

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción

Robot Cuadrúpedo para la Educación STEAM

INGE-2805

Proyecto Integrador

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero/a en Mecatrónica

Presentado por:

César Alexander Aulestia Tena

Carlos Johnny González Chancay

Guayaquil - Ecuador

Año: 2024

Dedicatoria

Este proyecto lo dedico a mis padres César Antonio Aulestia Cando y Ana Corina Tena Tinajero por su guía y apoyo incondicional durante toda mi carrera.

A mis abuelos Rubén Aulestia y Maritza Cando que pese a la distancia me alentaron a seguir nuevos sueños y me brindaron todo el apoyo para cumplirlos.

A mis hermanos Darío, María e Isaac, por su apoyo moral durante este camino.

A todos los familiares, profesores y amigos que han contribuido significativamente a mi crecimiento profesional y personal.

- **César Alexander Aulestia Tena**

Dedicatoria

El presente proyecto lo dedico a Dios y a mis padres Carlos González y Adela Chancay por ser mi soporte y apoyo incondicional en todo este proceso.

A mis hermanos Rubén, Jessenia, Karen y Nicolle, por siempre darme ánimos y apoyo moral en este camino profesional.

A mi novia Tania Choez que ha estado conmigo incondicionalmente en estos últimos años de estudios.

- **Carlos González Chancay**

Agradecimientos

Mi más sincero agradecimiento a Dios por permitirme recorrer este camino lleno de logros, recordándome siempre que sus planes son perfectos. A mi padre, César Aulestia, por ser mi ejemplo a seguir y la persona que más admiro en el mundo. A mi madre, Ana Tena, por inculcarme los valores y principios que me han formado como un hombre de bien. A mi abuelo, Rubén Aulestia, por su esfuerzo y apoyo incondicional, incluso desde la distancia, que me impulsaron a alcanzar nuevas metas. A mis hermanos, por ser una fuente constante de respaldo, sin importar en qué lugar del mundo se encuentren. A Andrés Reinoso, por ofrecerme su apoyo moral desde los días del colegio hasta hoy, por motivarme a enfrentar nuevos retos y, sobre todo, por ser mi mejor amigo. Un agradecimiento especial al profesor Francisco Yumbla, por las oportunidades brindadas y sus valiosos

consejos que me han ayudado a crecer como
investigador.

- **César Alexander Aulestia Tena**

Agradecimientos

Mi más profundo agradecimiento a Dios que me dio la oportunidad de concluir estos años de estudios, a mi padre Carlos que siempre me aconsejo en todo momento, a mi madre Adela por su amor incondicional, a mi segunda madre Rocío Chancay que siempre estuvo para mí y sin su apoyo no hubiese logrado desempeñarme de la mejor manera, finalmente a mi novia Tania y amigos por sus buenos deseos en todo momento.

- **Carlos González Chancay**

Declaración Expresa

Yo/Nosotros César Alexander Aulestia Tena y Carlos Johnny González Chancay acuerdo/acordamos y reconozco/reconocemos que:

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

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

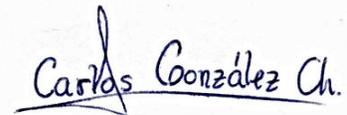
En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique al/los autor/es que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa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

Guayaquil, 17 de octubre del 2024.



César Alexander Aulestia

Tena



Carlos Johnny González

Chancay

Evaluadores

Jorge Luis Hurel Ezeta, Ph.D.

Profesor de Materia

Francisco Xavier Yumbra Arevalo,

Ph.D.

Tutor de proyecto

Resumen

El proyecto integrador se centra en el diseño y simulación de un robot cuadrúpedo orientado al ámbito educativo, con el objetivo de proporcionar una herramienta práctica y accesible para el aprendizaje de conceptos clave en mecatrónica, como diseño mecánico, electrónica y programación. El robot fue desarrollado desde cero utilizando herramientas CAD, integrando tecnologías de impresión 3D para fabricar sus componentes principales, con un diseño modular que facilita su ensamblaje y mantenimiento. El sistema de transmisión utiliza servomotores seriales de alta precisión para controlar las articulaciones, combinados con un mecanismo de barras que asegura un movimiento eficiente y estable. Además, el diseño incorpora materiales como PLA y TPU, seleccionados por su resistencia y capacidad de proporcionar estabilidad y adherencia en las extremidades. En términos de control y simulación, el robot fue validado en entornos virtuales mediante ROS 2 e Isaac Sim, garantizando un desempeño óptimo antes de su fabricación física. Estas herramientas permitieron implementar algoritmos básicos de control para explorar conceptos fundamentales, posicionando al robot como un recurso versátil para la enseñanza en primeros niveles universitarios. Finalmente, este proyecto ofrece una solución replicable y escalable, alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible 4 y 9, promoviendo la innovación en educación técnica y el acceso a tecnologías de aprendizaje accesibles y de calidad.

Palabras clave: Cuadrúpedo, STEAM, impresión 3D, Isaac Sim, ROS2 Humble

Abstract

The integrative project focuses on the design and simulation of a quadruped robot aimed at the educational field, with the objective of providing a practical and accessible tool for learning key concepts in mechatronics, such as mechanical design, electronics, and programming. The robot was developed from scratch using CAD tools, integrating 3D printing technologies to fabricate its main components, and featuring a modular design that facilitates assembly and maintenance. The transmission system uses high-precision serial servomotors to control the joints, combined with a bar mechanism that ensures efficient and stable movement. Additionally, the design incorporates materials such as PLA and TPU, selected for their strength and ability to provide stability and grip in the extremities. In terms of control and simulation, the robot was validated in virtual environments using ROS 2 and Isaac Sim, ensuring optimal performance before its physical construction. These tools allowed the implementation of basic control algorithms to explore fundamental concepts, positioning the robot as a versatile resource for teaching at introductory university levels. Finally, this project offers a replicable and scalable solution aligned with Sustainable Development Goals 4 and 9, promoting innovation in technical education and access to affordable and high-quality learning technologies.

Keywords: Quadruped, STEAM, 3D printing, Isaac Sim, ROS2 Humble.

Índice general

Resumen.....	I
Abstract.....	II
Índice general.....	III
Abreviaturas.....	VI
Simbología.....	VII
Índice de figuras.....	VIII
Índice de tablas.....	X
Índice de planos.....	XI
Capítulo 1.....	1
1. Introducción.....	2
1.1 Descripción del Problema.....	3
1.2 Justificación del Problema.....	4
1.3 Objetivos.....	5
1.3.1 Objetivo general.....	5
1.3.2 Objetivos específicos.....	5
1.4 Marco teórico.....	6
1.4.1 Falta de recursos prácticos en los primeros ciclos de la educación Técnica.....	6
1.4.2 Aprendizaje Práctico en la Educación Superior.....	7
1.4.3 Importancia de la Robótica Educativa.....	8
1.4.4 Estudio del Robot Cuadrúpedo Educativo: Diseño, Algoritmos y Tecnologías.....	10
1.5 Estado del arte.....	14
1.5.1 Stanford Doggo.....	14
1.5.2 PADWQ.....	15
Capítulo 2.....	16

2.	Metodología.....	17
2.1	Requerimientos de diseño	17
2.2	Selección de alternativas de solución.....	18
2.3	Proceso de diseño	21
2.4	Diseño conceptual	22
2.5	Parámetros de diseño mecánico	24
2.5.1	Restricciones de diseño en cuanto a rangos de movimiento.....	24
2.5.2	Selección de motores	27
2.5.3	Mecanismo para transmisión de movimiento	29
2.5.4	Análisis de cinemática inversa.....	31
2.5.5	Especificación del material de construcción.....	35
2.6	Parámetros de diseño electrónico.....	35
2.6.1	Selección de sensores.....	35
2.6.2	Selección de actuadores	36
2.6.3	Selección de controlador.....	36
2.7	Parámetros de control.....	38
2.7.1	Selección de controlador para los servomotores.....	38
2.8	Consumo de energía del robot y dimensionamiento de la batería.....	39
	Capítulo 3.....	41
3.	Resultados y análisis	42
3.1	Diseño mecánico	42
3.2	Sistema de control para la marcha de trote	56
3.3	Sistema electrónico del robot cuadrúpedo	57
3.4	Simulación y robot físico	60
3.5	Análisis de costos.....	66

Capítulo 4.....	67
4.1 Conclusiones y recomendaciones	68
4.1.1 Conclusiones.....	68
4.1.2 Recomendaciones	70
Referencias.....	72
Apéndices.....	74

Abreviaturas

CAD: Computer-Aided Design (Diseño Asistido por Computadora).

ESPOL: Escuela Superior Politécnica del Litoral.

GDL: Grados de Libertad.

GitHub: Plataforma de alojamiento de código y control de versiones.

IES: Instituciones de Educación Superior.

IK: Inverse Kinematics (Cinemática Inversa).

IMU: Inertial Measurement Unit (Unidad de Medición Inercial).

ODS: Objetivos de Desarrollo Sostenible.

PLA: Polylactic Acid (Ácido Poliláctico).

ROS: Robot Operating System (Sistema Operativo para Robots).

ROS 2: Segunda generación del Robot Operating System (Sistema Operativo para Robots).

STEAM: Science, Technology, Engineering, Arts, and Mathematics (Ciencia, Tecnología, Ingeniería, Arte y Matemáticas).

TPU: Thermoplastic Polyurethane (Poliuretano Termoplástico).

UI: User Interface (Interfaz de Usuario).

Simbología

A	Área de la sección transversal (m ²).
cm	Centímetro.
d	Diámetro de la barra (m).
F	Fuerza aplicada (N).
g	Aceleración gravitacional (m/s ²).
kg	Kilogramo.
L	Longitud de la barra (m).
mm	Milímetro.
MPa	Megapascal (N/mm ²).
N	Newton.
Nm	Newton-metro (unidad de torque).
PLA	Polylactic Acid (Ácido Poliláctico).
TPU	Thermoplastic Polyurethane (Poliuretano Termoplástico).
T	Torque (N·m).

Índice de figuras

Figura 1.1	10
Figura 1.2	11
Figura 1.3	12
Figura 1.4	13
Figura 1.5	15
Figura 1.6	15
Figura 2.1	18
Figura 2.2	22
Figura 2.3	23
Figura 2.4	25
Figura 2.5	25
Figura 2.6	26
Figura 2.7	26
Figura 2.8	28
Figura 2.9	30
Figura 2.10	32
Figura 2.11	33
Figura 2.12	34
Figura 3.1	42
Figura 3.2	44
Figura 3.3	46
Figura 3.4	46
Figura 3.5	47
Figura 3.6	48
Figura 3.7	49
Figura 3.8	50
Figura 3.9	51
Figura 3.10	53
Figura 3.11	54

Figura 3.12	55
Figura 3.13	56
Figura 3.14	58
Figura 3.15	59
Figura 3.16	60
Figura 3.17	61
Figura 3.18	62
Figura 3.19	63
Figura 3.20	64
Figura 3.21	64
Figura 3.22	65

Índice de tablas

Tabla 2.1	17
Tabla 2.2	20
Tabla 2.3	21
Tabla 2.4	27
Tabla 2.5	36
Tabla 2.6	37
Tabla 2.7	38
Tabla 2.8	39
Tabla 2.9	39
Tabla 2.10	40
Tabla 3.1	43
Tabla 3.2	66

Índice de planos

PLANO 1 Ensamble pierna

PLANO 2 Ensamble completo

PLANO 3 Extensión larga

PLANO 4 Muslo derecho

PLANO 5 Acople principal mecanismo pierna

PLANO 6 Acople servo rodamiento

PLANO 7 Acople servo rodamiento derecha

PLANO 8 Dedo de pierna

PLANO 9 Pierna parte derecha

PLANO 10 Pierna parte izquierda

PLANO 11 Acople cobertor

PLANO 12 Acople cobertor servo derecha

PLANO 13 Tapa frontal

Capítulo 1

1. Introducción

La educación técnica en el siglo XXI enfrenta el desafío de preparar a los estudiantes para un entorno en constante cambio, impulsado por los avances tecnológicos. En el ámbito universitario, especialmente en carreras como la mecatrónica, es esencial que los estudiantes desarrollen competencias en materias del ciclo básico de ingeniería para construir una base sólida en la comprensión de sistemas técnicos. Sin embargo, la enseñanza de estos temas, que abordan conceptos teóricos e interdisciplinarios, suele carecer de un enfoque práctico que permita a los estudiantes conectar los principios teóricos con aplicaciones reales, un aspecto clave para su aprendizaje y motivación.

Este proyecto integrador está orientado a estudiantes de primeros semestres universitarios que cursan asignaturas como Dibujo para Ingeniería, Introducción a la Mecatrónica, Diseño de Algoritmos de Control y Fundamentos de Programación. Aunque estas materias proporcionan conocimientos esenciales para el desarrollo de habilidades técnicas, suelen impartirse en un contexto teórico que, si bien necesario, puede limitar la comprensión práctica de los estudiantes en los primeros niveles de su formación.

El aprendizaje práctico es fundamental para reducir esta brecha, y la implementación de un robot cuadrúpedo educativo se presenta como una solución innovadora que facilita la exploración directa de los conceptos teóricos y su aplicación. Este robot permite experimentar con temas de simulación, programación y manufactura aditiva, sirviendo como una plataforma educativa accesible y asequible.

Existen herramientas educativas en robótica como Arduino Uno y Micro:bit, que ofrecen a los estudiantes una introducción básica a la construcción y programación de robots, que son efectivas en conceptos básicos, pero a menudo no abarcan aspectos de diseño mecánico ni la

integración de sistemas más complejos. En contraste, el robot cuadrúpedo educativo que se propone integra de manera efectiva el diseño mecánico, la simulación en entornos virtuales y la programación, promoviendo habilidades interdisciplinarias que no solo cubren los conocimientos básicos, sino que también sientan una base más sólida en ingeniería y control, adaptada al contexto universitario.

Este enfoque contribuye a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), específicamente a la educación inclusiva y de calidad (ODS 4) y al fomento de la innovación (ODS 9), al proporcionar una herramienta de aprendizaje asequible y alineada con los desafíos del entorno educativo.

1.1 Descripción del Problema

La falta de recursos prácticos en los programas de educación superior, especialmente en áreas técnicas como la ingeniería mecatrónica, limita la comprensión y aplicación de conceptos teóricos, impactando negativamente el desempeño académico de los estudiantes. Según un estudio, el 68% de los estudiantes en carreras técnicas en América Latina reporta que la falta de acceso a herramientas prácticas dificulta su aprendizaje, especialmente en los primeros niveles de la carrera. Este problema afecta su capacidad para relacionar la teoría con aplicaciones reales, disminuyendo su confianza en las materias fundamentales [1].

La educación técnica y profesional (ETP) en América Latina enfrenta retos significativos, especialmente en la alineación entre las habilidades enseñadas y las demandas del mercado laboral. Estos desafíos incluyen asimetrías de información entre jóvenes, instituciones educativas y sectores productivos, así como la falta de evaluación sistemática de los programas educativos. Además, se destaca la necesidad de desarrollar habilidades tanto técnicas como socioemocionales para mejorar la empleabilidad y la relevancia de la formación en la región [2].

Un aspecto importante es el creciente acceso a la educación secundaria en la región, con una tasa de matrícula que pasó del 59% en 1990 al 75.6% en 2015. Sin embargo, persisten problemas en la calidad educativa, reflejados en bajos resultados en exámenes internacionales y una limitada incorporación de habilidades socioemocionales en los currículos [3].

1.2 Justificación del Problema

La falta de recursos prácticos en los primeros niveles de la carrera de ingeniería mecatrónica representa un desafío importante, ya que dificulta el aprendizaje significativo de los conceptos teóricos adquiridos en esta etapa crucial de formación académica. Esto puede generar frustración en los estudiantes y disminuir su interés en la carrera, afectando su desempeño y motivación.

Por esta razón, se busca abordar este problema proporcionando una herramienta didáctica y asequible que facilite la comprensión y aplicación de los conceptos teóricos de manera práctica. El presente proyecto tiene como objetivo el diseño y desarrollo de dicha herramienta, alineada con las necesidades educativas de los primeros niveles de la carrera de ingeniería mecatrónica.

Este proyecto contribuye con el ODS 4, ya que, al proporcionar una herramienta didáctica y de bajo costo, se contribuye al desarrollo de una educación asequible y de calidad. Además, al fomentar un aprendizaje práctico desde los primeros niveles, se favorece la formación de personas mejor preparadas para afrontar los retos del mercado laboral [4]. También se alinea con el ODS 9, al impulsar el desarrollo de competencias tecnológicas y aumentar el acceso a la tecnología desde el inicio de la carrera, lo que representa una innovación en educación. Al ser una solución inclusiva y replicable en otras instituciones educativas con limitaciones de presupuesto, fortalece la infraestructura educativa. Asimismo, puede motivar a

los estudiantes a interesarse por la robótica, incentivando el desarrollo de una nueva generación de profesionales preparados para la industria 4.0 [5].

Finalmente, aunque este proyecto está enfocado en la carrera de ingeniería mecatrónica, las materias y conceptos abordados en los primeros niveles suelen ser transversales a varias carreras de ingeniería, lo que hace que el proyecto sea escalable en su aplicación a diferentes contextos académicos.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Diseñar un robot cuadrúpedo que sirva como una herramienta didáctica y asequible para la comprensión de conceptos teóricos estudiados en los primeros niveles de la carrera de ingeniería mecatrónica.

1.3.2 Objetivos específicos

1. Diseñar las partes estructurales del robot cuadrúpedo mediante software CAD considerando su fabricación con tecnologías de impresión 3D, para que sea fácilmente replicable en instituciones de educación superior.
2. Simular el robot cuadrúpedo en Isaac Sim, integrado con ROS 2 Humble, para que los estudiantes cuenten con una plataforma virtual donde realicen pruebas y ajustes en un entorno controlado.
3. Elaborar manuales de ensamblaje y programación del robot cuadrúpedo que faciliten su uso y aceptación como recurso didáctico en entornos educativos.

