISIS ESTRUCTURAL POR ELEMENTOS FINITOS

La prótesis está diseñada con el fin de sustentar el peso del perro, por ello se realiza un estudio de frecuencias modales y tensión estática. Para realizar el estudio se utiliza el módulo de simulación del Software Fusion360 y se escoge estudiar el cuerpo generativo porque es la pieza que recibe mayoría de la fuerza además que por su forma está expuesta a sufrir deformaciones.

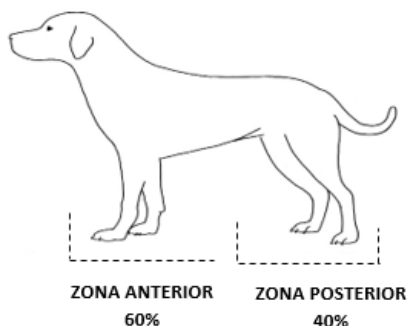
2.7.1. Fuerza

La fuerza que se utiliza es el peso del perro simplificado para una pata, en la biomecánica el peso de los perros se divide así: las patas delanteras reciben aproximadamente el 60% de los esfuerzos durante la marcha y las traseras el 40% restante de acuerdo a la figura 8. Es decir que, en caso de amputación de una extremidad la postura será en tres puntos causando una sobrecarga a las demás extremidades y una curvatura en la columna provocando escoliosis. (Acero, 2019).

Además, se toma en cuenta el factor de carga dinámica valorado en 3 porque un perro ejerce tres veces fuerza cuando corre.

Figura 8

Biomecánica del peso de los perros



La simplificación para realizar el análisis se muestra en la ecuación 1:

$$F_{paw} = w \times g \times FC_{dyn} \tag{1}$$

$$w = 15kg \times 0.6 \div 2$$

$$w = 4.5 kg$$

$$g = 9.8 \frac{m}{s^2}$$

$$F_{paw} = 4.5 N \times 9.8 \frac{m}{s^2} \times 3$$

$$F_{paw} = 132.3 N$$

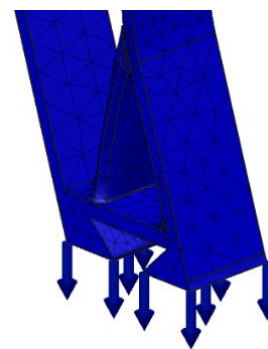
Dónde:

- w = peso del perro, en kg*
- g = aceleración de la gravedad, m/s²*
- FC_{dyn} = Factor de carga dinámica*

A continuación, se aplica una fuerza vertical de 132.3 N como se muestra en la figura 9, la cual simula el contacto con el suelo del elemento apoyo.

Figura 9

Carga aplicada al cuerpo generativo



2.7.2. Factor de seguridad

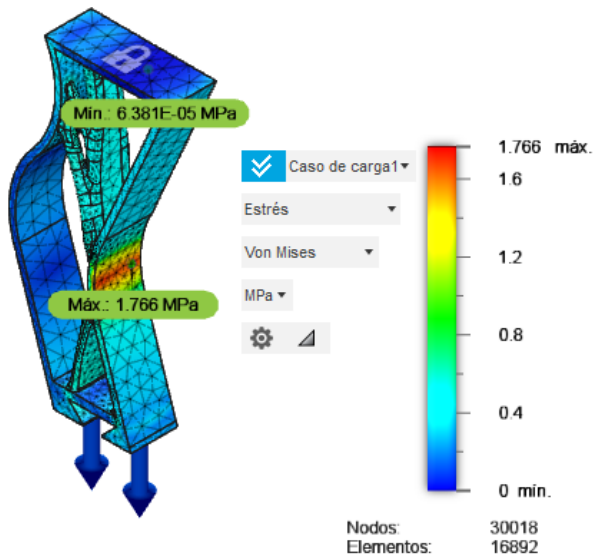
Cuando no se conoce las condiciones existentes en entorno se debe utilizar el facto de seguridad (FS), que permite cuantitativamente verificar la fuerza o resistencia del material que se utilizó para la elaboración de la prótesis. (Franklin E. Fisher, 2006)

En la figura 10 se muestra el esfuerzo equivalente de Von Misses, en ésta se observa que el *esfuerzo*

máximo no sobrepasa el 1.766 MPa; mientras que la resistencia a la fluencia del PETG es de 49 MPa descrito en la tabla 2.

Figura 10

Esfuerzo máximo.



