



**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA CENTROAMERICANA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**PROYECTO DE INVESTIGACIÓN**

**APLICACIÓN DEL MODELO JERÁRQUICO PARA EL PROCESO DE FABRICACIÓN DE UN  
PROTOTIPO DE PRÓTESIS CANINA**

**PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO**

**INGENIERO EN BIOMÉDICA**

**PRESENTADO POR:**

**21821001 ALEJANDRA GONZÁLEZ ARZATE**

**21811114 RUBÉN ANTONIO BERMÚDEZ DÍAZ**

**ASESOR: MANUEL ADALID GAMERO**

**CAMPUS SAN PEDRO SULA; ABRIL, 2023**

## AUTORIZACIÓN

### **AUTORIZACIÓN DEL AUTOR(ES) PARA LA CONSULTA, REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL Y PUBLICACIÓN FÍSICA Y ELECTRÓNICA DEL TEXTO COMPLETO DEL TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN DE UNITEC Y CESIÓN DE DERECHOS PATRIMONIALES**

Señores

CENTRO DE RECURSOS PARA EL APRENDIZAJE Y LA INVESTIGACION (CRAI)

San Pedro Sula, Cortés

Estimados Señores:

La presentación del documento de tesis forma parte de los requerimientos y procesos establecidos de graduación para alumnos de pregrado de UNITEC.

Nosotros, Alejandra González Arzate y Rubén Antonio Bermúdez Díaz, de San Pedro Sula autor(es) del trabajo de grado titulado: Aplicación del Modelo Jerárquico para el Proceso de Fabricación de un Prototipo de Prótesis Canina, presentado y aprobado en el año 2023, como requisito para optar al título de Profesional de Ingeniero Biomédico, autorizo a:

Las Bibliotecas de los Centros de Recursos para el Aprendizaje y la Investigación (CRAI) de la Universidad Tecnológica Centroamericana (UNITEC), para que, con fines académicos, pueda libremente registrar, copiar y usar la información contenida en él, con fines educativos, investigativos o sociales de la siguiente manera:

Los usuarios puedan consultar el contenido de este trabajo de grado en las salas de estudio de la biblioteca y la página Web de la universidad.

Permita la consulta y la reproducción, a los usuarios interesados en el contenido de este trabajo, para todos los usos que tengan finalidad académica, ya sea en formato CD o digital desde Internet, Intranet, etc., y en general para cualquier formato conocido o por conocer.

De conformidad con lo establecido en el artículo 19 de la Ley de Derechos de Autor y de los Derechos Conexos; los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.

Es entendido que cualquier copia o reproducción del presente documento con fines de lucro no está permitida sin previa autorización por escrito de parte de los principales autores.

En fe de lo cual, se suscribe la presente acta en la ciudad de San Pedro Sula a los veintiocho días del mes de abril de dos mil veintitrés.



Alejandra González Arzate

21821001



Rubén Antonio Bermúdez Díaz

21811114

## HOJA DE FIRMAS

Los abajo firmantes damos fe, en nuestra posición de miembro de Terna, Asesor y/o jefe Académico y en el marco de nuestras responsabilidades adquiridas, que el presente documento cumple con los lineamientos exigidos por la Facultad de Ingeniería y los requerimientos académicos que la Universidad dispone dentro de los procesos de graduación.



---

Ing. Manuel Gamero  
Asesor Metodológico

***Karla Miriam Reyes Leiva***  
***San Pedro Sula***  
***12/05/2023***

---

Dra. Karla Reyes  
Miembro #1 de Terna



---

Ing. Reyna Valle  
Jefe académico de Ingeniería en Biomédica – UNITEC SPS

## DEDICATORIA

Dedicamos en primer lugar nuestro trabajo de investigación a nosotros mismos como estudiantes, demostrando el esfuerzo y compromiso que hemos puesto en cada una de las etapas de este trabajo para darle colofón de manera exitosa.

### - **Alejandra y Ruben**

A mis padres, Martha Arzate y Alfredo González, quienes han estado a mi lado a pesar de cualquier cosa y me han brindado su apoyo y amor incondicional en cada uno de los momentos de mi vida. Agradezco todos los consejos de vida, esfuerzo y sacrificio que han hecho para brindarme más de lo necesario, enseñarme a luchar por mis sueños y no conformarme con nada. Cada uno de ellos ha sido mi guía y mi motor de vida para culminar esta nueva etapa. Este logro es tanto mío como de ustedes.

A mi hermana, Andrea González, por su apoyo incondicional, enseñarme a ser mejor hermana y por ser mi mejor amiga.

A mi novio, Danilo Luque, por acompañarme en cada una de las desveladas, y brindarme su apoyo y consejos para poder terminar este proyecto.

### - **Alejandra González Arzate**

A mis padres, ustedes son los que me han apoyado a cumplir mis metas las que me han llevado a este camino, han sido mis guías de vida y este logro es tanto como de ustedes como mío.

A mis hermanos por darme el apoyo incondicional.

A mis abuelos y abuelas, aunque algunos ya no se encuentren conmigo en estos momentos, cada uno de ustedes me ayudaron a formarme en la persona que soy hoy con cada una de sus palabras sabias.

De igual manera este logro es gracias a mis primos, primas, tíos, tías y mis amigos que me han acompañado en todo este tiempo, dado su apoyo y su amor.

### - **Ruben Antonio Bermudez Diaz**

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradecemos en primer lugar a la fundación "Refugio Amor y Abrigo" por abrirnos sus puertas para poder desarrollar nuestra investigación con uno de los perros que se encuentran en el lugar.

A Horacio Fernández, por brindarnos la ayuda al momento de realizar la fabricación del prototipo de la prótesis y estar todos los días apoyándonos en eso.

Al Ing. Manuel Gamero, quien nos ha guiado a lo largo del periodo académico para poder culminar nuestro proyecto de graduación.

## **EPÍGRAFE**

*El fracaso es solo la oportunidad de comenzar de nuevo solo que esta vez más sabiamente.*

*Henry Ford*

## RESUMEN EJECUTIVO

La amputación es un procedimiento quirúrgico en el cual se extirpa un miembro del cuerpo debido a una lesión o enfermedad, este es bastante común en animales, como en caninos. Está afección, con el tiempo, perjudica su salud, especialmente la columna. La prótesis es un dispositivo adaptable que tiene como objetivo reemplazar una parte faltante del cuerpo del canino. Sin embargo, actualmente en Honduras, el estudio de las prótesis veterinarias es limitada y no existe una organización que tenga como objetivo la fabricación de estas. Para poder brindar una mejor calidad de vida al canino, es necesario un dispositivo accesible que sea un apoyo para recuperar sus habilidades motoras. En consecuencia, distintas empresas internacionales y autores han fabricado mediante la técnica de impresión 3D estos dispositivos, en conjunto con metodologías de pruebas biomecánicas y modelado en 3D. Para la fabricación de este prototipo de prótesis veterinaria se utilizó la metodología en V y la aplicación del modelo jerárquico propuesto por Hehenberger para la definición del dominio y capas específicas, así como el análisis matemático y el análisis de la locomoción. El objetivo principal se fundamentó en el soporte del canino, teniendo en consideración las medidas zoométricas del mismo y las características de los materiales. Se demostró que el presente prototipo es capaz de soportar el peso del perro y ser un apoyo para la recuperación de sus habilidades de movilidad natural. Para mejorar aún más el dispositivo, se ha recomendado la utilización de herramientas como escáner 3D para el diseño del chaleco de sujeción y sesiones de rehabilitación y fisioterapia al canino antes y después al uso de la prótesis.

***Palabras clave– biomecánica, biomédica, prótesis, veterinaria***

## **ABSTRACT**

An amputation is a surgical procedure in which a limb is removed from the body due to an injury or disease, this is quite common in animals, such as canines. This condition, over time, damages their health, especially the spine. The prosthesis is an adaptable device that aims to replace a missing part of the canine's body. However, currently in Honduras, the study of veterinary prostheses is limited and there is no organization that aims to manufacture them. In order to provide a better quality of life for the canine, an accessible device is needed to support the recovery of motor skills. Consequently, different international companies and authors have manufactured these devices using the 3D printing technique, in conjunction with biomechanical testing methodologies and 3D modeling. For the fabrication of this veterinary prosthesis prototype, the V-methodology and the application of the hierarchical model proposed by Hehenberger for the definition of the domain and specific layers, as well as mathematical analysis and locomotion analysis were used. The main objective was based on the support of the canine, taking into consideration the zoometric measurements of the canine and the characteristics of the materials. It was demonstrated that the present prototype is able to support the weight of the dog and to be a support for the recovery of its natural mobility skills. To further improve the device, it has been recommended the use of tools such as 3D scanner for the design of the support vest and rehabilitation and physiotherapy sessions to the canine before and after the use of the prosthesis.

***Keywords– biomechanics, biomedical, prosthesis, veterinary***



# ÍNDICE DE CONTENIDO

<b>I. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b> .....	<b>2</b>
2.1. PRECEDENTES DEL PROBLEMA.....	2
2.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	3
2.3. JUSTIFICACIÓN.....	3
2.4. PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN .....	4
2.4.1. <i>Pregunta de Investigación General</i> .....	4
2.4.2. <i>Preguntas de Investigación Específicos</i> .....	4
2.5. OBJETIVOS .....	5
2.5.1. <i>Objetivo general</i> .....	5
2.5.2. <i>Objetivos específicos</i> .....	5
<b>III. MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>6</b>
3.1. ANÁLISIS DE LA SITUACIÓN ACTUAL .....	6
3.1.1. <i>Macroentorno</i> .....	6
3.1.2. <i>Microentorno</i> .....	8
3.2. CONCEPTUALIZACIÓN .....	11
3.2.1. <i>Amputaciones</i> .....	11
3.2.2. <i>Anatomía y Fisiología Canina</i> .....	14
3.3.1. <i>Extremidades Caninas</i> .....	17
3.3. TEORÍAS DE SUSTENTO.....	20
3.3.1. <i>Bases teóricas</i> .....	20
3.3.2. <i>Metodologías Aplicadas</i> .....	26
3.3.3. <i>Instrumentos</i> .....	28
3.4. MARCO LEGAL .....	28
3.4.1. <i>Normativa internacional</i> .....	29
3.4.2. <i>Normativa nacional</i> .....	29
<b>IV. METODOLOGÍA</b> .....	<b>30</b>

5.1.	ENFOQUE .....	30
5.2.	VARIABLES DE INVESTIGACIÓN.....	30
4.2.1.	<i>Variable dependiente</i> .....	30
4.2.2.	<i>Variables independientes</i> .....	31
5.3.	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS APLICADOS .....	31
5.4.	MATERIALES .....	32
5.5.	MUESTRA.....	34
5.6.	METODOLOGÍA DE ESTUDIO .....	34
5.7.1.	<i>Nivel Funcional</i> .....	34
5.7.2.	<i>Nivel de sistema</i> .....	36
5.7.3.	<i>Nivel de subsistema</i> .....	36
5.7.4.	<i>Nivel de componentes</i> .....	37
5.7.5.	<i>Fabricación de prótesis canina de extremidad delantera</i> .....	37
5.7.	METODOLOGÍA DE VALIDACIÓN.....	39
5.8.	CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES.....	40
5.9.	MATRIZ METODOLÓGICA.....	41
5.10.	OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES.....	42
<b>V.</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>44</b>
5.1.	VALIDACIÓN DE COMPONENTES: PROTOTIPADO.....	44
5.1.1.	<i>Toma de medidas zoométricas del canino</i> .....	44
5.1.2.	<i>Diseño de Piezas</i> .....	46
5.2.	VALIDACIÓN DE SUBSISTEMAS: ELABORACIÓN DE PIEZAS.....	48
5.1.3.	<i>Ensamblaje de Prototipo final</i> .....	53
5.3.	VALIDACIÓN DE SISTEMAS.....	54
5.3.1.	<i>Simulaciones por software</i> .....	54
5.2.1.	<i>Acople</i> .....	55
5.2.2.	<i>Tubo de Polietileno</i> .....	56
5.2.3.	<i>Base</i> .....	58
5.2.4.	<i>Prótesis</i> .....	60

5.3.2.	<i>Modelo Jerárquico</i> .....	62
5.4.	VALIDACIÓN DE FUNCIÓN: ANÁLISIS CINEMÁTICO DE LOCOMOCIÓN DE CANINO.....	72
5.4.1.	<i>Locomoción del canino antes de la utilización de prótesis</i> .....	72
5.4.2.	<i>Análisis de Locomoción del canino posterior a la utilización de prótesis</i> .....	74
5.5.	RESULTADOS DE COSTOS .....	75
<b>VI.</b>	<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>76</b>
<b>VII.</b>	<b>RECOMENDACIONES</b> .....	<b>78</b>
<b>VIII.</b>	<b>APLICABILIDAD/IMPLEMENTACIÓN</b> .....	<b>79</b>
<b>IX.</b>	<b>EVOLUCIÓN DEL TRABAJO ACTUAL/ TRABAJO FUTURO</b> .....	<b>80</b>
<b>X.</b>	<b>CONCORDANCIA DE LOS SEGMENTOS DE LA TESIS CON LA INVESTIGACIÓN</b> .....	<b>81</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>84</b>
	<b>ANEXOS</b> .....	<b>91</b>

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Prótesis de aleta caudal para delfín. ....	7
Ilustración 2. Prótesis articulada para canino. ....	8
Ilustración 3. Amputación del miembro torácico con desarticulación de la escápula. ....	12
Ilustración 4. Amputación del miembro pelviano mediante desarticulación de la cadera. ....	12
Ilustración 5. Amputación del miembro pelviano a nivel de la diáfisis femoral. ....	13
Ilustración 6. Amputaciones transradial y transtibial. ....	13
Ilustración 7. Rasgos anatómicos de canino. ....	14
Ilustración 8. Estructura de la columna vertebral. A. Vértebras cervicales B. Vertebras torácicas C. Vértebras lumbares D. Vertebras sacras E. Vertebras coccígeas. ....	16
Ilustración 9. Miembro anterior canino, vista craneal. ....	18
Ilustración 10. Músculos de las extremidades caninas. ....	19
Ilustración 11. Planos anatómicos caninos. ....	22
Ilustración 12. Marcha canina. ....	23
Ilustración 13. Representación gráfica de las medidas zoométricas caninas. AA'). Altura en la cruz. BB'). Largo del tronco. CC'). Largo del cuello. AD). Altura del tórax. EE'). Circunferencia del costillar. BF). Profundidad del costillar. DA'). Altura del codo. AG). Largo del tronco desde la cruz hasta la inserción de la cola. GG'). Largo de la cola. HH'). Altura en la punta del glúteo. H'). Altura del garrón. BK). Altura en la punta del hombro. BB'). Altura en el pliegue de la ijada. N'O). Inclinación del húmero. HP). Inclinación del coxis. QQ'). Inclinación del fémur. Q'R). Inclinación de la tibia. SS'). Inclinación del metacarpo. ....	24
Ilustración 14. Medidas zoométricas de perfil de la cabeza. AC). Longitud total de la cabeza. AB). Longitud del cráneo. BC). Longitud del hocico. FG). Longitud de la oreja. HH'). Circunferencia de la cabeza. ....	25
Ilustración 15. Medidas zoométricas de frente de la cabeza. AB). Ancho del cráneo. CD). Ancho del hocico. ....	25
Ilustración 16. Metodología de Análisis de Elementos Finitos. ....	26
Ilustración 17. Clasificación de instrumentos y métodos de la biomecánica. ....	27
Ilustración 18. Organigrama variables dependientes e independientes. ....	30

Ilustración 19. Diagrama de metodología en V.....	35
Ilustración 20. Diagrama de diseño de dominios. ....	38
Ilustración 21. Cronograma de Actividades. ....	40
Ilustración 22. Canino de estudio.....	44
Ilustración 23. Medidas zoométricas de extremidad delantera y torso del canino. ....	45
Ilustración 24. Vista frontal de ensamblaje del prototipo. ....	47
Ilustración 25. Vista lateral de ensamblaje del prototipo. ....	47
Ilustración 26. Acople para prótesis.....	48
Ilustración 27. Proceso de elaboración de la base. ....	49
Ilustración 28. Proceso de impresión de la base.....	49
Ilustración 29. Impresión completa de la base. ....	50
Ilustración 30. Tubo de polietileno.....	50
Ilustración 31. Círculos de foamy para el sistema de amortiguamiento de impacto.....	51
Ilustración 32. Proceso de molde para chaleco de sujeción.....	51
Ilustración 33. Proceso de desmoldante de yeso. ....	52
Ilustración 34 - Chaleco de sujeción.....	52
Ilustración 35. Ensamblaje del acople, amortiguador y base. ....	53
Ilustración 36 - Prototipo final del canino. ....	53
Ilustración 37 - Prueba de tensión de la pieza de acople.....	55
Ilustración 38. Prueba de deformación de la pieza de acople. ....	56
Ilustración 39. Factor de seguridad de la pieza de acople. ....	56
Ilustración 40. Prueba de tensión en la pieza de tubo.....	57
Ilustración 41. Prueba de deformación en la pieza de tubo.....	57
Ilustración 42. Factor de seguridad en la pieza de tubo. ....	58
Ilustración 43. Prueba de tensión de la pieza base. ....	58
Ilustración 44. Prueba de deformación de la pieza base. ....	59
Ilustración 45. Factor de seguridad de la pieza base.....	59
Ilustración 46. Prueba de tensión de la prótesis. ....	60
Ilustración 47. Prueba de deformación de la prótesis.....	61

Ilustración 48. Factor de seguridad de la prótesis.....	61
Ilustración 49. Locomoción del canino con extremidad delantera amputada.....	72
Ilustración 50. Ciclo de caminata de canino. A. Primer momento de caminata; B. Segundo momento de caminata; C. Tercer momento de caminata; D. Cuarto momento de caminata. ....	73
Ilustración 51. Fases de la locomoción. A, B, C. Fase de apoyo; D, E, F. Fase de balanceo. ....	74
Ilustración 52. Prototipo colocado en el canino.....	74
Ilustración 53. Prototipo final de la prótesis de canino.....	75
Ilustración 54. Dominios del sistema.....	62
Ilustración 55. Interrelación de variables por dominio de Sistema biomecánico.....	63
Ilustración 56. Modelo analítico de prototipo de prótesis de extremidad delantera para canino en metodología jerárquica propuesta por Hehenberger (2014).....	64
Ilustración 57. Diagrama de centro de masa del canino.....	67
Ilustración 58. Diagrama de bloques de fuerzas de contacto.....	69
Ilustración 59. Diagrama de cuerpo libre.....	69
Ilustración 60. Palanca interpotente.....	70
Ilustración 61. Medidas de canino para palanca interpotente.....	71

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Desarrollo de prótesis para animales en la última década.....	6
Tabla 2. Empresas fabricantes de prótesis veterinarias. ....	10
Tabla 3. Articulaciones del miembro anterior. ....	22
Tabla 4. Marco Normativo legal aplicable .....	29
Tabla 6. Propiedades físicas y térmicas del PLA. ....	33
Tabla 7. Metodología de la Investigación.....	39
Tabla 8. Matriz metodológica.....	41
Tabla 9. Operacionalización de las variables. ....	42
Tabla 10. Mediciones zoométricas del canino. ....	45
Tabla 11. Representación de las partes del diseño. ....	46
Tabla 12. Medidas para la realización de las piezas.....	48
Tabla 13. Propiedades del PLA.....	54
Tabla 14. Costo final del prototipo.....	75
Tabla 15. Concordancia de los segmentos de la tesis con la investigación.....	81
Tabla 5. Información sobre todos los artículos finales seleccionados. ....	91

## ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Criterio de Von mises. ....	54
Ecuación 2. Módulo de Young. ....	63
Ecuación 3. Oscilaciones amortiguadas. ....	65
Ecuación 4. Condición de amortiguamiento crítico. ....	66
Ecuación 5. Centro de masa para eje X. ....	66
Ecuación 6. Centro de masa para eje Y. ....	66
Ecuación 7. Fórmula de peso. ....	67
Ecuación 8. Cálculo de miembro delantero canino. ....	68
Ecuación 9. Segunda Ley de Newton. ....	68
Ecuación 10. Tercera Ley de Newton. ....	68
Ecuación 11. Equilibrio de palancas. ....	70
Ecuación 12. Conversión de kgf a N. ....	71
Ecuación 13. Cálculo de la fuerza potente. ....	71



## I. INTRODUCCIÓN

Los animales, al igual que los seres humanos, son propensos a ser afectados por diversos factores que conlleven a efectuar una amputación de alguna de sus extremidades. Este es un procedimiento quirúrgico en donde se extirpa, total o parcial, un miembro. Los caninos son uno de los animales domésticos que pueden tener como consecuencia esta afección debido a traumatismos, accidentes, enfermedades como osteosarcoma o diabetes y malformaciones. Una amputación es un procedimiento que dura toda la vida, por lo cual, no hay una regeneración del miembro perdido, pero es posible considerar otras alternativas para rehabilitar y sustituir la funcionalidad de este y mejorar la calidad de vida de la mascota.

Por ende, para poder contrarrestar esta discapacidad en los caninos, se realiza por medio de una prótesis, la cual tiene como función ser un dispositivo médico de reemplazo para una extremidad faltante, lo que permitiría realizar actividades diarias y recuperar las funciones de movilidad y estabilidad necesarias. En múltiples casos, estas amputaciones pueden producir secuelas en la marcha que podrían perjudicar la salud, especialmente la columna, provocando un desgaste, debido que, al momento de redistribuir el peso en las demás extremidades, podría parecer cómoda pero no natural.

La presente investigación tiene como objetivo desarrollar un biodispositivo que reemplace la extremidad amputada del canino que ha sido seleccionado, siendo rescatado y al cuidado de la fundación hondureña "Refugio Amor y Abrigo", el cual, debido a un accidente, tiene la extremidad delantera derecha amputada; la investigación contiene el diseño y fabricación de una prótesis con las medidas del canino seleccionado para que sea adaptada a su tamaño y necesidad.

En el siguiente documento se detallará el diseño de un prototipo de prótesis canina para extremidad delantera. Se expondrá las bases teóricas y su relación para la fabricación de una prótesis veterinaria. Se definirá la información relevante para su diseño y creación del prototipo, en conjunto con el análisis matemático por medio de un modelo jerárquico. Asimismo, se pondrá en evidencia los análisis de locomoción canina anterior y posterior a la utilización de la prótesis. Finalizando, se plasmará las conclusiones y recomendaciones para futuros proyectos.

## **II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

En este capítulo se representa la estructura del documento, compuesto por la problemática al tema de investigación, seguidamente de la definición del problema, justificación del estudio, las preguntas de investigación y los objetivos relacionados a estas.

### **2.1. PRECEDENTES DEL PROBLEMA**

Existen millones de animales a nivel mundial que son afectados por amputaciones de una extremidad, este procedimiento quirúrgico es bastante común. Las causas de esto pueden estar asociadas a diversos factores clínicos. Entre estos, la malformación o paralización de la extremidad, traumatismos, enfermedades como osteosarcoma (cáncer de huesos) o un accidente en donde los nervios del miembro son dañados y existen fracturas conminutas, en donde los huesos se rompen en varias piezas. Estadísticas colombianas reflejan que de 2.3 millones de caninos el 2% de ellos sufren amputaciones totales en uno de sus miembros (Hoyos Mogollon, 2020). Por otra parte, estadísticas españolas mencionan que alrededor del 7% de los 7 millones de perros que existen en España, son amputados por las razones anteriores, en perros de caza de tamaño medio-grande (Pardo, 2017).

Esta afección puede impactar en diferentes áreas del cuerpo; entre las más comunes son las extremidades, el hocico y la cola. Consecuentemente, perder alguna de estas partes puede suponer un evento traumático para algunos animales, por lo que, es necesario buscar una alternativa para ayudarlo. En el caso de los caninos, las amputaciones de extremidades delanteras exhiben una recuperación post quirúrgica más lenta, tomando en consideración que reciben el 60% del peso corporal del animal; en esta zona incluyendo el peso de la cabeza. Como referencia, la distribución de peso para extremidades traseras es de 40% (Millis et al., 2014).

Debido a lo anterior, una de las alternativas de abordaje para estos casos, es la utilización de prótesis. Actualmente, las prótesis para animales son cada vez más mencionadas y utilizadas en otros países, lo que le permite al canino realizar las actividades diarias y moverse con facilidad, sin necesidad de equilibrar el peso en el resto de las extremidades, lo que puede llevar a problemas físicos más adelante.

## **2.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA**

La pérdida de una extremidad es un evento traumático, tanto para personas como animales, ya que esto los afectará por toda su vida para el cumplimiento de sus actividades diarias. El estudio para la utilización de prótesis en humanos es un tema muy común, sin embargo, es escaso ese estudio en el área de la medicina veterinaria. En Honduras, el uso de prótesis en animales domésticos es limitado. Existen algunas organizaciones sin fines de lucro que refugian a animales abandonados, sin embargo, no existe una organización que se encargue de realizar prótesis u órtesis para animales que presentan la amputación de alguna extremidad o que tienen alguna malformación o paralización.

## **2.3. JUSTIFICACIÓN**

La agencia GFK (2016) realizó un informe en 22 países sobre la tenencia de una mascota en el hogar, asegurando que más del 56% de la población mundial tiene por lo menos una, siendo el 33% caninos. Según estadísticas de la Asociación Médica Veterinaria Estadounidense (2022), el 46% de las familias tienen como mascota un canino. Cada año, alrededor de 10 mil de estos son diagnosticados con osteosarcoma, lo cual puede ser tratada con una amputación. Asimismo, estas se dan con mayor frecuencia por traumatismos (65%) y neoplasias (35%) (Adamson et al., 2005), teniendo como alternativa el uso de una prótesis.

Por consiguiente, el mercado de orto-prótesis veterinarias crecerá a una tasa de crecimiento anual compuesto de 7.1% durante el período de 2021-2026, siendo América del Norte el de mayor dominio en el mercado global (*Mercado de orto-prótesis animales | 2022 - 27 | Participación, tamaño y crecimiento de la industria - Mordor Intelligence, s. f.*). Sin embargo, hay una limitante de pruebas científicas que respalden la eficacia del diseño y desarrollo de las prótesis para extremidades caninas, siendo necesario un diseño biomecánico que cumpla los métodos de validación necesarios.

De igual manera, las prótesis para caninos disponibles en el mercado pueden tener un costo de \$1000 a \$2000, siendo un precio bastante elevado para poder ser adquiridas por las fundaciones de animales. Un prototipo de prótesis canina que utilice recursos y materiales asequibles podría mejorar la calidad de vida de los caninos con amputación que se encuentran en estos lugares, donde los recursos son escasos.

Con el diseño y construcción de un prototipo de prótesis de extremidad delantera para caninos, cuyos miembros fueron amputados, se les permitirá obtener movilidad y una distribución de peso más equilibrada. Estos dispositivos médicos deben ajustarse personalmente a cada canino, para su comodidad y facilidad de uso. Las prótesis son clasificadas en dos categorías: las exoprótesis y endoprótesis, en el caso de esta investigación se estará desarrollando una exoprótesis

## **2.4. PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN**

### 2.4.1. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN GENERAL

- ¿Cuáles son los elementos que se deben tomar en cuenta para la fabricación de un prototipo de prótesis veterinaria para caninos afectados por amputación de la extremidad delantera?