1.4 Marco teórico

1.4.1 Falta de recursos prácticos en los primeros ciclos de la educación Técnica

La ausencia de recursos prácticos en la educación superior, especialmente en las carreras de ingeniería, constituye un desafío importante para el aprendizaje significativo. Según un análisis en *ResearchGate* sobre el impacto de la ausencia de prácticas profesionales, la falta de acceso a materiales y herramientas prácticas limita la capacidad de los estudiantes para relacionar los conceptos teóricos con su aplicación real, lo que puede llevar a una disminución en su interés y motivación académica [6].

Un estudio publicado en *SciELO México* revela que, en los primeros años de las carreras técnicas, los estudiantes enfrentan mayores dificultades debido a la complejidad de los contenidos teóricos y la falta de oportunidades para experimentar de manera práctica. Estas carencias dificultan la comprensión profunda de los conceptos, reduciendo la efectividad del aprendizaje [7].

Asimismo, en un análisis de *Redalyc*, se destaca que la implementación de recursos didácticos prácticos en el aula no solo mejora la comprensión conceptual, sino que también fomenta el compromiso y la confianza de los estudiantes. Las actividades experimentales, como el uso de prototipos y simuladores, han demostrado ser altamente efectivas para reforzar el aprendizaje en áreas técnicas [8].

En este contexto, el desarrollo de herramientas prácticas asequibles y accesibles se vuelve fundamental para abordar estas limitaciones. Proyectos como el robot cuadrúpedo propuesto ofrecen a los estudiantes la posibilidad de interactuar directamente con conceptos técnicos en un entorno práctico. Esto no solo facilita el aprendizaje, sino que también promueve el interés y la innovación tecnológica, alineándose con las necesidades de una educación técnica de calidad [9].

1.4.2 Aprendizaje Práctico en la Educación Superior

El aprendizaje práctico se ha convertido en un elemento esencial en la educación superior, especialmente en áreas técnicas como la ingeniería. La implementación de métodos de enseñanza que enfatizan la aplicación de conocimientos teóricos en contextos prácticos es fundamental para mejorar la retención estudiantil y el rendimiento académico. Según Prince y Felder (2020), el aprendizaje activo, que incluye actividades prácticas, fomenta una comprensión más profunda de los conceptos y permite a los estudiantes aplicar lo aprendido en situaciones del mundo real.

Los entornos de aprendizaje que ofrecen experiencias prácticas facilitan no solo la adquisición de conocimientos técnicos, sino también el desarrollo de habilidades blandas, como el trabajo en equipo y la resolución de problemas (Freeman et al., 2019). Un estudio realizado por Terenzini demuestra que los estudiantes que participan en experiencias de aprendizaje práctico, como laboratorios y proyectos de investigación, tienden a tener una mayor satisfacción académica y una mayor probabilidad de completar sus estudios [10].

El uso de plataformas educativas en robótica, como los kits de construcción y programación, ha demostrado ser efectivo para involucrar a los estudiantes en su aprendizaje. Sin embargo, aunque herramientas como Arduino y Raspberry Pi son útiles para introducir conceptos básicos, a menudo carecen de la complejidad necesaria para abordar temas de diseño mecánico y la integración de sistemas más avanzados (Brock et al., 2021). Por lo tanto, es crucial desarrollar soluciones que no solo introduzcan a los estudiantes en la robótica, sino que también les permitan explorar conceptos interdisciplinarios y aplicar sus conocimientos de manera efectiva.

El diseño y la implementación de un robot cuadrúpedo educativo se presenta como una alternativa innovadora para abordar esta necesidad. Este tipo de plataforma no solo enseña a los estudiantes sobre programación y electrónica, sino que también integra aspectos de mecánica y diseño, proporcionando una experiencia de aprendizaje holística. Según un estudio de García, los estudiantes que interactúan con robots educativos muestran una mayor motivación y una mejora en su comprensión de los conceptos teóricos [11].

Además, la incorporación de tecnologías como la simulación y la manufactura aditiva en el proceso educativo permite a los estudiantes visualizar y experimentar con el diseño y la construcción de sus proyectos, lo que resulta en una comprensión más completa y aplicada de los contenidos. Esto, a su vez, se alinea con el Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) 4, que busca garantizar una educación inclusiva y equitativa de calidad y promover oportunidades de aprendizaje durante toda la vida para todos [12].

1.4.3 Importancia de la Robótica Educativa

La robótica educativa ha emergido como una herramienta poderosa en el contexto de la enseñanza y el aprendizaje, especialmente en disciplinas relacionadas con la ingeniería y la tecnología. Su implementación en el aula permite a los estudiantes no solo adquirir conocimientos teóricos, sino también aplicar estos conceptos de manera práctica, lo cual es esencial para fomentar el aprendizaje significativo y mejorar la retención de estudiantes en carreras técnicas.

Un estudio de Sutherland y Leland destaca que la robótica educativa fomenta el interés de los estudiantes en disciplinas técnicas al permitirles participar activamente en su proceso de aprendizaje [13]. Al trabajar con robots, los estudiantes desarrollan habilidades críticas como el pensamiento lógico, la resolución de problemas y la creatividad, que son fundamentales para el

éxito en la ingeniería. La investigación de Yilmaz y Kocak también indica que el aprendizaje basado en robótica puede aumentar la motivación de los estudiantes, reduciendo así las tasas de deserción en programas académicos [14].

Además, la robótica educativa proporciona un contexto en el cual los estudiantes pueden ver la relevancia de los conceptos teóricos que aprenden. Según un estudio de Binkley et al. (2019), los estudiantes que participan en actividades de robótica son más propensos a entender la aplicación práctica de las matemáticas y las ciencias, lo que a su vez mejora su rendimiento académico en estas áreas. La capacidad de integrar teoría y práctica a través de proyectos de robótica permite a los estudiantes conectar sus aprendizajes con el mundo real, lo que es crucial para su desarrollo profesional.

La versatilidad de la robótica educativa también permite la inclusión de diferentes enfoques de aprendizaje, como el aprendizaje colaborativo y la gamificación, que han demostrado ser efectivos en la enseñanza. Un análisis realizado por Catalano y Castriotta muestra que las experiencias de aprendizaje que incorporan elementos de juego y colaboración en la robótica aumentan la participación y el compromiso de los estudiantes, aspectos que son vitales para mantener su interés a lo largo de sus estudios [15].

Por lo tanto, la implementación de un robot cuadrúpedo educativo no solo proporciona una herramienta para el aprendizaje práctico, sino que también crea un entorno en el que los estudiantes pueden experimentar, innovar y aplicar sus conocimientos de manera efectiva. Este enfoque multidimensional en la educación no solo contribuye a una comprensión más profunda de los conceptos de ingeniería, sino que también fortalece la preparación de los estudiantes para el futuro laboral, alineándose con los ODS 4 y 9, que buscan mejorar la calidad de la educación y fomentar la innovación.

1.4.4 Estudio del Robot Cuadrúpedo Educativo: Diseño, Algoritmos y Tecnologías

La implementación de un robot cuadrúpedo educativo presenta una serie de oportunidades para explorar conceptos avanzados en diseño mecánico, algoritmos de control y programación en entornos de simulación. Este enfoque no solo proporciona a los estudiantes una plataforma práctica para aplicar conocimientos teóricos, sino que también les introduce en tecnologías y metodologías utilizadas en la robótica moderna.

1.4.4.1 Diseño Mecánico de Robots Cuadrúpedos

El diseño mecánico de un robot cuadrúpedo debe considerar aspectos fundamentales como la estabilidad, la movilidad y la versatilidad en el entorno en el que se va a operar. Existen varios modelos de robots cuadrúpedos en la industria, como el Cheetah de Boston Dynamics que puede apreciar en la **Figura 1.2** y el Spot que se observa en la **Figura 1.1**, que son reconocidos por su capacidad de moverse eficientemente en terrenos irregulares y su diseño optimizado para el equilibrio. Según Geyer et al. (2021), los principios de diseño que se aplican en estos robots incluyen el análisis de la cinemática y la dinámica del movimiento, así como el uso de materiales ligeros pero resistentes para maximizar la eficiencia energética y la agilidad.

Figura 1.1

Spot de Boston Dynamics [16]



Figura 1.2

Cheetah de Boston Dynamics [17]



1.4.4.2 Algoritmos de Control

El control de robots cuadrúpedos implica la implementación de algoritmos complejos que permiten la locomoción y la interacción con el entorno. Los algoritmos de control, como los que se utilizan en sistemas de control adaptativo y de retroalimentación, son cruciales para lograr un movimiento suave y estable. Un estudio de Kanoulas et al. (2022) destaca que el uso de modelos predictivos en el control de locomoción puede mejorar significativamente la eficiencia del movimiento y la respuesta del robot a perturbaciones externas.

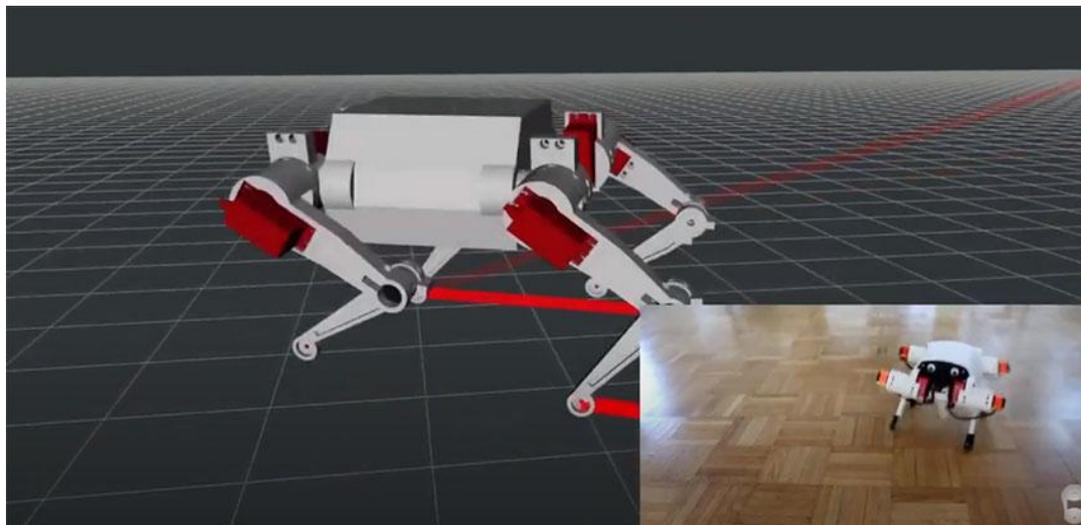
1.4.4.3 Uso de ROS y Gazebo

La utilización de ROS (Robot Operating System) y Gazebo como herramientas de desarrollo y simulación es esencial en la educación en robótica. ROS proporciona un marco flexible para construir y programar robots, permitiendo la integración de diferentes componentes de hardware y software. Gazebo, por otro lado, permite la simulación realista de robots en entornos virtuales, lo que es fundamental para el desarrollo y prueba de algoritmos sin la necesidad de un hardware físico. Según el estudio de Faulwasser et al. (2021), el uso de simulaciones en Gazebo facilita la validación de estrategias de control y el ajuste fino de

parámetros antes de la implementación en el robot físico. En la **Figura 1.3** se muestra un robot cuadrúpedo simulado en el entorno Gazebo.

Figura 1.3

Robot cuadrúpedo simulado en Gazebo [18]



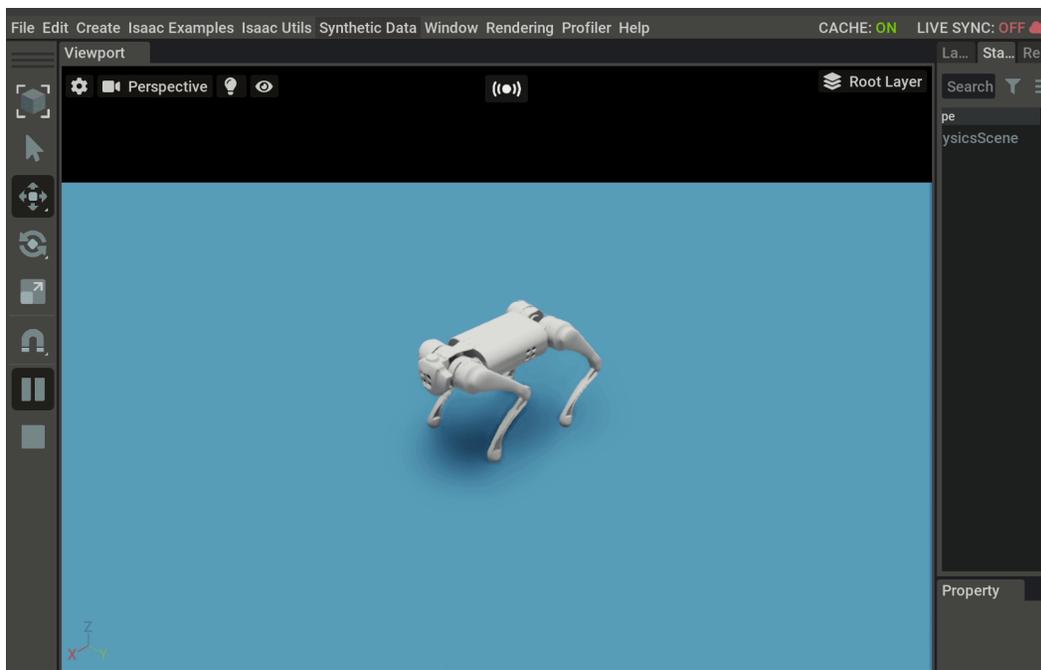
1.4.4.4 Isaac Sim

Isaac Sim, desarrollado por NVIDIA, es una plataforma avanzada de simulación basada en la tecnología Omniverse que permite diseñar, probar y validar robots en entornos virtuales altamente realistas. Ofrece herramientas para simular física compleja, sensores, y comportamientos de robots, facilitando el desarrollo de sistemas autónomos sin los riesgos y costos asociados con pruebas en el mundo real. Gracias a su compatibilidad con ROS (Robot Operating System), Isaac Sim permite integrar simulaciones con flujos de trabajo robóticos tradicionales, además de aprovechar capacidades de inteligencia artificial mediante su aceleración en GPUs, lo que lo convierte en una solución ideal para entrenar modelos de aprendizaje automático, evaluar algoritmos de navegación y optimizar diseños antes de su

implementación física [19]. En la **Figura 1.4** puede observar la simulación en Isaac Sim del robot cuadrúpedo Unitree Go1 en un terreno plano.

Figura 1.4

Robot cuadrúpedo simulado en Isaac Sim [20]



1.4.4.5 Impresión 3D en la Fabricación de Robots

La impresión 3D ha revolucionado la forma en que se diseñan y fabrican los componentes de los robots. Esta tecnología permite crear prototipos rápidamente y realizar ajustes en los diseños con facilidad. La capacidad de personalizar componentes y producir piezas complejas con geometrías optimizadas ha hecho que la impresión 3D sea una herramienta indispensable en el desarrollo de robots educativos. La impresión 3D no solo reduce los costos de producción, sino que también acelera el proceso de diseño y desarrollo, lo que resulta en una mayor capacidad para iterar y mejorar los diseños de los robots [21].

1.4.4.6 Integración de Sistemas de Control

La integración de sistemas de control en un robot cuadrúpedo educativo implica combinar sensores, actuadores y software para lograr un funcionamiento coherente. Esto incluye el uso de técnicas como el control PID, el control basado en modelos y la inteligencia artificial para mejorar la toma de decisiones del robot. La investigación de Alif et al. (2023) indica que la implementación de técnicas de control avanzadas en robots educativos no solo mejora su rendimiento, sino que también proporciona a los estudiantes experiencias prácticas que son esenciales para su formación en ingeniería.

1.5 Estado del arte

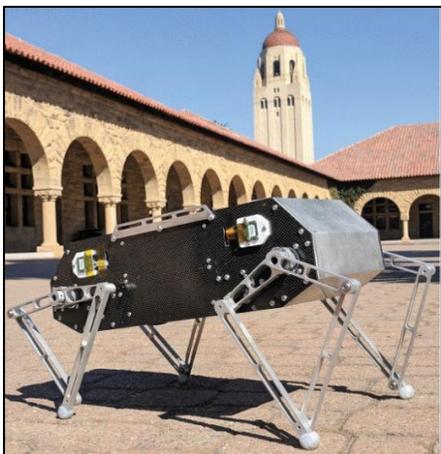
Universidades reconocidas han demostrado que los robots cuadrúpedos son un excelente material didáctico para ayudar a los estudiantes principiantes a aprender y desarrollar su creatividad [22].

1.5.1 *Stanford Doggo*

En la **Figura 1.5** se muestra al robot Stanford Doggo un cuadrúpedo desarrollado por la universidad de Stanford. Se ofrece como una plataforma open-source tanto de hardware como de software, que se puede replicar por menos de \$3000 usando solo herramientas manuales para su manufactura y ensamblaje. Con este robot buscan incentivar la educación e investigación de robots con patas [23].

Figura 1.5

Robot cuadrúpedo Stanford Doggo [23]



1.5.2 PADWQ

En la **Figura 1.6** se muestra al robot PADWQ que es un cuadrúpedo open-source, con un costo total de aproximadamente \$7700. Se caracteriza por su construcción con componentes comerciales y partes estructurales impresas en 3D, lo que permite una rápida réplica del proyecto. Con este proyecto se busca poner al alcance de investigadores y estudiantes un robot ágil y personalizable [24].

Figura 1.6

Robot PADWQ [24]



Capítulo 2

2. Metodología.

En este capítulo se describen los pasos que se llevaron a cabo para el cumplimiento de los objetivos. Se detallan desde los requerimientos del cliente, las posibles alternativas de solución hasta los parámetros de diseño mecánico, electrónico, programación y control.

2.1 Requerimientos de diseño

En esta sección se detallan los requisitos técnicos, funcionales y educativos proporcionados por el cliente que guiaron el desarrollo del robot cuadrúpedo educativo. Estos requerimientos se muestran en la **Tabla 2.1**.