Si $F_s > 1$ el diseño es adecuado, entre mayor sea el número más seguro es el diseño.

$$F_s = \frac{\text{Resistencia a la fluencia}}{\text{Esfuerzo máximo}} \quad (2)$$

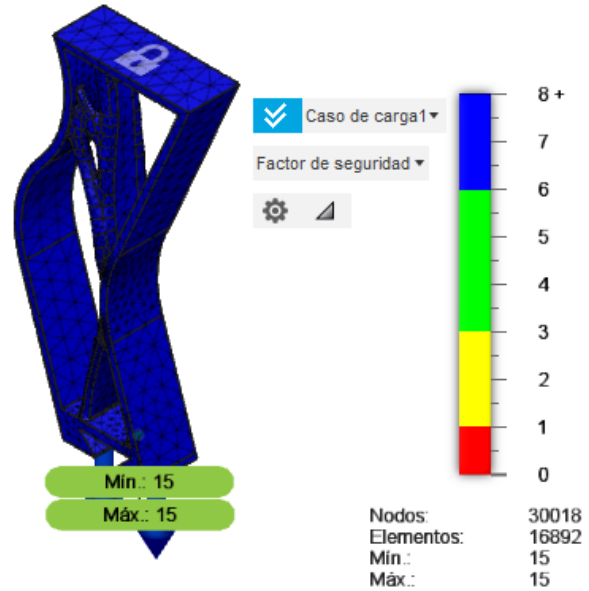
$$F_s = \frac{49\text{MPa}}{1.766\text{MPa}}$$

$$F_s = 27.74$$

El resultado permite la verificación de que, el factor de seguridad según la figura 11, es superior a la unidad. Este resultado garantiza que la prótesis no se deforme y tampoco exista una rotura de los materiales.

Figura 11

Factor de seguridad del cuerpo generativo.

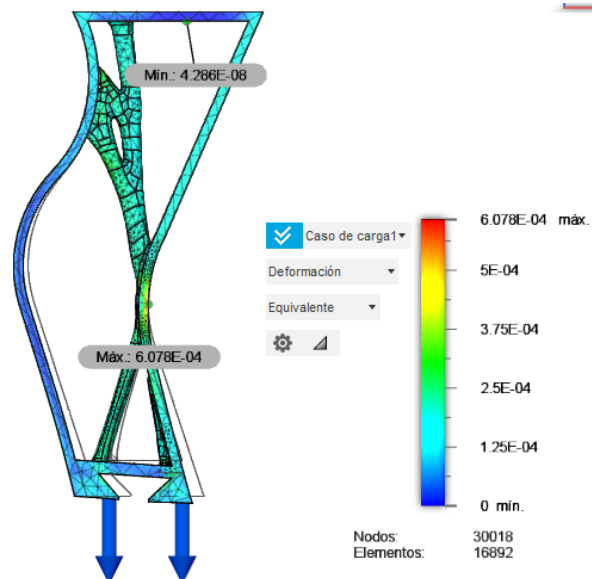


2.7.3. Deformación

Es el cambio en la forma de un material que resulta de la aplicación de fuerza, y es medida por el cambio en su longitud. En la figura 12 se ve la deformación del diseño en 6.07 mm medida expresada en mm, lo que quiere decir que la deformación es casi nula.

Figura 12

Deformación del cuerpo generativo.



2.8. PROCESO DE FABRICACIÓN:

Para la fabricación, como primer paso es diseñar las piezas en el software de diseño FUSION 360, utilizando los diferentes módulos de diseño como:

2.8.1. Diseño en superficie: En donde se diseña la prótesis de manera intuitiva, guiados a través de puntos de grados de libertad y morfología original de un can, observado en la figura 13.

Figura 13

Diseño superficial para las partes de la prótesis.