### 2.4.2. PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN ESPECÍFICOS

- ¿Cuáles son los materiales que podrían ser utilizados para realizar el prototipo de una prótesis canina?
- ¿Qué características se deben tomar en cuenta para realizar un diseño funcional de prótesis de extremidad delantera canina con materiales utilizados para la impresión 3D?
- ¿Qué diseño de prótesis de extremidad delantera canina impreso 3D cumpliría con los rangos establecidos en las pruebas de simulaciones de software?
- ¿Cuáles son las consideraciones para realizar un prototipo de prótesis canina que sea accesible y económica a todo el público?

## **2.5. OBJETIVOS**

### 2.5.1. OBJETIVO GENERAL

- Estudiar los elementos para la fabricación de un prototipo de prótesis veterinaria para caninos afectados por amputación de la extremidad delantera.

### 2.5.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Inquirir cuáles son los materiales, software y técnicas más viables para el desarrollo de una prótesis canina afectados por amputación de extremidad.
- Seleccionar el diseño ideal para la prótesis de extremidad delantera derecha canina con materiales utilizados para la impresión 3D.
- Realizar simulaciones de software y un modelo matemático para poder verificar que los rangos de valores establecidos sean cumplidos.
- Fabricar un prototipo de prótesis canina de extremidad delantera derecha con piezas impresas en 3D que sea accesible para todo el público.

### III. MARCO TEÓRICO

En el capítulo se estará presentando el análisis de situación actual, así como las teorías, incluyendo trabajos e investigaciones que existen hasta la actualidad.

#### 3.1. ANÁLISIS DE LA SITUACIÓN ACTUAL

##### 3.1.1. MACROENTORNO

En el presente apartado se presenta el análisis de la situación actual del macroentorno ligado con las prótesis de animales.

##### 3.1.1.1. *Fabricación de Prótesis de Animales en el mundo*

En esta sección se describirá las diferentes prótesis desarrolladas para animales, siendo las principales partes: extremidad, cola y hocico. Las prótesis de un miembro restablecen la estructura y la marcha cuadrúpeda, por lo cual se evita el desarrollo de enfermedades musculoesqueléticas secundarias (Wendland et al., 2019). En la actualidad, existen empresas a nivel mundial, que se han encargado de desarrollar y fabricar prótesis para diversos animales, especialmente aquellos que necesitan de esto para poder sobrevivir en su hábitat. A continuación, se clasifican las prótesis de animales desarrolladas agrupados por año, animal, tipo de prótesis y función (Tabla 1).

**Tabla 1. Desarrollo de prótesis para animales en la última década.**

AÑO	ANIMAL	TIPO DE PRÓTESIS	FUNCIÓN
2018	Elefante	Prótesis de extremidad	Regularizar la distribución de peso
2018	Tucán	Prótesis de pico	Capturar alimentos, defensa propia y alisado de plumas
2018	Gato	Prótesis de cadera	Alternativa para enfermedades degenerativas, traumatismos o luxaciones de cadera
2018	Cocodrilo	Prótesis de cola	Bucear, nadar y cazar
2021	Canino	Prótesis dentales	Evitar la pérdida de masa ósea en la mandíbula.
2022	Delfín	Prótesis de aleta caudal	Recuperar la capacidad de impulso
2023	Canino	Prótesis de extremidad	Evitar lesiones por la redistribución de peso

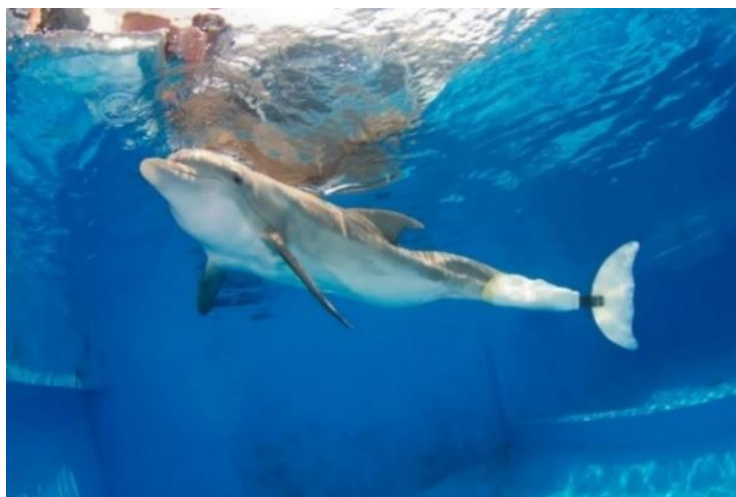
Fuente: (Clarín.com, 2018; El Comercio, 2018; G, 2023; Girard, 2021; Huelin, 2022; LaSexta, 2018; López, 2018)

Durante la última década el desarrollo para prótesis de animales ha tenido varios avances en cuanto a este tema, especialmente en el área de la impresión 3D (Timercan et al., 2019; (Clarín.com, 2018; El Comercio, 2018; G, 2023; Girard, 2021; Huelin, 2022; LaSexta, 2018; López, 2018)Mendoza-DeCal et al., 2022; Marouf et al., 2023). Al igual que en la medicina humana, la

veterinaria se ha encargado de realizar estudios a los animales sobre los miembros artificiales que le permiten recuperar alguna función primordial para sobrevivir y brindar una buena calidad de vida. Por lo tanto, el desarrollo de las prótesis ha demostrado la utilización de estos para movilizarse, alimentarse o defenderse.

Es importante tomar en cuenta que las investigaciones sobre esta temática son bastante limitadas, esto debido a que hay una mayor prioridad en la mejora de la calidad de vida de los humanos que de los animales. La falta de información de estos procesos dificulta el conocimiento para desarrollar un adecuado dispositivo que tome en cuenta las necesidades y condiciones del animal, sin embargo, algunos investigadores han mostrado interés sobre esto (Arauz et., 2021; Mich, 2014; Mich et al., 2018). A continuación, se detallan algunas prótesis para animales que han sido utilizadas.

La aleta caudal es una aleta localizada en la parte final del vertebrado acuático, la utilizan para la locomoción y el equilibrio. En los delfines, se encuentra en un plano horizontal y para impulsarse realizan movimientos verticales de este. Estos animales además de tener las funciones anteriores, también la utilizan para mantenerse erguidos por un momento en la superficie (Blanco y Olaechea, 2000). Al ser amputada esta aleta, las probabilidades de supervivencia de los delfines son baja, sin embargo, este delfín aprendió a nadar de izquierda a derecha, lo cual podría llegar a afectar su columna dorsal por el movimiento antinatural. Por lo que fue necesario realizarle una prótesis de aleta caudal (Ilustración 1).



**Ilustración 1. Prótesis de aleta caudal para delfín.**

Fuente: (López, 2016)

Las prótesis realizadas por la técnica de impresión 3D también están tomando bastante auge actualmente. En México, especialistas del Hospital Veterinario de la Universidad del Valle de México desarrollaron una prótesis canina articulada impresa en 3D, fabricada con materiales de bajo costo: policarbonato y acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) (Ilustración 2). Este dispositivo fue investigado en un período de seis meses y crearon un prototipo que cuenta con un sistema articulado mecánico, impreso en partes separadas, por lo que, si una pieza se daña, se imprime nuevamente y se coloca. Este es una recreación de un sistema de poleas y engranes.



**Ilustración 2. Prótesis articulada para canino.**

Fuente: (Prensa UVM, 2016)

### 3.1.2. MICROENTORNO

A continuación, se presentarán los aspectos de la situación actual del microentorno, siendo estos los tipos de prótesis que existen y algunas empresas que fabrican este tipo de dispositivos.

#### 3.1.2.1. *Tipos de Prótesis para Animales*

Se han estudiado los diferentes tipos de prótesis durante varios años. Estos se han clasificado en dos tipos: exoesqueléticas y endoesqueléticas. Según Stokosa (2021), las prótesis cuentan con sistemas de receptáculo, suspensión y control, articulaciones y apéndices, teniendo como objetivo ser estables y cómodas. A continuación, se brindan las características de cada una de ellas.

1. **Prótesis exoesqueléticas:** estas poseen una estructura plástica externa rígida, siendo diseñada con la forma del miembro seleccionado. Estas son fijas permanentemente y no



son ajustables, las cuales son más duraderas y pueden ser expuestas a condiciones ambientales adversos.

2. Prótesis endoesqueléticas: cuentan con una estructura esquelética interna central que está conformada por componentes modulares y acoplamientos, proporcionando, en los tres planos, un ángulo ajustable. Este sistema puede ser cubierto con un material blando tomando la forma del miembro y piel sintética aplicada sobre este. Sin embargo, son pocos los estudios que se han enfocado en el desarrollo de este tipo de prótesis (Farrell et al., 2013; Mendaza-DeCal et al., 2022).

### 3.1.2.2. *Empresas que fabrican Prótesis Veterinarias*

Actualmente no se encuentran empresas especializadas en realizar prótesis veterinarias en Honduras, aunque se puedan encontrar algunas internacionalmente que se especializan en este ámbito (Tabla 2). Entre esas esta "BIONIC PETS" la cual se encuentra en Virginia, en los Estados Unidos. En esta empresa se puede adquirir una prótesis de miembro completo con una chaqueta de plástico termoformado la cual viene a tener un precio de \$1,275.00.






Por otro lado, se encuentra la empresa de "ORTHOPETS" la cual está ubicada en el estado de Colorado en los Estados Unidos. Dicha empresa tiene un precio comenzando en \$1,976.00 el cual puede ir subiendo, dependiendo del tamaño del canino y de la calidad de los materiales utilizados, los cuales dichos materiales son los destacados de estas prótesis (Orthopets, 2022).

De igual manera, se puede encontrar la empresa "Animal Ortho Care" la cual se encuentra en Minnesota, Estados Unidos. El precio aproximado es de alrededor de \$1,750.00 el cual incluye el molde para el muñón del canino y de esta manera disminuir el contacto.

Asimismo, en Salvaterra, España, existe una empresa llamada "Beta", la cual se encarga de diseñar, fabricar y distribuir prótesis personalizadas para animales, tanto endoprótesis como exoprótesis. El precio oscila entre los \$110 a \$650 aproximadamente (*BETA Implants – Innovation for Veterinary Surgery, 2022*).

Otra de las empresas a mencionar se encuentra en América Latina. La empresa se llama "Animal Fix" y se ubica en Colombia. Esta cuenta con servicios que ofrecen protección auricular, sillas de ruedas, prótesis y férulas. El precio de las prótesis desarticuladas puede variar dependiendo de la medida de cada animal, siendo desde \$160 en adelante (Animal Fix, 2022).

**Tabla 2. Empresas fabricantes de prótesis veterinarias.**

Empresa	País donde se encuentra	\$.	Precio	Lps.	Representación del producto
<b>Bionic Pets</b>	Estados Unidos	1,275		31,441.50	
<b>Orhopets</b>	Estados Unidos	1,976		48,728.16	
<b>Animal Ortho Care</b>	Estados Unidos	1,750		43,155	
<b>Beta</b>	España	110 - 650		2,712.60 – 16,029	
<b>Animal Fix</b>	Colombia	160 – en adelante		3,945.60 – en adelante	

Fuente: (Elaboración propia)

## 3.2. CONCEPTUALIZACIÓN

### 3.2.1. AMPUTACIONES

La amputación es el proceso en el cual se elimina una extremidad del cuerpo mediante un procedimiento quirúrgico. Este procedimiento se realiza con el fin de poder controlar el dolor o la propagación dada por algún tipo de enfermedad.

#### 3.2.1.1. *Causas de Amputaciones*

El traumatismo se podría decir que es una de las causas más usuales por el cual se da una amputación, son lesiones que sufren los tejidos y órganos del cuerpo. Los casos más frecuentes serían por accidentes de tráfico, por caídas o por maltrato del canino. Por consiguiente, las extremidades sufren daños como los nervios dañados y los huesos astillados.

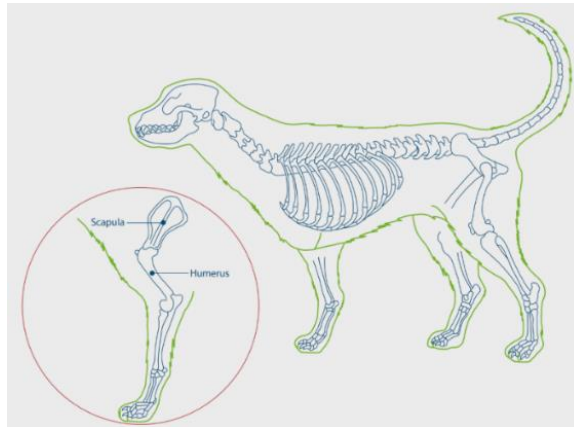
La neoplasia es un término médico el cual representa la rápida formación de tejido tumoral el cual puede ser benigno o maligno. La causa más común para estas amputaciones caninas sería por el osteosarcoma (cáncer de hueso) (Le Bras et al., 2022). El cual es caracterizado por ser muy agresivo con los caninos llegando hasta el punto de poder afectar todo el cuerpo. En la mayoría de los casos se da en caninos más ancianos en los huesos más extensos.

Las deformaciones congénitas se pueden llegar a dar en cualquier parte del cuerpo, ya sean los órganos, extremidades o los sistemas del cuerpo. Estas anomalías normalmente son detectadas desde cachorros en donde se puede observar que presentan malformaciones funcionales o estructurales. Estas deformaciones son más comunes en los caninos más grandes. De igual manera por la exposición a agentes tóxicos como los antibióticos, el selenio y la toxina tetánica se genera el aumento de anomalías congénitas en las madres en sus 55 y 75 días de gestación (Teratología Veterinaria – VetPraxis, 2009).

La osteonecrosis es la muerte del tejido óseo dada por la falta de suministro de sangre. Esta aparece en caninos jóvenes de 4 a 12 meses de edad, en caninos más diminutas y se puede dar en ambos sexos. Se manifiesta en las articulaciones y tiene como característica ser incurable (Casal, 2021).

### 3.2.1.2. Tipos de Amputaciones en Extremidades

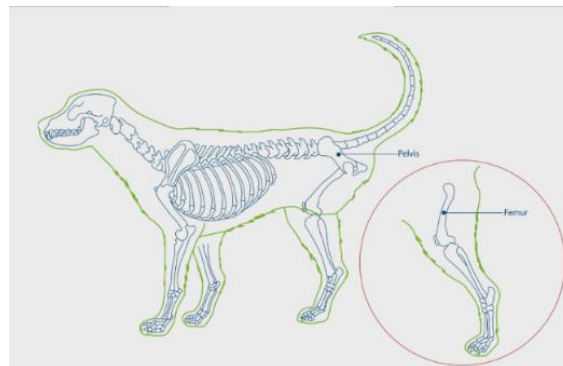
La amputación de la extremidad delantera se realiza por desarticulación escapulotorácica, la cual es extirpada desde el pie hasta la escápula. En este tipo de amputación los cambios afectan principalmente al tarso contralateral y a las regiones vertebrales cérvico-torácica y lumbosacra (Ben-Amotz et al., 2020). En esta amputación, el hueso no es cortado. Por su anatomía normal, solo posee músculos que conectan la extremidad delantera con la pared torácica, lo que facilita su extracción, cortando estos músculos y suturando el área para cerrarlo (Ilustración 3).



**Ilustración 3. Amputación del miembro torácico con desarticulación de la escápula.**

Fuente: (PawOpedic, s.f.)

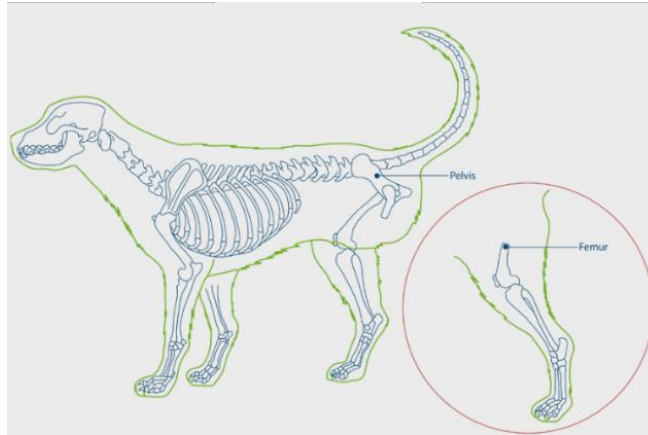
Por otra parte, en la amputación del miembro pelviano mediante la desarticulación de cadera se extrae por completo el hueso del fémur, cortando los ligamentos y tendones que mantienen su posición en la cavidad de la cadera. Por lo que, queda el hueso de la pelvis y la musculatura circundante en su lugar, dejando una ligera asimetría en su aspecto (Ilustración 4).



**Ilustración 4. Amputación del miembro pelviano mediante desarticulación de la cadera.**

Fuente: (PawOpedic, s.f.)

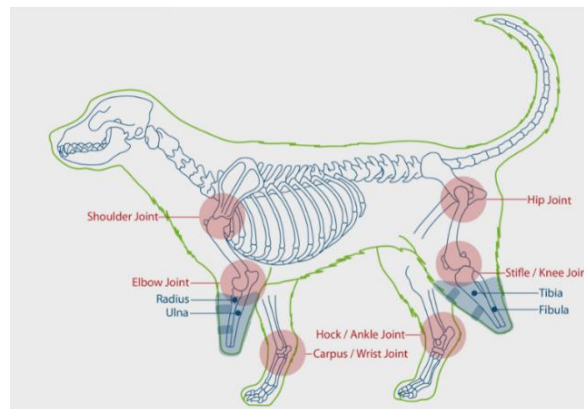
Asimismo, otra técnica de amputación de miembro pelviano es la de a nivel de la diáfisis femoral, en la cual ocurre en el tercio superior del hueso. En este caso se deja un residuo corto del hueso de fémur, el cual se bisela y la musculatura restante del muslo se sutura a su alrededor, resultando en un cuarto trasero simétrico (Ilustración 5).



**Ilustración 5. Amputación del miembro pelviano a nivel de la diáfisis femoral.**

Fuente: (PawOpedic, s.f.)

De igual manera, existen las amputaciones en las que se conserva la articulación, ya sea del codo o de la rodilla. Esta se realiza a través del eje de un hueso largo, como transtibial o transradial (Ilustración 6).



**Ilustración 6. Amputaciones transradial y transtibial.**

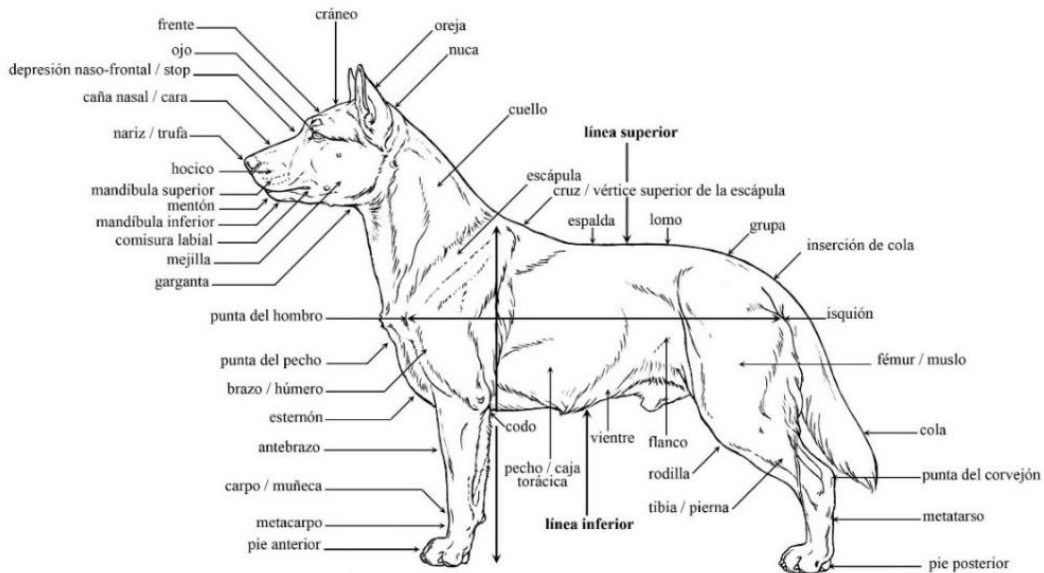
Fuente: (PawOpedic, s.f.)

Aquellos procedimientos que requieren de la amputación proximal al codo tienen una capacidad limitada al éxito protésico. Esto por el hecho que no hay prominencias ideales para la

suspensión y de igual manera hay más planos de movimiento. Por consiguiente, por ello reducirá el control sobre la extremidad e incluso puede provocar una fractura humeral si el vástago de la prótesis es muy largo (Jean Carr et al., 2023).

### 3.2.2. ANATOMÍA Y FISIOLÓGÍA CANINA

Según Dyce et al., (2009), la anatomía es la rama del conocimiento que se encarga de la forma, disposición y estructura de los tejidos y órganos que componen el cuerpo. Asimismo, la anatomía canina es bastante variada debido a las diferentes razas que existen, tomando en cuenta el tamaño tanto de la cabeza como del cuerpo. Los caninos se pueden clasificar en tres categorías por su tipo de cabeza: dolicocefalos; los cuales tienen la cabeza más larga que ancha, braquicefalos; los cuales poseen una cabeza igualmente larga que ancha y los mesocéfalos; con características intermedias entre los dos anteriores. De igual manera, se debe tomar en consideración que hay siete partes principales en los cuadrúpedos, siendo estos: cabeza, cuello, tronco, pelvis, extremo posterior, miembro torácico y miembro pelviano (Ilustración 7).



**Ilustración 7. Rasgos anatómicos de canino.**

Fuente: (Nomenclatura de las razas de la FCI, s. f.)

#### 3.2.2.1. Esqueleto

El esqueleto canino es el conjunto de huesos de los cuales llegan a ser alrededor de 319 en promedio. Estos huesos son de consistencia dura y tienen como función el proteger los tejidos

blandos de los animales, producir glóbulos rojos en la medula ósea y almacenar vitaminas y minerales. Se dividen en dos partes las cuales son el esqueleto axial y el apendicular. Este está compuesto por distintos tipos de huesos que se pueden clasificar de tal manera (Manual de Cinología, 2016):

- Huesos largos: Estos huesos se caracterizan por su forma alargada como lo dice su nombre, cilíndrica con extremidades anchas. Tienen como función el sostener el cuerpo y ayudar con el movimiento. En esta categoría se pueden encontrar el fémur, tibia, humero, peroné, radio, cubito, metatarsos y metacarpos.
- Huesos cortos: Se puede apreciar claramente que el ancho y largo son equivalentes y tienen forma cubica. La función de estos huesos son proporcionar movimientos cortos en las articulaciones, amortiguar choques y estabilidad. Se pueden encontrar los huesos del carpo, vertebras y del tarso.
- Huesos planos: Tienen un tamaño mediano, como lo dice su nombre su espesor es menor que si largo y ancho. La función principal de este tipo de hueso es para proteger zonas delicadas como el cerebro, el corazón y los órganos pelvianos. Entre estos se pueden encontrar los huesos de la cadera, la cabeza, las costillas y la escapula.

#### 3.3.1.1. *Esqueleto axial*

Se llama de tal manera dado que está ubicado en el eje central del cuerpo. Compuesto por diferentes huesos como los de la columna vertebral, la cabeza, las costillas y el esternón.

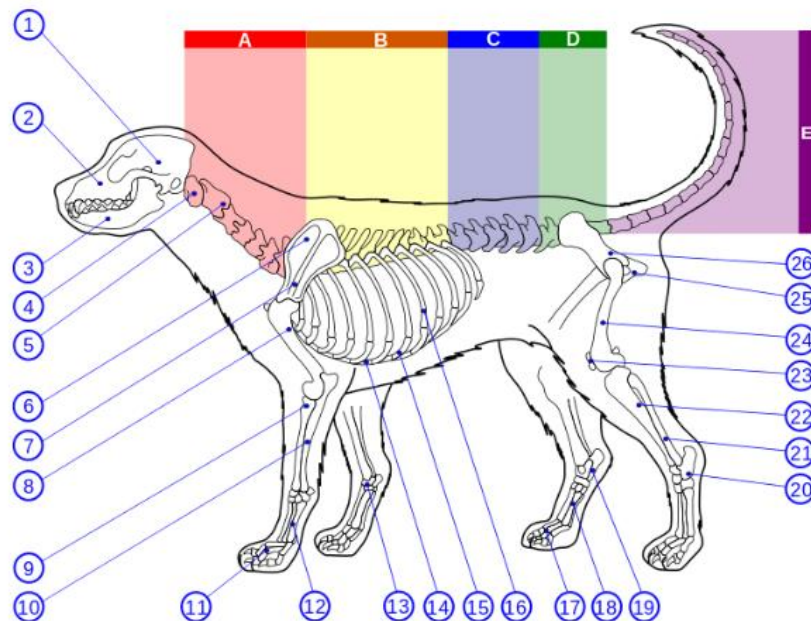
La cabeza es aquella que está unida al cuello por su articulación con la primera vertebra cervical, músculos y por los ligamentos. Los huesos de la cabeza se dividen en dos partes los de la cara y del cráneo.

Los huesos de la cara tienen la peculiaridad que en sus cavidades se encuentran la mayoría de los órganos encargados de los sentidos. Entre ellos se pueden encontrar 2 huesos temporales, 2 parietales, 2 frontales, 1 occipital, 1 etmoides, interparietal y 1 esfenoides. Por otro lado, los huesos del cráneo son aquellos los cuales protegen el encéfalo. En estos se pueden encontrar 2 nasales, 2 premaxilares 2 maxilares 2 lagrimales, 2 malares, 2 pterigoides, 4 cornetes, 1 vómer, 2 palatinos, 1 hioides y 1 mandíbula.

En la parte central del esqueleto se encuentra la columna vertebral la cual está compuesta por vertebras las cuales son huesos huecos. La función de esta columna es proteger la medula espinal de lesiones para no llegar al punto de tener una parálisis. Entre las vértebras se encuentra un disco el cual proporciona movilidad y flexibilidad al momento de realizar cualquier acción. Las vértebras por total son 26 pero se clasifican en cinco distintos tipos, las cervicales, torácicas, lumbares, sacras y coccígeas (Ilustración 8).

Las costillas son el conjunto de huesos que protegen los órganos internos dentro de la caja torácica, tales como el hígado, el corazón y los pulmones. El canino tiene 13 pares de costillas, 9 de estas articulan en la parte superior con las vértebras torácicas y en el área inferior del esternón. Por otra parte, los últimos 3 pares se conocen como costillas falsas dado que no tienen contacto con el esternón, sino que con los cartílagos. Con el ultimo par el cual es llamado flotante no se encuentra unido con el esternón y es el más pequeño.

El esternón es largo y comprimido lateralmente y es compuesto por 8 esternebras. Su extremidad posterior presenta cartílago xifoides y por consiguiente la extremidad anterior es llamado manubrio del esternón. Se puede encontrar localizado en el centro del tórax.



**Ilustración 8. Estructura de la columna vertebral. A. Vértebras cervicales B. Vertebras torácicas C. Vértebras lumbares D. Vertebras sacras E. Vertebras coccígeas.**

Fuente: (Cristina Pichon Wütscher, 1970)



### 3.3.1.2. *Esqueleto apendicular*

El esqueleto apendicular es aquel el cual su conjunto de huesos son los que conforman el movimiento del esqueleto. Donde está conformado por los huesos de los miembros anteriores y posteriores.