Tabla 2.1

Requerimientos de diseño

Tipo de requerimiento	Detalles del Requerimiento
Mecánico	Configuración cuadrúpeda con patas articuladas para marcha y movimientos básicos. Materiales accesibles y económicos. Tener tres servomotores por pierna y una baja inercia.
Electrónico	Uso de servomotores tipo bus de alto torque. Uso de una fuente de alimentación interna. El cableado externo sea el mínimo posible.
Programación	Uso de Python como lenguaje de programación. Para la simulación uso de ROS 2 integrado con Gazebo.
Control	En la marcha de trote implementar algún tipo de control para asegurar la estabilidad del robot.

Requerimientos Técnicos detallados:

Estructura Mecánica

- El robot debe tener una configuración cuadrúpeda con cuatro patas articuladas, capaces de movimientos básicos como marcha y pasos básicos.
- Materiales ligeros y resistentes, priorizando la impresión 3d en PLA, PTG y TPU, por su costo accesible y sostenibilidad.
- Dimensiones compactas para facilitar su uso en entornos académicos.

Componentes electrónicos

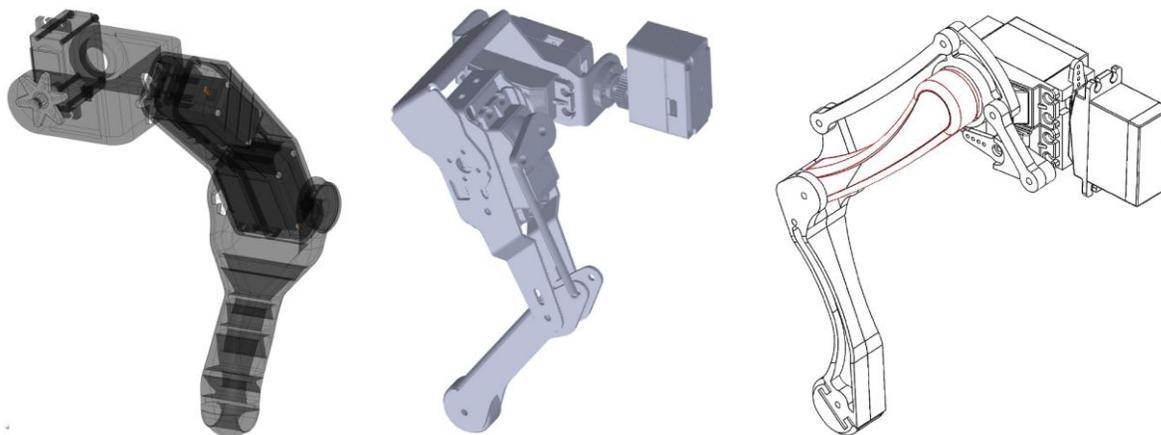
- Controlador accesible, de fácil uso, que tenga respaldo en cuanto a información.
- Servomotores altamente precisos.

2.2 Selección de alternativas de solución

En base a lo expuesto en el capítulo 1, se muestran a continuación, tres alternativas de solución, que puede apreciar en la **Figura 2.1**, que se centran en la disposición de los tres servomotores que conforman cada pierna del robot cuadrúpeda.

Figura 2.1

Primera, segunda y tercera alternativa de solución



- **Alternativa uno**

Los servomotores se ubican directamente en la articulación a mover.

- **Alternativa dos**

Dos servomotores se ubican en el hombro y se conectan directamente a la articulación que deben mover, mientras que el tercero se ubica en la extremidad superior y mueve la extremidad inferior por medio de un mecanismo.

- **Alternativa tres**

Tres servomotores se ubican en el hombro, dos conectados directamente a la articulación que deben mover y el tercero mueve la extremidad inferior por medio de un mecanismo.

Cada alternativa fue evaluada con base en diversos criterios que permitieron cuantificar y determinar la solución más viable en función del problema planteado. Estos criterios se presentan en la **Tabla 2.2** y se describen a continuación.

- **Estabilidad:** Capacidad del robot para caminar o realizar movimientos sin perder el equilibrio, aumentando su confiabilidad para realizar experimentos didácticos y evitar frustraciones en el aprendizaje.
- **Baja inercia:** La distribución de los motores debe minimizar la inercia, lo que reduce el torque necesario y prolongando la vida útil de los servomotores. Además, permite realizar movimientos más ágiles y precisos, esenciales para ilustrar conceptos como la dinámica.
- **Eficiencia energética:** Una distribución adecuada de los motores contribuye al ahorro energético al optimizar el torque requerido por cada motor y reducir las pérdidas asociadas al cableado extenso. Esto resulta crucial en entornos educativos, donde las sesiones prácticas suelen ser prolongadas y la duración de la batería es fundamental.

- **Optimización del espacio:** Un diseño compacto facilita la manipulación del robot por estudiantes y profesores, además de adaptarse mejor a las limitaciones de espacio en un salón de clases.
- **Bajo costo:** La distribución óptima de los motores reducirá el material con el que se fabrican las partes estructurales disminuyendo el costo. Esto contribuirá a la accesibilidad por parte de instituciones educativas con recursos limitados.

Tabla 2.2*Criterios de selección*

Criterio	Ranking	Peso relativo	Porcentaje
Estabilidad	1	3.8	38 %
Baja inercia	2	2.8	28 %
Eficiencia energética	3	1.9	19 %
Optimización del espacio	4	0.9	9 %
Bajo costo	5	0.6	6 %
Peso total		10	100 %

Se analizó cada alternativa de solución en base a los criterios establecidos, tal como se observa en la **Tabla 2.3**. Se obtuvo que la alternativa tres es la más viable en relación con la problemática planteada, superando en cada criterio al resto de alternativas de solución.

Tabla 2.3*Matriz de decisión*

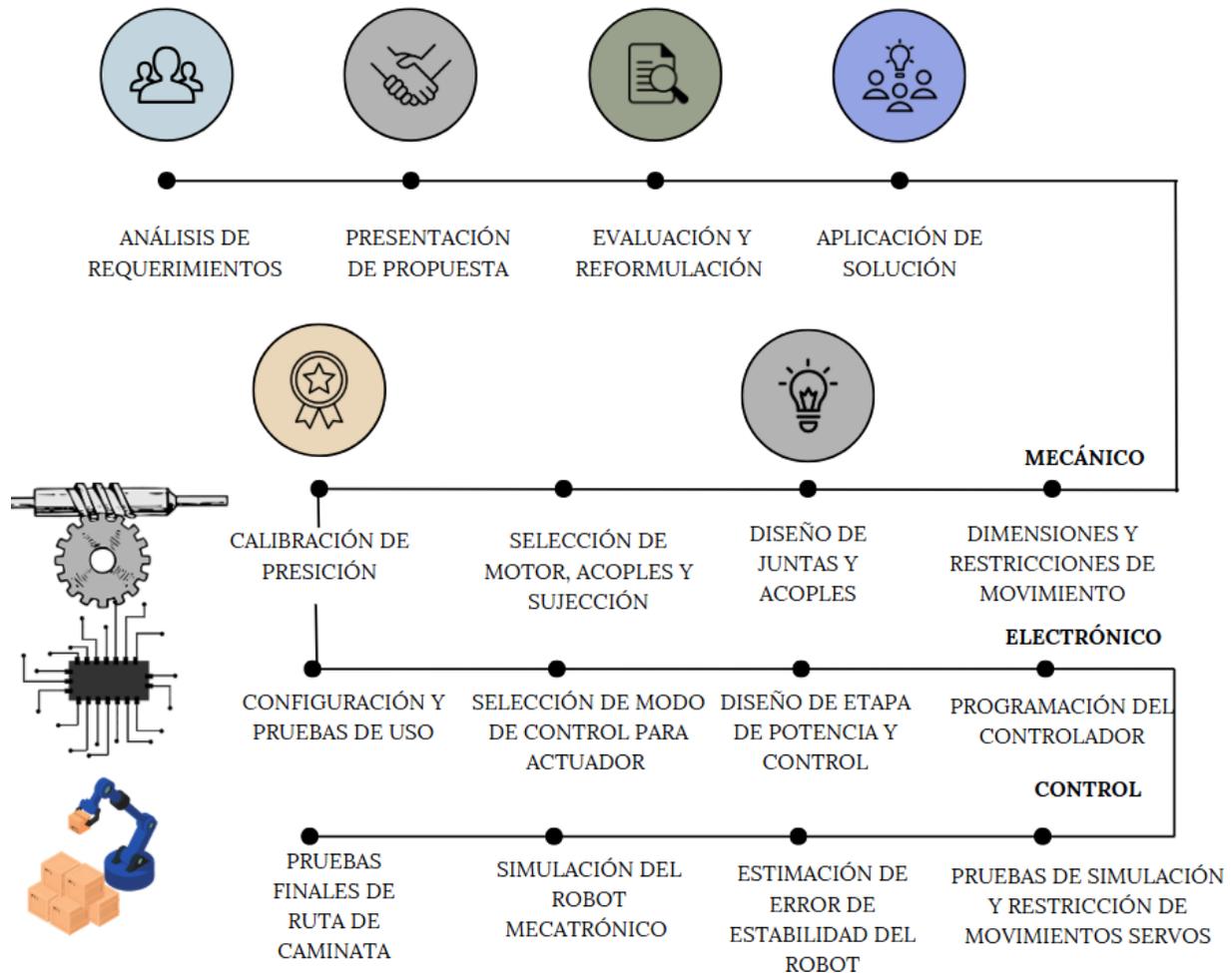
	Criterio 1	Criterio 2	Criterio 3	Criterio 4	Criterio 5	Total
Descripción	Estabilidad	Baja inercia	Eficiencia energética	Optimización del espacio	Bajo costo	
Peso	3.8	2.8	1.9	0.9	0.6	10
Alternativa 1	2	1	1	2	3	1.59
Alternativa 2	5	6	4	3	4	4.85
Alternativa 3	8	9	7	5	6	7.7

2.3 Proceso de diseño

A continuación, se presenta el proceso de diseño del robot cuadrúpedo que se ilustra en la **Figura 2.2**, el cual incluye tres etapas principales: diseño mecánico, diseño electrónico y diseño de control. Cada etapa ha sido desarrollada con un enfoque interdisciplinario para garantizar la funcionalidad, estabilidad y cumplimiento de los objetivos educativos del proyecto.

Figura 2.2

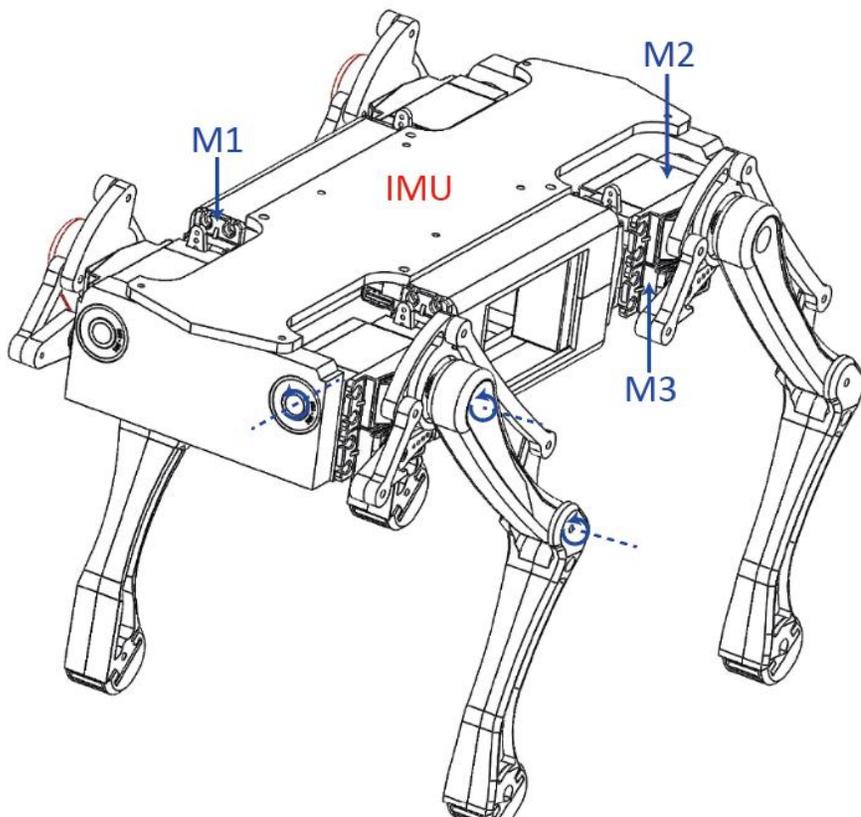
Metodología de diseño



2.4 Diseño conceptual

Una versión preliminar de la solución propuesta se presenta en la

Figura 2.3, donde se destacan los componentes principales que la conforman. Entre ellos, se incluye una unidad de medición inercial (IMU) para registrar la orientación del robot en términos de roll, pitch y yaw. Asimismo, se indican los ejes de rotación de las articulaciones de una pierna.

Figura 2.3*Diseño conceptual*

La configuración del robot cuadrúpedo presentada previamente refleja tanto los requerimientos del cliente como la solución seleccionada. Una distribución adecuada de los servomotores, como se indicó anteriormente, reduce la inercia, mejora la estabilidad y aumenta la eficiencia energética. En este diseño, los servomotores que operan cada pierna están estratégicamente concentrados en el eslabón del hombro, contribuyendo directamente a estas mejoras.

El diseño planteado proporciona a cada pierna 3 grados de libertad a través del uso de servomotores (M1, M2, M3) convirtiendo a cada articulación del robot en tipo revoluta. Además,

cada servomotor brinda retroalimentación de la posición angular. La rotación del motor M3 se transmite a el eslabón en contacto con el suelo por medio de un sistema de barras.

2.5 Parámetros de diseño mecánico

Se consideraron diversas restricciones mecánicas, se llevaron a cabo simulaciones de movimiento y cálculos detallados para dimensionar cada componente. Todo esto se realizó con el objetivo de desarrollar un diseño final que cumpla con los requerimientos del cliente y esté alineado con los estándares de ingeniería.

2.5.1 Restricciones de diseño en cuanto a rangos de movimiento

El diseño de cada pierna es el mismo desde la base hasta el efector final. Por esta razón, los servomotores se clasifican como M1, M2 y M3, según la articulación a la que proporcionan movimiento y el eslabón correspondiente que rotan.

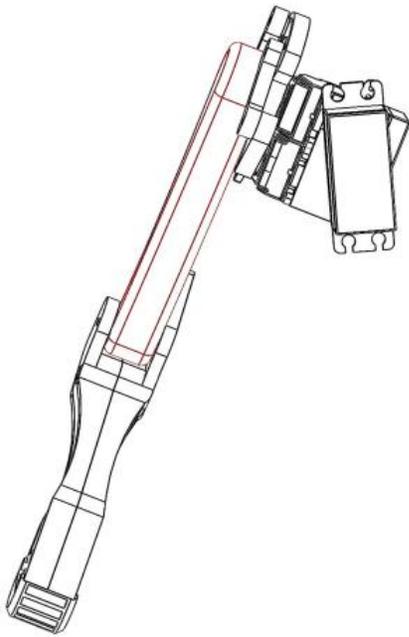
El servo motor M1 controla la rotación del eslabón del hombro, la rotación se produce a lo largo de un eje perpendicular al plano YZ y el rango de rotación es de 45° , puede apreciar su movimiento en la **Figura 2.4** y **Figura 2.5**.

El servo motor M2 controla la rotación de la extremidad superior de la pierna, la rotación se produce a lo largo de un eje perpendicular al plano XZ y el rango de rotación es de 85° , puede apreciar su movimiento en la **Figura 2.6**.

El servo motor M3 controla la rotación del eslabón en contacto con el suelo, la rotación se produce a lo largo de un eje perpendicular al plano XZ y el rango de rotación es de 30° , puede apreciar su movimiento en la **Figura 2.7**.

Figura 2.4

Rotación en sentido antihorario para M1

**Figura 2.5**

Rotación en sentido horario para M1

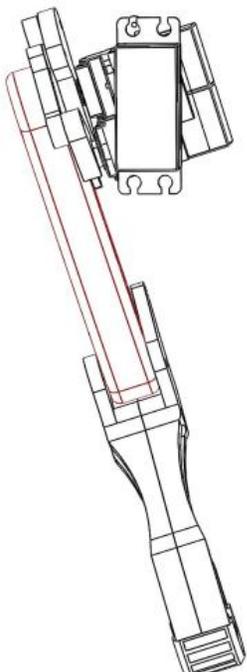
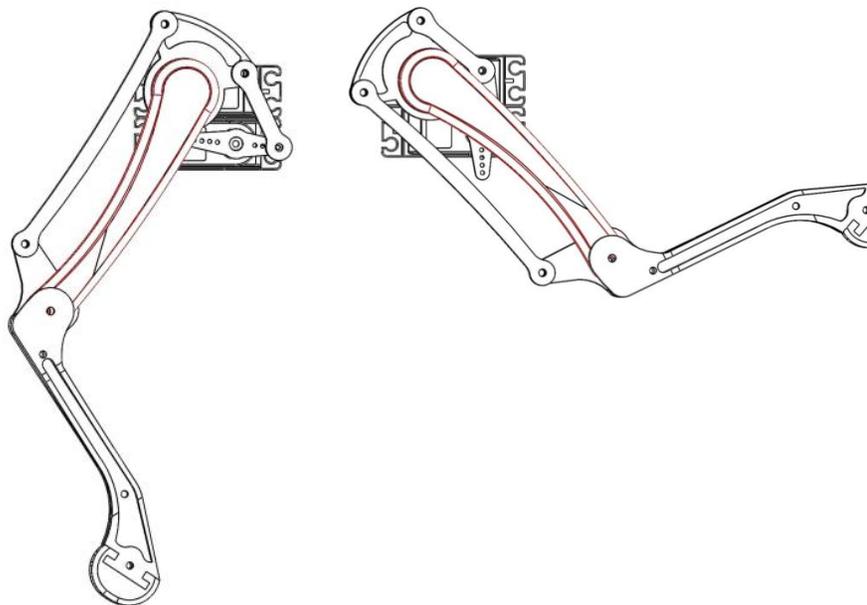
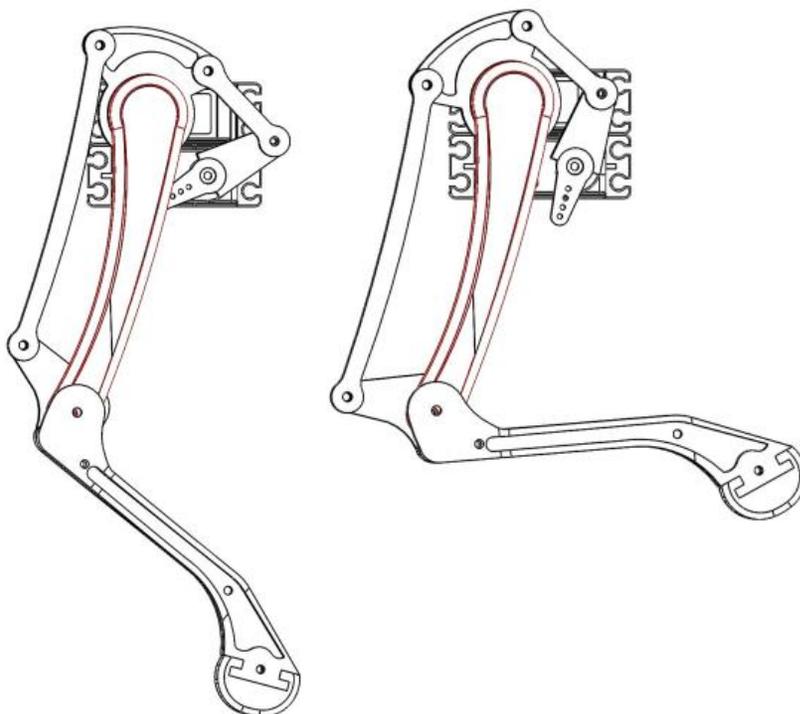


Figura 2.6

Rango de movimiento para servomotor M2

**Figura 2.7**

Rango de movimiento del servomotor M3



En la **Tabla 2.4** se resumen los rangos de movimiento para cada servomotor que conforma la pierna del robot cuadrúpedo.