2.8.2. Generativo:

La idea principal del diseño generativo, que se observa en la figura 14, es crear diferentes soluciones basados en un solo diseño, da diversas opciones para optimizar ciertos aspectos que se describen a continuación:

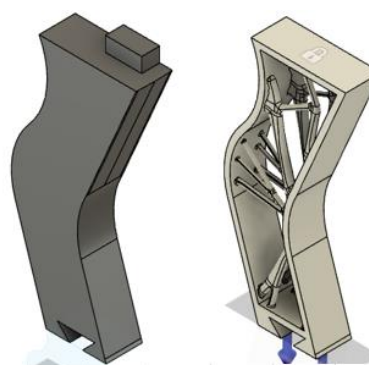
- **Resistencia en puntos de apoyo:** Uno de los requerimientos del diseño generativo es asignar una carga de acuerdo al uso que va a tener el diseño, en este caso se le asigna el peso del animal y tomando en cuenta lo mencionado genera varias opciones de diseño, pero todas optimizan la resistencia a la carga definida.
- **Reducción de material:** En base a la carga aplicada, el software genera varias opciones de modelos simplificados en forma de nervios los cuales están interconectados unos con otros

de tal manera que ya no se crea un cuerpo sólido si no, da un aspecto natural al diseño.

- **Tiempo de fabricación:** Con estas alternativas de diseño simplificadas se obtiene tiempos menores de fabricación respecto a propuestas de diseños anteriores, al definir puntos de apoyo y generar una geometría reducida (Peña, 2018).

Figura 14

Diseño generativo.



2.9. PARÁMETROS DE IMPRESIÓN

Una vez que se realiza los respectivos análisis se procede a la fabricación por adición utilizando una impresora Artillery Genius, que se muestra en la figura 15. Se ha realizado cuatro impresiones, esto debido a que las piezas son fabricadas en dos tipos filamentos y cada una requiere de parámetros personalizados de acuerdo a su función, descritos en la tabla 3.

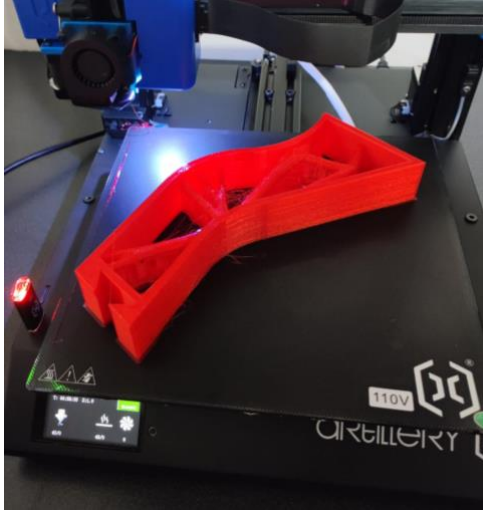
Tabla 3

Parámetros de impresión

Parámetros	Parte A	Parte B	Parte C	Parte D
Altura de capa (mm)	0.2	0.2	0.3	0.2
% Relleno	25	25	75	80
Velocidad (mm/s)	35	35	50	30
Temperatura Nozzle (°C)	215 PETG	215 PETG	215 PETG	210 TPU
Tiempo de impresión (horas)	6	4	18	5

Figura 15

Fabricación de la prótesis en impresión 3D



3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN:

- Se fabricó la prótesis delantera, y se pudo observar que su resistencia era la apropiada en base a un análisis estructural de elementos finitos en el software Fusión 360, el cual es 49 MPa para el PETG y 39MPa para el TPU.
- La prótesis es orgánica, lo que la hace más apta para el uso del can, basándose en la anatomía del animal.
- El diseño posee un factor de seguridad de 8 lo que significa que está lejos de la rotura.
- Se consultó a varios veterinarios sobre la seguridad de la prótesis, y se confirmó que los materiales usados no representan ningún riesgo para la salud del perro.
- La tolerancia de $\pm 0.2\text{mm}$ que se toma en cuenta en el diseño no tuvo ninguna variación en la prótesis fabricada.

4. CONCLUSIONES:

En el desarrollo de los objetivos planteados al inicio de la investigación se ha obtenido las siguientes conclusiones:

Mediante la impresión 3D es posible desarrollar una prótesis delantera para canes a través de un

diseño paramétrico que permita adaptar su tamaño al animal en estudio.

- Los materiales utilizados en la prótesis son TPU y PETG obteniendo 210°C y 215°C en la temperatura de impresión con la cual se consigue una resistencia a la compresión de 39.49 MPa permitiendo su durabilidad ante condiciones cotidianas de movilidad del can.
- La velocidad de impresión promedio es 35 mm/s permitiendo alcanzar una calidad alta y sin defectos en las piezas 3D, con la cual se acepta su funcionalidad y en caso de rotura se puede reproducir nuevamente
- Las formas de construcción tradicionales coexisten y se complementan con la tecnología 3D en una relación 70-30, piezas impresas 70% y correas y tornillos 30%.