#### 3.3.1. EXTREMIDADES CANINAS

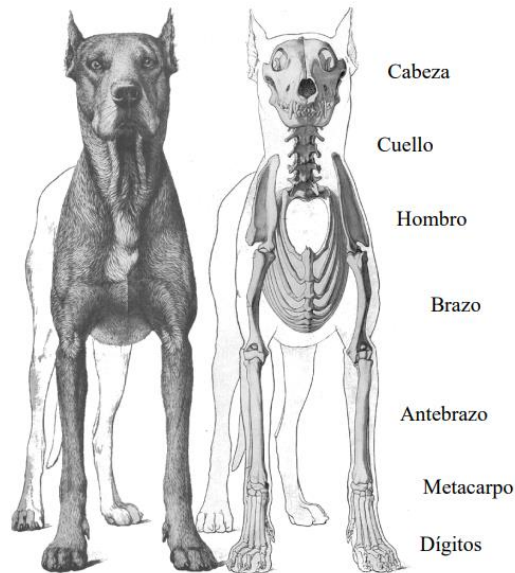
##### 3.3.1.1. *Miembro anterior*

El miembro anterior es aquel miembro el cual está conformado por la escapula, el humero, el cubito y el radio y los huesos de la mano o carpo (Millis et al., 2014):

- La escapula es un hueso plano el cual tiene forma parecida a un triángulo. Tiene dos caras, una que está en contacto con las costillas la cual es la interna. Por otro lado, la cara externa en la cual se encuentra una prominencia longitudinal. Esta es llamada espina de la escapula que se divide en dos teniendo los músculos insertados supra e infra espinosos.
- El humero es aquel hueso largo que se extiende desde el hombro hasta el codo. La región donde la base ósea este formada por el humero se le llama brazo.
- El radio y el cubito son aquellos 2 huesos largos que conforman el antebrazo. Algo curioso de ellos es que se encuentran parcialmente fusionados.
- Los huesos de las manos están compuestos por los huesos del carpo que son siete que se encuentran en la muñeca. Los huesos metacarpianos que son cinco, encontrados entre la muñeca u las falanges. Por último, las falanges también conocidas como dedos que son cinco (Ilustración 9).

##### 3.3.1.2. *Miembro posterior*

El miembro posterior es aquel miembro el cual este encargado de la locomoción. La locomoción implica movimientos tridimensionales de los segmentos de las extremidades y estos movimientos pueden diferir entre razas según la morfología de los pies caninos (Fischer et al., 2018). Entre estos huesos se pueden encontrar el fémur, la tibia, el peroné, el coxal y los huesos del pie. Es común en este miembro el tener deformidades angulares, estas malformaciones esqueléticas están asociadas con causas de la cojera que incluyen la displasia de cadera, ruptura del ligamento cruzado craneal y luxación patelar medial (Savio et al., 2016).



**Ilustración 9. Miembro anterior canino, vista craneal.**

Fuente: (López, 2016)

- El hueso coxal es el más grande de los huesos planos. Está compuesto por 3 huesos unidos entre sí los cuales son el ilion, el isquion y el pubis. Estos tres huesos se encuentran para formar el acetábulo que es la cavidad que articula con la cabeza del fémur.
- El fémur es aquel hueso el cual constituye la estructura ósea del muslo, la cadera hasta la rodilla. Se articula con el acetábulo por la parte superior y con la tibia y la rótula por debajo. Esta área con el fémur como base ósea se le llama muslo.
- La tibia y el peroné son 2 huesos que forman la pierna en posición paralela, que articulan con el fémur por la parte superior y por la parte inferior con el tarso. El área con base ósea de la tibia y el peroné se le llama pierna.
- Dentro de los huesos del pie se encuentran el tarso que consiste en siete huesos que articulan con la tibia por arriba y con los metatarsianos por abajo. Por otra parte, el metatarso que consiste en cinco metatarsianos. Como último se tienen a las falanges en donde la primera falta normalmente pero cuando existe se consta de uno o de las dos falanges.

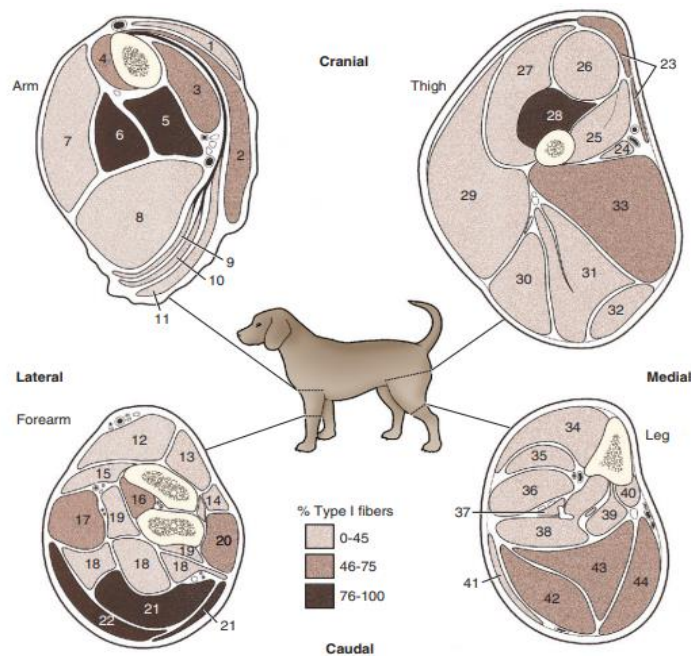
### 3.3.1.3. *Músculos*

Los músculos son aquellos tejidos que generan la capacidad de tener movimiento, flexionarse y mantenerlo en reposo. En los animales mamíferos los músculos son el aproximado

de un tercio de la mitad del peso corporal. En las razas de perros la proporción viene a ser un aproximado del 44%. Cabe tomar en cuenta que las variaciones dentro del sistema muscular son abundantes y puede ser retribuido a las razas (Ilustración 10).

Los músculos unidos con los huesos largos y que abarcan una o más articulaciones suelen tener desventajas mecánicas. Cuando se contrae lo realiza en su nivel máximo de activación por lo cual viene a ser un sistema de todo o nada. Esa contracción es iniciada por impulsos nerviosos que viajan a través de una fibra motora llamada axón hasta llegar a las fibras musculares.

Asimismo, estos adquieren diversas formas y suelen denominarse según alguna característica funcional o estructural. Los músculos que enderezan la alineación de los huesos o abren una articulación se les conoce como extensores. Aquellos que forman ángulos en los huesos o cierran la articulación se les conoce como flexores. La flexión y extensión son los movimientos primarios de la locomoción. El movimiento que resulta de las contracciones musculares es producido por interacciones complejas de muchos músculos, múltiples músculos trabajan en realizar las actividades de las más rutinarias a las más compleja (Evans, 1993).



**Ilustración 10. Músculos de las extremidades caninas.**

Fuente: (Evans, 1993)

### **3.3. TEORÍAS DE SUSTENTO**

#### 3.3.1. BASES TEÓRICAS

##### 3.3.1.4. *Medicina Veterinaria*

La Medicina Veterinaria es una disciplina científica que surge como una necesidad para encargarse de estudiar las causas, mecanismos y manifestaciones de las enfermedades en los animales. Al igual que en la medicina humana, la veterinaria tiene como objetivo prevenir, diagnosticar y curar aquellas afecciones de la salud que tienen un impacto en los animales, teniendo diferentes ramas de especialización como epidemiología, anatomía y fisiología, toxicología y biomecánica, por mencionar algunas de ellas.

Con las nuevas tendencias y avances tecnológicos, las aplicaciones para la Medicina Veterinaria también han revolucionado, utilizando materiales didácticos tecnológicos que permitan el estudio de este, como el caso de los modelos animales digitales en 3D (Khalip et al., 2019).

##### 3.3.1.5. *Ingeniería Biomédica*

La Ingeniería Biomédica es una disciplina para realizar avances en los conocimientos de ingeniería, medicina y biología con aplicaciones a todas las ciencias básicas de la vida. Actualmente, es una disciplina que se ha dado a conocer con la llegada de la pandemia por COVID-19. Esta tiene un amplio campo de aplicación, basándose en los fundamentos de mecánica, termodinámica, ingeniería eléctrica, procesamiento de señales, modelado fisiológico, imágenes médicas, óptica biomédica, y el transporte de calor, masa y fluidos (Masters, 2012).

Asimismo, existe una gran oportunidad de implementar la ingeniería biomédica en medicina veterinaria, no solamente para el desarrollo y fabricación de prótesis, sino también para el estudio de variables, estandarización de dispositivos, procesos y sistemas (Bressan et al., 2018).

##### 3.3.1.6. *Biomecánica Canina*

La biomecánica es el análisis de la estructura, movimiento, función y mecánica del cuerpo canino. Es considerado que tiene cinco elementos importantes los cuales son el movimiento, la fuerza, el momento, las palancas y el equilibrio. Se considera que cualquier movimiento parte de una posición anatómica. La posición anatómica es aquella en la que se encuentra parado sobre

sus miembros, paralelos entre sí, con el cuello extendido y con la mirada hacia el frente como si estuviera a punto de caminar.

Otro punto que tomar en cuenta es que, al momento de la utilización rutinaria de la prótesis con parámetros no apropiados pueden generar el aumento de la tensión de la sutura. Esto provoca que se amplifiquen las presiones de contacto en el compartimiento lateral de la babilla (Del Carpio et al., 2021). Es necesario tomar en cuenta que la biomecánica parte de un concepto de la física que se encarga de estudiar el movimiento y las fuerzas que lo provocan, la mecánica, siendo dividida en dos: cinemática y dinámica (Pelaez, 2006).

En el caso de la cinemática, este es el estudio del movimiento. El cuerpo humano tiene la capacidad de realizar movimiento, por lo tanto, la cinemática hace referencia al movimiento de los segmentos corporales. El segundo concepto es la dinámica, que es el estudio de las fuerzas que provocan movimiento, y, por lo tanto, como el cuerpo humano realiza movimiento, debe haber fuerzas que lo provoquen. En consecuencia, la biomecánica es la combinación de estos dos conceptos.

Los cuadrúpedos poseen la habilidad de generar coordinación adaptativa y presentar patrones de marcha, como lo es caminar, trotar, saltar, lo cual es necesario para moverse en velocidades diferentes y bajo diversas condiciones ambientales (Catavittello et al., 2015; Erazo et al., 2020).

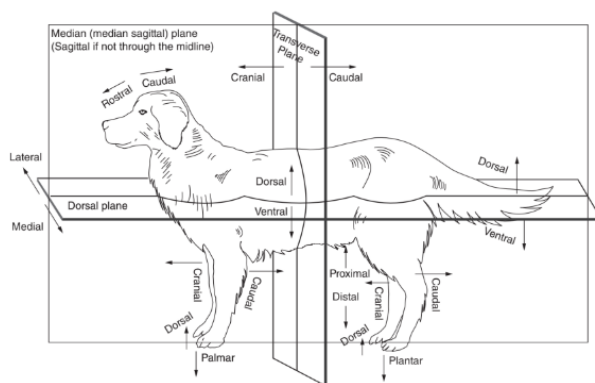
Según Lee (1995), son tres los parámetros para tener una definición radical del movimiento en una articulación:

- Eje de movimiento. En donde se encuentran datos sobre cómo cambia la ubicación durante el movimiento.
- Cantidad de rotación. Representa el ángulo a través el cual se produce la rotación de la articulación sobre el eje durante el movimiento.
- Cantidad de traslación. Muestra el desplazamiento que ocurre a lo largo del eje durante el movimiento.

La forma en la que se demuestra el movimiento de las articulaciones es una aproximación. Esto por el hecho que muchos aspectos de la dinámica de las articulaciones y las fuerzas que actúan en las articulaciones no están disponibles. La solución para dicho problema en el

movimiento tridimensional es considerar que este movimiento de articulación se da en los tres planos ortogonales: sagital, frontal y horizontal. De igual manera con los componentes de traslación se debe de idear con los planos caudo-craneal, medio-lateral y dorso-transversal (Ilustración 11) (McGowan & Goff, 2016).

Existen seis articulaciones que se pueden encontrar en el miembro. A continuación, se detalla cada una de ellas, clasificado en articulación, tipo de articulación y superficies articulares, movimiento principal y otros movimientos (Tabla 3).



**Ilustración 11. Planos anatómicos caninos.**

Fuente: (McGowan & Goff, 2016)

**Tabla 3. Articulaciones del miembro anterior.**

<b>Articulación</b>	<b>Tipo de articulación y superficies articulares</b>	<b>Movimiento principal</b>	<b>Otros movimientos</b>
Articulación glenohumeral	Tipo esferoide entre la cavidad glenoidea de la escapula y la cabeza del humero, con la fosa glenoidea en la escapula.	Flexión y extensión	Rotatorio
Articulación de codo	Tipo compuesta, formada por el cóndilo, humero, cabeza del radio y escotadura semilunar del cubito. La articulación radiocubital proximal se comunica con la articulación principal del codo.	Flexión, extensión y rotación la cual se produce en la articulación radiocubital,	Lateral
Garra	Tipo compuesta, involucra las articulaciones proximal, medial, carpometacarpiana e intercarpiana. La proximal del carpo es un ginglymus entre el extremo distal del radio, el cubito y la fila proximal del carpo.	Tipo flexión, extensión. Dado en la articulación proximal y la del carpo medio.	Lateral

<b>Articulación</b>	<b>Tipo de articulación y superficies articulares</b>	<b>Movimiento principal</b>	<b>Otros movimientos</b>
Articulación metacarpofalángica	Tipo compuesta entre las falanges proximales, huesos sesamoideos proximales y dorsales y metacarpianos.	Flexión y extensión	Aducción y rotación axial como secundarios
Articulación proximal interfalángica	Tipo conjunto de silla entre las falanges proximal y medial	Flexión y extensión	Rotación axial y movimientos laterales.
Articulación interfalángica distal	Tipo conjunto de silla entre la media falange y la distal.	Flexión y extensión	Rotación axial y movimiento lateral.

Fuente: (Adamson et al., 2005)

### 3.3.1.6.1. *Marcha canina*

Por medio de este movimiento, el canino se puede desplazar de un lugar a otro en distintas velocidades (Ilustración 12). Aquellos movimientos pendulares en los planos sagitales predominan aquellas articulaciones de las extremidades que se conocen como la flexión y extensión. La flexión es cuando se reduce el ángulo entre los dos segmentos de la extremidad y el opuesto abre el ángulo y los alinea los segmentos. De igual manera, el movimiento en algunas articulaciones puede variar desde una posición flexionada hasta una extensión completa hasta una segunda posición flexionada en otro limite (Dyce et al., 2009).

Por otro lado, la aducción y la abducción son movimientos pendulares en planos transversales. La aducción realiza la función de la parte móvil hacia el plano medio y la abducción se aleja de ella. Cuando estos movimientos se ejercen en los dedos se puede apreciar el movimiento con referencia al eje de la extremidad por lo que se puede observar una convergencia o la extensión de los dedos. Por medio de la combinación de la flexión, extensión, aducción y abducción se puede realizar que la extremidad describa un círculo o elipse, que se le conoce como un movimiento de circunducción (Dyce et al., 2009).



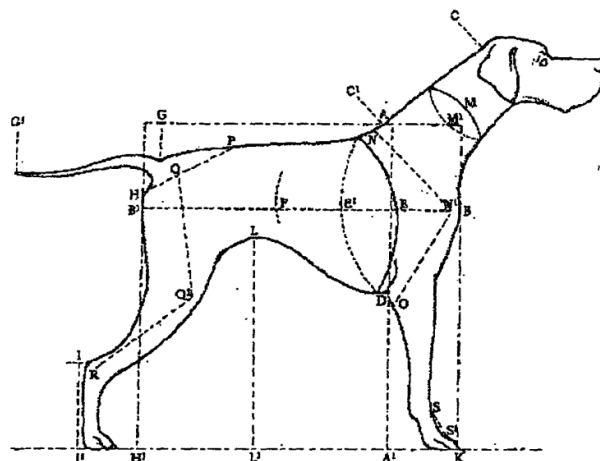
**Ilustración 12. Marcha canina**

Fuente: (Millis et al., 2014)

### 3.3.1.7. Zoometría Canina

Dubuc (1991) menciona que la zoometría estudia las formas de los animales mediante mediciones corporales concretas, lo que permite cuantificar la conformación corporal. Por otra parte, según Sastre (2003) permite deducir la proporcionalidad entre las diferentes regiones del cuerpo para poder obtener una base para la clasificación de los tipos armónicos dentro de las diversas razas.

Las principales mediciones de las regiones corporales externas de los animales son: cabeza, cuello, tronco y extremidades. Es importante conocer las medidas necesarias para cada región con el propósito de poder obtener las proporciones para cada raza de canino, y en dado caso que fuera necesario fabricar una prótesis u órtesis, se podría tener la facilidad de saber qué mediciones son las más adecuadas para esa región específica y cómo tomarlas. A continuación, se muestra las medidas corporales caninas del cuello, tronco y extremidades (Ilustración 13).

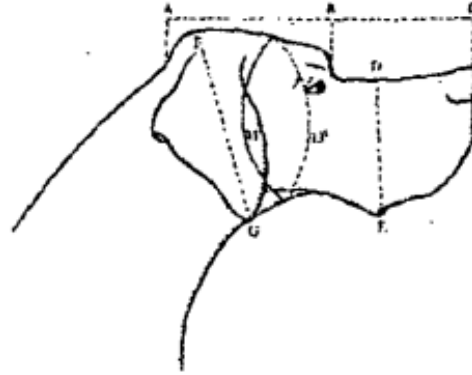


**Ilustración 13. Representación gráfica de las medidas zoométricas caninas. AA'). Altura en la cruz. BB'). Largo del tronco. CC'). Largo del cuello. AD). Altura del tórax. EE'). Circunferencia del costillar. BF). Profundidad del costillar. DA'). Altura del codo. AG). Largo del tronco desde la cruz hasta la inserción de la cola. GG'). Largo de la cola. HH'). Altura en la punta del glúteo. H'). Altura del garrón. BK). Altura en la punta del hombro. BB'). Altura en el pliegue de la ijada. N'O). Inclinación del húmero. HP). Inclinación del coxis. QQ'). Inclinación del fémur. Q'R). Inclinación de la tibia. SS'). Inclinación del metacarpo.**

Fuente: (Orozco et al., 1998)

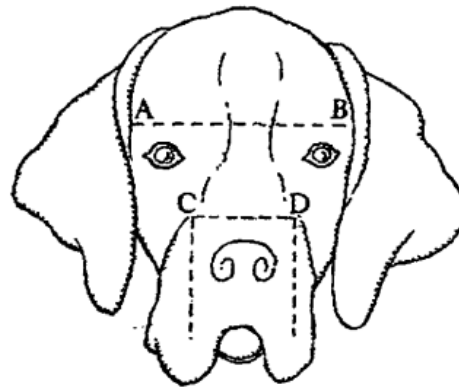


También es necesario tomar en consideración las medidas zoométricas de la cabeza, tanto de perfil como de frente (Ilustración 14 y 15).



**Ilustración 14. Medidas zoométricas de perfil de la cabeza. AC). Longitud total de la cabeza. AB). Longitud del cráneo. BC). Longitud del hocico. FG). Longitud de la oreja. HH'). Circunferencia de la cabeza.**

Fuente: (Orozco et al., 1998)



**Ilustración 15. Medidas zoométricas de frente de la cabeza. AB). Ancho del cráneo. CD). Ancho del hocico.**

Fuente: (Orozco et al., 1998)

Jones et al., (2018) menciona que la morfología y parámetros del segmento corporal de los caninos es importante. Las medidas tienen un componente esencial al momento de desarrollar modelos biomecánicos que pueden ser de apoyo a los veterinarios para intervenciones quirúrgicas, tratamiento de lesiones y procedimientos de prevención.

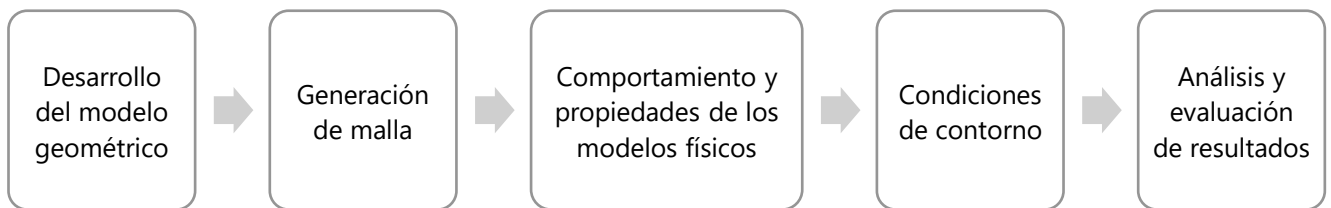
### 3.3.2. METODOLOGÍAS APLICADAS

En este apartado se expone sobre las metodologías utilizadas que se encuentran ligadas a las teorías de sustento que han sido utilizadas en diferentes investigaciones que poseen similitudes al estudio que se está realizando, del cual se hace una recolección de datos y posteriormente analizar la información obtenida.

#### 3.3.2.1. *Análisis de elementos finitos*

Vásquez (2001) menciona que el método de elementos finitos es bastante útil al momento de resolver problemas de ingeniería, como derivados del análisis de deformación, transmisión de calor, redes eléctricas y movimientos de fluidos. El análisis de elementos finitos es un método computarizado que permite realizar simulaciones con diseños en 3D para predecir cómo reaccionará un producto ante los efectos físicos del mundo real, siguiendo una serie de pasos para poder llegar a las conclusiones necesarias (Ilustración 16). Según Rao (2018), en este método el objetivo principal es encontrar la solución de un problema complicado a uno más simple, pero teniendo como resultado una solución aproximada y no exacta. Por lo que, se tiene que la región de la solución está construida a partir de subregiones pequeñas e interconectadas llamadas elementos

Asimismo, en la Ingeniería Biomédica tiene aplicaciones en las áreas de problemas de equilibrio y propagación. Por ejemplo, el análisis de estrés de los ojos, huesos y dientes; capacidad de carga de un implante o prótesis y en la mecánica de las válvulas cardíacas; el análisis de impacto del cráneo y dinámica de las estructuras anatómicas. Diversos autores de investigaciones han utilizado esta metodología para el diseño y fabricación de prótesis (Hincapie et al., 2021; Timercan et al., 2019; Javier et al., 2017).



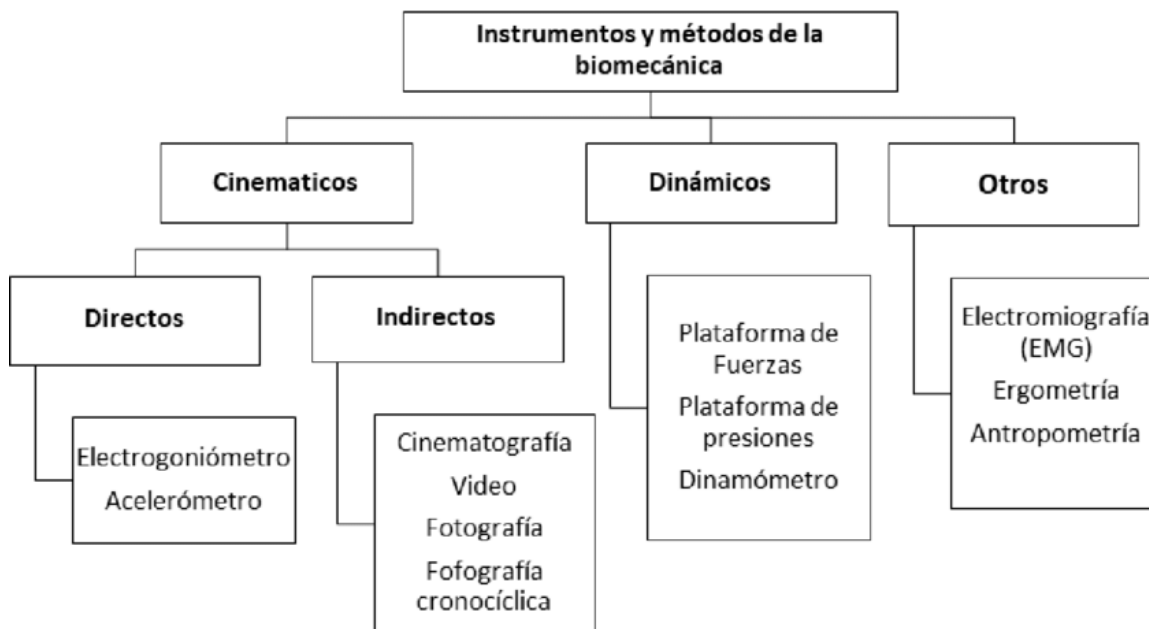
**Ilustración 16. Metodología de Análisis de Elementos Finitos.**

Fuente: (Ramírez et al., 2017)

### 3.3.2.2. Pruebas biomecánicas

Las pruebas biomecánicas, según el Instituto de Biomecánica, son orientadas a la valoración funcional del sistema musculoesquelético y neuromuscular. Cuenta con una serie de pruebas de esfuerzo, resistencia y movimiento. En la práctica clínica, estas tienen como objetivo evaluar aspectos mecánicos o fisiológicos de la motricidad, como ser la fuerza, movimiento, coordinación, equilibrio y patrones de activación muscular dinámica (Chaler et al., 2010). Para ello, debido a los diferentes métodos de estudio de la biomecánica, se utilizan instrumentos para poder obtener los datos necesarios según sea el caso, los cuales se dividen en cinemáticos, dinámicos y otros (Ilustración 17).

Algunos estudios encontrados utilizan estas pruebas para valorar estos procesos de marcha, tanto en animales que no han sido afectados por una amputación como los que han sido (Galindo-Zamora et al., 2016). En algunos casos, tiene una gran importancia al momento de la colocación de la prótesis, permitiendo su estudio en la evolución y para la optimización (Timercan et al., 2019; Mendaza-DeCal et al., 2021).



**Ilustración 17. Clasificación de instrumentos y métodos de la biomecánica.**

Fuente: (Jódar, 1993)

### 3.3.3. INSTRUMENTOS

En este apartado se detallan los instrumentos utilizados para evidenciar la extracción de datos de ellos, con el objetivo de facilitar el proceso de medición.

#### 3.3.3.1. *SolidWorks*

El software CAD SOLIDWORKS es una aplicación con bastante utilidad en el área de automatización de diseño mecánico, en el cual es posible realizar croquis de ideas con facilidad, experimentar con operaciones y medidas y, de igual manera, producir modelos y dibujos con bastante detalle. Esta aplicación utiliza procedimientos de diseño 3D, basándose en un croquis en 2D, en el cual también es posible crear dibujos en 2D a partir de los ensamblajes en 3D. Asimismo, se pueden realizar análisis estructural y simulaciones que permitan ser una guía al momento de tomar decisiones en el diseño, rendimiento y calidad del producto final (SolidWorks, 2015).

#### 3.3.3.2. *Medidas morfométricas*

La morfometría consiste en la medición de las formas de los organismos. Este análisis se utiliza para hacer el cálculo de la composición corporal y porcentaje de grasa corporal, tomando en cuenta las diferentes mediciones de longitudes anatómicas. La morfometría es el estudio realizado por la zoometría, lo cual permite diferenciar las razas de caninos existentes y tener parámetros en cuando a las mediciones.

## **3.4. MARCO LEGAL**

En este apartado se expondrán las leyes, normas y reglamentos que dan fundamento a la investigación y, por ende, sean aplicables para el proyecto de fabricación de un prototipo de prótesis canina de extremidad.

Cabe resaltar que aún no existe suficiente documentación legal que sea aplicable para cualquiera de las etapas de desarrollo y fabricación de una prótesis canina, así como para dispositivos veterinarios. Sin embargo, existen algunas normativas internacionales y nacionales que son específicas para la veterinaria, en el área de experimentación, medicamentos e instrumental utilizado en ellos.