Tabla 2.4

Rango de movimiento de los actuadores del robot

Servomotor	Ranking
M1	[0°, 90°]
M2	[0°, 65°]
M3	[0°, 45°]

2.5.2 Selección de motores

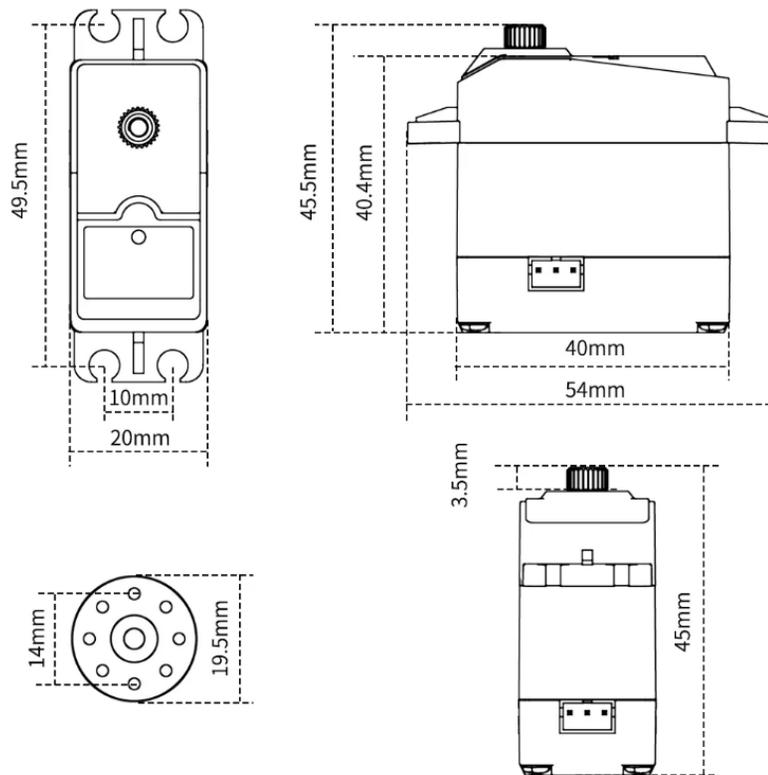
La selección del motor se basó en las dimensiones y torque requerido. Además, se tomaron en cuenta requerimientos del cliente como el uso de servomotores de tipo bus. Se utilizó el catálogo de Hiwonder una compañía que ofrece una variedad de servos tipo bus con diferentes torques, velocidades y dimensiones.

Dimensiones del motor

Los tres servomotores que controlan cada pierna están ubicados en la articulación del hombro, lo que significa que el torso del robot alberga un total de doce servomotores. Dado que el diseño del robot está pensado para su uso en un salón de clases, debe ser compacto. Bajo esta premisa y considerando las características del diseño mecánico, se identificó como área crítica la ubicación del motor que conecta el torso con la pierna. Este motor debe tener dimensiones iguales o menores de 53 mm de largo y 21 mm de ancho. Lo cual cumplen los servos bus ofrecidos por Hiwonder como se muestra en la **Figura 2.8**.

Figura 2.8

Dimensiones de servo bus Hiwonder [25]



Torque del motor

Otro aspecto importante que considerar es el torque necesario del servomotor que se calcula utilizando la ecuación:

$$\text{Torque} = \text{Fuerza} \times \text{Brazo de palanca}$$

Donde la fuerza se estima considerando el peso de las extremidades del robot y las cargas dinámicas durante el movimiento.

Asumiendo los siguientes valores:

Peso de la pierna = 0.3 kg (considerando el peso del material PLA a 85%).

Aceleración gravitatoria (g) = 9.81 m/s².

Longitud efectiva = 0.2 m (convertida a metros).

La fuerza debido al peso se calcula como:

$$\text{Fuerza} = \text{Peso} \times g = 0.3 \times 9.81 = 2.943 \text{ N.}$$

Por lo tanto, el torque requerido es:

$$\text{Torque} = \text{Fuerza} \times \text{Brazo de palanca} = 2.943 \times 0.2 = 0.5886 \text{ Nm.}$$

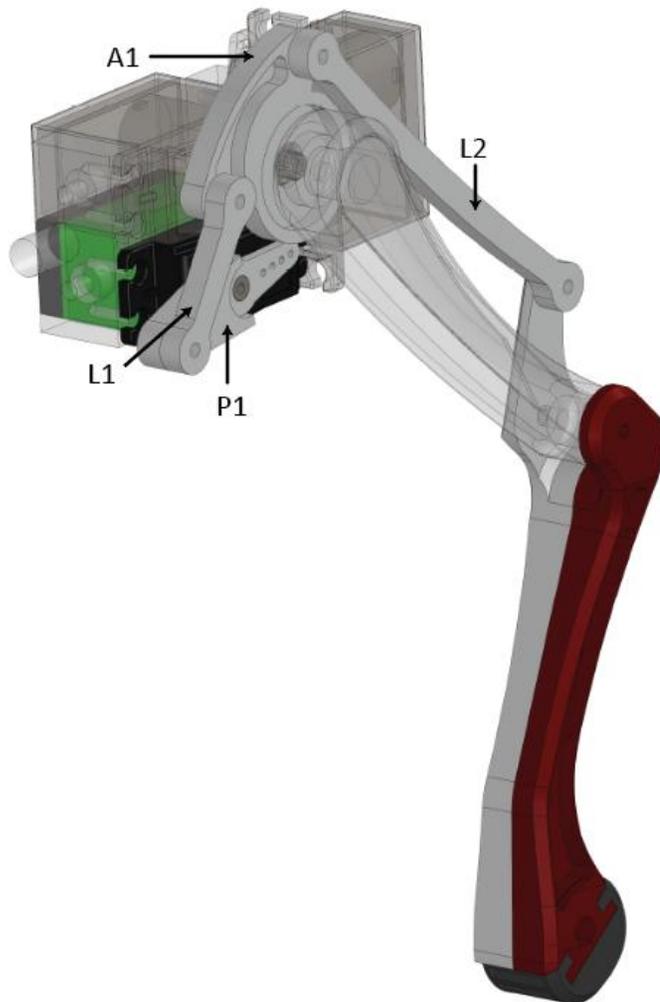
El valor calculado asegurara que el servomotor seleccionado tiene la capacidad suficiente para operar dentro de los límites requeridos. Además, se considera un margen de seguridad adicional y el requerimiento del cliente de usar un torque mayor para futuras expansiones en la plataforma robótica.

2.5.3 Mecanismo para transmisión de movimiento

Como se mencionó los tres servos motores que conforman la pierna, están ubicados en el hombro. Dos de ellos se conectan directamente a la articulación correspondiente permitiendo su movimiento. Sin embargo, el motor M3 que mueve el eslabón en contacto con el suelo requiere de un medio de transmisión de movimiento. Por tal motivo, se diseñó el mecanismo que puede apreciar en la **Figura 2.9**.

Figura 2.9

Mecanismo para transmisión de movimiento



El mecanismo de transmisión consta de un sistema de barras acopladas que transforman el movimiento rotatorio del servomotor en movimiento lineal para el control de las rodillas. El diseño incluye los siguientes elementos: la paleta del servomotor (P1), la barra de apoyo (L1), el acople rotacional (A1) y la barra paralela (L2). Este mecanismo permite mantener el peso distribuido uniformemente mientras asegura una transmisión eficiente del movimiento sin pérdida de estabilidad.

La barra L2, al ser paralela a P1, replica el movimiento rotacional del servomotor, mientras que A1 garantiza una correcta conversión del movimiento circular en lineal. El uso de PLA como material asegura un diseño ligero y resistente, capaz de soportar las fuerzas generadas durante el movimiento del robot.

Se calcula la longitud efectiva del sistema considerando el brazo de palanca creado por las barras:

$$\text{Longitud efectiva} = L1 + A1 + L2$$

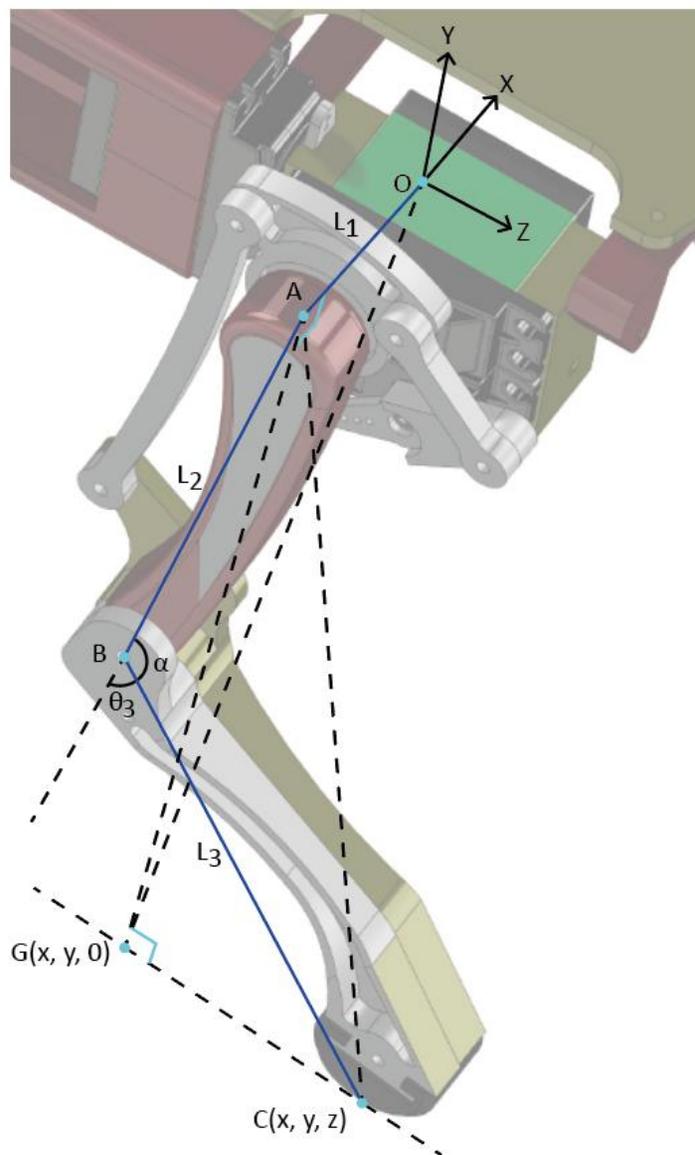
Sustituyendo los valores:

$$\text{Longitud efectiva} = 4 \text{ cm} + 4.5 \text{ cm} + 11.5 \text{ cm} = 20 \text{ cm}.$$

Esta longitud asegura una transmisión eficiente del movimiento mientras se mantiene la integridad estructural del sistema.

2.5.4 Análisis de cinemática inversa

Cada pierna del robot cuadrúpedo cuenta con 3 articulaciones de tipo revoluta. Para controlar su movimiento fue necesario calcular los ángulos de cada articulación en función de la posición deseada del efector final, que es el punto de contacto de la pierna con el suelo. Este cálculo, conocido como cinemática inversa se realizó de forma geométrica. Dado que las 4 piernas son iguales basta con realizar el análisis para una sola de ellas. En este caso se consideró la pierna frontal derecha y su geometría que se describe en la **Figura 2.10**.

Figura 2.10*Geometría de la pierna frontal derecha*

Para calcular el ángulo θ_1 observe la

Figura 2.11 que muestra una vista frontal de la pierna derecha, este ángulo rota la pierna alrededor del eje Z indicado.

$$OG^2 = x^2 + y^2$$

$$OG^2 = OA^2 + AG^2$$

$$x^2 + y^2 = L_1^2 + AG^2$$

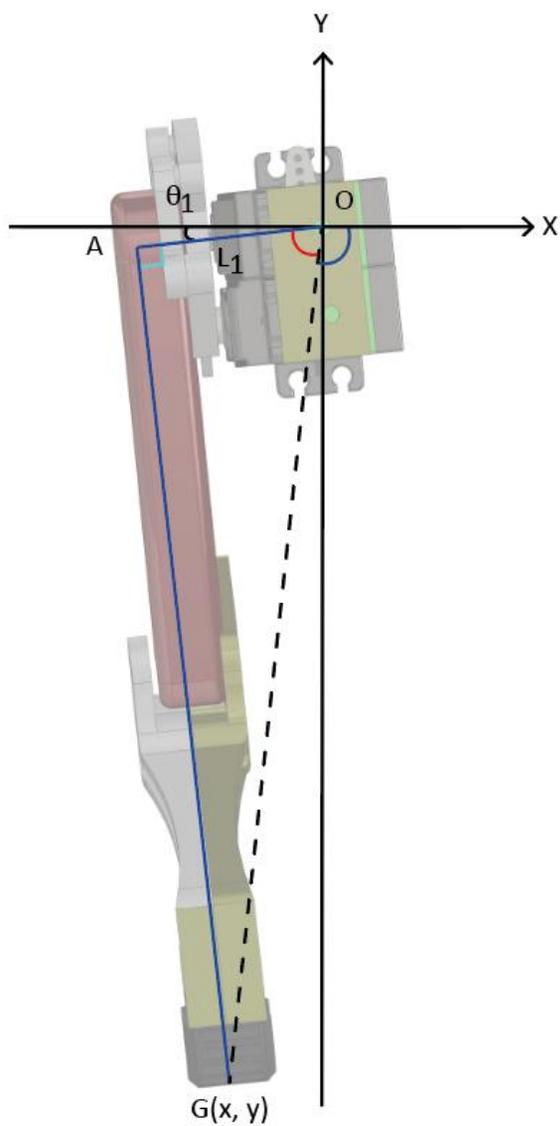
$$AG = \sqrt{x^2 + y^2 - L_1^2}$$

$$AC = \sqrt{AG^2 + GC^2}$$

$$\theta_1 = \frac{\pi}{2} - \left(\text{atan}\left(\frac{x}{y}\right) + \text{atan}\left(\frac{AG}{OA}\right) \right)$$

Figura 2.11

Vista frontal de la pierna frontal derecha



Para calcular el ángulo θ_3 se utilizó una vista lateral tal como se muestra en la **Figura**

2.12. Dicho ángulo rota el eslabón L3 en un eje perpendicular al plano YZ.

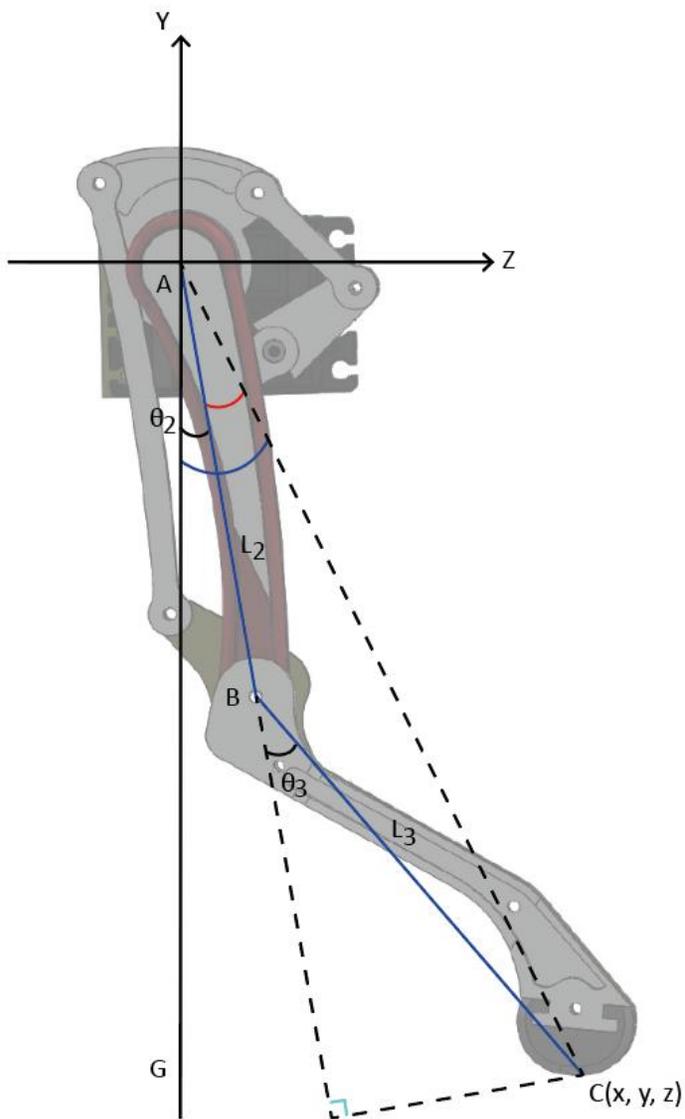
$$AC^2 = L_2^2 + L_3^2 - 2L_2L_3 \cos(\alpha)$$

$$\alpha = \arccos\left(-\frac{AC^2 - L_2^2 - L_3^2}{2L_2L_3}\right)$$

$$\theta_3 = \pi - \alpha$$

Figura 2.12

Vista lateral de la pierna frontal derecha



Por último, para calcular el ángulo θ_2 observe nuevamente la **Figura 2.12**.

$$\theta_2 = \text{atan}\left(\frac{GC}{AG}\right) - \text{atan}\left(\frac{L_3 \sin \theta_3}{L_2 + L_3 \cos \theta_3}\right)$$

2.5.5 Especificación del material de construcción

El diseño del robot cuadrúpedo se basa en la manufactura aditiva como método principal de fabricación. Se utilizó PLA (Poliácido Láctico) como material principal para las piezas estructurales del robot. Este material fue impreso con un porcentaje de **relleno del 85%**, asegurando una alta resistencia mecánica y durabilidad, al mismo tiempo que se mantiene la ligereza de las piezas. Para las "patas" del robot, que están en contacto directo con las superficies, se empleó TPU (Poliuretano Termoplástico). Este material flexible y antideslizante mejora la estabilidad y evita el derrape, adaptándose a diferentes tipos de terreno.