5. RECOMENDACIONES:

- Imprimir todas las piezas de manera horizontal para que su resistencia sea mayor a la carga aplicada en sentido vertical.
- En el cuerpo generativo se puede aplicar resina de poliéster semielástica para impermeabilizar y endurecer los nervios que están expuestos a posibles roturas.
- Usar un aditamento químico para mejorar la adherencia a la cama de impresión como el fijador para cabello.
- Calibrar la temperatura y velocidad mediante pruebas de impresión de no más de 30 min.
- Evitar aristas vivas en el diseño, pues a pesar de que la fabricación es en un polímero puede causar incomodidad en el can.
- Evitar cambios bruscos de temperatura para que la pieza no se desprege de la cama de impresión.

6. REFERENCIAS:

Ortoprono. (2022). *Qué tipos de órtesis existen*. <https://ortoprono.es/blog/ortopedia-tecnica/tipos-de-ortesis/>

EMASEO. (2017). *Servicio de Emaseo EP: Animales*

- al Cielo. <http://www.emaseo.gob.ec/servicio-emaseo-ep-animales-al-cielo/>
- El Comercio. (2015). *Los perros atropellados en las vías son un drama de todos los días.* <https://www.elcomercio.com/actualidad/quitoo/perros-atropellados-vias-quito.html>
- Canis et Felis. (2014). *Patologías hereditarias en el perro.* https://www.ucm.es/data/cont/docs/345-2019-02-05-Patologias_hereditarias_en_perros.pdf
- Arévalo I. (2021). *Diseño generativo para el desarrollo de prótesis de canes.* Pontificia Universidad Católica del Ecuador. <https://repositorio.pucesa.edu.ec/handle/123456789/3256>
- El Telégrafo. (2021). *Los perros callejeros proliferan en Quito y Guayaquil.* <https://www.letelegrafo.com.ec/noticias/sociedad/6/perros-callejeros-prolifera-quito-guayaquil>
- Ortocanis. (2020). *¿Qué son y cómo funcionan las órtesis para perros?.* <https://www.ortocanis.com/es/content/ayudas-ortopedicas-para-perros-con-artrosis>
- Portal veterinaria. (2022). *Utilización de prótesis para los problemas articulares de los perros.* <https://www.portalveterinaria.com/>
- Prótesis MG. (2022) *Prótesis y órtesis en las mascotas.* <https://protesismg.com/protesis-y-ortosis-en-las-mascotas/blog-especializado-mg-latam/protesis-y-ortosis-para-animales/cod-3687/>
- Tarragó A. (2022). *Órtesis, dispositivos para disimetrías.* <http://www.traumatologiaveterinaria.com/articulaciones/docs/ortosis.pdf>
- Rubio A. (2011) *Diseño de prótesis económica para perros con displasia de cadera, con tecnología disponible en el contexto guatemalteco.* <https://revista.uisrael.edu.ec/index.php/ro/article/view/636>
- Diccionario Visual. (2016) *Esqueleto de un can.* <https://infovisual.info/es/biologia-animal/esqueleto-de-un-perro>
- ISO ORG. (2006). *Prótesis externas, requerimientos y métodos.* <https://www.iso.org/standard/37546.html>
- Sabater Carlos. (2019). *Diseño y cálculo de una prótesis canina.* <https://n9.cl/602u5>
- ULTIMAKER. (2017). *Ficha de datos técnicos TPU.* <https://ultimaker.com/es/materials/tpu-95a>
- COLORPLUS. (2020). *PETG.* <https://www.colorplus3d.com/wp-content/uploads/2020/11/PETG.pdf>
- El Comercio. (2016). *Prótesis caninas se imprimen en 3D.* <https://www.elcomercio.com/narices-frias/protesis-perros-impresion3d-tecnologia-depocaspulgas.html>
- Fundación Almanimal. (2019). *Prótesis de animales.* <https://brenp.com/protesis-de-animales-un-mercado-naciente-en-ecuador/>
- Plastic Technology Mexico. (2018). *La verdad sobre los plásticos: sin reacción química, no hay contaminación.* <https://www.pt-mexico.com/articulos/la-verdad-sobre-los-plsticos>
- Benavides, C. (2022, enero) *Requerimientos para la prótesis animal.* Charla ofrecida en la veterinaria "Garras y huellas". Quito, Ecuador
- Franklin E.Fisher (2006) *"Mechanical Engineers' Handbook: Materials and mechanical d*