### 3.4.1. NORMATIVA INTERNACIONAL

Para comenzar, la Administración de Alimentos y Medicamentos (FDA) regula los alimentos, medicamentos, dispositivos médicos, productos electrónicos, cosméticos, productos veterinarios y productos de tabaco. Para el caso de los dispositivos médicos destinados para el uso de animales, la FDA tiene una supervisión regulatoria, sin embargo, no se requiere una aprobación previa a la comercialización ni la presentación de un 501(k) o PMA. Asimismo, los responsables de dispositivos que fabrican o distribuyen estos dispositivos no están obligados a registrar sus establecimientos o enumerar los dispositivos para animales en la FDA, solamente debe asegurarse que sean seguros, efectivos y estén debidamente etiquetados (FDA, 2021).

### 3.4.2. NORMATIVA NACIONAL

En Honduras, existen algunas normativas que se encargan de velar por el bienestar y protección de los animales, así como los profesionales responsables de cumplir con estas. De igual manera, para las actividades relacionadas con los productos veterinarios se tienen una normativa, siendo responsable el Colegio de Médicos Veterinarios de Honduras (Tabla 3).

**Tabla 4. Marco Normativo legal aplicable**

<b>Documento Legal</b>	<b>Ente Rector</b>	<b>Requisito</b>
Artículo 12.- Ley de Protección y Bienestar Animal	Congreso Nacional	Los animales de experimentación deben ser protegidos y cuidados según lo previsto en esta Ley.
Decreto No. 6 – 2004 Ley Orgánica del Colegio de Médicos Veterinarios de Honduras	Colegio de Médicos Veterinarios de Honduras	Todo establecimiento fabricante, importador, distribuidor y expendedor de productos veterinarios requerirá los servicios de un Regente, responsable ante la Secretaría del Estado en los Despachos de Agricultura y Ganadería.
Decreto No. 6 – 2004 Ley Orgánica del Colegio de Médicos Veterinarios de Honduras	Colegio de Médicos Veterinarios de Honduras	Registrar un producto veterinario ante la Secretaría de Estado en los Despachos de Agricultura y Ganadería deberá contar con los servicios de un responsable técnico.
RTCA 65.05.51:08 Reglamento Técnico Centroamericano – Medicamentos Veterinarios y Productos afines. Requisitos de Registro Sanitario y Control	Secretaría de Agricultura y Ganadería	Revisar el reglamento para las disposiciones de registro sanitario y control de los medicamentos veterinarios, productos afines y establecimientos.

Fuente: (Elaboración propia)

## IV. METODOLOGÍA

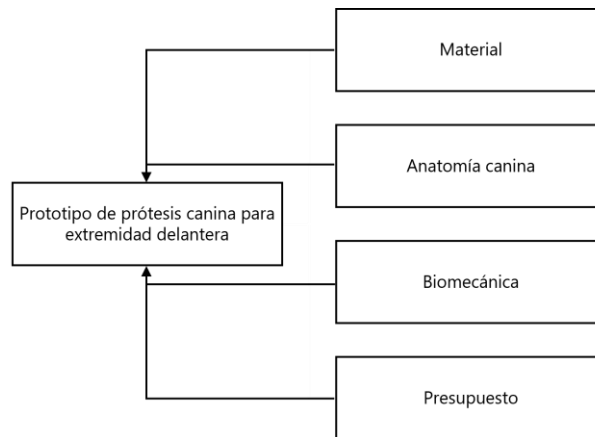
En este apartado se presenta la aplicación de la metodología a utilizar en la investigación y se busca resolver el problema mediante la utilización de técnicas e instrumentos, detallando la interpretación de los datos y proponiendo conclusiones sobre estos.

### 5.1. ENFOQUE

El enfoque mixto cumple con los requisitos para la investigación, debido a que se implica un conjunto de procesos de recolección, análisis y vinculación de datos tanto cualitativos como cuantitativos en un mismo estudio que permiten responder el planteamiento del problema siendo la interpretación de esta toda la información en su conjunto. De igual manera, este enfoque permite lograr una perspectiva más amplia y profunda del fenómeno a estudiar (Sampieri et al., 2014).

### 5.2. VARIABLES DE INVESTIGACIÓN

En este apartado se detallaron las variables independientes y la variable dependiente, las cuales se relacionan entre sí. La variable dependiente es aquella que es influenciada por las variables independientes (Ilustración 18).



**Ilustración 18. Organigrama variables dependientes e independientes.**

Fuente: (Elaboración propia, 2023)

#### 4.2.1. VARIABLE DEPENDIENTE

La variable dependiente de esta investigación es el diseño del prototipo de prótesis canina de extremidad delantera, ya que esta se verá influenciada por las variables independientes

seleccionadas. El diseño de prototipo de prótesis canina de extremidad delantera depende de los siguientes factores: el material, anatomía canina, biomecánica y presupuesto.

#### 4.2.2. VARIABLES INDEPENDIENTES

Las variables independientes son aquellas que sus valores no se ven alteradas por las demás.

- **Material.** Fue necesario tomar en cuenta el análisis del material a utilizar para la fabricación debido a la técnica que se utilizará, siendo impresión 3D y que sea biocompatible, debido a que no se debe provocar ningún efecto indeseable en la piel del canino. Asimismo, se debe considerar las propiedades mecánicas de este, ya que debe ser resistente, y los costos.
- **Anatomía canina.** Debido a que existe una variedad extensa de razas caninas, se debió tomar en cuenta factores como la zoometría, debido a su tamaño, y el peso de cada uno.
- **Biomecánica.** Los caninos se desplazan con cuatro extremidades, dos delanteras, las cuales se encargan de brindar soporte del peso del cuerpo; mientras que las dos traseras son utilizadas para propulsión. Por ello, fue necesario tomar en cuenta cuál es la función que debe cumplir el prototipo.
- **Presupuesto.** Con motivo de brindar un prototipo que sea accesible y económico para todo el público, los costos para su fabricación deben ser lo mínimo posible.

### 5.3. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS APLICADOS

En este espacio se presentan las técnicas e instrumentos que fueron esenciales en el proceso del desarrollo de prototipo de prótesis canina de miembro anterior. Entre estas se encuentra:

- **SolidWorks.** Esta técnica permite realizar el proceso completo de diseño mecánico, desde la idea por el diseñador a la realización de los planos técnicos necesarios para su fabricación. Con la ayuda de las herramientas e interfaz del programa en los diseños de piezas, ensamblajes y dibujo, el operador puede modelar en tres dimensiones la pieza y realizar las vistas que se necesiten (Diseño mecánico con SolidWorks, 2015). Este se utilizó para el diseño de la prótesis y las simulaciones de software para verificar la resistencia de esta.

- Modelado 3D. Por medio de esta técnica se realizó el proceso de creación de una representación matemática de superficies utilizando la geometría. El resultado se puede representar como una imagen bidimensional por medio del renderizado 3d o como un objeto físico por medio de una impresora 3D (Fabricación Digital: Introducción al Modelado E Impresión 3D, 2016).
- Impresión 3D. Es una tecnología de fabricación aditiva que permite transformar un modelo digital en un objeto tridimensional real y tangible. Estos objetos se construyen capa a capa, creando estructuras complejas, en menores tiempos y costos. En este, pueden ser utilizados diferentes tecnologías y materiales, según la aplicación final destinada. En la medicina, este tipo de tecnología tiene un creciente interés en la parte de especialidad ortopédica y traumatología (Cano et al., 2021).
- Modelado en CNC. Es el control numérico por computadora, son dispositivos de fresado automatizado que fabrican componentes industriales. Estas permiten formar de manera automática un patrón de diseño asistido por ordenador (Bhattacharjee et al., 2023). Se utilizó para la fabricación del acople de dura aluminio y el tubo de polietileno.
- Ensamblaje de prototipo. Dicha técnica viene a ser la integración de todos los componentes que son correspondientes al prototipo final. En este caso, se ensamblaron las partes impresas en 3D junto con los demás materiales necesarios para el prototipo hechos en CNC.
- Kinovea. Esta aplicación permitió realizar un análisis del estudio del movimiento, el cual captura, observa, se hacen anotaciones y mediciones. En el caso de esta investigación, se utilizó para realizar un análisis del movimiento de locomoción del canino de estudio.

#### **5.4. MATERIALES**

- Filamento PLA para impresión 3D. El políácido láctico, también conocido por sus siglas PLA, es un poliéster alifático ecológico, procesable, y biocompatible, siendo un biomaterial esencial para diversas aplicaciones biomédicas (Farah et al., 2016). Asimismo, DeStefano et al., (2020) menciona que ofrece ventajas potencias para dispositivos ortopédicos biodegradables. El PLA contiene las propiedades físicas y procesabilidad de un termoplástico, el cual pueden calentarse, recalentarse y enfriarse para modificar la



morfología deseada (Tabla 6). Este se utilizó para realizar la base de la prótesis y parte del chaleco de sujeción.

**Tabla 5. Propiedades físicas y térmicas del PLA.**

<b>Propiedades físicas y térmicas</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>
<b>Peso molecular (MW)</b>	g/mol	66,000
<b>Gravedad específica</b>		1.27
<b>Densidad Sólida</b>	g/cm <sup>3</sup>	1.252
<b>Densidad de fusión</b>	g/cm <sup>3</sup>	1.073
<b>Calor específico</b>	J/kg °C	
<b>190°</b>		2060
<b>100°C</b>		1955
<b>Conductividad térmica 190°C</b>	W/m °C	0.195
<b>Conductividad térmica 109°C</b>	W/m °C	0.197
<b>Temperatura de transición vítrea</b>	°C	55
<b>Punto de fusión</b>	°C	165

Fuente: (DeStefano et al., 2020)

- Yeso. Es un material el cual busca la inmovilización de un área. En este caso se utilizó la venda yeso para realizar un molde del muñón del canino. Estas capas están superpuestas sobre una cara de la extremidad, sin circundar a esta y cubiertas posteriormente por un vendaje contentivo (Joaquín Cristóbal Sangüesa et al., 2021).
- Tubo de polietileno. Se utilizó para darle una base estructural al prototipo y fue acoplado mediante tornillos.
- Almohadillas de caucho. Dicho material fue destinado para reducir la fricción de la pieza baja del prototipo con el terreno por el cual el canino realice su movimiento. De igual manera, tiene un efecto pegajoso con el suelo por el cual brinda al prototipo ese efecto de "agarre" con la tierra.
- Tornillos. Se atornillan en los orificios del prototipo y se unieron con las tuercas.
- Tuercas. Con la ayuda de los tornillos para llegar a tener la unión necesaria.
- Base de acople para tubo de polietileno. Se pudo unir el tubo metálico con el chaleco de sujeción.
- Foamy. Se utilizó para la elaboración del sistema de amortiguación. Con el diseño de este sistema, se evitó que el canino tuviera un impacto negativo al momento de golpear la prótesis al suelo, y tuviera una mejor manera de moverse.

- Fibra de vidrio. Se utilizó para realizar el chaleco de sujeción de la prótesis.
- Correa de agarre. Se utilizó para el chaleco y sujetará la prótesis al canino.

## **5.5. MUESTRA**

El tipo de muestra por utilizar en la investigación es no probabilístico, por el motivo de que el procedimiento depende de las causas que se relacionan con las características de la investigación. En este caso, la muestra seleccionada es un canino macho de raza grande que presenta una amputación de miembro torácico con desarticulación de la escápula derecha.

## **5.6. METODOLOGÍA DE ESTUDIO**

En este apartado se detalló la metodología de estudio utilizada, siendo la Metodología en V la seleccionada. Esta metodología permite comparar las fases de desarrollo con las de control de calidad correspondientes, siendo ideal para procesos pequeños. Esta se adaptó al proceso realizado para la investigación, siguiendo una lista de pasos fundamentales y retroalimentación de los sistemas y subsistemas, con el objetivo final del diseño y fabricación de una prótesis de canino para extremidad delantera (Ilustración 19).

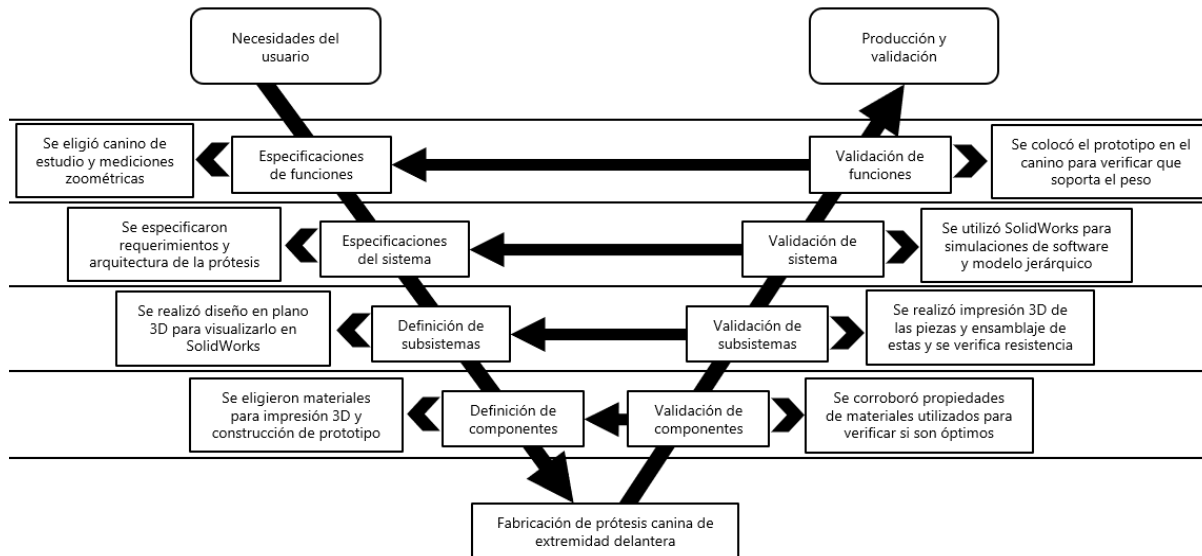
Asimismo, el alcance para esta investigación fue exploratorio, debido a que el objetivo de esta no es un tema muy investigado en el país y se muestra interés de conocer las características de este.

De igual manera, fue transversal, debido a que la recolección de datos es en un período de diez semanas. El tipo de diseño fue cuasiexperimental, ya que el sujeto de estudio se establece previamente y no de forma aleatoria, siendo en este caso un canino rescatado por un refugio de animales que sufrió de una amputación y cumplió con las características establecidas en esta investigación (Tabla 7).

### **5.7.1. NIVEL FUNCIONAL**

#### **5.7.1.1. *Especificaciones de funciones***

Se encontró un canino que se adapta a las necesidades de la investigación. Una vez encontrado, se le realizó la toma de medidas zoométricas que fueron útiles para el diseño de las piezas para la prótesis de canino.



**Ilustración 19. Diagrama de metodología en V.**

Fuente: (Elaboración propia)

### 5.7.1.2. Validación de funciones

Es la etapa final antes de la producción y validación del prototipo. En esta etapa, se colocó el prototipo en el canino para verificar que la prótesis funcionó correctamente y soporta el peso del animal.

## 5.7.2. NIVEL DE SISTEMA

### 5.7.2.1. *Especificación del sistema*

En dicho nivel, se especificaron los requerimientos y arquitectura de la prótesis del canino, siendo personalizada para la extremidad delantera. Este fue diseñado a partir de piezas que se acoplen a las necesidades del canino y ajustables al mismo. El objetivo del prototipo fue que soporte el peso del canino. Asimismo, se establecieron las técnicas, softwares y materiales necesarios para la fabricación de la prótesis.

### 5.7.2.2. *Validación del sistema*

Se realizaron las simulaciones de los elementos finitos (pruebas de tensión, deformación, factor de seguridad) por medio del software CAD de SolidWorks para confirmar el cumplimiento de los requisitos del prototipo. Por otra parte, la realización del modelo jerárquico se realizó mediante una investigación amplia acerca de cada uno de los niveles del tema recalando los puntos importantes de ella.

## 5.7.3. NIVEL DE SUBSISTEMA

### 5.7.3.1. *Definición de los subsistemas*

Se implementó las herramientas del software de SolidWorks con el propósito de realizar un modelado 3D. Por medio de la investigación acerca de materiales con biocompatibilidad se encontraron los materiales apropiados para realizar las piezas del prototipo. Asimismo, se utilizó el software de Autodesk para realizar el escáner 3D y esculpir el torso del canino.

### 5.7.3.2. *Validación del subsistema*

En este nivel, por medio de una impresora 3D se pudo llevar a cabo la técnica de la impresión 3D de las piezas modeladas anteriormente. Luego de ello, con la ayuda del sistema de amortiguación, tubo y ajustes de tornillos, se pudo llevar a cabo el ensamblaje de las piezas. Asimismo, el diseño del chaleco de sujeción se realizó con diversos materiales, siendo estos foamy y fibra de vidrio, para brindarle una mejor comodidad y ergonomía al canino.

#### 5.7.4. NIVEL DE COMPONENTES

##### 5.7.4.1. *Definición de componentes*

Mediante una completa investigación se eligió el material de filamento PLA para ser utilizado en la técnica de la impresión 3D y los materiales enlistados necesarios para la construcción completa del prototipo de prótesis.

##### 5.7.4.2. *Validación de componentes*

Luego, se comprobó que el material cuente con las propiedades necesarias que validaron la resistencia del material y de igual manera, se corroboró que sea óptimo para cada pieza utilizada. Asimismo, se diseñó un sistema de amortiguamiento para evitar un impacto negativo en la salud del canino.

#### 5.7.5. FABRICACIÓN DE PRÓTESIS CANINA DE EXTREMIDAD DELANTERA

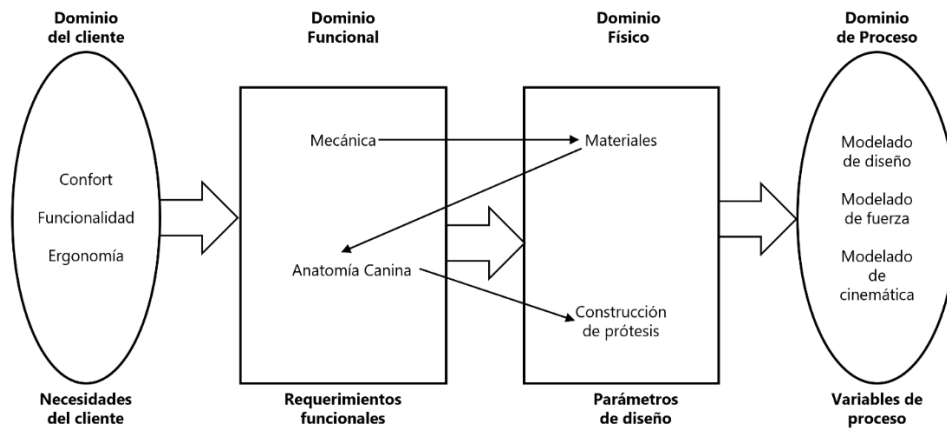
En este último nivel, luego de haber ensamblado las partes, se encajó el sistema completo de la prótesis con la chaqueta del canino, que actuó como soporte para el prototipo como para el canino, siendo el paso que completa la fabricación de la prótesis canina de extremidad delantera.

Para el diseño de los dominios, se utilizó la metodología de diseño axiomático aplicado al prototipo de prótesis de canino (Ilustración 20), el cual consta de cuatro dominios: cliente, funcional, físico y proceso (Hehenberger et al., 2010):

- En el dominio del cliente se indican las necesidades del cliente, siendo el canino el cliente en este caso. Las necesidades que fueron propuestas son: funcionalidad, ergonomía y comodidad. Siendo la funcionalidad que soporte el peso del canino, la comodidad que se establezca entre los rangos de suavidad de uso y en la ergonomía que el sistema de amortiguamiento sea el adecuado para evitar un impacto que afecte la salud del canino.
- En el dominio funcional se expresa las funciones deseadas del objeto de diseño. Se estableció los requerimientos funcionales, los cuales fueron mecánica y anatomía canina.
- En el dominio físico representa las propiedades físicas del objeto de diseño. Se especificaron los parámetros de diseño, siendo estos materiales y construcción de la prótesis.

- En el dominio de proceso se ilustra cómo lograr o producir el objeto de diseño. Siendo las variables de proceso el modelado del diseño, modelado de fuerza y modelado de cinemática.

La clasificación de estos permitió establecer las variables necesarias para elaborar un modelo jerárquico del producto de la investigación y la integración e interacción del sistema.



**Ilustración 20. Diagrama de diseño de dominios.**

Fuente: (Elaboración propia)

El sistema seleccionado para la investigación es el biomecánico. En el sistema biomecánico fue necesario tomar en cuenta la anatomía canina, debido a la variedad de razas que existen y la extremidad a analizar, siendo en este caso, la anterior o delantera. De igual manera, el diseño de ensamblaje tenía que cumplir con la función de facilitar al canino movilizarse y redistribuir su peso a todos los miembros para evitar lesiones. Se trabajó con el software de SolidWorks para el diseño de las partes que conformaron la prótesis canina de extremidad delantera, tomando en cuenta las mediciones de zoometría del canino. Asimismo, se debió tomar en consideración el material seleccionado para esta investigación, ya que fue necesario para que el diseño sea funcional y resistente.

Para los subsistemas se dividen en cuatro específicos, siendo estos materiales, mecánica, anatomía canina y construcción de la prótesis.

- **Materiales.** En este subsistema, se debieron escoger los materiales necesarios que cumplan con los requisitos del prototipo. Este debió ser resistente, liviano y biocompatible para que soporte el peso del canino sin tener algún tipo de

deformación.

- Mecánica. Se debió tomar en consideración la marcha del canino y que cumplió con la funcionalidad del reemplazo de una extremidad delantera para que el canino pueda recuperar sus habilidades y soporte del peso.
- Anatomía canina. Debido a que existen diversas razas de caninos, en las cuales varían el peso, tamaño y estructura, fue necesario tomar en cuenta estas variables para el diseño de la prótesis, ya sea de la extremidad anterior o posterior, siendo el caso de esta investigación, la primera.
- Construcción de la prótesis. Para el prototipo final de la prótesis, fue necesario realizar un diseño en el software de SolidWorks para luego realizar la impresión con la técnica de 3D y el ensamblaje de este con todas las piezas. Asimismo, se realizaron simulaciones de software para el análisis de elementos finitos en SolidWorks (pruebas de tensión, deformación, factor de seguridad) y análisis de la marcha canina en Kinovea de la locomoción normal.

**Tabla 6. Metodología de la Investigación.**

<b>Enfoque</b>	Cuantitativo			
<b>Alcance</b>	Exploratorio			
<b>Tipo de estudio</b>	Transversal			
<b>Tipo de diseño</b>	Cuasiexperimental			
<b>Tipo de muestra</b>	No probabilístico			
<b>Técnicas e instrumentos</b>	Impresión 3D	Medidas morfométricas	Kinovea	Análisis de elementos finitos (SolidWorks)

Fuente: (Elaboración propia)

## 5.7. METODOLOGÍA DE VALIDACIÓN

La metodología de validación que se utilizará para cumplir con los requisitos esenciales para mostrar la validez de la investigación es por medio de la validación mediante simulaciones computacionales. En este caso se utilizará el software de SolidWorks.

- Análisis de elementos finitos. Este análisis viene a ser una técnica numérica la cual está destinada a resolver problemas de campo descrito por un conjunto de ecuaciones diferenciales parciales. En la mecánica es utilizado este análisis para la solución estructural, vibración y problemas térmicos. El mallado o mejor conocido como el proceso de

discretización divide la geometría en entidades pequeñas y esas son llamados elementos finitos (González et al., 2020).

Por medio de las simulaciones del software de SolidWorks se puede realizar dicho análisis en las piezas diseñadas, en donde se elige el material para que luego se le apliquen las cargas que mostrarían resultados dependiendo de lo que sea buscado. Asimismo, se realiza un modelo jerárquico de los dominios establecidos en la metodología en V.

### 5.8. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

En esta sección, se detalla el cronograma de las actividades realizadas de la investigación en el tiempo determinado, siendo este de diez semanas aproximadamente (Ilustración 21).

Desarrollo de actividades del Proyecto de Investigación	SEMANA									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Reunión con el asesor metodológico	■									
Búsqueda del canino modelo		■								
Visita del canino modelo y toma de medidas		■								
Desarrollo del diseño de las piezas 3D			■							
Segunda visita del canino para la toma de fotos y videos				■						
Investigación y desarrollo del modelo matemático				■	■					
Realización de simulaciones de las piezas					■	■				
Impresión final de las piezas en CNC e impresión 3D						■	■			
Realización del ensamblaje del prototipo							■	■	■	
Tercera visita del canino para la prueba de prototipado									■	
Entrega del prototipo de prótesis final al canino.										■

**Ilustración 21. Cronograma de Actividades.**

Fuente: (Elaboración propia)



## 5.9. MATRIZ METODOLÓGICA

Tabla 7. Matriz metodológica.

Título	Problema de investigación	Preguntas de investigación	Objetivos	Variables	Metodología y herramientas
Diseño y Desarrollo de un Prototipo de Prótesis para Caninos Afectados por Amputación de Extremidad	Existen millones de animales a nivel mundial que son afectados por amputaciones de una extremidad, este procedimiento quirúrgico es bastante común. Consecuentemente, perder alguna de estas partes puede suponer un evento traumático para algunos animales, por lo que, es necesario buscar una alternativa para ayudarlo. Una de las alternativas de abordaje para estos casos, es la utilización de prótesis.	General	General	Dependiente	SolidWorks
		¿Cómo desarrollar un prototipo de prótesis veterinaria para caninos afectados por amputación de la extremidad delantera?	Desarrollar un prototipo de prótesis veterinaria para caninos afectados por amputación de la extremidad delantera.	Diseño del prototipo de prótesis canina de extremidad delantera	
		<b>Específicas</b>	<b>Específicos</b>	<b>Independientes</b>	Impresión 3D
		¿Qué materiales podrían ser utilizados para realizar el prototipo de una prótesis canina?	Investigar cuáles son los materiales, software y técnicas más viables para el desarrollo de una prótesis canina afectados por amputación de extremidad. Seleccionar el diseño ideal para la prótesis de extremidad delantera derecha canina con materiales utilizados para la impresión 3D.	Material	
		¿Es posible realizar un diseño funcional de prótesis de extremidad delantera canina con materiales utilizados para la impresión 3D?	Realizar simulaciones de software y un modelo matemático para poder verificar que los rangos de valores establecidos sean cumplidos.	Anatomía canina	
¿Qué diseño de prótesis de extremidad delantera canina impreso 3D cumpliría con los rangos establecidos en las pruebas de simulaciones de software?		Biomecánica	Medidas morfométricas		
¿Se puede realizar un prototipo de prótesis canina que sea		Fabricar un prototipo de prótesis canina de extremidad delantera	Presupuesto		

accesible y económica a todo el público?      derecha con piezas impresas en 3D.