2.6 Parámetros de diseño electrónico

Los parámetros electrónicos considerados en el diseño del robot cuadrúpedo son: posición angular, torque, corriente de arranque en los actuadores. También, se desea conocer la aceleración y orientación del cuerpo (base link) del robot.

2.6.1 Selección de sensores

Los servomotores cuentan con una serie de sensores integrados, estos proporcionan retroalimentación de posición, temperatura y voltaje. Además, cuentan con una serie de protecciones sobre corriente y sobre temperaturas.

El controlador incluye una unidad de medición inercial (IMU) que permitirá conocer la aceleración y orientación angular en los tres ejes del cuerpo del robot.

2.6.2 Selección de actuadores

Los actuadores seleccionados son servomotores de tipo bus de acuerdo con los requerimientos del cliente. Su función radica en el movimiento de las articulaciones del robot cuadrúpedo. En la **Tabla 2.5** se resumen las principales características de estos servos bus.

Tabla 2.5

Características del servomotor HTS-35H

Figura	Características
	Voltaje de alimentación de 9V a 12.6V
	Velocidad de rotación 0.18sec/60°
	Torque máximo de 35kgf cm
	Rango de 0 a 240 grados
	Consumo de corriente 100 mA
	Corriente de arranque de 3A
	Resolución de 0.2°
	Baudios 115200

2.6.3 Selección de controlador

Se evaluaron tres opciones de controladores proporcionadas por el cliente: ESP32, Raspberry Pi 4 Model B y Jetson Nano. El análisis se basó en los requerimientos específicos del proyecto, incluyendo el uso de ROS 2 Humble como arquitectura de software, la necesidad de

que el controlador disponga de puertos compatibles con servo bus o permita la integración de placas de expansión que los incluyan.

En la **Tabla 2.6** se analizó cada controlador en función de los requisitos mencionados. Tras el análisis, se determinó que la Raspberry Pi 4B es la opción más adecuada, ya que cumple con los requerimientos técnicos y ofrece un equilibrio óptimo entre costo, consumo de energía y prestaciones. Este dispositivo garantiza el funcionamiento correcto del robot cuadrúpedo y brinda la posibilidad de ampliar sus capacidades para abordar aplicaciones académicas más avanzadas en el futuro.

Tabla 2.6

Comparativa de controladores

Controlador	Soporta ROS 2	Puertos servo bus serial	Consumo de corriente	Costo
ESP 32	No	Si	Cada pin de 30 – 50 mA	\$18,90
Raspberry Pi 4B	Si	Si	0.8 – 1.2 A	\$94,99
Jetson Nano	Si	Si	Alrededor de 2A	\$239,99

En la **Tabla 2.7** se presentan las principales características de la Raspberry Pi 4 Model B, que será utilizada como ordenador a bordo en el proyecto. Su función principal será ejecutar ROS 2 Humble, permitiendo que estudiantes y profesores puedan interactuar con el robot sin necesidad de una laptop de alta gama. Esto se logra mediante el procesamiento y control del robot desde la Raspberry Pi, aliviando la carga del dispositivo del usuario y garantizando que todas las funciones necesarias estén disponibles para una experiencia práctica completa.

Tabla 2.7*Características del controlador*

Figura	Características
 <p>A photograph of a Raspberry Pi 4 Model B single-board computer. The board is green and populated with various components including a Broadcom BCM2711 SoC, LPDDR4-3200 SDRAM, and various I/O ports like USB, HDMI, and Ethernet.</p>	CPU Broadcom BCM2711
	Quad-core Cortex-A72(ARM v8)
	64-bit SoC
	1.5GHz basic frequency
	GPU 600 MHz VideoCore VI
	Support OpenGL ES3.0
Memoria LPDDR4-3200 SDRAM	
Voltaje de funcionamiento 5V	

2.7 Parámetros de control**2.7.1 Selección de controlador para los servomotores**

Dado que el cliente requiere el uso de servos bus y que se ha seleccionado la Raspberry Pi 5 como ordenador a bordo, se hizo necesario elegir una placa de expansión adecuada. Esta placa tendrá como objetivo proporcionar la interfaz necesaria entre los servos bus y la Raspberry Pi 5, asegurando que se cuenten con los puertos adecuados para conectar los servos. Además, permitirá el control preciso de la posición angular de los servos, facilitando la ejecución de las tareas requeridas para el funcionamiento del robot.

Considerando lo anterior se encontró que la placa de expansión más adecuada es la Raspberry Pi 5 Expansion Board Model B de la compañía Hiwonder, cuyas características se resumen en la **Tabla 2.8**.

Tabla 2.8*Características de la placa de expansión*

Figura	Características
	Procesador Cortex-M3
	32-bit high-performance Arm chip
	Voltaje de funcionamiento 5 - 12V
	6 puertos para servo bus

2.8 Consumo de energía del robot y dimensionamiento de la batería

Para el consumo de energía del robot es importante aclarar que el conjunto de sensores mencionados previamente, ya se encuentran integrados dentro de los componentes que se muestran en la **Tabla 2.9**, donde se muestra el consumo de energía.

Tabla 2.9*Consumo de energía*

Tipo de sistema	Cantidad	Componente	Consumo de corriente [A]	Voltaje [V]	Potencia [W]	Potencia total [W]
Potencia	12	Servo bus	0.1	9.0	0.9	10.8
Control	1	Expansion Board	0.1	9.0	0.9	0.9
	1	Raspberry Pi 4B	1.0	5.0	5.0	5.0
					Total	16.7

Dado que la placa de expansión funciona con un voltaje de entrada de 5-12.6V, la batería puede ser de 2 o 3 celdas. Sin embargo, los servomotores funcionan de 9-12.6V, así que se usara una de 3 celdas.

Además, dado que el robot será utilizado en sesiones de clases con una duración de 60 a 90 minutos, se seleccionó la batería Rhino con una capacidad de 24.42Wh. Las características de esta batería se resumen en la **Tabla 2.10**. La autonomía que proporciona esta batería se calcula como:

$$\text{Duracion de la batería} = \frac{24.42Wh}{16.7W} = 87.7min$$

Tabla 2.10

Característica de la batería

Figura	Características
	Capacidad de 2200 mAh
	3 celdas
	Voltaje de 11.1V a 12.6V
	Constante de descarga 25C

Capítulo 3

3. Resultados y análisis

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en el desarrollo de la solución propuesta con su respectivo análisis. La solución propuesta engloba aspectos de diseño mecánico, diseño electrónico, sistema de control y una simulación. Adicionalmente, se realiza un análisis de costos del producto final.

3.1 Diseño mecánico

En la *¡Error! La autoreferencia al marcador no es válida.* puede apreciar una vista en perspectiva del diseño mecánico del robot cuadrúpedo. El diseño de partes mecánicas es fundamental para el funcionamiento del robot cuadrúpedo tanto por el movimiento articulado de las juntas como por el peso y material a usar. A continuación, se describe la solución bajo estos ejes mencionados.

Figura 3.1

Diseño 3D de robot cuadrúpedo con tres servomotores en cada hombro.



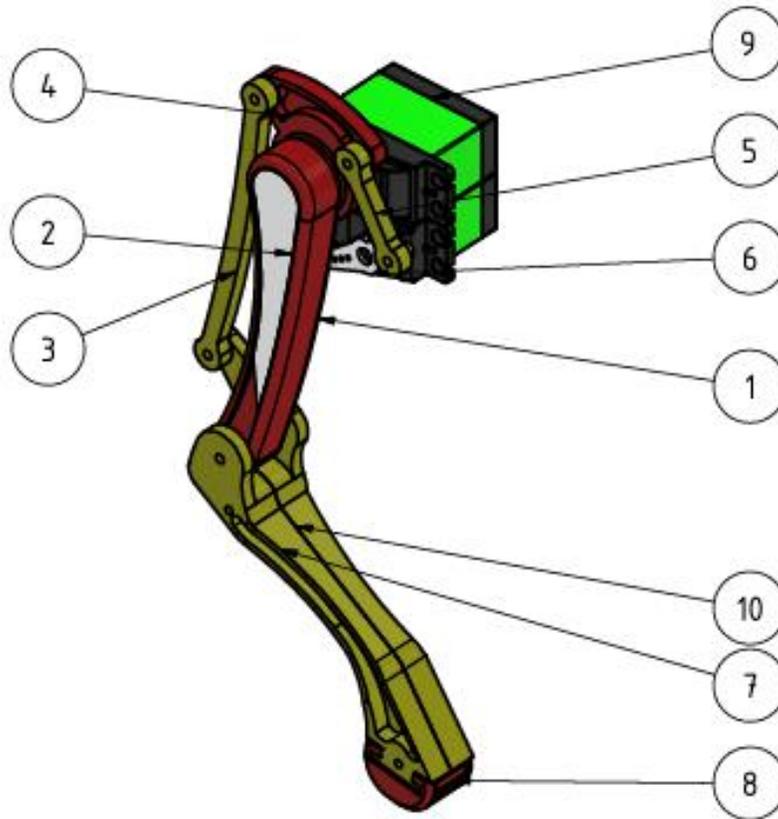
El robot cuenta con cuatro patas articuladas que respetan la distribución de tres servomotores seriales en el mismo ecosistema del hombro, el mismo que se observa en la **Figura 3.2**, además a modo de mostrar no solo la distribución sino también el listado de las piezas se adjunta el listado mismo del plano mecánico en la **Tabla 3.1**.

Para el armado se complementa con el dimensionamiento y para la fabricación con los planos los que indican medidas, espesores, volúmenes y formas en la que se debe fabricar (imprimir en 3D), esta información de planos se adjunta en el **apéndice B**, empezando por los ensamblajes y continuando por las partes del ensamble pierna, para finalizar con las partes del ensamble torso y total, cabe indicar que algunas partes como los servomotores son descargados de librerías oficiales de las marcas de estos actuadores.

Tabla 3.1

Listado de partes de la pierna

Elemento	Cantidad	Número de pieza
1	1	Muslo
2	1	Tapa muslo
3	1	Extensión pierna larga
4	1	Acople mecanismo pierna
5	1	Extensión pierna corta
6	1	Conector paleta servo
7	1	P1 pierna
8	1	Dedo
9	2	Bus servo Hiwonder 35Kg
10	1	P2 pierna

Figura 3.2*Partes de la pierna*

Con un sistema articulado de barras que se sujetan principalmente por acoples mecánicos propios de los servos (accesorios tipo paletas y discos), y las barras mediante tornillos, pernos y contratueras, el diseño de la pierna trata de seguir la morfología de un perro la cual ligeramente se encuentra desfasada hacia atrás (la rodilla del perro), como se observa en la **Figura 3.2**, el dedo del perro fue diseñado para que se acople a la pierna mediante unión permanente por soldadura en frío, este dedo está hecho en material flexible (TPU) con una resistencia mecánica a la tracción de 69 MPa y con una configuración de ranuras que asegure que el robot no resbale en su caminata. Es importante mencionar que el coeficiente de fricción del TPU dinámico es de 0.6,

recordemos aquí que un coeficiente de rozamiento alto implica que tiene una considerable resistencia a la superficie en contacto.

El material del que están hecha las piernas tanto como la estructura principal y los acoples del perro es en PLA con una resistencia mecánica a la tracción de 3309 MPa y resistencia a la compresión 66 MPa. Además, el PLA presenta una buena relación entre rigidez y fragilidad, lo que significa que las piezas son suficientemente rígidas para evitar deformaciones durante las interacciones, pero no son tan frágiles como otros plásticos más duros. Este comportamiento es ideal para un entorno educativo donde el robot puede experimentar caídas o golpes sin que se rompa inmediatamente, pero sin ser excesivamente costoso ni complejo de producir.

El movimiento del hombro también es parte de nuestros resultados ya que el diseño busca que pueda girar libremente (aunque nuestro robot tendrá restricciones angulares), sin colisionar por eso se ajustó el diseño de la carcasa como se muestra en la **Figura 3.4**.

La descripción de partes que se muestra en la **Figura 3.5**, se describe así: el servomotor del hombro reposa sobre la estructura principal del perro robot (11) y se asegura mediante pernos pasantes y concéntricos a los huecos laterales del servomotor (7), se conecta a los otros servos pierna mediante un conector paleta(9) y para asegurar un movimiento continuo y sin atascos se tiene un acople saliente(12) junto con eje concéntrico que realizará el movimiento del servo con un rodamiento (10), todas las uniones antes mencionadas son con pernos y contratuercas o entradas de los componentes (servomotores).

El diseño mecánico también cumple con un diseño estético que permite el paso adecuado de cables, incorporación de la Raspberry Pi, acople y ajustes de los servomotores por tornillos,

huecos para cabezas de tornillos, demostrando así que el diseño a más de ser funcional es estético, como se puede ver en la **Figura 3.3**.

Figura 3.3

Espacios y cavidades para cables y componentes electrónicos

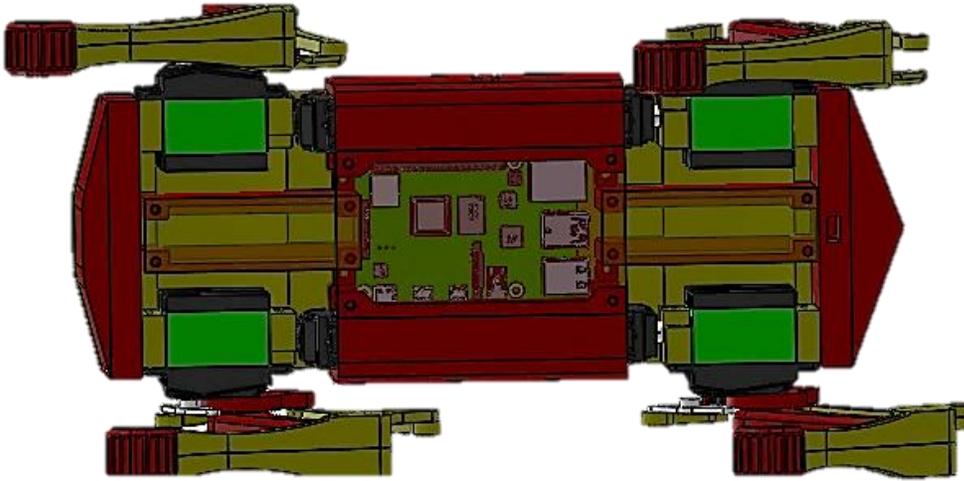


Figura 3.4

Partes del hombro y pierna

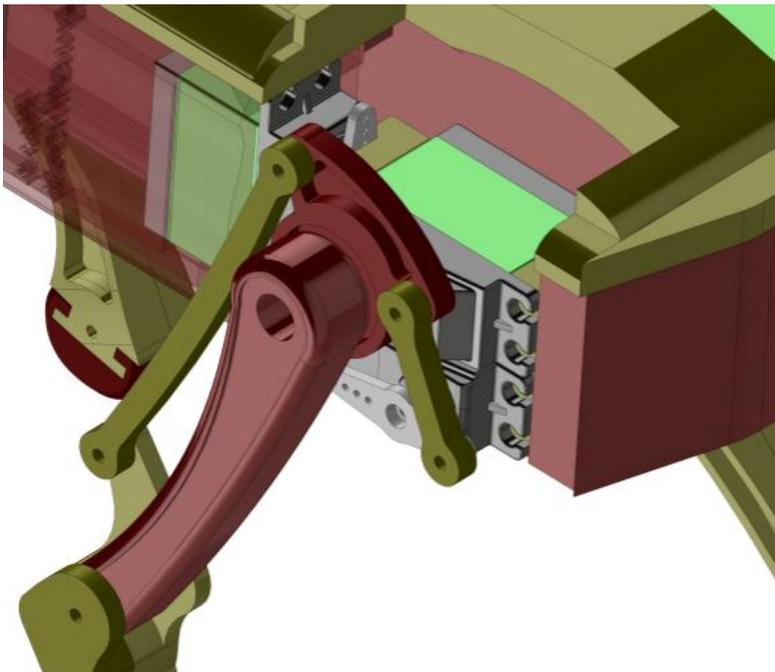
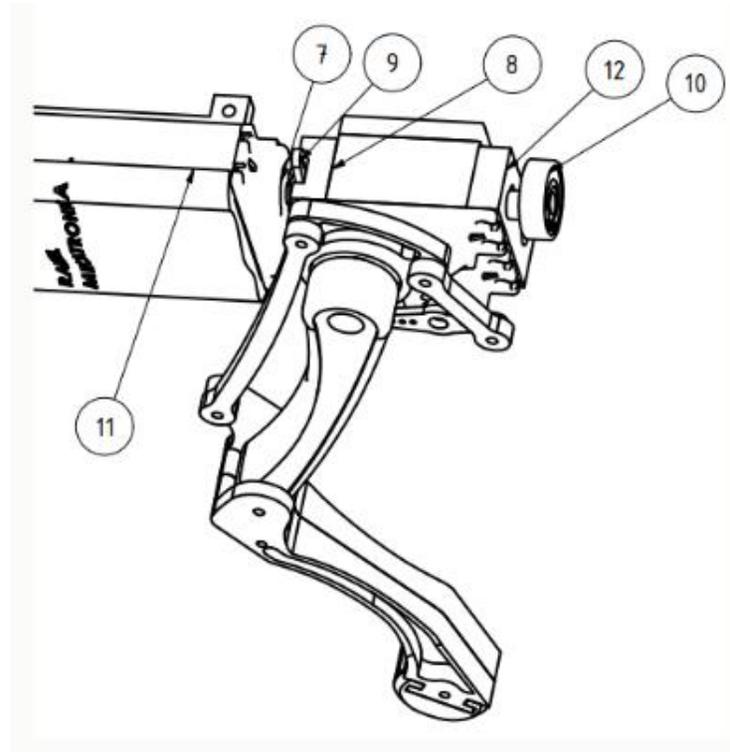


Figura 3.5*Partes del hombro y pierna descripción*

Para las primeras pruebas de movimiento de la pierna, se construyó una cuarta parte del perro considerando el hombro y la pierna completa, se pudo demostrar que el sistema se comporta bastante bien en los movimientos que realiza el conjunto articulado, pasando por el servomotor hombro con su movimiento de todo el conjunto pierna, luego la pierna con sus dos servomotores, el primero realiza un movimiento de extender la pierna y contraerla simulando así el alzado y agachado del perro, luego el servomotor inferior de la pierna simula el movimiento de la rodilla y actúa como flexión, para ambos casos el robot no colisiona con sus partes y demuestra que el movimiento es continuo sin atascamientos, todo esto se lo puede observar en la **Figura 3.6, Figura 3.7, Figura 3.8 y Figura 3.9** estas dos últimas muestran la simulación de un movimiento, otras configuraciones de la simulación se encuentran en el **apéndice C**.