Fuente: (Elaboración propia)

## 5.10. OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES

**Tabla 8. Operacionalización de las variables.**

<b>Objetivos</b>	<b>Variables</b>	<b>Definición conceptual</b>	<b>Dimensiones</b>	<b>Indicadores</b>
General	Dependiente			
Estudiar los elementos para la fabricación de un prototipo de prótesis veterinaria para caninos afectados por amputación de la extremidad delantera.	Diseño del prototipo de prótesis canina de extremidad delantera	Etapas en el desarrollo de un prototipo de les permita a los caninos reemplazar su miembro amputado.	Impresión 3D Prototipo	Versión final del prototipo fabricado con la técnica de impresión 3D.
<b>Específicos</b>	<b>Independientes</b>	<b>Definición conceptual</b>	<b>Dimensiones</b>	<b>Indicadores</b>
Inquirir cuáles son los materiales, software y técnicas más viables para el desarrollo de una prótesis canina afectados por amputación de extremidad.	Material	Evaluación de los materiales, softwares y técnicas que sean la mejor opción para el desarrollo del prototipo de prótesis canina.	Propiedades físicas, costos.	Biocompatibilidad de los materiales, precios.
Seleccionar el diseño ideal para la prótesis de extremidad delantera derecha canina con materiales utilizados para la impresión 3D.	Anatomía canina	Escoger cuál de los diseños propuestos es la opción más cómoda y funcional para el canino.	Diseño, movimiento.	Cantidad de peso y tamaño para sostener al canino.
Realizar simulaciones de software y un modelo matemático para poder verificar que los rangos de valores establecidos sean cumplidos.	Biomecánica	Utilizar el software de SolidWorks para la realización del análisis y principios físicos y biomecánicos para el modelo matemático.	Pruebas de esfuerzo, SolidWorks.	Resultados del análisis de elementos finitos.

Fabricar un prototipo de prótesis canina de extremidad delantera derecha con piezas impresas en 3D.

Presupuesto

Fabricación de una prótesis canina de extremidad delantera para que el canino recupere la habilidad de moverse fácilmente.

Deformación, factor de seguridad.

Resultado y análisis del instrumento de recolección de datos

---

Fuente: (Elaboración propia)

## V. RESULTADOS

En este capítulo se abordan los resultados que han sido obtenidos del diseño y construcción del prototipo de prótesis canina de extremidad delantera y la integración de sus sistemas. El sistema mencionado es necesario para poder establecer las medidas necesarias y los parámetros de acuerdo con la anatomía del canino y la biomecánica del movimiento de los miembros delanteros.

### 5.1. VALIDACIÓN DE COMPONENTES: PROTOTIPADO

#### 5.1.1. TOMA DE MEDIDAS ZOMÉTRICAS DEL CANINO

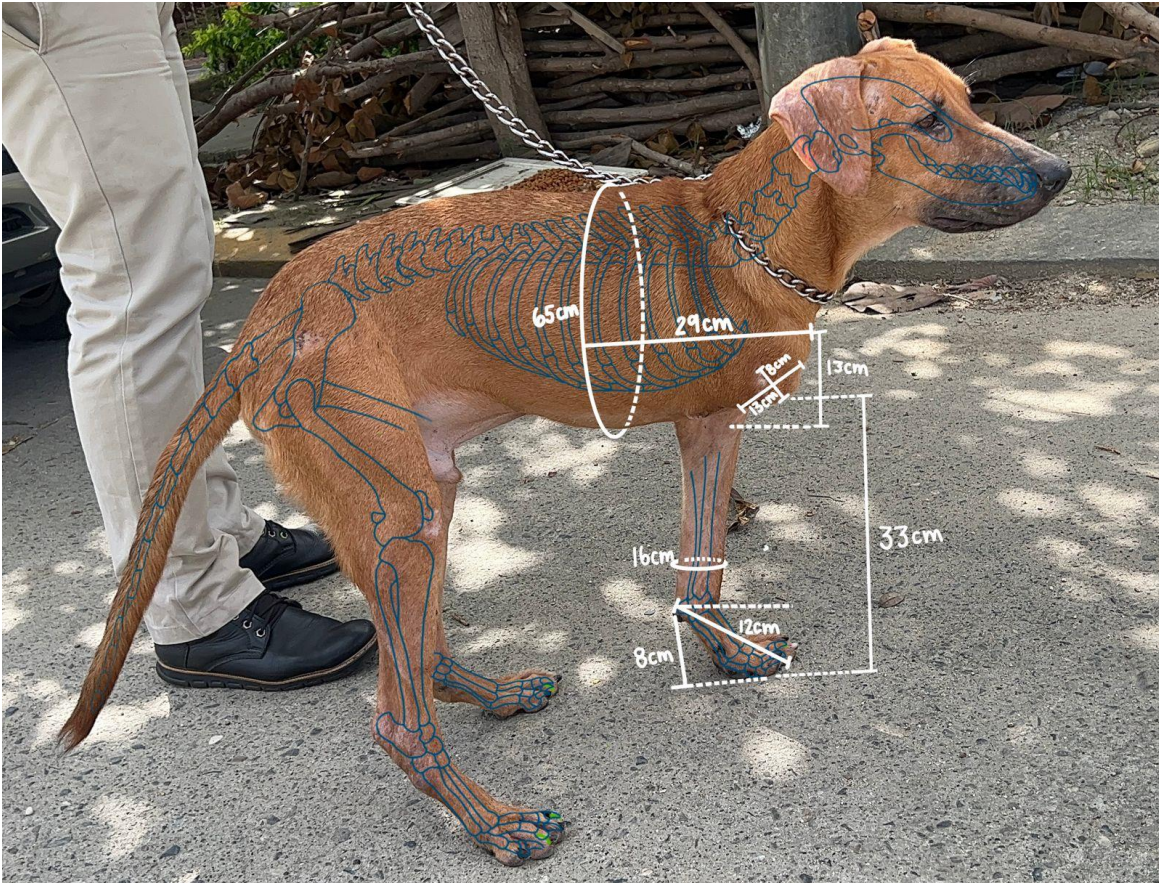
El prototipo de prótesis canina de extremidad delantera se desarrolló el diseño en el software de SolidWorks. Asimismo, se tomó en consideración la resistencia del material y que logré soportar el peso del canino sin presentar algún tipo de deformación. El canino macho de raza grande presenta una amputación de miembro torácico con desarticulación de la escápula derecha (Ilustración 22). Debido a esto, se tuvo que tomar en consideración las opciones para realizar un chaleco de sujeción.



**Ilustración 22. Canino de estudio.**

Fuente: (Elaboración propia)

Una vez elegido el canino de estudio, se procedió a tomar las medidas zoométricas de la extremidad delantera y del torso con la ayuda de un metro, las cuales son necesarias para la realización de la prótesis, así como el peso del canino, siendo de aproximadamente 23 kg, el cual fue utilizado para realizar los cálculos en las simulaciones de software (Ilustración 23).



**Ilustración 23. Medidas zoométricas de extremidad delantera y torso del canino.**

Fuente: (Elaboración propia)

Las piezas de la prótesis fueron diseñadas y adaptadas según las mediciones zoométricas del canino de estudio con el objetivo de que sea similar a la extremidad delantera (Tabla 10).

**Tabla 9. Mediciones zoométricas del canino.**

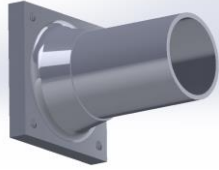

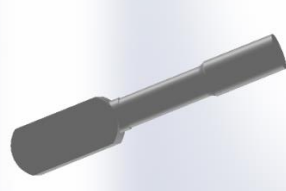

Región	Longitud (cm)	Diámetro (cm)
Torso	29	65
Extremidad delantera	33	16
Muñón	8	-----
Caña anterior	12	3

Fuente: (Elaboración propia)

### 5.1.2. DISEÑO DE PIEZAS

El diseño de las partes del prototipo fue personalizado, ya que se tomó en cuenta las medidas específicas para el canino de la fundación "Refugio Amor y Abrigo". El objetivo de la investigación es de ser un apoyo para devolver las habilidades de locomoción y una mejor calidad de vida al canino. Se diseñaron cuatro piezas individuales (Tabla 11), el acople, base y sistema de amortiguamiento fueron realizadas en SolidWorks, mientras que el chaleco de sujeción fue diseñado utilizando vendas de yeso y fibra de vidrio. El sistema de amortiguamiento fue diseñado para proteger de impactos y golpes al canino, tomando en cuenta las medidas de longitud del muñón al suelo.

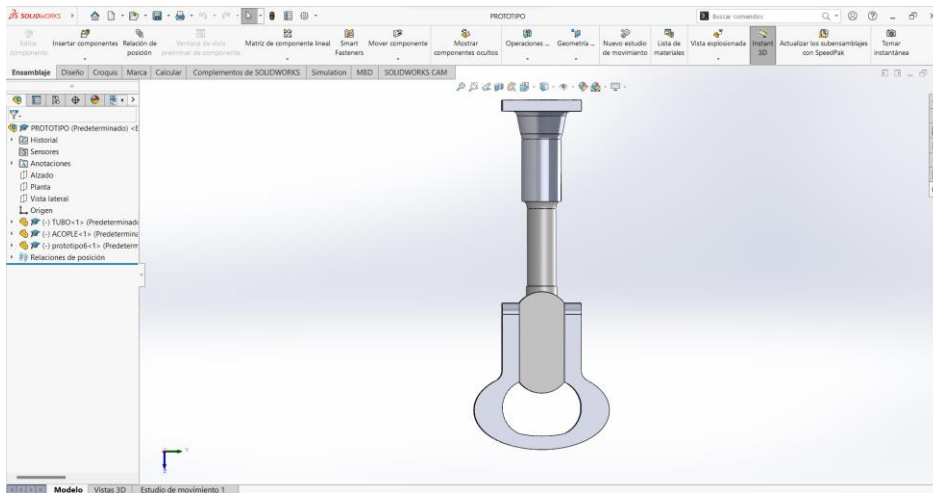
**Tabla 10. Representación de las partes del diseño.**

Pieza diseñada	Representación
Acople	
Base	
Tubo de polietileno	
Chaleco de sujeción	

Fuente: (Elaboración propia)

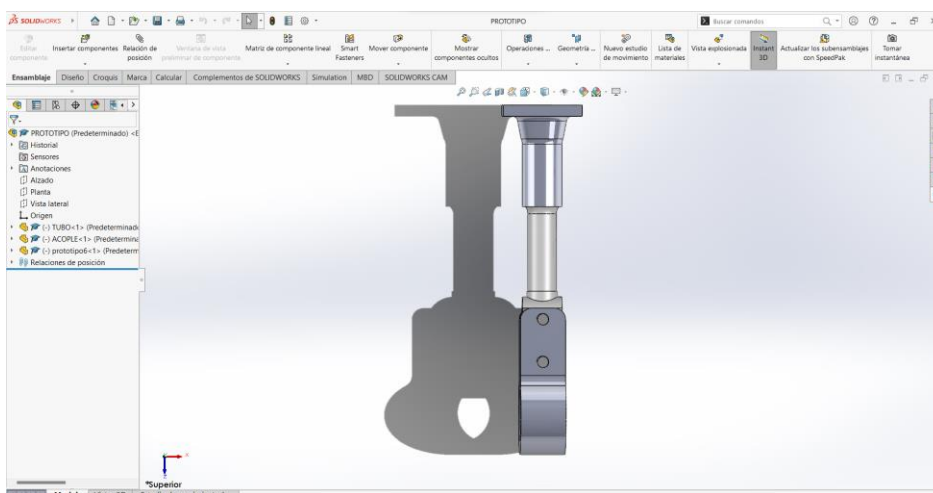
Es por eso, que cada una de las partes del prototipo fueron diseñadas según las medidas zoométricas de la extremidad delantera del canino, siendo adaptadas para los fines del prototipo. Las dos piezas se conectan por medio de un tubo de aluminio con un sistema de amortiguación, las cuales, en conjunto con el chaleco de sujeción, conforman la prótesis de canino.

Una vez que fueron diseñadas todas las piezas en SolidWorks, se realizó el ensamblaje de estas para poder visualizar de una manera mejor la integración para la construcción del prototipo, permitiendo ser observado en un plano 3D, con diferentes puntos de vista, tanto del frontal (Ilustración 24), como del lateral (Ilustración 25).



**Ilustración 24. Vista frontal de ensamblaje del prototipo.**

Fuente: (Elaboración propia)



**Ilustración 25. Vista lateral de ensamblaje del prototipo.**

Fuente: (Elaboración propia)

Durante la primera etapa del diseño se tuvieron problemas con respecto al diseño de la base de la prótesis del canino, debido a que es necesario tomar en consideración la forma de la extremidad delantera. De igual manera, la técnica y material a utilizar en el chaleco de sujeción. Esto con el objetivo de que el canino se sienta cómodo al momento de utilizar la prótesis, por ello fue necesario realizar diversos diseños para encontrar el más apto para el canino de estudio.

Cabe resaltar que, para el diseño del acople y la base, las medidas fueron adaptadas para que el canino tuviera una mayor facilidad al momento de moverse (Tabla 12).

**Tabla 11. Medidas para la realización de las piezas.**

Pieza diseñada	Ancho (cm)	Alto (cm)	Profundidad (cm)	Peso (g)
Acople	7	9	7	208.7
Base	12	13	4	86
Tubo de polietileno	2.54 - 4	23	4	310
Chaleco de sujeción	25	15	20	1070

Fuente: (Elaboración propia)

## 5.2. VALIDACIÓN DE SUBSISTEMAS: ELABORACIÓN DE PIEZAS

El acople fue realizado con el objetivo de ser capaz de soportar el peso del canino y la fuerza que ejerce al momento de hacer impacto la prótesis con el suelo. El diseño fue realizado en SolidWorks y fabricado con una CNC. Cuenta con unos huecos para el paso de los tornillos y permitir la sujeción de este con el chaleco y el tubo de aluminio de aproximadamente 3.81 cm de diámetro y 23 cm de largo (Ilustración 26), así como el sistema de amortiguamiento. El material seleccionado para esta pieza fue de dura aluminio, ya que es liviano y posee buena resistencia.



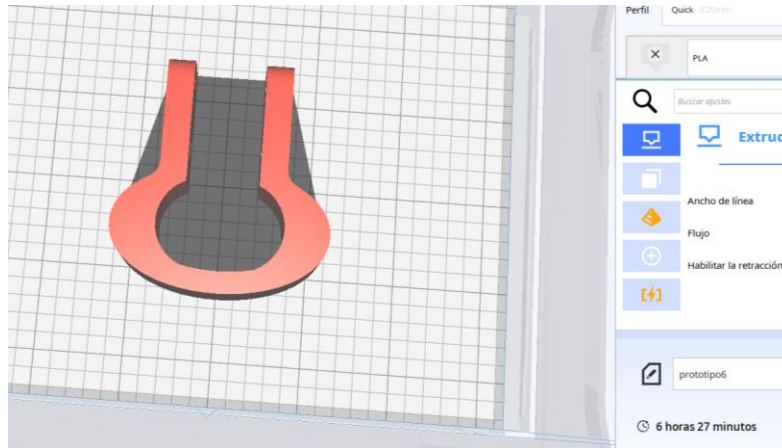
**Ilustración 26. Acople para prótesis.**

Fuente: (Elaboración propia)



La base se diseñó tomando en cuenta y adaptando la forma de la mano del canino. Este cuenta con cuatro huecos con forma de rosca interna, dos en cada lado de la parte superior de la base, los cuales fueron utilizados para colocar tornillos en su interior con el objetivo de integrar el tubo con el sistema de amortiguamiento y quedará fijo en la base.

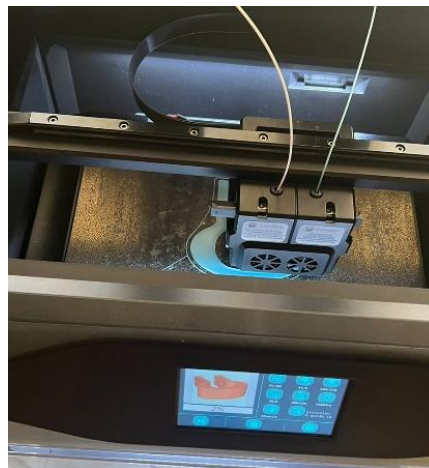
Después de realizar la pieza en 3D, el diseño se guardó como un archivo STL para enviarlo a imprimir en la impresora 3D. Este tardó aproximadamente 6 horas y 27 minutos (Ilustración 27).



**Ilustración 27. Proceso de elaboración de la base.**

Fuente: (Elaboración propia)

El material utilizado para la impresión 3D fue filamento PLA de 1.75 mm con temperatura de impresión a 210°C, con velocidad de impresión de 60 mm/s y velocidad de desplazamiento de 100 mm/s (Ilustración 28).



**Ilustración 28. Proceso de impresión de la base.**

Fuente: (Elaboración propia)

Una vez finalizada la pieza, se esperó a que enfriará la mesa de trabajo para evitar alguna deformación y se retiró (Ilustración 29). Luego, se limpió el área para imprimir la pieza restante.



**Ilustración 29. Impresión completa de la base.**

Fuente: (Elaboración propia)

Asimismo, el tubo fue realizado de material polietileno (Ilustración 30). La pieza fue realizada para que la longitud sea regulable, es decir, se colocaron unos huecos distribuidos verticalmente para poder ajustarlo a la altura adecuada, siendo de 31 a 33 cm.



**Ilustración 30. Tubo de polietileno.**

Fuente: (Elaboración propia)

De igual manera, el sistema de amortiguamiento de impacto fue realizado con pedazos circulares de etilvinilacetato, o mejor conocido como foamy, el cual es bastante flexible por su textura espumosa y fácil de manipular, y un tornillo en la parte superior (Ilustración 31). Este permitió alrededor de 1.5 cm de amortiguamiento. En caso de que fuera necesario tener más amortiguamiento, se podían colocar más círculos de este material.



**Ilustración 31. Círculos de foamy para el sistema de amortiguamiento de impacto.**

Fuente: (Elaboración propia)

Para el chaleco de sujeción se realizó un molde del torso del canino utilizando vendas de yeso (Ilustración 32). Esto con el propósito de que se pudiera realizar el chaleco por medio de fibra de vidrio.



**Ilustración 32. Proceso de molde para chaleco de sujeción.**

Fuente: (Elaboración propia)

Asimismo, para la elaboración del diseño del chaleco se optó por utilizar materiales que fueran resistentes y cómodos para el canino, ya que este abarca gran parte del torso. De igual manera, se utilizaron correas de agarre a los extremos del chaleco para poder ajustarlo adecuadamente al torso del canino, ni muy apretado ni muy suelto.

Se utilizó como chaleco un arnés para canino. El material que fue seleccionado para el chaleco está compuesto de una tela de forro malla, el cual es bastante flexible y liviano y tela sintética para brindarle comodidad al canino. De igual manera, cuenta con fibra de vidrio que contiene la forma del muñón y adaptada para que se pudiera acoplar las demás piezas que conforman la prótesis.

Para la fabricación del chaleco de sujeción, se tuvo que realizar un proceso con desmoldante para poder colocar la fibra de vidrio (Ilustración 33). Una vez colocado, se procedió a verter la fibra de vidrio en el molde y se esperó a que se seque alrededor de 4 a 5 horas.



**Ilustración 33. Proceso de desmoldante de yeso.**

Fuente: (Elaboración propia)

Una vez finalizado el secado de la pieza, se procedió a colocar un pedazo de madera en la parte del muñón para estabilizar la prótesis. Asimismo, se redondearon las esquinas para evitar que el canino se lastimará. Luego para suavizar la parte interna del chaleco se colocó foamy delgado y tela de algodón (Ilustración 34).



**Ilustración 34 - Chaleco de sujeción.**

Fuente: (Elaboración propia)

### 5.1.3. ENSAMBLAJE DE PROTOTIPO FINAL

Finalizado el diseño de todas las partes de la prótesis, se procedió a realizar el ensamblaje del prototipo. Para el montaje, primero se colocaron los círculos de foamy dentro del acople de dura aluminio y a lado de este se colocó un tornillo. Luego, la parte superior del tubo de polietileno se colocó dentro del acople y en la parte inferior la base de la prótesis fue colocada con pines de 1 cm para que se sujetará. Para la unión de la base con el tubo de polietileno se utilizó tornillería M8, la cual permitió sujetarlo debidamente. En el caso del acople con el tubo de amortiguamiento se utilizó tornillería M, siendo una tornillería delgada para el sistema utilizado.



**Ilustración 35. Ensamblaje del acople, amortiguador y base.**

Fuente: (Elaboración propia)

Una vez ensambladas estas piezas, se procedió a atornillar el acople con el chaleco de sujeción. En esta fue utilizada tornillería torx de cabeza plana, que fuera larga para que sujetara la prótesis con el chaleco. Luego de integrar todas las piezas de la prótesis de canino para extremidad delantera, se procedió a colocar el prototipo en el canino para verificar que el tamaño es el adecuado y se encuentre cómodo con ella.



**Ilustración 36. Prototipo final del canino.**

Fuente: (Elaboración propia)

### 5.3. VALIDACIÓN DE SISTEMAS

#### 5.3.1. SIMULACIONES POR SOFTWARE

Las pruebas de software de simulaciones fueron elaboradas en SolidWorks, estableciendo el material para las piezas de base como PLA, el acople como aluminio y el tubo como polietileno. El material de PLA no se encuentra en el software, por lo que fue necesario agregarlo con las propiedades de este filamento (Tabla 13).

**Tabla 12. Propiedades del PLA.**

Propiedad	Valor	Unidad
Módulos Elásticos	3500	N/mm <sup>2</sup>
Coefficiente de POISSON	0.38	N/A
Módulo de corte	2400	N/mm <sup>2</sup>
Densidad de masa	1300	kg/m <sup>3</sup>
Resistencia a la tracción	50	N/mm <sup>2</sup>
Fuerza Compresiva	17.92	N/mm <sup>2</sup>
Limite elástico	26.082	N/mm <sup>2</sup>
Coefficiente de Conductividad Térmica	68	/K
Conductividad Térmica	0.2256	W/(m*K)
Calor específico	1386	J/(kg*K)
Relación amortiguamiento del material	2.2	N/A

Fuente: (Farah et al., 2016)

Posteriormente, las pruebas que fueron realizadas para las piezas individuales y el ensamblaje de la prótesis fueron de tensión, deformación y factor de seguridad. La prueba de tensión consiste en la aplicación del criterio de Von Mises en cada punto de la pieza y compararla con el límite elástico que tiene el material de la pieza o ensamblaje (Ecuación 1).

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_1\sigma_3 + \sigma_2\sigma_3}$$

**Ecuación 1. Criterio de Von mises.**

Fuente: (Montoya-Zapata et al., 2020)

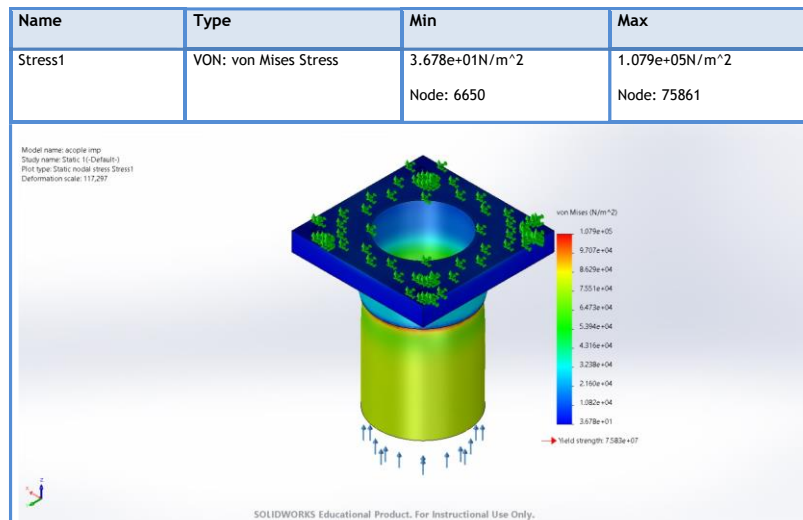
En cuanto a la prueba de deformación, es una prueba que mide mediante el desplazamiento resultante (URES) si se extiende una región de la pieza hacia otro punto representándolo con su tonalidad de colores. Asimismo, para la prueba de factor de seguridad viene a ser el valor cálculo de la capacidad máxima de un sistema y el valor de lo que requirió cumplir de igual manera se representó con sus tonalidades de colores.

El objetivo de realizar estas pruebas es para confirmar que las piezas diseñadas cumplieron con los requerimientos básicos de aguantar el peso y fuerza del canino. Estas iniciaron aplicando lugares fijos en la pieza para luego realizar una fuerza o lo que se midió, con un mallado detallado para obtener resultados de toda la pieza si es posible.

## 5.2.1. ACOPLÉ

### 5.2.1.1. Prueba de tensión

La prueba de tensión en la pieza de acople mostro resultados acerca la fuerza elástica que se encuentra en  $7.583e+07\text{N/m}^2$  con un mínimo de  $3.678e+01\text{N/m}^2$  y con un máximo de  $1.079e+05\text{N/m}^2$ . De igual manera se pudo observar la escala establecida indica que en las orillas del acople hubo mayor tensión a la fuerza aplicada e igualmente que se encontró fuera del límite elástico, pero se asemeja a lo necesitado (Ilustración 37).



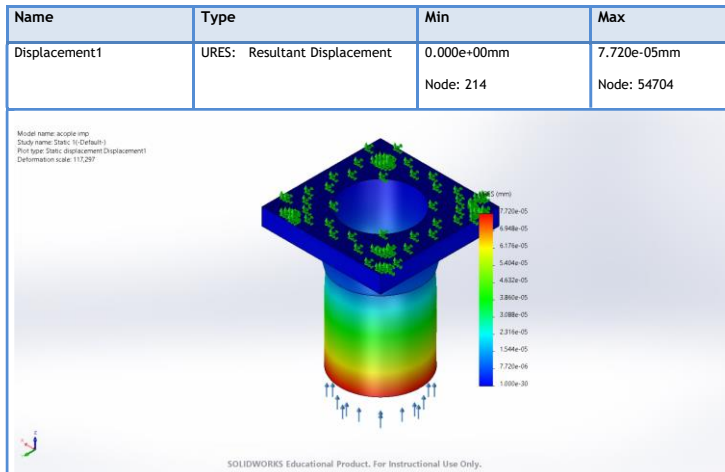
**Ilustración 37 - Prueba de tensión de la pieza de acople.**

Fuente: (Elaboración propia)

### 5.2.1.2. Prueba de deformación

Mediante la prueba de deformación se pudo observar que el mínimo es de  $0.000e+00\text{mm}$  y un máximo de  $7.720e-05\text{mm}$ .

Al momento de observar la escala de colores se pudo visualizar el área en la que se encuentra una pequeña deformación de la parte en contacto con el tubo. Aun con la pequeña deformación se determinó que el material puede resistir la fuerza requerida (Ilustración 38).

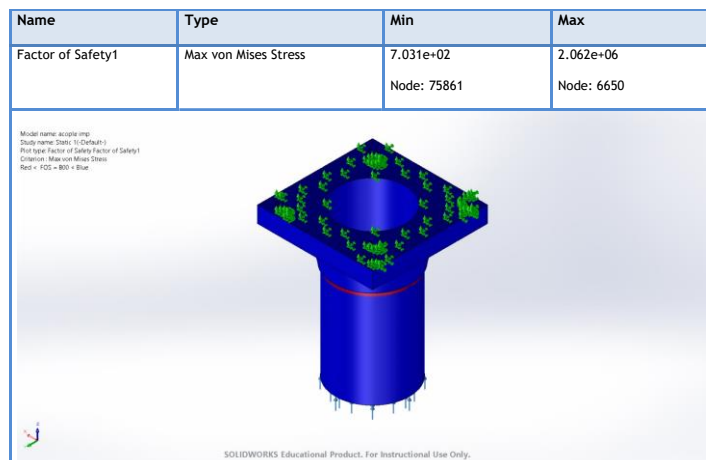


**Ilustración 38. Prueba de deformación de la pieza de acople.**

Fuente: (Elaboración propia)

### 5.2.1.3. Factor de seguridad

El factor de seguridad mostró las áreas en las cual la pieza tiene un riesgo, teniendo un valor mínimo de  $7.031e+02$  y máximo de  $2.062e+06$ . El área que sufrió daño se mostró en una tonalidad de color rojo, la cual sería el borde conector del acople (Ilustración 39).



**Ilustración 39. Factor de seguridad de la pieza de acople.**

Fuente: (Elaboración propia)

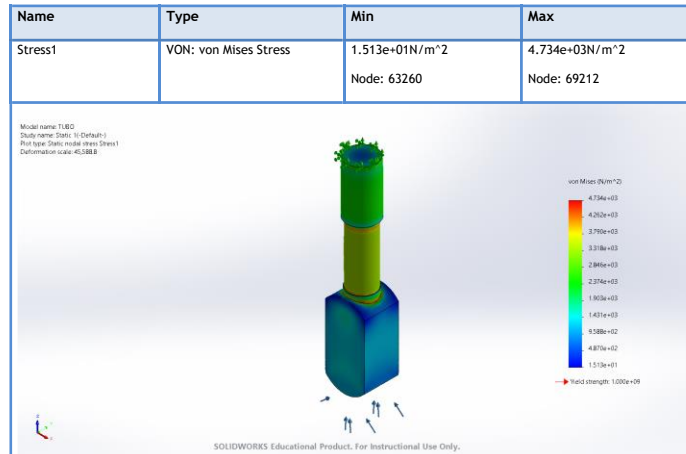
## 5.2.2. TUBO DE POLIETILENO

### 5.2.2.1. Prueba de tensión

La prueba de tensión realizada en el tubo indico como resultado una fuerza elástica de  $1.000e+09N/m^2$  con una mínima de  $1.513e+01N/m^2$  e igualmente un máximo de  $4.734$



e+03N/m<sup>2</sup> que mostró una tensión alta en la mayoría de las esquinas, pero en el rango que es controlable, por lo cual se indicó que la pieza es poco probable a sufrir daños por tensión, ya que se distribuye correctamente (Ilustración 40).

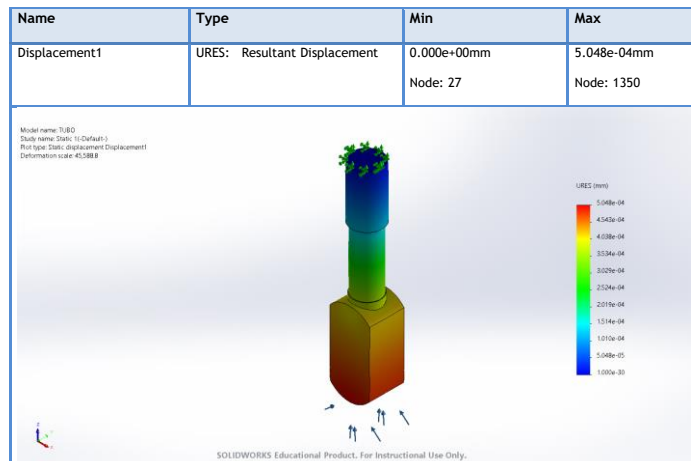


**Ilustración 40. Prueba de tensión en la pieza de tubo.**

Fuente: (Elaboración propia)

### 5.2.2.2. Prueba de deformación

Según los resultados de la prueba de deformación realizada en la pieza de tubo se pudo observar que tiene un mínimo de deformación de 0.000e+00mm y un máximo de 5.048e-04mm por lo cual podría haber una pequeña deformación de igual manera, aunque sigue en los parámetros para su correcto funcionamiento por lo cual no se encuentra un riesgo (Ilustración 41).

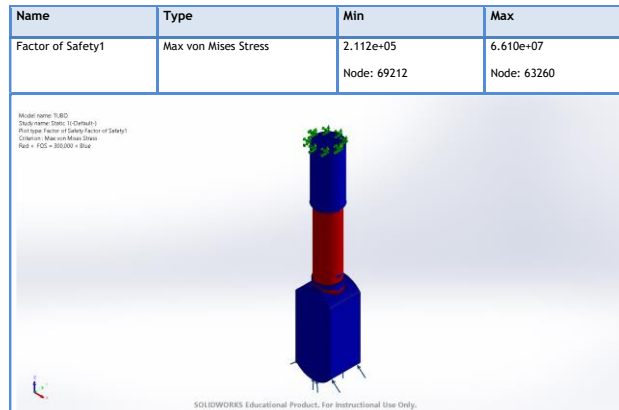


**Ilustración 41. Prueba de deformación en la pieza de tubo.**

Fuente: (Elaboración propia)

### 5.2.2.3. Factor de seguridad

En cuanto a los resultados entregados por la simulación se determinó que el factor de seguridad cumple con los parámetros teniendo un mínimo de  $2.112e+05$  y un máximo de  $6.610e+07$ . La pieza tiene unas pocas situaciones que sufrió deformaciones (Ilustración 42).



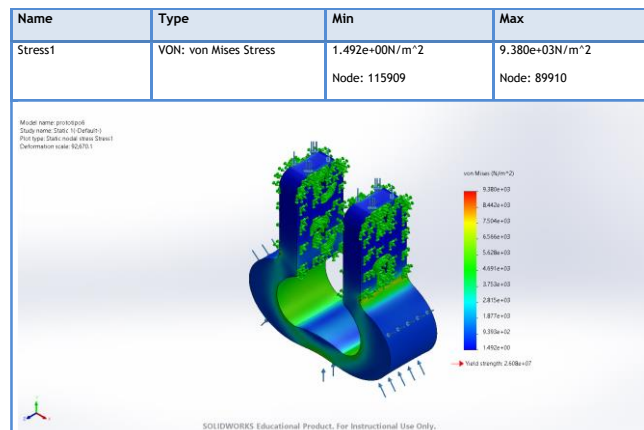
**Ilustración 42. Factor de seguridad en la pieza de tubo.**

Fuente: (Elaboración propia)

### 5.2.3. BASE

#### 5.2.3.1. Prueba de tensión

Mediante la prueba de tensión realizada a la pieza base se pudo observar los resultados tales como la fuerza elástica que se encuentra en  $2.608e+07$  con un mínimo de  $1.492e+00N/m^2$  y un máximo de  $9.380e+03N/m^2$ , ya que los valores se encuentran dentro de la escala establecida y se mantiene en los rangos seguros de la fuerza elástica (Ilustración 43).

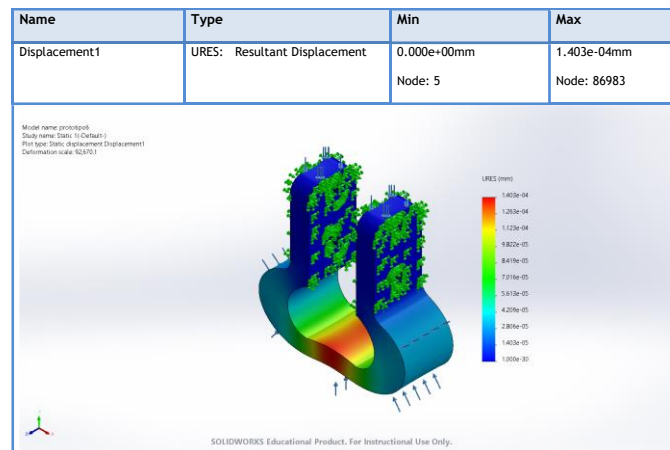


**Ilustración 43. Prueba de tensión de la pieza base.**

Fuente: (Elaboración propia)

### 5.2.3.2. Prueba de deformación

Al realizarse la prueba de deformación, los límites establecidos tuvieron un mínimo de 0.000e+00mm y un máximo de 1.403e-04mm. Mediante la observación de la escala de colores se pudo observar un área en la que se da una pequeña deformidad, aunque se puede determinar que cumplió su funcionalidad y la pieza pudo aguantar la fuerza expuesta (Ilustración 44).

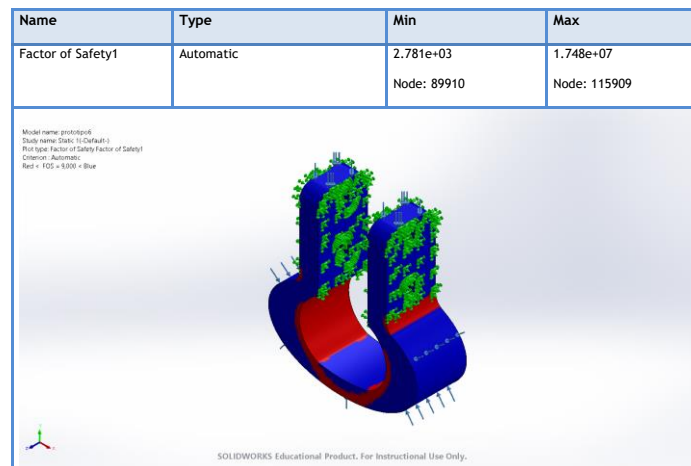


**Ilustración 44. Prueba de deformación de la pieza base.**

Fuente: (Elaboración propia)

### 5.2.3.3. Factor de seguridad

De igual manera, el factor de seguridad mostró unas secciones mediante la escala de colores en la cual algunas áreas fueron más propensas a sufrir daño que fueron los soportes de la pieza en sí (Ilustración 45).



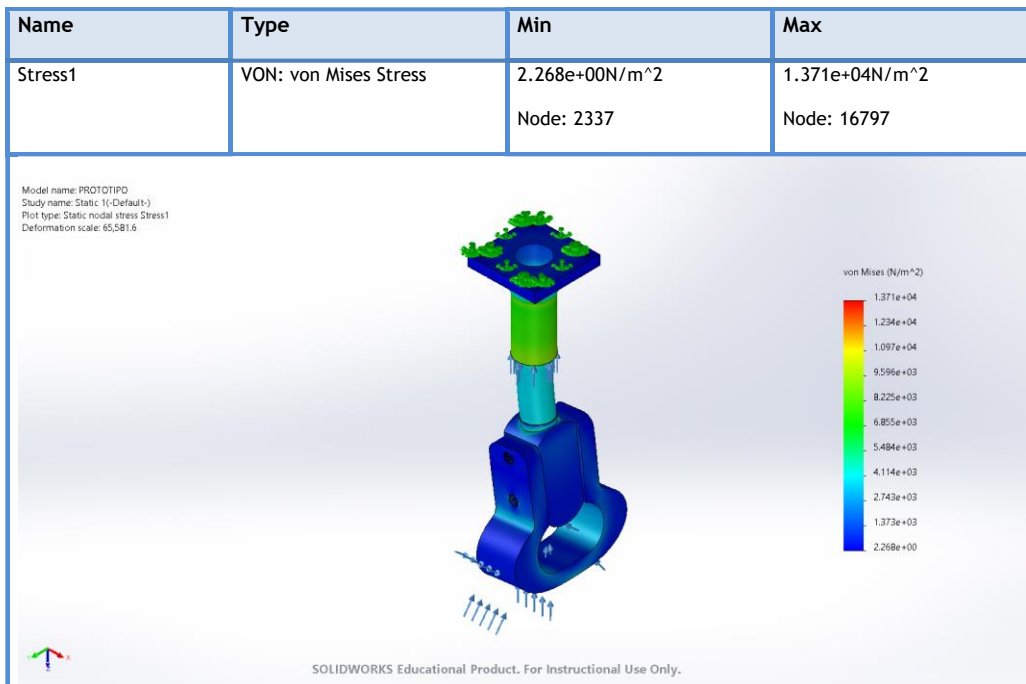
**Ilustración 45. Factor de seguridad de la pieza base.**

Fuente: (Elaboración propia)

## 5.2.4. PRÓTESIS

### 5.2.4.1. Prueba de tensión

La prueba de tensión de la prótesis mostró resultados acerca la fuerza con un mínimo de  $2.268e+00\text{N/m}^2$  y con un máximo de  $1.371e+04\text{N/m}^2$ . De igual manera, se pudo observar la escala establecida indica que en las bases de la pieza base se puede observar mayor tensión a la fuerza aplicada y de igual manera que se distribuyó de la manera requerida la tensión en toda la prótesis (Ilustración 46).

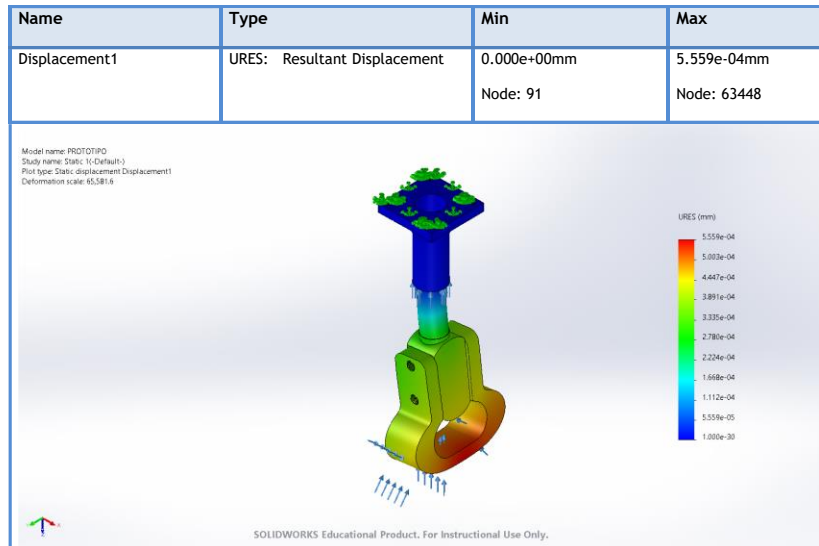


**Ilustración 46. Prueba de tensión de la prótesis.**

Fuente: (Elaboración propia)

### 5.2.4.2. Prueba de deformación

Al realizarse la prueba de deformación los límites establecidos tuvieron un mínimo de  $0.000e+00\text{mm}$  y un máximo de  $5.599e-04\text{mm}$ . Mediante la observación de la escala de colores se pudo observar un área en la que se da una pequeña deformidad en la pieza base, aunque se pudo determinar que cumplió su funcionalidad y la pieza pudo aguantar la fuerza expuesta, ya que fue controlada por las conexiones de las 3 piezas (Ilustración 47).

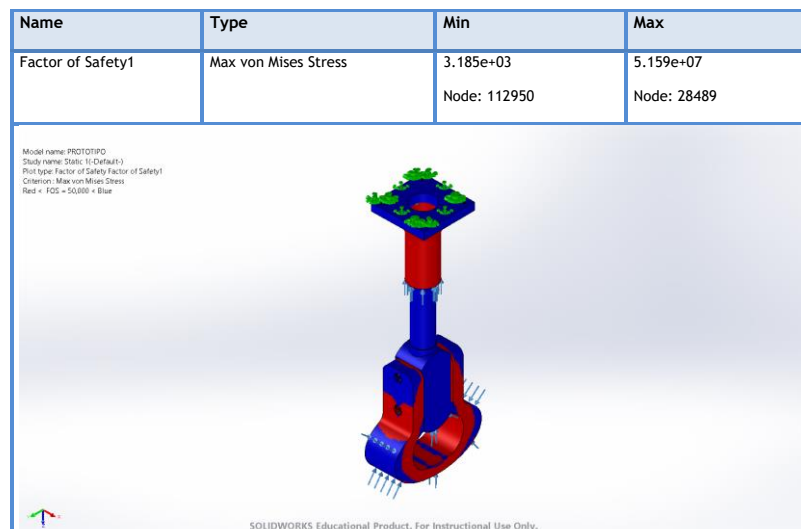


**Ilustración 47. Prueba de deformación de la prótesis.**

Fuente: (Elaboración propia)

### 5.2.4.3. Factor de seguridad

De igual manera el factor de seguridad mostró unas secciones mediante la escala de colores que se puede observar, en la cual algunas áreas son más propensas a sufrir daño que serían las conexiones de la pieza base con un factor de seguridad mínimo de  $3.185e+03$  y un máximo de  $5.159e+07$  (Ilustración 48).

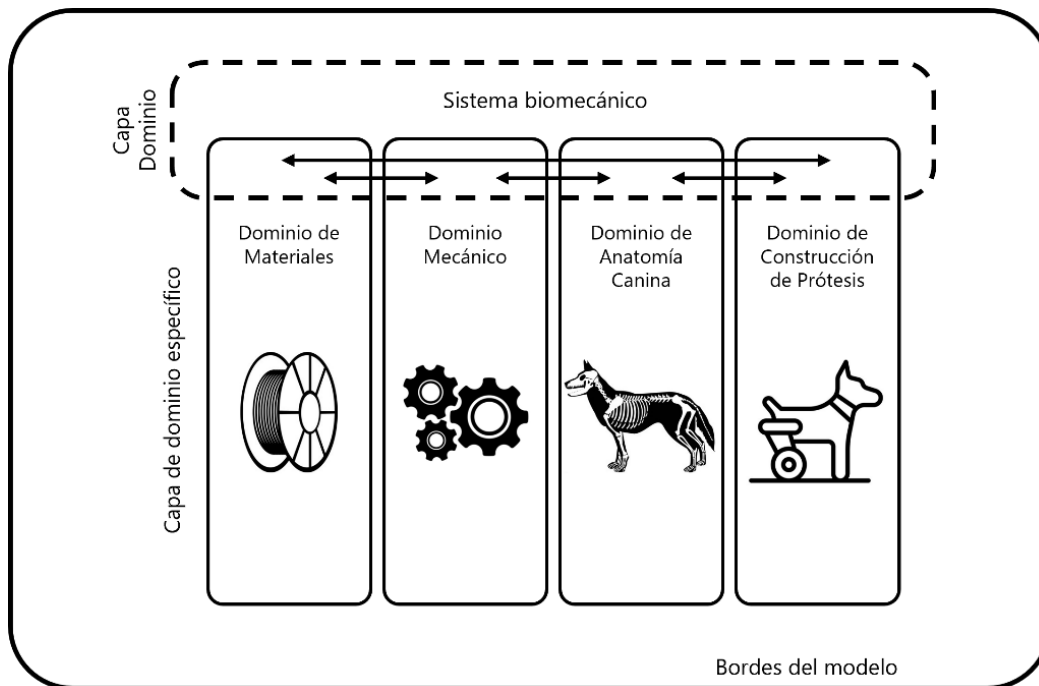


**Ilustración 48. Factor de seguridad de la prótesis.**

Fuente: (Elaboración propia)

### 5.3.2. MODELO JERÁRQUICO

Para el desarrollo del análisis matemático se hizo uso del modelo jerárquico propuesto por Hehenberger (2010). Para una adecuada implementación de esta metodología fue necesario definir los dominios y capas específicas de dominio del prototipo siendo desarrollado. Como resultado de ello, se estableció una capa de dominio. Siendo el dominio del «Sistema biomecánico». Este dominio incluyó a las capas específicas relativas al funcionamiento de los componentes asociados a los materiales utilizados para el diseño de la prótesis; la capa específica del dominio mecánico que está relacionado al empleo de un sistema de amortiguamiento que permita un movimiento más flexible; la capa específica del dominio de anatomía canina, debido a que existen diversas razas y tamaños que es necesario tomar en consideración y la capa específica de construcción de la prótesis que está asociada a la técnica e instrumentos utilizados para su diseño y fabricación (Ilustración 54).

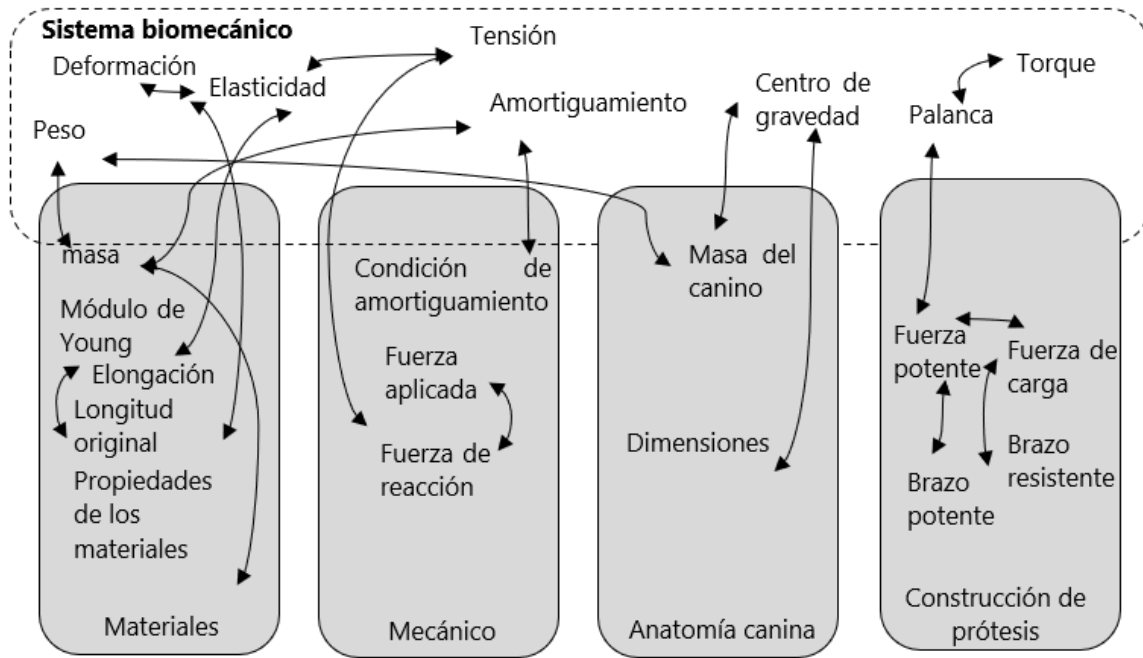


**Ilustración 49. Dominios del sistema.**

Fuente: (Elaboración propia)

Posterior a la definición de dominios, fue posible comenzar con la definición y proceso analítico relativo a la interrelación de variables por dominio y los parámetros externos e internos del prototipo. Lo anterior, consideró una segregación por componentes-dominios, diseñada para

validar los requerimientos con respecto a las necesidades del usuario y los medios técnicos que permitieron alcanzar una determinada función (Ilustración 55).



**Ilustración 50. Interrelación de variables por dominio de Sistema biomecánico.**

Fuente: (Elaboración propia)

Se logró identificar todas las variables que interactúan con los dominios del prototipo, consecuentemente, se consideró viable la construcción de un modelo analítico de los dominios que se han asociado con los parámetros externos e internos (Ilustración 56).

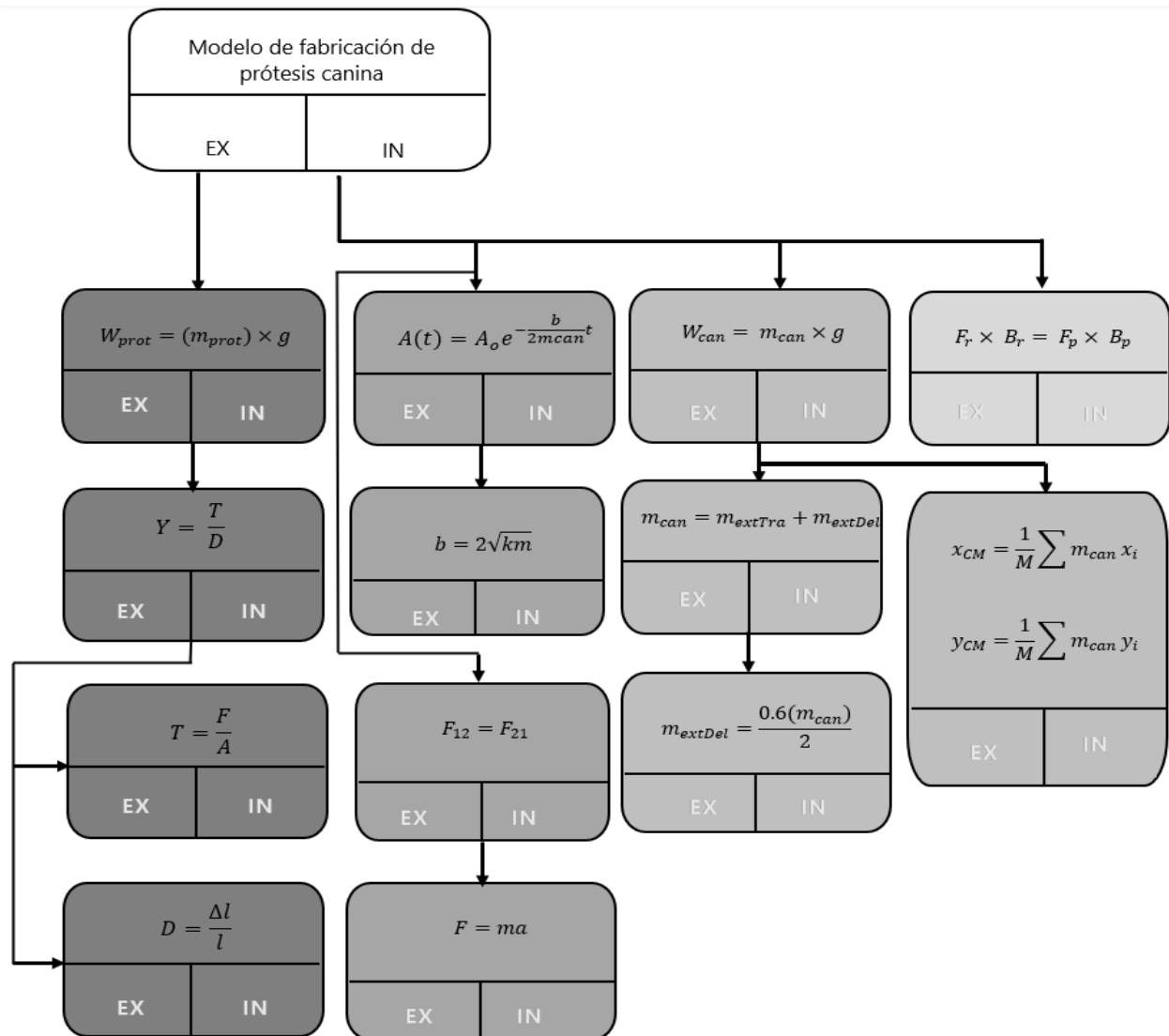
En la capa específica de materiales fue necesario tomar en cuenta cada uno de los materiales utilizados para la fabricación de la prótesis, por lo tanto, la masa del prototipo se vio afectada por la masa de cada una de las piezas utilizadas. En el caso de esta investigación, se utilizaron cinco materiales: PLA, dura aluminio, polietileno, fibra de vidrio y foamy.

Por lo tanto, para el cálculo de las propiedades de los materiales tuvo que ser independiente para cada uno de ellos, utilizando la fórmula de Módulo de Young (Ecuación 2).

$$Y = \frac{FL}{A \Delta L}$$

**Ecuación 2. Módulo de Young.**

Fuente: (Young, 2018)



**Ilustración 51. Modelo analítico de prototipo de prótesis de extremidad delantera para canino en metodología jerárquica propuesta por Hehenberger (2010).**

Fuente: (Elaboración propia)

Los valores utilizados para resolver la ecuación del módulo de Young para cada uno de los materiales utilizados en el prototipo fueron estimados. Se tomó en cuenta la fuerza del canino, siendo igual a 58.89 N. Asimismo, el área de cada una de las piezas fue calculado mediante el software de SolidWorks.