En las pruebas de movimiento de la **Figura 3.6** se muestra el conjunto completo de la pierna y se verifica las dimensiones a movimiento libre para corroborar que no vaya a colisionar cuando se incorpore el resto de las partes.

En la transición de simulación del conjunto **Figura 3.7** se observa el movimiento de la pierna de tanto el servomotor de extensión y recogimiento como del servomotor de movimiento de alargue, ya incorporado los acoples que mantienen a los servomotores firmes, para esta prueba se desestimó el servo hombro dado que no es parte de la demostración.

Para la siguiente transición del conjunto **Figura 3.8** se observa ya el conjunto completo y un primer movimiento acoplando el servo hombro de similar forma pero ya acoplado toda la estructura en la **Figura 3.9** se representa el movimiento del hombro y pierna demostrando que no colisiona y que su movimiento es continuo, asegurando que no se atasca y se mueve de forma adecuada para su caminata, y ya con estas pruebas de una pierna completa se asegura su funcionamiento para la fabricación final, mostrando así nuestro resultado.

Figura 3.6

Construcción del sistema de pierna con sus servomotores



Figura 3.7

Transición de simulación de pierna alargue

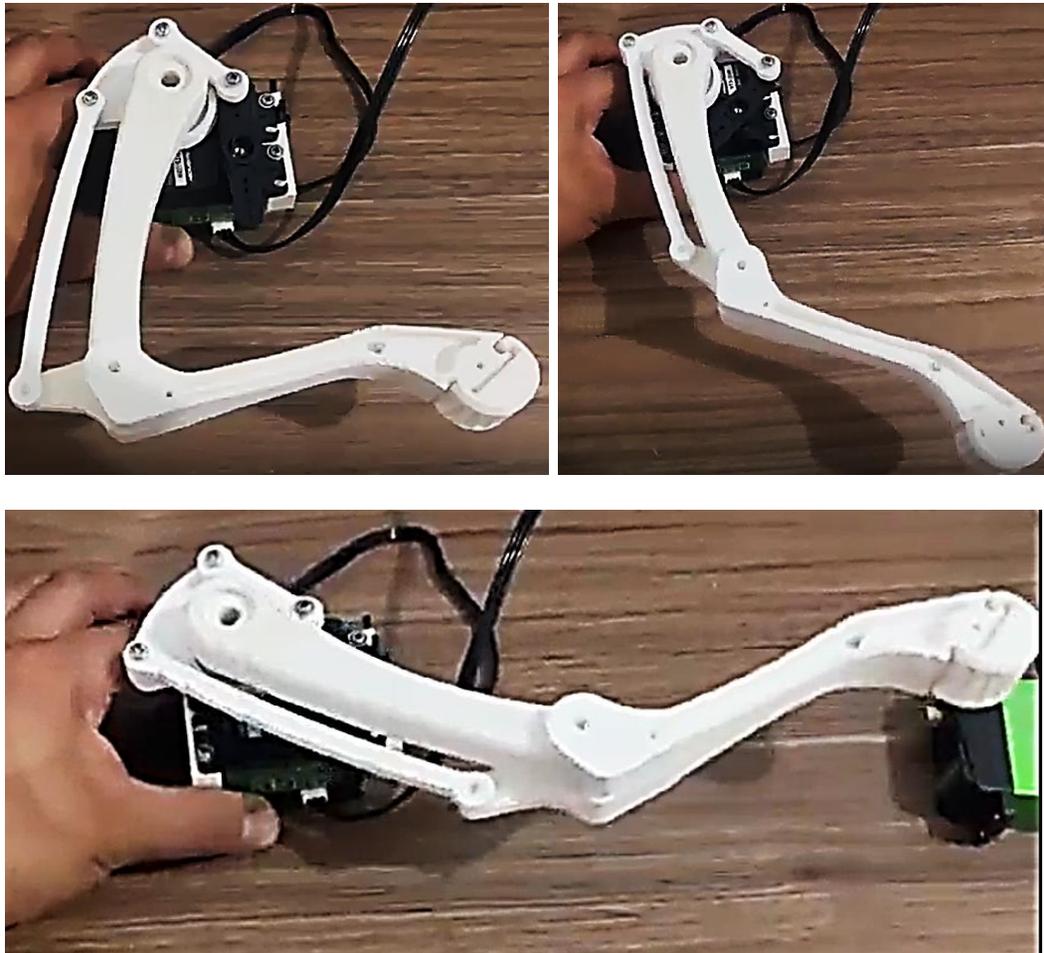


Figura 3.8

Transición de simulación de pierna

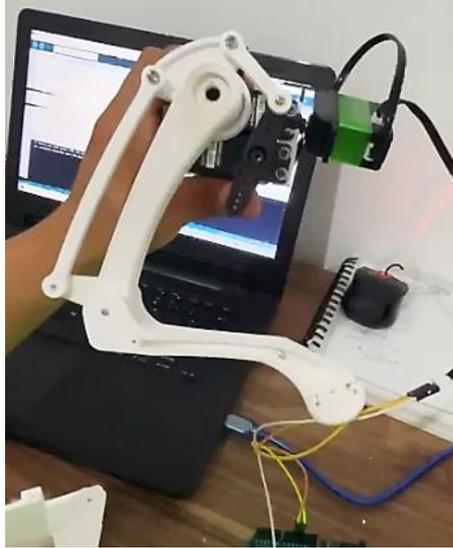
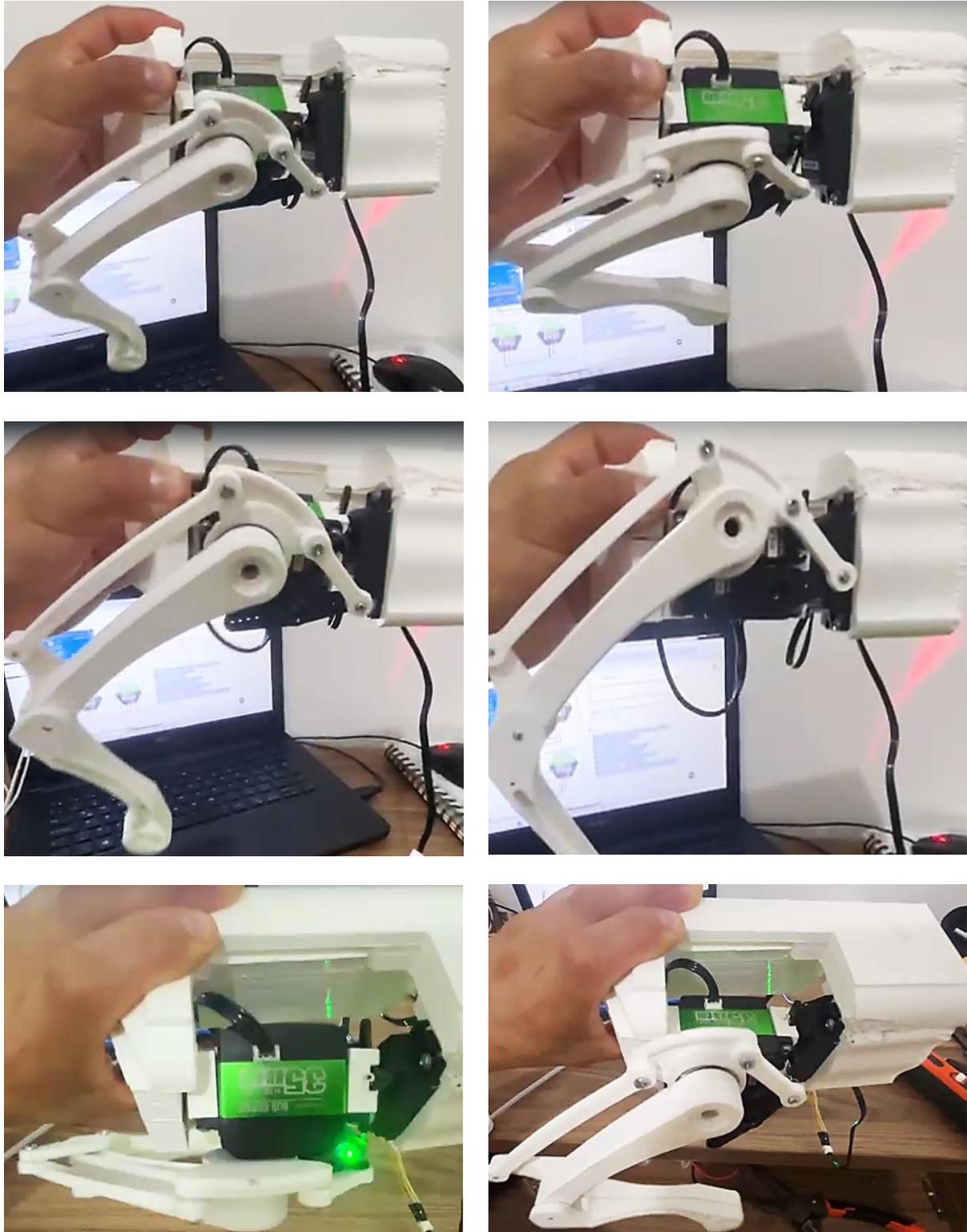


Figura 3.9

Transición simulación Pierna-Hombro



Adicional se diseñó un manual de uso mecánico que sirve como guía para el armado e identificación de partes.

En este manual de usuario se describe no solo las partes del diseño del robot sino también la forma en que se deben acoplar cuenta con una descripción en caso de que la imagen sea compleja de entender. La portada del manual se puede encontrar en el **apéndice A**.

En la siguiente imagen se puede observar **Figura 3.10** una vista de la pierna más detallada en la que se observan los servomotores de la pierna como del hombro, y como estas se ensamblan mediante las juntas y acoples que se diseñaron para que tanto el mecanismo como las estructura funcionen de forma adecuada.

Posteriormente podemos observar en la **Figura 3.11** todo el conjunto explotado del diseño mecánico del robot cuadrúpedo que nos muestra como este se ensambla y acopla a la estructura y a los 4 mecanismos de las piernas, también como los componentes se incorporan al diseño.

Figura 3.10

Transición de la vista explotada de la pierna

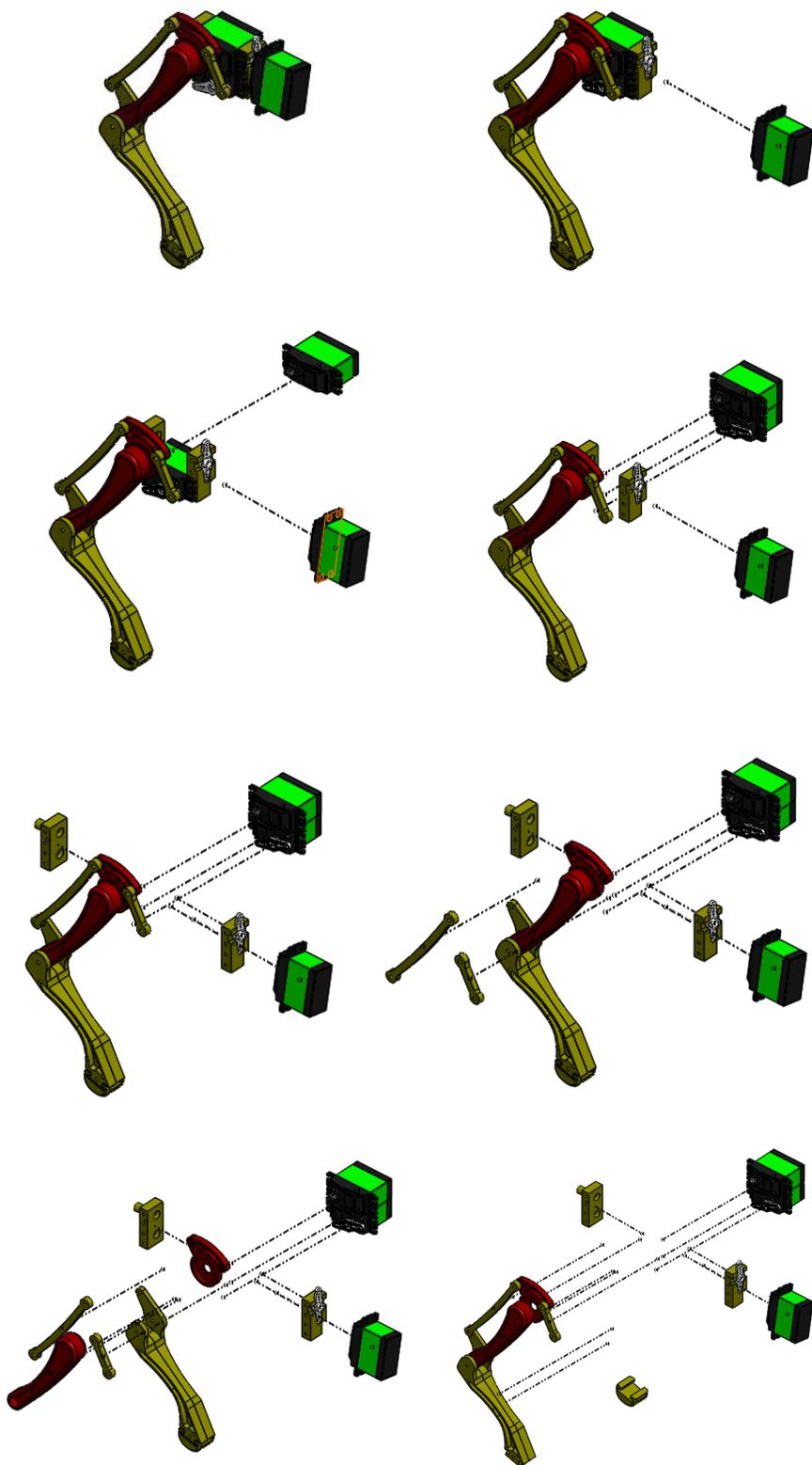
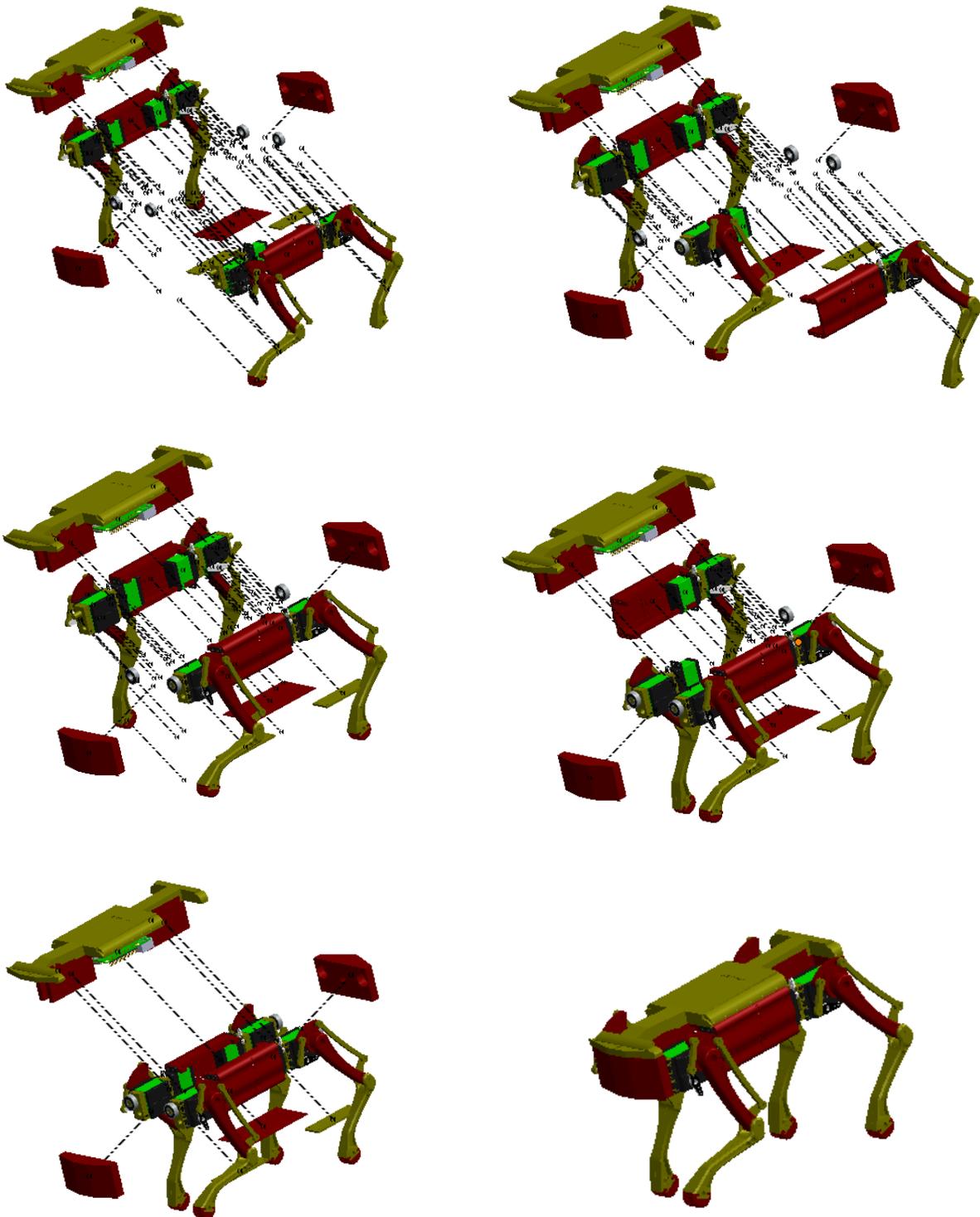