En el caso del material PLA, el cual contiene un rango de límite elástico de 55-72 MPa. Que de igual manera tiene un rango de dicho módulo de Young de 3.3-3.6 GPa, por lo cual los resultados deben de ser asemejados a dicho rango.



$$Y = \frac{196N(0.13m)}{(0.00533m^2)(1.29 \times 10^{-6} m)}$$

$$Y = 3.70GPa$$

Con el cálculo realizado, se obtuvo que el módulo de Young del PLA es igual a 3.70 GPa, lo cual entra en el rango establecido.

En el caso del material de dura aluminio, dicho material tiene un módulo elástico de 96 MPa lo cual indica la gran diferencia con los otros materiales por su poca elasticidad sino su dureza. El rango normal del módulo de Young es de hasta 73.1 GPa, utilizando estos valores fue como se calculó el módulo de Young.

$$Y = \frac{196N(0.09m)}{(0.012995m^2)(1.85 \times 10^{-7} m)}$$

$$Y = 73.3GPa$$

Para el material de dura aluminio, el módulo de Young que se obtuvo de la pieza fue de 73.3GPa, por lo tanto, el resultado entra en los valores establecidos de este.

En el caso del material de polietileno, dicho material contiene un módulo de elasticidad de hasta 20 MPa y el rango de dicho material para el módulo de Young debe de ser de 1.08 GPa el cual viene a ser un poco menor a los demás por lo cual fue reforzado con una capa de fibra de vidrio, la cual le ayuda a quitar una parte de ese esfuerzo.

$$Y = \frac{196N(0.31m)}{(0.018114m^2)(3.0 \times 10^{-6} m)}$$

$$Y = 1.11GPa$$

Para el material de polietileno, el módulo de Young que se obtuvo de la pieza fue de 1.11 GPa, por lo tanto, el resultado entra en los valores establecidos de este.

En la capa específica mecánica se calculó la constante de amortiguamiento de acuerdo con la viscosidad (Ecuación 3) y la constante de elasticidad del material con la condición de amortiguamiento crítico (Ecuación 4).

El amortiguamiento utilizado fue con condición de amortiguamiento crítico, debido a que se procuró ajustarse a este valor para disminuir la cantidad de vibraciones en el menor tiempo posible. Los valores utilizados fueron aproximados.

$$A(t) = A_0 e^{-\frac{b}{2m\zeta\omega_n} t}$$

### **Ecuación 3. Oscilaciones amortiguadas.**

Fuente: (Young, 2018)

$$b = \frac{-\ln(0.6) * 2 * 0.015kg}{0.5s}$$

$$b = 0.031 \frac{kg}{s}$$

Como resultado la viscosidad del foamy dio un total de 0.031kg/s el cual ayudo en el proceso de resolver la siguiente ecuación para obtener el resultado de la constante de elasticidad la cual dio un resultado de 0.16 N/m.

$$b = 2\sqrt{km}$$

#### **Ecuación 4. Condición de amortiguamiento crítico.**

Fuente: (Young, 2018)

$$k = \frac{b^2}{4m}$$

$$k = 0.16 \frac{N}{m}$$

El centro de gravedad y centro de masa, cuando estos se encuentran en el área de soporte, el canino se encuentra en equilibrio. Estos se encuentran en la misma posición debido a que se encuentran en un campo gravitacional uniforme. En el caso de los cuadrúpedos, como los caninos, tienen un área de apoyo grande delimitada por sus extremidades, por lo que son estables por naturaleza, y solo necesitan pies pequeños.

Se aproximó el cálculo del centro de masa, utilizando las fórmulas para el eje X (Ecuación 5) y para el eje Y (Ecuación 6), utilizando un diagrama de figuras para simular el cuerpo del canino con las medidas aproximadas (Ilustración 57).

$$x_{CM} = \frac{1}{M} \sum m_{can} x_i$$

#### **Ecuación 5. Centro de masa para eje X.**

Fuente: (Young, 2018)

$$y_{CM} = \frac{1}{M} \sum m_{can} y_i$$

#### **Ecuación 6. Centro de masa para eje Y.**

Fuente: (Young, 2018)

Se tomó que la distancia en el eje X es de 31 cm, y la longitud en el eje Y es de X cm. Asimismo, la masa que se considero fue del porcentaje de los miembros delanteros, que

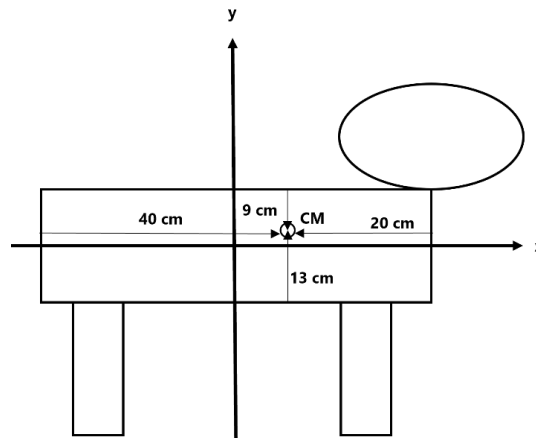
corresponden al 60% de la masa del canino, y de los miembros traseros, siendo el 40% restante de la masa.

En el caso de las extremidades delanteras fueron 12 kg, mientras que las traseras fueron 8 kg. Por lo tanto, al calcularlo con las fórmulas se obtuvieron los siguientes datos.

$$x_{CM} = \frac{1}{20 \text{ kg}} \sum (12 \text{ kg} \times 0.2 \text{ m}) + (8 \text{ kg} \times 0.4 \text{ m})$$

$$x_{CM} = 0.28 \text{ m}$$

Por lo tanto, el centro de masa en el eje X fue de 0.28 m, aproximadamente.



**Ilustración 52. Diagrama de centro de masa del canino.**

Fuente: (Elaboración propia)

$$y_{CM} = \frac{1}{20 \text{ kg}} \sum (12 \text{ kg} \times 0.09 \text{ m}) + (8 \text{ kg} \times 0.13 \text{ m})$$

$$y_{CM} = 0.106 \text{ m}$$

Asimismo, el centro de masa en el eje Y fue de 0.106m, aproximadamente.

En la capa específica de anatomía canina, se calculó el peso del canino y la masa de la extremidad delantera. Se tomó en consideración que la masa total del canino es de 20 kg. Y el porcentaje de los miembros anteriores es del 60% de la masa total del canino. Por lo tanto, en el cálculo del peso del canino se utilizó la fórmula de peso (Ecuación 7).

$$W_{can} = m_{can} \times g$$

**Ecuación 7. Fórmula de peso.**

Fuente: (Young, 2018)

$$W_{can} = 20 \text{ kg} \times 9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$W_{can} = 196 \text{ N}$$

Se realizaron los cálculos, obteniendo como resultado 196 N del peso total del canino. Asimismo, para el cálculo de la masa de las extremidades delanteras del canino se utilizó la mitad del porcentaje de los miembros anteriores, con el objetivo de encontrar la masa de una sola extremidad (Ecuación 8).

$$m_{extDel} = \frac{0.6 \times m_{can}}{2}$$

**Ecuación 8. Cálculo de miembro delantero canino.**

Fuente: (Millis et al., 2014).

$$m_{extDel} = \frac{0.6 \times 20 \text{ kg}}{2}$$

$$m_{extDel} = 6 \text{ kg}$$

Al realizar el cálculo, se obtuvo una masa de 6 kg. Por lo tanto, la masa de la prótesis no debe pasar de este resultado, ya que el canino podría caminar con dificultad. Asimismo, se calcularon las fuerzas de contacto de muñón-prótesis y prótesis-suelo. Se tomó en consideración la masa de la extremidad delantera del canino y la masa de la prótesis en conjunto con la extremidad delantera del canino cuando este se encuentra en reposo.

De igual manera, se realizó un diagrama de bloques con las fuerzas de acción y reacción (Ilustración 58), utilizando la segunda Ley de Newton (Ecuación 9) y tercera Ley de Newton (Ecuación 10).

$$F = ma$$

**Ecuación 9. Segunda Ley de Newton.**

Fuente: (Young, 2018)

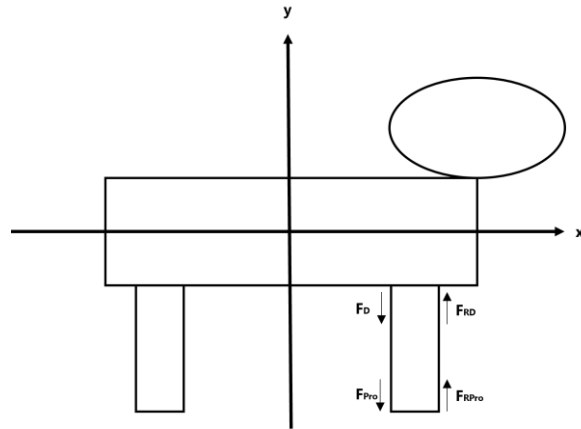
$$F_{12} = -F_{21}$$

**Ecuación 10. Tercera Ley de Newton.**

Fuente: (Young, 2018)

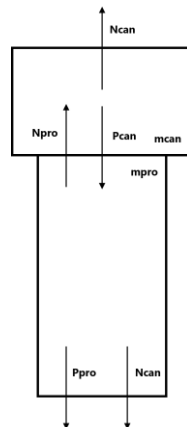
Donde, los datos son los siguientes, teniendo las variables  $m_{can}$ , siendo la masa del canino y  $m_{pro}$ , la masa del prototipo, en este caso se realizó cuando el canino se encuentra en reposo. Se diseñó un diagrama de cuerpo libre con las fuerzas a calcular (Ilustración 59).

Las variables para utilizar fueron las fuerzas normales del canino y de la prótesis ( $N_{can}$  y  $N_{pro}$ ) y el peso del canino y la prótesis ( $P_{can}$  y  $P_{pro}$ ). Posterior, se hizo uso de la segunda Ley de Newton, siendo esta igualada a cero, debido a que el canino se encuentra en reposo y tercera Ley de Newton para calcular las fuerzas normales del diagrama de cuerpo libre.



**Ilustración 53. Diagrama de bloques de fuerzas de contacto.**

Fuente: (Elaboración propia)



**Ilustración 54. Diagrama de cuerpo libre.**

Fuente: (Elaboración propia)

**$m_{can} = 12 \text{ kg}$  (se tomó en cuenta solo el porcentaje de extremidades delanteras)**

**$m_{pro} = 1.68 \text{ kg}$**

$$F = m \times a = 0$$

$$N_{can} - P_{can} = 0$$

$$N_{can} = P_{can} \rightarrow m_{can} \times g$$

$$N_{can} = P_{can} \rightarrow 12 \text{ kg} \times 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$N_{can} = P_{can} \rightarrow 117.72 \text{ N}$$

$$N_{pro} - P_{pro} - N_{can} = 0$$

$$N_{pro} = P_{pro} + N_{can}$$

$$N_{can} = (m_{pro} \times g) + (m_{can} \times g)$$

$$N_{can} = (m_{pro} + m_{can}) \times g$$

$$N_{pro} = (1.68 \text{ kg} + 12 \text{ kg}) \times 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$N_{pro} = 134.2 \text{ N}$$

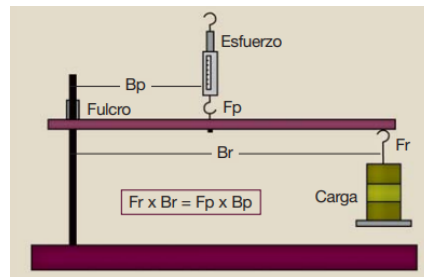
Se obtuvo como resultado que la fuerza que ejerce como reacción fue de 117.72 N para el canino y 134.2 N para la prótesis.

En la capa específica de construcción de prótesis, se calculó el esfuerzo ejercido por el animal, mediante el cálculo de palancas.

Se tomó en cuenta cinco elementos principales:  $F_p$ , siendo la fuerza potente;  $B_p$ , que es el brazo potente, que corresponde a los músculos extensores carporradial y digital común, el cual consiste en la distancia entre la potencia y el punto de apoyo;  $F_r$ , siendo la fuerza resistente (la prótesis propiamente dicha);  $B_r$ , que es el brazo resistente, correspondiente a los músculos flexores cubital del carpo y cubital lateral, el cual consiste en la distancia entre el apoyo y la resistencia; y finalmente  $F$ , siendo el fulcro, apoyo o eje.

La articulación de interés fue la escapulohumeral, por lo tanto, el género de palanca que se utilizó es la de tercer género o interpotente (Ilustración 60). Este tipo de palanca permite un aumento en el movimiento, por lo cual hay una mayor velocidad y desplazamiento.

Se tomó en consideración las medidas del canino de prueba (Ilustración 61).



**Ilustración 55. Palanca interpotente.**

Fuente: (Rodríguez, 2023)

En la cual, la variable a calcular es la fuerza potente, es decir, la fuerza que ejerce el canino para caminar con la prótesis. Se utilizó la fórmula de equilibrio de palancas (Ecuación 11).

$$F_r \times B_r = F_p \times B_p$$

**Ecuación 11. Equilibrio de palancas.**

Fuente: (Rodríguez, 2023)

Donde, los datos son los siguientes:

$$Fr = 1.68 \text{ kg}$$

$$Br = 25 \text{ cm}$$

$$Bp = 20 \text{ cm}$$

$$Fp = X$$

De igual manera, la conversión (Ecuación 12) de 1kgf (kilogramo patrón), se tomó en cuenta para convertirlo a la unidad de N, lo cual resulta en 9.81 N.



**Ilustración 56. Medidas de canino para palanca interpotente.**

Fuente: (Elaboración propia)

$$1 \text{ kgf} = 1 \text{ kg} \times 9.806 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

### **Ecuación 12. Conversión de kgf a N.**

Asimismo, despejando para la Ecuación 11, se obtiene la fórmula para calcular Fp en la unidad de kgf (Ecuación 13).

$$Fp = \frac{Fr \times Br}{Bp}$$

### **Ecuación 13. Cálculo de la fuerza potente.**

$$Fp = \frac{1.68 \text{ kgf} \times 25 \text{ cm}}{20 \text{ cm}}$$

$$Fp = 2.1 \text{ kgf o } 20.61 \text{ N}$$

Lo cual, se concluye que la fuerza empleada por el animal es de 2.1 kgf o 20.61 N, el cual es un valor dentro del rango para facilitar la movilidad del canino.

#### **5.4. VALIDACIÓN DE FUNCIÓN: ANÁLISIS CINEMÁTICO DE LOCOMOCIÓN DE CANINO**

La locomoción del canino se compone de dos fases, la primera que es la fase de apoyo y la segunda que es la fase de balanceo. En cada una de ellas, se aplica una fuerza diferente sobre la estructura ósea y la musculatura de la extremidad. En la fase de apoyo es el período en el que el pie se encuentra en contacto con el suelo y la fase de balanceo es cuando el pie se encuentra en el aire.

##### **5.4.1. LOCOMOCIÓN DEL CANINO ANTES DE LA UTILIZACIÓN DE PRÓTESIS**

En el canino se encuentran seis momentos para completar un ciclo de caminata con una extremidad. En cuatro de estos es cuando la extremidad se encuentra en contacto con el suelo (fase de apoyo) y en dos cuando realiza la flexión y la mano se encuentra en el aire (fase de balanceo).

En caninos con sus cuatro extremidades en el primer momento se forma un triángulo con una de las extremidades delanteras y las dos traseras, en el segundo momento es una línea diagonal con una extremidad delantera y una trasera; después, se forma una línea recta con una extremidad delantera y trasera y se repite el mismo proceso con las extremidades contrarias, completando un ciclo. Sin embargo, en caninos con tres extremidades, el ciclo de caminata no es igual al ciclo de un canino normal.

En este caso, para completar un ciclo solo se toman en cuenta los primeros tres momentos mencionados, debido a que es necesaria la extremidad que fue amputada para completar los otros tres (Ilustración 49).



**Ilustración 57. Locomoción del canino con extremidad delantera amputada.**

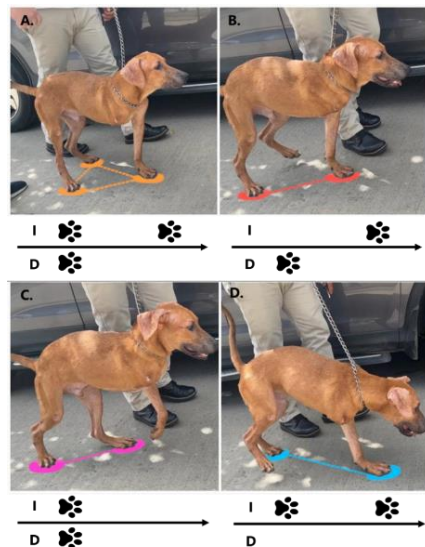
Fuente: (Elaboración propia)



La caminata del canino comenzó formando un triángulo con las tres extremidades en contacto con el suelo, las dos traseras y la izquierda delantera. En el segundo momento, se formó la línea diagonal con la extremidad delantera izquierda y trasera derecha. Se añadió otro momento en el que la extremidad delantera izquierda se eleva y las traseras están en contacto con el suelo, para equilibrarse y finalmente se completó el ciclo formando la línea recta entre la extremidad delantera y trasera izquierdas (Ilustración 50).

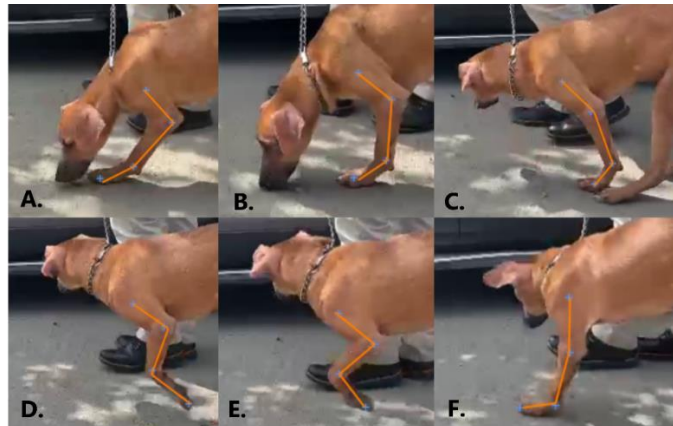
Asimismo, el canino realiza ambas fases mencionadas con las tres extremidades. En esta investigación, el interés de estudio es en la extremidad delantera izquierda, puesto que la derecha fue la amputada. El análisis fue realizado con la aplicación Kinovea, la cual permitió observar puntos clave para la realización de las fases de apoyo y balanceo.

En las primeras tres etapas, la extremidad del canino se encuentra en contacto con el suelo, provocando un pequeño impulso para elevar la extremidad y realizar una flexión en el área de la muñeca. En la primera etapa, el pie se encontró en contacto con el suelo, el cual es una fuerza de frenado, seguidamente de la segunda y tercera etapa, en la que hubo una propulsión, provocando que el pie se balanceará hacia atrás entrando a la fase de balanceo, realizando la cuarta etapa. En la quinta etapa, los músculos se balancearon hacia adelante para la locomoción y finalmente lo llevó hacia atrás y abajo mientras regresó al suelo (Millis et al., 2014) (Ilustración 51).



**Ilustración 58. Ciclo de caminata de canino. A. Primer momento de caminata; B. Segundo momento de caminata; C. Tercer momento de caminata; D. Cuarto momento de caminata.**

Fuente: (Elaboración propia)



**Ilustración 59. Fases de la locomoción. A, B, C. Fase de apoyo; D, E, F. Fase de balanceo.**

Fuente: (Elaboración propia)

#### 5.4.2. ANÁLISIS DE LOCOMOCIÓN DEL CANINO POSTERIOR A LA UTILIZACIÓN DE PRÓTESIS

El prototipo de prótesis para canino cumplió con su objetivo de soportar el peso del canino sin deformación alguna. Sin embargo, debido al poco tiempo para la realización de la investigación, en el análisis de locomoción del canino posterior a la utilización del prototipo es necesario realizar varias sesiones de rehabilitación y fisioterapia para que el canino logre adaptarse a la utilización de la prótesis y aprenda a caminar en ella.

Se logró colocar el prototipo para verificar que se acomodaba al canino (Ilustración 52 y 53), sin embargo, no se logró que pudiera caminar en ella, debido a que es un dispositivo al cual debe adaptarse, conocer y sentirse seguro al utilizarlo.



**Ilustración 60. Prototipo colocado en el canino.**

Fuente: (Elaboración propia)



**Ilustración 61. Prototipo final de la prótesis de canino.**

Fuente: (Elaboración propia)

## 5.5. RESULTADOS DE COSTOS

En este apartado se abordaron los costos de los materiales utilizados para el prototipo de prótesis de canino para extremidad delantera, sin tomar en cuenta los costos de mano de obra propia (Tabla 14).

**Tabla 13. Costo final del prototipo.**

<b>Materiales para prótesis de canino</b>	<b>Costo</b>
Filamento PLA	L. 150.00
Acople	L. 1,400.00
Tubo de polietileno	L. 1,600.00
Foamy	L. 50.00
Fibra de vidrio	L. 250.00
Tornillería	L. 180.00
Arnés para canino	L. 250.00
Vendas de yeso	L. 200.00
<b>Total</b>	<b>L. 4,080.00</b>

Fuente: (Elaboración propia)

## VI. CONCLUSIONES

1. A lo largo de este trabajo, se desarrolló un prototipo de prótesis veterinaria para caninos afectados por amputación de la extremidad delantera aplicando los conocimientos necesarios y la utilización de materiales asequibles. La prótesis es un dispositivo que le permite al canino ser un apoyo para la recuperación de sus habilidades de locomoción. Este dispositivo tiene las características de ser resistente y personalizado al canino, por lo que soporta el peso sin deformación y se acopla a su figura. Sin embargo, debido al corto tiempo de estudio, no se pudo establecer un resultado para el análisis de locomoción posterior a la utilización de la prótesis.
2. Según los resultados encontrados se concluye que el material, software y técnicas más viables para el desarrollo de una prótesis canina afectados por amputación de extremidad fueron el PLA, SolidWorks, para el diseño y simulaciones, y las técnicas por modelado y ensamblaje de piezas.
3. En relación con lo antes expuesto, se seleccionó el diseño ideal para la prótesis de extremidad delantera derecha canina con materiales utilizados para la impresión 3D, siendo la base la pieza impresa de esta manera con PLA, el cual es un material con propiedades resistentes. Este diseño contó con cuatro piezas diferentes las cuales van ensambladas entre si mediante tornillos y pines. De igual manera, se tomó en consideración las medidas zoométricas del canino para que el diseño fuera personalizable para él.
4. Por medio de las simulaciones de software en SolidWorks y un modelo jerárquico propuesto por Hehenberger se verificaron que los rangos de valores establecidos en las pruebas de tensión, deformación y factor de seguridad, siendo para el prototipo un mínimo de  $2.268e00N/m^2$  y un máximo de  $1.371e+04N/m^2$  en la prueba de tensión, lo cual muestra que se encuentra en los valores donde soporta la tensión; con un mínimo de 0 y un máximo de  $5.599e-04mm$  en la prueba de deformación, lo cual muestra que la pieza que puede sufrir deformación es en la base; y un mínimo de  $3.185e+03$  y un máximo de  $5.159e+07$  para el factor de seguridad, contando con la capacidad de soportar el peso del canino. De igual manera, se muestra que la fuerza empleada por el animal es de 20.61 N
5. Por último, el prototipo de prótesis veterinaria para caninos afectados por amputación de la

extremidad delantera se fabricó con piezas impresas en PLA, de igual manera, en material de polietileno, fibra de vidrio y dura aluminio, utilizando un sistema de amortiguamiento a base de etilvinilacetato, siendo un material espumoso y moldeable.

## **VII. RECOMENDACIONES**

- Se aconseja utilizar un dispositivo de escáner 3D para poder facilitar la realización y diseño del chaleco de sujeción, y posteriormente, ser impreso por la técnica de impresión 3D.
- Se sugiere la utilización de material TPU para la impresión 3D, ya que cuenta con propiedades flexibles y permitiría que el prototipo sea más liviano. Asimismo, este material es biocompatible, por lo que no tendrá un impacto negativo al momento de entrar en contacto con el canino.
- Se recomienda realizar pruebas de locomoción canina con la utilización de una máquina caminadora, plataforma de fuerza y marcadores para tener una mejor precisión en el análisis.
- Se recomienda realizar terapias de rehabilitación al canino después de la colocación del prototipo de prótesis para que se logre acostumbrar a la utilización de esta.

## **VIII. APLICABILIDAD/IMPLEMENTACIÓN**

El prototipo de prótesis de extremidad delantera para caninos afectados por amputaciones tiene aplicabilidad dentro del área de ortopedia, rehabilitación y fisioterapia veterinaria. Dentro del área de ortopedia veterinaria, puesto que con la utilización de la prótesis se corrige o previene las deformaciones en el cuerpo del canino que podrían ser causadas por la amputación.

En el área de la rehabilitación veterinaria el prototipo puede ser de utilidad para brindar ayuda al canino al momento de recuperar o mantener sus habilidades de locomoción natural y evitar problemas de salud futuros. Dentro de la fisioterapia veterinaria, le proporcionaría una ayuda para adaptarse a la utilización de la prótesis en su vida cotidiana.

## **IX. EVOLUCIÓN DEL TRABAJO ACTUAL/ TRABAJO FUTURO**

Durante el desarrollo del proyecto de investigación se encontraron bastantes limitantes en cuanto a estudios realizados en ingeniería biomédica con veterinaria. Asimismo, se puede realizar una segunda fase analizando la marcha del canino posterior a la utilización del prototipo, debido a que es necesario realizar sesiones de fisioterapia y rehabilitación para fortalecimiento y adaptación de esta.

Con respecto al canino, se puede realizar un mejor análisis en la parte de la locomoción, utilizando máquina caminadora, plataforma de fuerza y marcadores con el objetivo de conocer el posicionamiento y la evolución de su marcha. De igual manera, se puede realizar mejoras en el prototipado, siendo el material en impresión 3D, ya que es más flexible. También, se puede tener el acompañamiento de un veterinario y se podría realizar una búsqueda de especialistas en rehabilitación y terapia física veterinaria para que el canino logre adaptarse a la utilización de la prótesis.



## X. CONCORDANCIA DE LOS SEGMENTOS DE LA TESIS CON LA INVESTIGACIÓN

Tabla 14. Concordancia de los segmentos de la tesis con la investigación.

Capítulo I	Capítulo II	Capítulo III	Capítulo IV	
Los animales, al igual que los seres humanos, son propensos a ser afectados por diversos factores que conllevan a efectuar una amputación de alguna de sus extremidades. Este es un procedimiento quirúrgico en donde se realiza la extirpación, total o parcial, del miembro. Los caninos son uno de los animales domésticos que pueden tener como consecuencia esta afección. Estas amputaciones pueden producir secuelas en la marcha que	<b>Preguntas de Investigación</b>	<b>Objetivos</b>	<b>Marco Teórico</b>	
	<b>General</b>	<b>General</b>	<b>Variables Dependiente</b>	
	¿Cuáles son los elementos que se deben tomar en cuenta para la fabricación de un prototipo de prótesis veterinaria para caninos afectados por amputación de la extremidad delantera?	Estudiar los elementos para la fabricación de un prototipo de prótesis veterinaria para caninos afectados por amputación de la extremidad delantera.	En la elaboración de este capítulo se ilustró sobre el análisis de la situación actual en un nivel de macroentorno y microentorno para la elaboración de una prótesis de canino. Se recopiló información acerca de las bases teóricas y conceptualización de definiciones y las metodologías, técnicas e instrumentos utilizados por otros autores para dar colofón con el marco legal de normativas nacionales e internacionales referentes a la investigación.	Diseño de prototipo de prótesis canina de extremidad delantera
	<b>Específicas</b>	<b>Específicos</b>	<b>Variables Independientes</b>	
¿Qué materiales podrían ser utilizados para realizar el prototipo de una prótesis canina?	Inquirir cuáles son los materiales, software y técnicas más viables para el desarrollo de una prótesis canina afectados por amputación de extremidad.	Material	La metodología de estudio seleccionada para esta investigación es la metodología en V, así como la aplicación de dominios de Hehenberger. Con esta metodología se definieron los sistemas y subsistemas que se integran para desarrollar, de igual manera, los dominios y capas específicas que se utilizaron para la fabricación de un prototipo de prótesis canina.	
¿Qué características se deben tomar en cuenta para realizar un	Seleccionar el diseño ideal para la prótesis de extremidad delantera derecha canina con	Anatomía canina		

podrían perjudicar su salud, especialmente la columna, en la cual se podría provocar un desgaste, debido que al momento de redistribuir el peso en sus demás extremidades podría parecer cómoda, pero no natural.

diseño funcional de prótesis de extremidad delantera canina con materiales utilizados para la impresión 3D?

materiales utilizados para la impresión 3D.