Figura 3.11

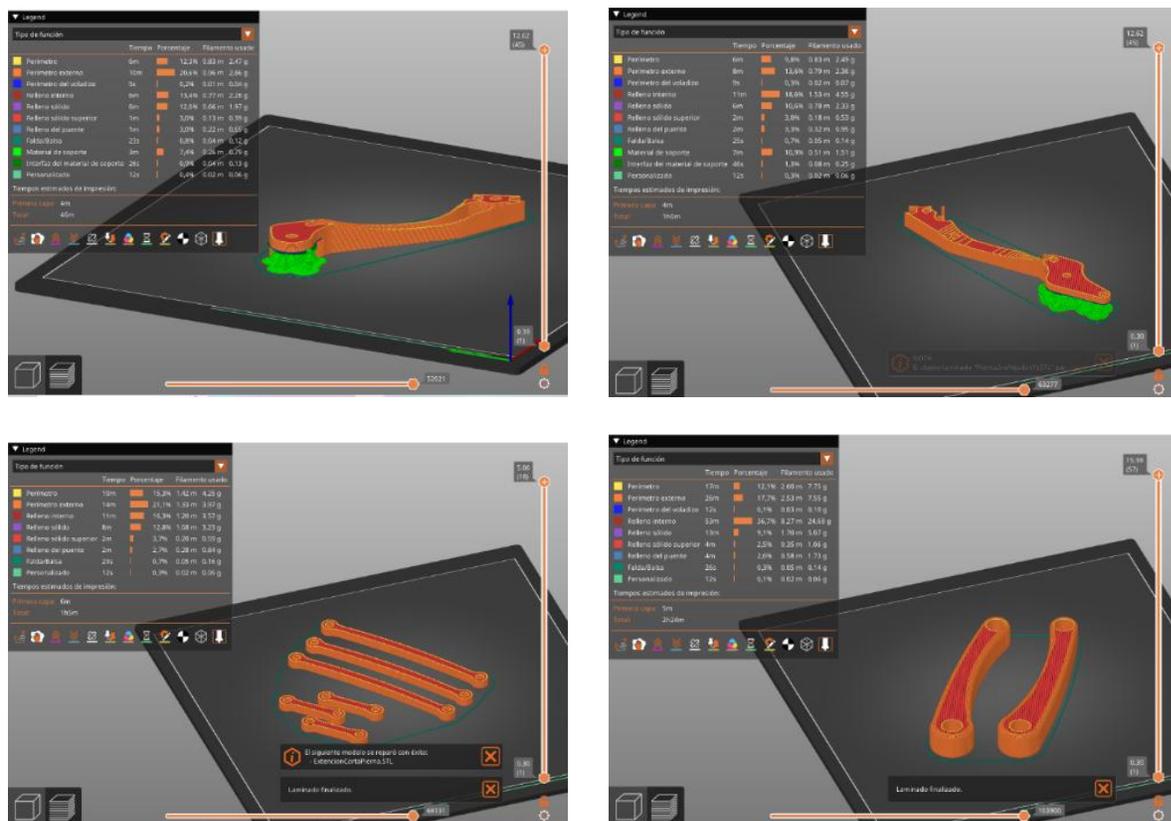
Transición de vista explotada del cuerpo completo



Para poder llevar a cabo se consideró una correcta forma de impresión 3d basado en los estándares de fabricación de Prusa knowledge base, que recomienda un porcentaje de relleno para piezas funcionales no menor a 45% y piezas estáticas (carcasa para nuestro caso), no menor al 30% todo esto consideran material de impresión en PLA Winkle a continuación en el siguiente grupo de imágenes se adjunta algunas piezas críticas de nuestros robot, laminados en el software Prusa Slicer 2.8.1 categoría avanzado, véase en **Figura 3.12** otras más se encuentran en el **apéndice D**.

Figura 3.12

Laminación en Prusa Slicer

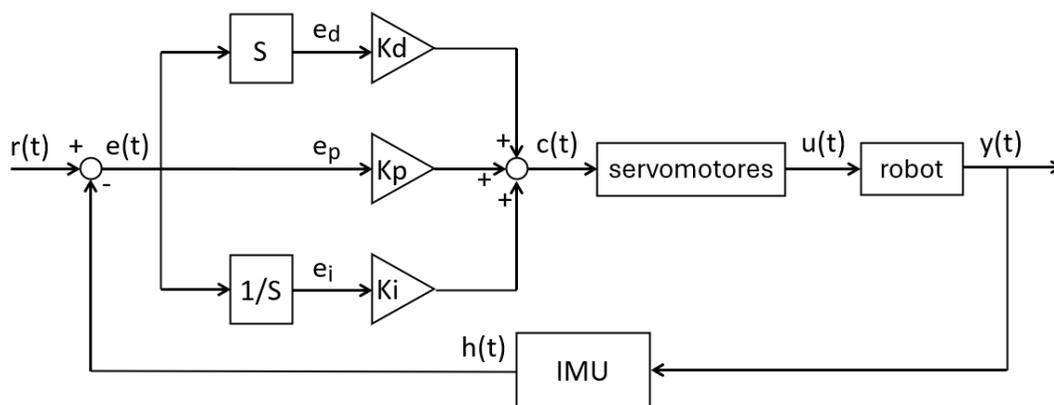


3.2 Sistema de control para la marcha de trote

La marcha de trote es inestable dado que solo hay dos piernas diagonales en contacto con el suelo a la vez. Por esta razón, fue necesario aplicar algún tipo de control para la estabilización del robot cuando realiza este patrón de movimiento. El objetivo de control es encontrar la posición de las piernas las cuales hagan que los ángulos de roll y pitch sean iguales a cero. Para esto se utilizó un control PID que puede observar en la **Figura 3.13** el correspondiente diagrama de bloques.

Figura 3.13

Diagrama de bloques del sistema de control para la marcha de trote



Donde r es el valor deseado de los ángulos pitch y roll que sería cero, e es la diferencia entre el valor deseado y los datos obtenidos de la IMU. Dado que este es un sistema discreto, la componente diferencial se calcula según la **ecuación (3.1)**.

$$kd \frac{(error_{actual} - error_{anterior})}{\Delta t} \quad (3.1)$$

Para calcular la componente integral se tiene la **ecuación (3.2)**.

$$Ki(Integral_{anterior} + error_{actual} * \Delta t) \quad (3.2)$$

Luego se calcula la matriz de rotación sobre cada eje con la **ecuación (3.3)**.

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Finalmente, se calculan las posiciones correctas de las piernas usando la matriz de rotación y la posición de las piernas calculadas de la secuencia de trote como se muestra en la **ecuación (3.4)**.

$$R \begin{bmatrix} FR_x & FL_x & RR_x & RL_x \\ FR_y & FL_y & RR_y & RL_y \\ FR_z & FL_z & RR_z & RL_z \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

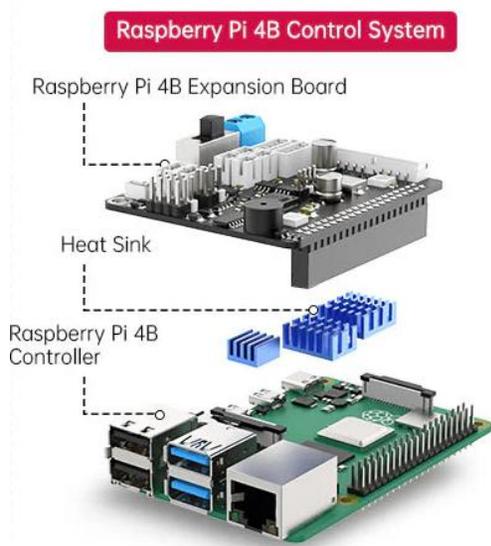
3.3 Sistema electrónico del robot cuadrúpedo

La **Figura 3.15** muestra el esquemático del circuito electrónico del robot cuadrúpedo que está conformado por la Raspberry Pi 4B, la Raspberry Pi 5 Expansion Board Model B, 12 servomotores HTS-35H y una batería LiPo que provee de energía al circuito. Como se mencionó anteriormente, la placa de expansión contiene internamente al sensor IMU. Además, posee un interruptor, un regulador de voltaje, entre otros elementos que distribuyen la energía necesaria a cada elemento dentro del circuito. Los servomotores también poseen internamente un conjunto de sensores para proporcionar retroalimentación de posición, temperatura, etc.

Es importante señalar que la Raspberry Pi 5 Expansion Board Model B es un HAT, es decir que se coloca encima de la Raspberry Pi 4B, tal como se muestra en la **Figura 3.14**.

Figura 3.14

Ejemplo de ensamblaje entre la Raspberry Pi y la placa de expansión [26]



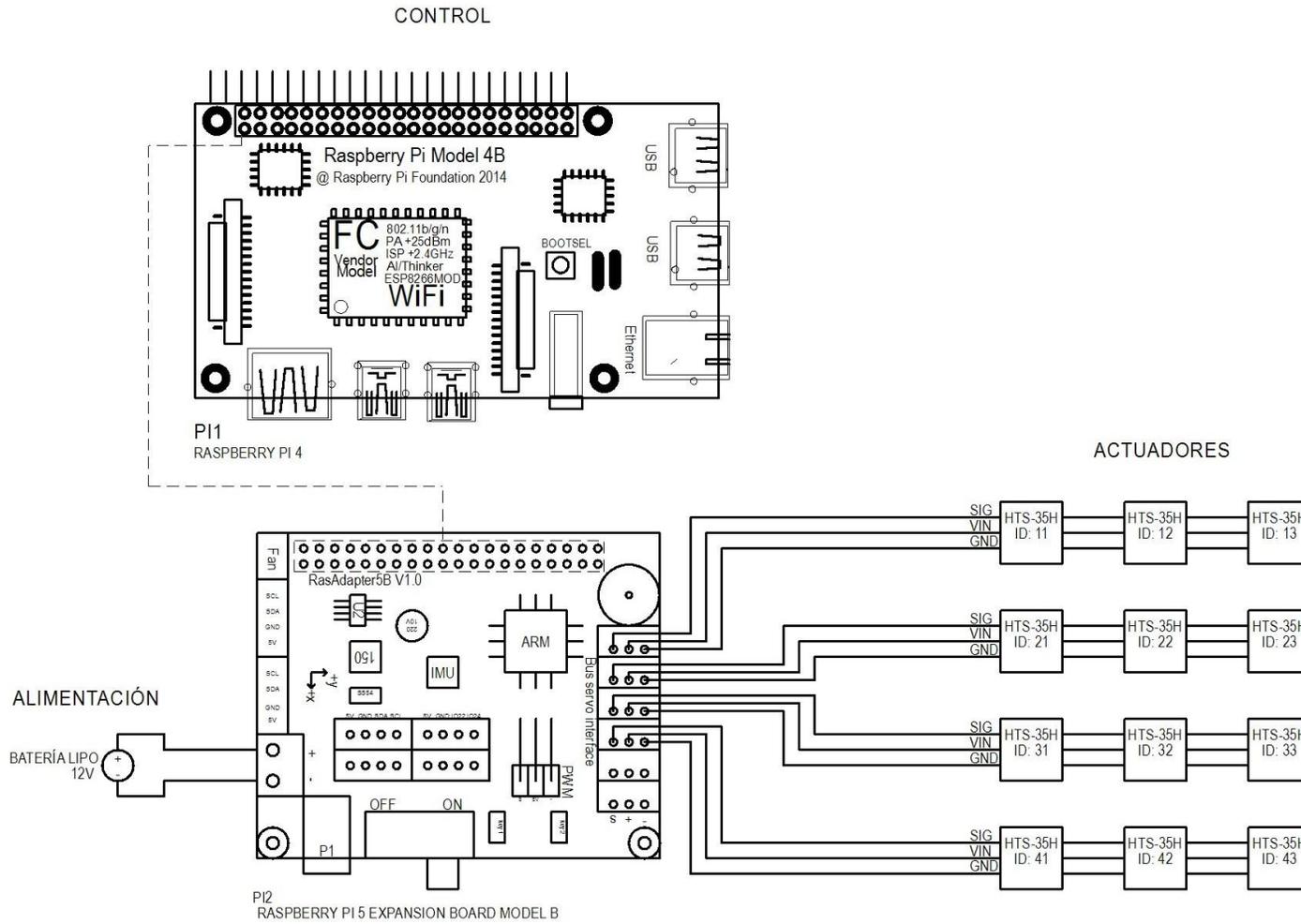
En términos generales, el circuito mostrado en la **Figura 3.15** utiliza la Raspberry Pi 4B como el cerebro del robot, encargada de controlar los componentes y procesar la información recopilada por los sensores. La Raspberry Pi 5 Expansion Board Model B gestiona de manera eficiente los 12 servomotores, controlando su velocidad y posición. Además, esta placa administra la energía suministrada por la batería LiPo, asegurando que todos los elementos del circuito reciban los rangos adecuados de voltaje y corriente.

El sensor IMU integrado en la placa de expansión mide la orientación y la aceleración del torso del robot cuadrúpedo (`base_link`), lo que permite implementar el sistema de control previamente descrito para mejorar el equilibrio del robot durante la marcha de trote.

Los servomotores HTS-35H tipo bus son responsables del movimiento de las articulaciones del robot cuadrúpedo, ajustando sus ángulos en función de los cálculos realizados por los algoritmos de programación. Dado que estos motores requieren altas corrientes, la batería LiPo garantiza el suministro de energía necesario para su funcionamiento.

Figura 3.15

Esquema eléctrico del robot cuadrúpedo

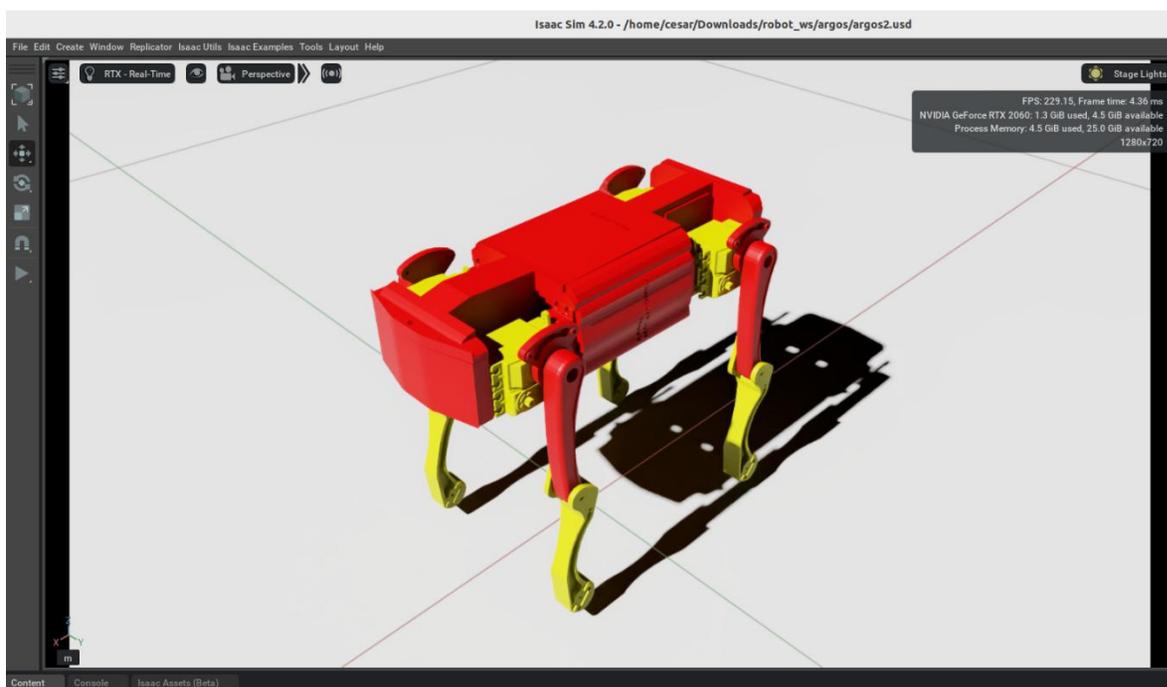


3.4 Simulación y robot físico

En la **Figura 3.16** se muestra el modelo del robot cuadrúpedo cargado en el simulador Isaac Sim. Este simulador está integrado con ROS2 Humble, lo que permitió cargar el controlador de posición y transmitir datos del sensor IMU simulado.