¿Qué diseño de prótesis de extremidad delantera canina impreso 3D cumpliría con los rangos establecidos en las pruebas de simulaciones de software?

Realizar simulaciones de software y un modelo matemático para poder verificar que los rangos de valores establecidos sean cumplidos.

Biomecánica

¿Cuáles son las consideraciones para realizar un prototipo de prótesis canina que sea accesible y económica a todo el público?

Fabricar un prototipo de prótesis canina de extremidad delantera derecha con piezas impresas en 3D que sea accesible para todo el público.

Presupuesto

<b>Capítulo V</b>	<b>Capítulo VI</b>	<b>Capítulo VII</b>	<b>Capítulo VIII</b>	<b>Capítulo IX</b>
<b>Resultados</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>Recomendaciones</b>	<b>Aplicabilidad/Implementación</b>	<b>Evolución del trabajo</b>
Los resultados obtenidos abarcan el diseño y la fabricación	Se desarrolló un prototipo de prótesis veterinaria para caninos afectados por amputación de la extremidad delantera aplicando los conocimientos y utilización de materiales asequibles.		El prototipo de prótesis de extremidad delantera para caninos afectados por amputación	Se encontraron bastantes limitantes en cuanto a estudios realizados en ingeniería

<p>del prototipo de prótesis de extremidad delantera para caninos afectados por amputación, así como el modelado y ensamblaje de este. En este capítulo se obtuvo los resultados de las pruebas de simulaciones por software de las piezas y ensamblaje simulado (tensión, deformación y factor de seguridad), análisis de locomoción canina y modelo jerárquico.</p>	<p>El material, software y técnicas más viables para el desarrollo de una prótesis canina afectados por amputación de extremidad fueron el PLA, SolidWorks y las técnicas por modelado y ensamblaje de piezas.</p> <p>Se logró seleccionar el diseño ideal para la prótesis de extremidad delantera derecha canina con materiales utilizados para la impresión 3D, siendo la base la pieza impresa de esta manera, para posteriormente realizar su ensamblaje.</p> <p>Se realizaron simulaciones de software en SolidWorks y un modelo jerárquico propuesto por Hehenberger para poder verificar que los rangos de valores establecidos fueron cumplidos y contaron con la capacidad de soportar el peso del canino.</p> <p>El prototipo de prótesis veterinaria para caninos afectados por amputación de la extremidad delantera se fabricó con piezas impresas en 3D, material de polietileno, fibra de vidrio y dura aluminio.</p>	<p>Se aconseja utilizar un escáner 3D para poder facilitar la realización del chaleco de sujeción en impresión 3D.</p> <p>Se sugiere la utilización de material TPU para la impresión 3D, ya que cuenta con propiedades flexibles.</p> <p>Se recomienda realizar pruebas de locomoción canina con la utilización de una máquina caminadora, plataforma de fuerza y marcadores para tener una mejor precisión en el análisis.</p> <p>Se recomienda realizar terapias de rehabilitación al canino después de la colocación del prototipo de prótesis para que se logré acostumbrar a la utilización de esta.</p>	<p>tiene aplicabilidad dentro del área de ortopedia, rehabilitación y fisioterapia veterinaria.</p>	<p>biomédica con veterinaria. Asimismo, se puede realizar una segunda fase analizando la marcha del canino posterior a la utilización del prototipo.</p>
---	---	--	---	--

Fuente: (Elaboración propia)

## BIBLIOGRAFÍA

- Adamson, C., Kaufmann, M., Levine, D., Millis, D. L., & Marcellin-Little, D. J. (2005). Assistive Devices, Orthotics, and Prosthetics. *Veterinary Clinics of North America: Small Animal Practice*, 35(6), 1441-1451. <https://doi.org/10.1016/j.cvsm.2005.08.009>
- Andrés-Cano, P., Calvo-Haro, J. A., Fillat-Gomà, F., Andrés-Cano, I., & Perez-Mañanes, R. (2020). Papel del cirujano ortopédico y traumatólogo en la impresión 3D: aplicaciones actuales y aspectos legales para una medicina personalizada. *Revista Española de Cirugía Ortopédica y Traumatología*. doi: 10.1016/j.recot.2020.06.014
- Animal Fix - Soluciones quirúrgicas y de movilidad para animales. (2022). *Prótesis y Férulas*. Animal Fix - Soluciones Quirúrgicas y de Movilidad Animal. <https://animalfix.co/protesis-y-ferulas/>
- Arauz, P. G., Chiriboga, P., García, M. G., Kao, I., & Díaz, E. A. (2021). *New technologies applied to canine limb prostheses: A review*. *Veterinary World*, 2793-2802. <https://doi.org/10.14202/vetworld.2021.2793-2802>
- Ben-Amotz, R., Dycus, D., Levine, D., Arruda, A. G., Fagan, N., & Marcellin-Little, D. (2020). Stance and weight distribution after tibial plateau leveling osteotomy in forelimb and hind limb amputee dogs. *BMC Veterinary Research*, 16(1). <https://doi.org/10.1186/s12917-020-02402-7>
- BETA Implants – Innovation for Veterinary Surgery*. (2022). <https://www.betaimplants.com/>
- Bhattacharjee, D., Nag, S., & Deb, D. S. (2023). Deployment of Fractals through CNC Devices. *Procedia Computer Science*, 218, 2541-2549. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.01.228>
- Bras, L. L., Timercan, A., Llido, M., Petit, Y., Seguin, B., Lussier, B., & Brailovski, V. (2022). Personalized endoprostheses for the proximal humerus and scapulohumeral joint in dogs: Biomechanical study of the muscles' contributions during locomotion. *PLOS ONE*, 17(1), e0262863. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0262863>
- Bressan, N., & Creighton, C. (2018). Veterinary Medicine Engineering Challenges and Opportunities. 2018 IEEE Life Sciences Conference (LSC). doi:10.1109/lsc.2018.8572055

Brittany Jean Carr, Canapp, S., Petrovitch, J. L., Campana, D., Canapp, D., & Leasure, C. S. (2023). Retrospective Study on External Canine Limb Prosthesis used in 24 patients. *Veterinary Evidence*, 3(1). <https://doi.org/10.18849/ve.v3i1.118>

Catavittello, G., Ivanenko, Y. P., & Lacquaniti, F. (2015). *Planar Covariation of Hindlimb and Forelimb Elevation Angles during Terrestrial and Aquatic Locomotion of Dogs*. *PLOS ONE*, 10(7), e0133936. doi: 10.1371/journal.pone.0133936

Center for Veterinary Medicine. (2021, 29 junio). *How FDA Regulates Animal Devices*. U.S. Food and Drug Administration. <https://www.fda.gov/animal-veterinary/animal-health-literacy/how-fda-regulates-animal-devices>

Chaler Vilaseca, J., & Garreta Figuera, R. (2010). Aplicaciones clínicas de las pruebas biomecánicas: mitos y realidades. *Rehabilitación*, 44(3), 195–198. doi:10.1016/j.rh.2010.04.003

Colegio Médico de Honduras. (2004). Ley Orgánica del Colegio de Médicos Veterinarios de Honduras. En Colegio Médico Leyes y Reglamentos (N.o 22056). Diario Oficial La Gaceta.

Clarín.com. (2018, junio 8). El hombre que le hizo a un elefante la prótesis más grande del mundo. Clarín. [https://www.clarin.com/sociedad/hombre-hizo-elefante-protesis-grande-mundo\\_0\\_HyAiKjSgQ.html](https://www.clarin.com/sociedad/hombre-hizo-elefante-protesis-grande-mundo_0_HyAiKjSgQ.html)

Congreso Nacional de Honduras. (2016). Ley de Protección y Bienestar Animal. <https://www.poderjudicial.gob.hn/CEDIJ/Leyes/Documents/Ley%20de%20Proteccion%20y%20Bienestar%20Animal.pdf>

Del Carpio, L.-I., Petit, Y., Diotalevi, L., Laroche, E., Levasseur, A., & Lussier, B. (2021). Three-dimensional kinematic evaluation of lateral suture stabilization in an in vitro canine cranial cruciate deficient stifle model. *PLOS ONE*, 16(12), e0261187. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0261187>

DeStefano, V., Khan, S., & Tabada, A. (2020). Applications of PLA in modern medicine. *Engineered Regeneration*, 1, 76–87. doi: 10.1016/j.engreg.2020.08.002

D. Millis y D. Levine, Eds. (2014), «Web Appendix 2 - Main Ligament Attachments and Function», en *Canine Rehabilitation and Physical Therapy (Second Edition)*, St. Louis: W.B. Saunders, pp. e1-e7. <https://doi.org/10.1016/b978-1-4377-0309-2.00050-8>

- DUBUC, M.W. (1991). *Zoometría*. Zootecnia General. Ediciones Oumar, 3era Edición- Caracas Venezuela. Voí. 1. 281- 289
- El Comercio. (2018). Un cocodrilo recuperó su cola con una prótesis impresa en 3D. <https://www.eluniversal.com.mx/ciencia-y-salud/tecnologia/un-cocodrilo-recupero-su-cola-con-una-protesis-impresa-en-3d/>
- Erazo, A., Quinde, E. P., & Cornejo, S. E. (2020). Biomechanical Analysis of Canine Hind Limb: Mathematical Model and Simulation of Torques in Joints. ResearchGate; unknown. [https://www.researchgate.net/publication/346331493\\_Biomechanical\\_Analysis\\_of\\_Canine\\_Hind\\_Limb\\_Mathematical\\_Model\\_and\\_Simulation\\_of\\_Torques\\_in\\_Joints](https://www.researchgate.net/publication/346331493_Biomechanical_Analysis_of_Canine_Hind_Limb_Mathematical_Model_and_Simulation_of_Torques_in_Joints)
- Estudio de diseño 3D - Modelado 3D - ProyectosCAD. (2022). ProyectosCAD. <https://proyectoscad.com/servicios/modelado-3d/>
- Farah, S., Anderson, D. G., & Langer, R. (2016). Physical and mechanical properties of PLA, and their functions in widespread applications — A comprehensive review. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 107, 367–392. doi: 10.1016/j.addr.2016.06.012
- Farrell, B. J., Prilutsky, B. I., Kistenberg, R. S., Dalton, J. F., & Pitkin, M. (2014). An animal model to evaluate skin–implant–bone integration and gait with a prosthesis directly attached to the residual limb. *Clinical Biomechanics*, 29(3), 336–349. doi: 10.1016/j.clinbiomech.2013.12.014
- Fernández, V. M. P. (2023). *Metodo de los elementos finitos aplicado al analisis estructural*. Editorial Noela.
- Fischer, M. S., Lehmann, S. V., & Andrada, E. (2018). Three-dimensional kinematics of canine hind limbs: in vivo, biplanar, high-frequency fluoroscopic analysis of four breeds during walking and trotting. *Scientific Reports*, 8(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-34310-0>
- Galindo-Zamora, V., von Babo, V., Eberle, N., Betz, D., Nolte, I., & Wefstaedt, P. (2016). Kinetic, kinematic, magnetic resonance and owner evaluation of dogs before and after the amputation of a hind limb. *BMC Veterinary Research*, 12(1). <https://doi.org/10.1186/s12917-016-0644-5>
- Global GfK survey. (2016a). Pet ownership. [https://cdn2.hubspot.net/hubfs/2405078/cms-pdfs/fileadmin/user\\_upload/country\\_one\\_pager/nl/documents/global-gfk-survey\\_pet-ownership\\_2016.pdf](https://cdn2.hubspot.net/hubfs/2405078/cms-pdfs/fileadmin/user_upload/country_one_pager/nl/documents/global-gfk-survey_pet-ownership_2016.pdf)

- G, N. (2023). Una prótesis impresa en 3D cambia la vida a un perro—3Dnatives. <https://www.3dnatives.com/es/la-protesis-de-titanio-impresa-en-3d-080320232/>
- Girard, N. (2021). Empastes, coronas e implantes | Royal Canin. <https://vetfocus.royalcanin.com/es/cientifico/empastes-coronas-e-implantes>
- Gunn HM (1978). The proportions of muscle, bone and fat in two different types of dogs, *Res Vet Sci* 24:277–282.
- Hehenberger, P. (2014). Perspectives on hierarchical modeling in mechatronic design. *Advanced Engineering Informatics*, 28(3), 188-197. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2014.06.005>
- Help Your Pet | Prosthetics for Dogs Back Legs | Dog Brace For Back Leg | OrthoPets.* (2022). <https://www.orthopets.com/products/prosthetics>
- Hincapie Riano, T. A., Vega-Medina, L., & Rodriguez, C. (2021). Foot Prosthesis Design to Recover the Natural Biomechanical Position in *Ramphastos tucanus* Specimen. 2021 IEEE 3rd Global Conference on Life Sciences and Technologies (LifeTech). doi:10.1109/lifetech52111.2021.9391918
- Hoyos Mogollón, V, Ayala Ciendúa, M, Hernández Olaya, J, Castillo Lastre, M y Cuaspa Arizmendi, L. (2020). *Prótesis para caninos con amputaciones totales*. Universidad de los Andes.
- Javir, A. V., & Kirkire, M. S. (2017). Finite element analysis of Femur prosthesis. 2017 International Conference on Nascent Technologies in Engineering (ICNTE). doi:10.1109/icnte.2017.7947900
- Huelin, L. (2022). Winter: El delfín que perdió su aleta. *Mis Animales*. <https://misanimales.com/winter-la-delfin-perdio-su-aleta/>
- Joaquín Cristóbal Sangüesa, Patricia Leal Campillo, Cristina Benito López, Paula Constante Pérez, Vanesa Gómez Barranco, & Elisa Felipe Carreras. (2021). Cuidados de enfermería en pacientes con vendaje rígido o yeso. Revisión sistemática. *Revista Sanitaria de Investigación*, 2(10), 250. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/dcart?info=link&codigo=8163751&orden=0>
- Jódar, X. A. (1993). *Eficacia y técnica deportiva*. Inde.
- Jones, O. Y., Raschke, S. U., & Riches, P. E. (2018). Inertial properties of the German Shepherd Dog. *PLOS ONE*, 13(10), e0206037. doi: 10.1371/journal.pone.0206037

Khalip, S., Alkawaz, M. H., & Puaad, S. N. A. (2019). 3D Digital Animal Model: Complication and Future Impact. *2019 IEEE 7th Conference on Systems, Process and Control (ICSPC)*. <https://doi.org/10.1109/icspc47137.2019.9068060>

LaSexta. (2018, febrero 8). Grecia, un tucán maltratado, recupera parte de su pico gracias a una prótesis impresa en 3D. LaSexta. [https://www.lasexta.com/noticias/virales/un-tucan-que-perdio-parte-de-su-pico-al-ser-maltartado-lo-recupera-gracias-a\\_2016081157ac39200cf225b6b2f77070.html](https://www.lasexta.com/noticias/virales/un-tucan-que-perdio-parte-de-su-pico-al-ser-maltartado-lo-recupera-gracias-a_2016081157ac39200cf225b6b2f77070.html)

Lee, M. (1995), Biomechanics of joint movements. In: Refshauge, K., Gass, L. (eds), *Musculoskeletal Physiotherapy – Clinical Science and Practice*. Butterworth Heinemann, Oxford.

LÓPEZ, G. (2016). *ANÁLISIS NUMÉRICO Y EXPERIMENTAL DE UN PROTOTIPO DE PRÓTESIS CANINA PARA EXTREMIDAD POSTERIOR* [Tesis de maestría]. INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL.

López, J. (2018). Realizan con éxito el primer trasplante de cadera en un gato. <https://www.animalshealth.es/profesionales/realizan-con-exito-el-primer-trasplante-de-cadera-en-un-gato>

Marouf, N.O., Mimoune, N., Benchabane, A., Khelef, D. i Kaidi, R. (2023). 3d printer uses in veterinary medicine: a review. *Veterinarska stanica*, 54 (2), 223-237. <https://doi.org/10.46419/vs.54.2.9>

Masters, B. R. (2012). Introduction to Biomedical Engineering, Third Edition. *Journal of Biomedical Optics*, 17(3), 039901. doi: 10.1117/1.jbo.17.3.039901

Material de filamento Ultimaker PLA para impresora 3D: altamente versátil y fácil de imprimir | Ultimaker. (2023). <https://ultimaker.com/es/materials/pla>

McGowan, C., & Goff, L. (2016). *Animal Physiotherapy: Assessment, Treatment and Rehabilitation of Animals*. Wiley.

Mendoza-DeCal, R., Ballesteros, Y., Peso-Fernandez, S., del Real-Romero, J. C., & Rodríguez-Quiros, J. (2022). Biomechanical Tests on Long-Bone Elliptical Medullary-Canal Endoprostheses for Limb Salvage in Dogs. *Animals*, 12(21), 3021. <https://doi.org/10.3390/ani12213021>



Mercado de orto-prótesis animales | 2022 - 27 | Participación, tamaño y crecimiento de la industria - Mordor Intelligence. (s. f.-a). <https://www.mordorintelligence.com/es/industry-reports/animal-ortho-prosthetics-market>

Mich, P. M. (2014). The Emerging Role of Veterinary Orthotics and Prosthetics (V-OP) in Small Animal Rehabilitation and Pain Management. *Topics in Companion Animal Medicine*, 29(1), 10–19. doi: 10.1053/j.tcam.2014.04.002

Mich, P. M., & Kaufmann, M. (2018). Veterinary Orthotics and Prosthetics. *Canine Sports Medicine and Rehabilitation*, 265–293. doi:10.1002/9781119380627.ch11

Ministerio de Educación, Cultura y Deporte (2016). Fabricación digital: Introducción al modelado e impresión 3D. (NIPO en línea: 030-16-562-2) <https://sede.educacion.gob.es/publiventa/PdfServlet?pdf=VP18119.pdf&area=E>

Montoya-Zapata, D., Acosta, D. A., Cortés, C., Pareja-Corcho, J., Moreno, A., Posada, J., & Ruiz-Salguero, O. (2020). Approximation of the Mechanical Response of Large Lattice Domains Using Homogenization and Design of Experiments. *Applied Sciences*, 10(11), 3858. <https://doi.org/10.3390/app10113858>

*Nomenclatura de las razas de la FCI*. (s. f.). <https://www.fci.be/es/Nomenclature/>

Orozco, R., Ramírez, A., & Patiño, N. (1998). *MANUAL ZOOTECNICO DEL PERRO* [Tesis profesional]. Universidad de Guadalajara.

Pardo, M. A. P. (2017). Diseño de una prótesis canina para extremidades delanteras [Trabajo Fin de Grado]. Universidad Pública de Navarra.

Ramirez-Cedillo, E., Lara-Padilla, H., Zamudio-Peña, L. F., Rodriguez-Garcia, A., Ruiz-Huerta, L., Ruiz, A. C., & Siller, H. R. (2017). Process Chain for the Fabrication of a Custom 3D Barrier for Guided Bone Regeneration. *Procedia CIRP*, 65, 151–156. doi: 10.1016/j.procir.2017.04.015

Rao, S. S. (2017). *The Finite Element Method in Engineering* (6th ed.). Butterworth-Heinemann.

Sampieri, R. H., Collado, C. F., Lucio, P. B., Valencia, S. M., & Torres, C. P. M. (2014). *Metodología de la investigación*.

SASTRE, H., (2003). Descripción, Situación Actual y Estrategias de Conservación de la Raza Bovina Colombiana Criolla Casanare. Tesis Doctoral. Facultad de Veterinaria. Universidad de Córdoba. Córdoba, España. 337 p.

Savio, G., Baroni, T., Concheri, G., Baroni, E., Meneghello, R., Longo, F., & Isola, M. (2016). Computation of Femoral Canine Morphometric Parameters in Three-Dimensional Geometrical Models. *Veterinary Surgery*, 45(8), 987–995. <https://doi.org/10.1111/vsu.12550>

Simulación. (s. f.). SolidWorks. <https://www.solidworks.com/es>

SOLIDWORKS - Qué es y para qué sirve. (2022, November 23). SolidBI. <https://solid-bi.es/solidworks/>

Stokosa, J. J. (2021). *Opciones para las prótesis de los miembros*. Manual MSD versión para profesionales. <https://www.msmanuals.com/es/professional/temas-especiales/miembro-prot%C3%A9sico/opciones-para-las-pr%C3%B3tesis-de-los-miembros>

Teratología Veterinaria – VetPraxis. (2009, July 17). Vetpraxis.net. <https://www.vetpraxis.net/2009/07/17/teratologia-veterinaria/>

Timercan, A., Brailovski, V., Petit, Y., Lussier, B., & Séguin, B. (2019). Personalized 3D-printed endoprostheses for limb sparing in dogs: Modeling and in vitro testing. *Medical Engineering & Physics*, 71, 17-29. <https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2019.07.005>

Uvm, P. (2016, 21 enero). Especialistas de la Universidad del Valle de México crean primera prótesis articulada en 3D para perro en México. UVM. <https://laureate-comunicacion.com/prensa/especialistas-de-la-universidad-del-valle-de-mexico-crean-primera-protesis-articulada-en-3d-para-perro-en-mexico/>

Vidal, C. R. (2016). *DISEÑO MECÁNICO CON SOLIDWORKS 2015*. Alianza Editorial.

Young, H. D. (2018). *FISICA UNIVERSITARIA CON FISICA MODERNA 1 DE SEARS Y ZEMANSKY* (1.a ed.). PEARSON.

Wendland, T. M., Seguin, B., & Duerr, F. M. (2019). Retrospective Multi-Center Analysis of Canine Socket Prostheses for Partial Limbs. *Frontiers in Veterinary Science*, 6. <https://doi.org/10.3389/fvets.2019.00100>

Wirth, M. A., Korvick, D. L., Basamania, C. J., Toro, F., Aufdemorte, T. B., & Rockwood, C. A. (2001). *Radiologic, mechanical, and histologic evaluation of 2 glenoid prosthesis designs in a canine model*. *Journal of Shoulder and Elbow Surgery*, 10(2), 140–148. doi:10.1067/mse.2001.112021

## ANEXOS

**Tabla 15. Información sobre todos los artículos finales seleccionados.**

<b>Autores del estudio</b>	<b>Año</b>	<b>Área de conocimiento de la revista</b>	<b>Enfoque de estudio</b>	<b>Metodología utilizada</b>	<b>Instrumentos utilizados</b>
Hincapié et al.	2021	Ciencias biológicas y tecnologías	Biomecánica estática para prototipo de prótesis de tarsometatarso de tucán.	Análisis cinético y análisis de elementos finitos	Software de Solidworks CAD
Le Bras et al.	2022	Ingeniería Mecánica y veterinaria	Efectos biomecánicos de las endoprótesis y la cinemática del músculo del hombro.	Estudio biomecánico	Simulaciones estáticas
Timercan et al.	2019	Ingeniería Médica y Física	Fabricación de una endoprótesis utilizando TC y desarrollar y validar un modelo numérico de extremidad canina.	Pruebas biomecánicas y modelo de elementos finitos	Software de ProAnalyst, Matlab
Catavittello et al.	2015	Ciencias biológicas	Comparar el patrón de coordinación intersegmentaria durante varias formas de locomoción cuadrúpeda.	Captura de movimiento 3D de alto rendimiento	Software Tracker
Farrell et al.	2014	Biomecánica clínica	Desarrollar un modelo animal que permitiera investigaciones de la marcha con una prótesis de extremidad anclada al hueso como análisis histológico de dos gatos.	Análisis mecánico e histológico	Prueba t de Student, software de Solidworks
Jones et al.	2018	Ciencias biológicas	Conjunto de datos experimentales sobre las propiedades de masa e inercia del perro pastor alemán macho adulto.	Ecuaciones de regresión para predecir las masas de los segmentos	Medidas morfométricas, propiedades inerciales tridimensionales
Javir et al.	2017	Tecnologías Nacientes en Ingeniería	Diseñar una prótesis de fémur para humano mediante el análisis de elementos finitos.	Análisis de Elementos Finitos	ANSYS, Pro-E y CAD
Wendland et al.	2019	Veterinaria	Análisis multicéntrico retrospectivo de prótesis de encaje canino para extremidades parciales.	Encuesta acerca de la satisfacción del cliente con su prótesis	Bases de Datos

<b>Autores del estudio</b>	<b>Año</b>	<b>Área de conocimiento de la revista</b>	<b>Enfoque de estudio</b>	<b>Metodología utilizada</b>	<b>Instrumentos utilizados</b>
Galindo-Zamora et al.	2016	Veterinaria	Evaluación cinética, cinemática, resonancia magnética y propietario de perros antes y después de la amputación de una extremidad trasera.	Prueba biomecánica, captura de movimientos y resonancia magnética.	Resonancia Magnética
Jean Carr et al.	2023	Veterinaria	Estudio Retrospectivo de Prótesis Externa de Miembro Canino utilizada en 24 pacientes.	Encuestas para recopilación	Encuestas
Erazo et al.	2020	Ingeniería y Robótica	Análisis Biomecánico de la Extremidad Posterior Canina: Modelo Matemático y Simulación de Torques en Articulaciones.	Análisis Cinemático y cinético	Proteus, ecuaciones y análisis matemáticos
Ben-Amotz et al.	2020	Veterinaria	Distribución de la postura y el peso después de la osteotomía de nivelación de la meseta tibial en perros amputados de miembros anteriores y posteriores.	Análisis Cinemático y cinético	Plataforma de distribución de peso
Fischer et al.	2018	Veterinaria	Cinemática tridimensional de las extremidades traseras caninas: análisis in vivo, biplanar y fluoroscópico de alta frecuencia de cuatro razas durante la marcha y el trote.	Análisis 3D	Cinta de correr de cuatro bandas
Savio et al.	2016	Veterinaria	Cálculo de parámetros morfométricos caninos femorales en modelos geométricos tridimensionales	Análisis 3D, CAD software	Scanner 3d
Del Carpio et al.	2021	Veterinaria	Evaluación cinemática tridimensional de la estabilización de la sutura lateral en un modelo de rodilla deficiente en cruzado craneal canino in vitro.	3D slicer, 3D análisis	Disecación Desarticulación
Mendoza-DeCal et al.	2021	Ingeniería Mecánica	Prueba de diseño y fabricación de una endoprótesis de poli-éter-éter-cetona para extremidades caninas mediante impresión 3D.	Pruebas mecánicas cuasiestáticas y de fatiga	Solidworks

Fuente: (Elaboración propia).