Figura 3.16

Simulación del robot en Isaac Sim



El robot se controla mediante un joystick, que permite seleccionar entre diversos modos de operación, descritos a continuación.

1. Balanceo: El robot no se desplaza, sino que se mantiene en la misma posición. Sin embargo, cambia su orientación variando los ángulos de roll, pitch y yaw, como puede apreciarse en la **Figura 3.17**.

Figura 3.17

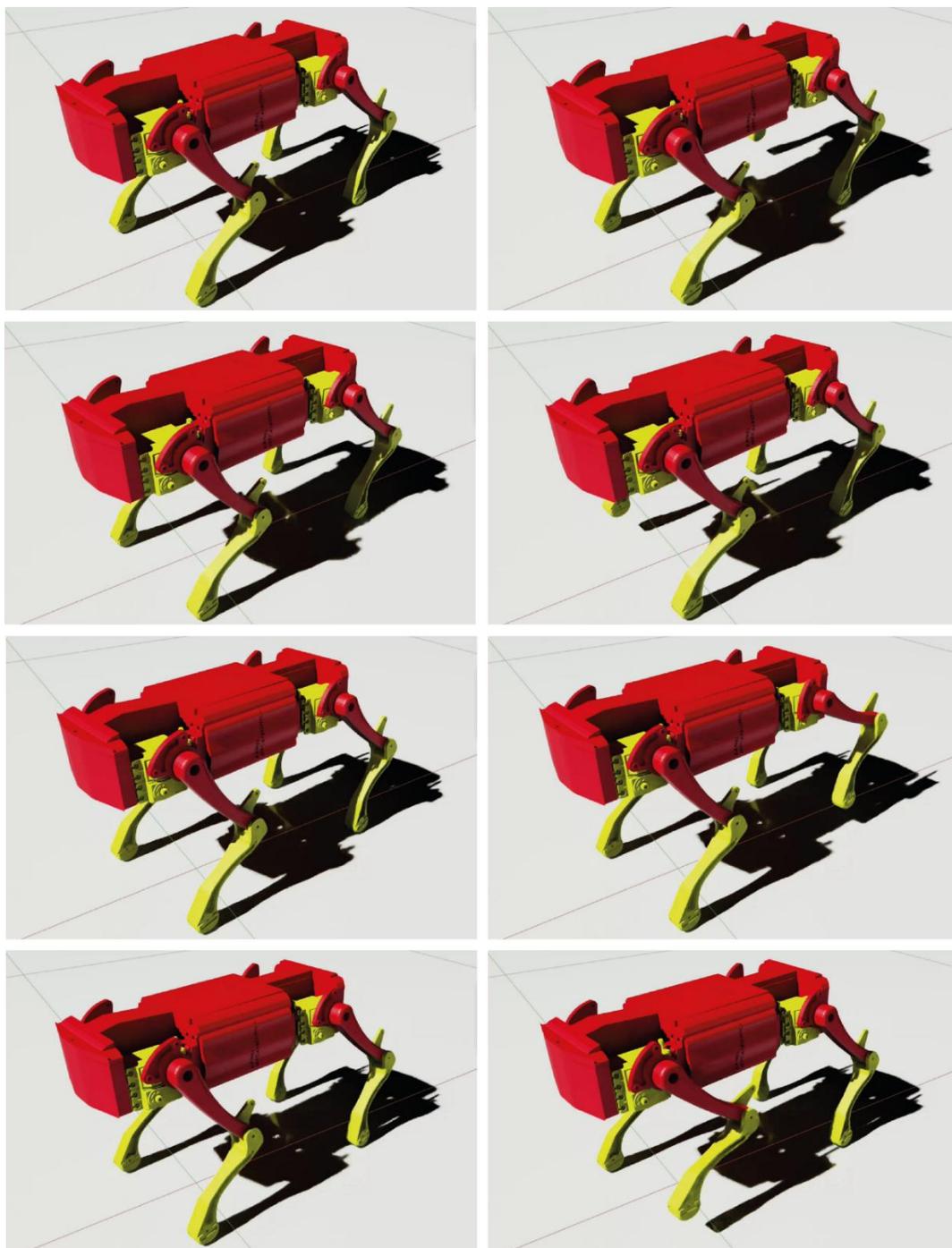
Modo de balanceo



2. Caminata sencilla: El robot mueve una pierna a la vez, lo que le permite desplazarse hacia adelante, hacia atrás y rotar sobre su propio eje como puede apreciarse en la **Figura 3.18**.

Figura 3.18

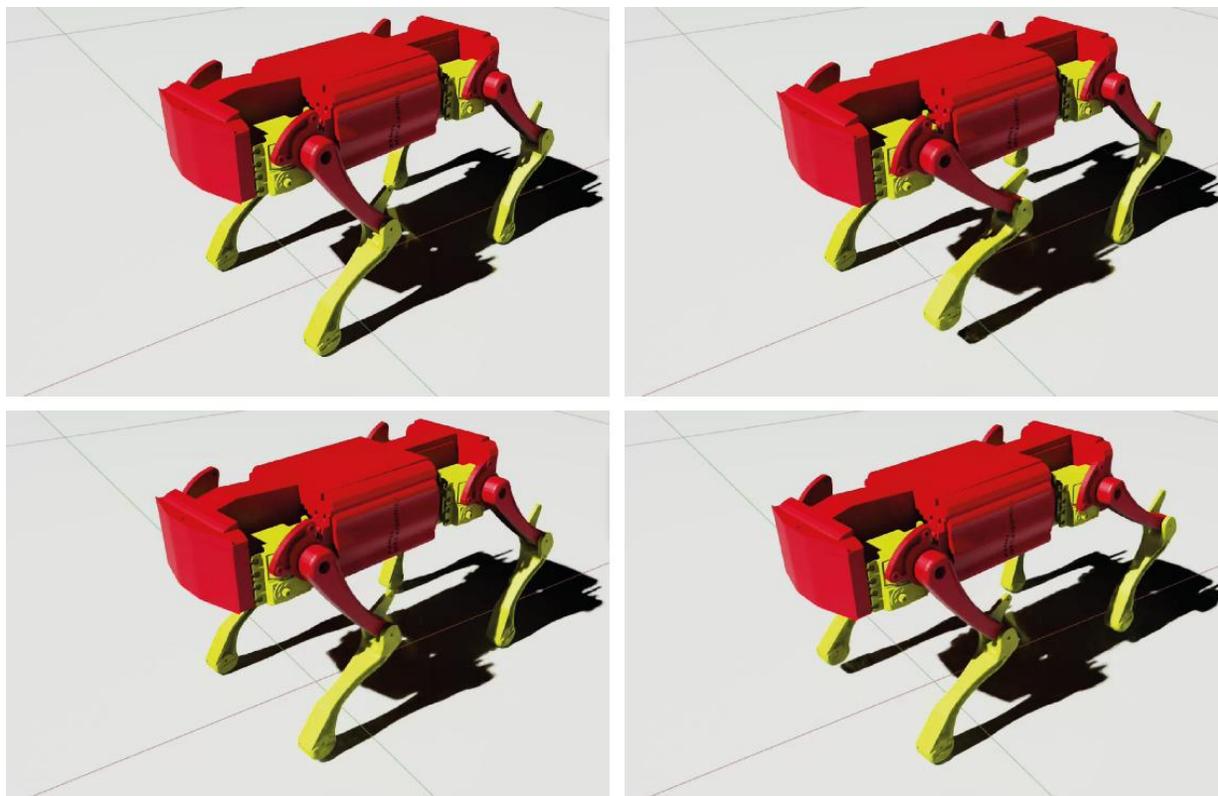
Modo de caminata



3. Trote: El robot mueve dos piernas en diagonal simultáneamente como puede observar en la **Figura 3.19**. Dado que esta marcha es inestable, se implementa el control PID descrito en la sección sistema de control, para estabilizar la marcha. Es importante señalar, que en este modo se logró un movimiento omnidireccional del robot.

Figura 3.19

Modo de trote



Se construyó un prototipo físico del robot, como se muestra en la **Figura 3.20**, **Figura 3.21** y **Figura 3.22**. Este prototipo permitió verificar las dimensiones y tolerancias del diseño, asegurando que las piezas ensamblaran correctamente. Además, se utilizó para validar la disposición de los componentes electrónicos y mecánicos, asegurando la funcionalidad del robot.

Figura 3.20

Vista frontal del robot implementado



Figura 3.21

Vista superior del robot implementado

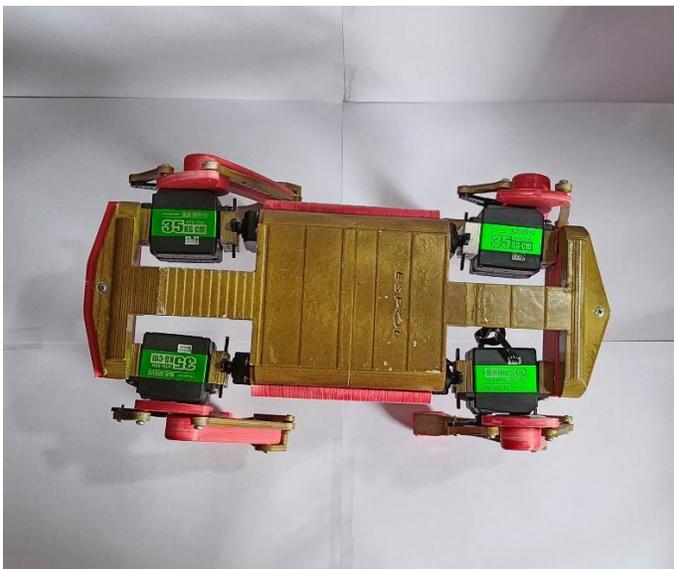


Figura 3.22

Vista en perspectiva del robot implementado



3.5 Análisis de costos

En la **Tabla 3.2** se detallan los costos asociados al presente proyecto. Aquí se observa que el mayor costo se dio en los servomotores ya que se necesita un gran número de estos. Se recuerda que el robot está pensando para su fabricación con material de impresión, por lo que este recurso también se considera dentro de los costos. Además, se tienen otros elementos adicionales como rodamientos, pernos, etc.

Tabla 3.2

Costos de construcción del robot cuadrúpedo

Tipo de sistema	Descripción	Cantidad	Precio Unitario [\$]	Precio total [\$]
	Raspberry Pi 5 Expansion Board Model B	1	39,99	39,99
Electrónico y control	Serial bus servo	12	23,99	287,88
	Raspberry Pi 4 Model B	1	94,99	94,99
	LiPo Battery Rhino 11.1V 2200 mAh	1	9,99	9,99
Mecánico	Rollo de filamento PLA	2	23	46
	M3 Locknut 30 PCS	20	0,0465	0,93
	Perno M3X30mm	20	0,07	1,4
	Rodamientos de bola rígidos 608	4	1	4
Total				\$485,18

Capítulo 4

4.1 Conclusiones y recomendaciones

4.1.1 Conclusiones

- Se diseñó un robot cuadrúpedo como herramienta didáctica asequible para enseñar conceptos de álgebra, física y control. En álgebra, permite explorar matrices de transformación en el modelado de movimientos. En física, ejemplifica el centro de masa mediante su equilibrio en modo de caminata sencilla. En control, el uso de PID en la marcha de trote demuestra la estabilización del robot. Su complejidad facilita la comprensión de múltiples conceptos teóricos aplicados al mundo real.
- Se diseñó un robot cuadrúpedo educativo optimizando estabilidad, precisión y eficiencia en el movimiento. La distribución estratégica de servomotores y un sistema de transmisión con barras articuladas mejoraron la dinámica de sus extremidades. Su estructura en PLA (85% de relleno) y extremidades de TPU garantizaron funcionalidad, durabilidad y adherencia. Además, el diseño modular facilita el mantenimiento y futuras mejoras, asegurando un robot ligero, accesible y replicable en entornos educativos.
- Se simuló el robot cuadrúpedo en Isaac Sim integrado con ROS2 Humble, proporcionando una plataforma virtual en la que los estudiantes pueden realizar pruebas y ajustes en un entorno controlado. El robot se controla por medio de un joystick e incluye tres modos de operación: balanceo, caminata sencilla y trote.
- La plataforma robótica fue diseñada con tecnologías accesibles y conceptos básicos de ingeniería para facilitar su uso en educación. Se programó en Python y cuenta con un repositorio en GitHub con archivos, simulaciones y una guía paso a paso. Incluye un manual de cálculo de ángulos basado en geometría y archivos de diseño en Inventor con videos de

simulación en CAD para validar su funcionamiento. También se proporcionan planos técnicos y especificaciones para impresión 3D. Un manual técnico detalla el ensamblaje y mantenimiento, asegurando su fácil reproducción en entornos educativos.

- La implementación del robot cuadrúpedo incluyó impresión 3D para una fabricación económica, rápida y precisa. Este proceso permitió iterar el diseño, garantizando la compatibilidad mecánica y electrónica para un ensamblaje eficiente. Las decisiones sobre materiales y diseño modular optimizaron su rendimiento y funcionalidad educativa. Su diseño práctico y accesible lo posiciona como una herramienta clave para la enseñanza de mecánica, electrónica y control en el ámbito universitario.

4.1.2 Recomendaciones

- Se recomienda explorar el uso de materiales avanzados o compuestos que puedan combinarse con la impresión 3D, como filamentos reforzados con fibra de carbono o nylon, para mejorar la resistencia estructural del robot sin incrementar significativamente su peso. Además, sería valioso realizar un análisis detallado de optimización topológica en el diseño mecánico para identificar posibles reducciones de material en áreas de bajo esfuerzo. Este enfoque permitiría aumentar la eficiencia del diseño, ampliando su aplicación a contextos más exigentes y robustos en entornos educativos o experimentales.
- Es importante considerar la integración de un sistema de retroalimentación avanzada mediante sensores adicionales como acelerómetros de alta precisión y sensores de fuerza en las extremidades. Estos elementos permitirían al robot cuadrúpedo adaptarse a diferentes tipos de terreno y condiciones operativas, incrementando su versatilidad y funcionalidad. Asimismo, implementar estas mejoras abriría oportunidades para desarrollar y enseñar conceptos avanzados de control adaptativo y dinámica, elevando el impacto educativo del robot en escenarios de aprendizaje más complejos.
- Para futuros trabajos que busquen mejorar este proyecto de tesis, se recomienda continuar aprovechando el uso de Isaac Sim como herramienta de simulación. Esta plataforma permite la integración de inteligencia artificial, lo que facilita la creación de algoritmos de movimiento mediante técnicas avanzadas como el aprendizaje por refuerzo. Estas técnicas ofrecen ventajas significativas, como la optimización de movimientos complejos (caminar, trotar, adaptarse a terrenos irregulares), la capacidad de adaptarse a cambios en el entorno en tiempo real y la reducción de la necesidad de programar manualmente las trayectorias,

ya que el robot puede aprender de forma autónoma. Esto podría llevar el desempeño del robot a niveles aún más avanzados y ampliar sus posibles aplicaciones.

Referencias

- [1] R. Economía, «68% de profesores latinoamericanos consideran que la falta de herramientas tecnológicas adecuadas es una barrera para la enseñanza en línea», *Revista Economía*. Accedido: 3 de diciembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.revistaeconomia.com/68-de-profesores-latinoamericanos-consideran-que-la-falta-de-herramientas-tecnologicas-adecuadas-es-una-barrera-para-la-ensenanza-en-linea/>
- [2] L. Sepúlveda, «La educación técnico-profesional en América Latina: retos y oportunidades para la igualdad de género», mar. 2017, Accedido: 4 de diciembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/11362/41046>
- [3] «Technical Education & Professional Training in Latin America – Inter-American Dialogue». Accedido: 4 de diciembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://thediologue.org/analysis/technical-education-professional-training-in-latin-america/>
- [4] «Objetivo 4: Educación de calidad | Programa De Las Naciones Unidas Para El Desarrollo», UNDP. Accedido: 14 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.undp.org/es/sustainable-development-goals/educacion-calidad>
- [5] «Objetivo 9: Industria, innovación e infraestructura | Programa De Las Naciones Unidas Para El Desarrollo», UNDP. Accedido: 14 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.undp.org/es/sustainable-development-goals/industria-innovacion-infraestructura>
- [6] P. Nogales y M. Abril Elizondo, «“El Impacto de la Ausencia de Prácticas Profesionales en la Formación Universitaria”», dic. 2023.
- [7] L. R. Vega-González, «La educación en ingeniería en el contexto global: propuesta para la formación de ingenieros en el primer cuarto del Siglo XXI», *Ing. Investig. Tecnol.*, vol. 14, n.º 2, pp. 177-190, jun. 2013.
- [8] E. A. Espinosa-Ríos, K. D. González-López, y L. T. Hernández-Ramírez, «Las prácticas de laboratorio: una estrategia didáctica en la construcción de conocimiento científico escolar», *Entramado*, vol. 12, n.º 1, pp. 266-281, 2016.
- [9] C. Lion, «Los desafíos y oportunidades de incluir tecnologías en las prácticas educativas. Análisis de casos inspiradores».
- [10] «First-Generation College Students: Additional Evidence on College Experiences and Outcomes | Request PDF», *ResearchGate*, nov. 2024, doi: 10.1353/jhe.2004.0016.
- [11] cgarcia, «¿Qué es Raspberry Pi y para qué sirve? | Escuela de programación, robótica y pensamiento computacional | Codelearn.es». Accedido: 3 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://codelearn.es/blog/que-es-raspberry-pi-y-para-que-sirve/>
- [12] «Objetivos de Desarrollo Sostenible | Programa De Las Naciones Unidas Para El Desarrollo». Accedido: 3 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.undp.org/es/sustainable-development-goals>
- [13] «1065581552.pdf». Accedido: 3 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/39364/1065581552.pdf>
- [14] «A typology of personalisation practices in marketing in the digital age | Request PDF», *ResearchGate*, ene. 2025, Accedido: 3 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/354432928_A_typology_of_personalisation_practices_in_marketing_in_the_digital_age
- [15] H. M. Reyes, E. Á. A. M. Beltrán, y C. S. P. Vargas, «Análisis de las experiencias de enseñanza y aprendizaje digitales aplicadas durante la pandemia de COVID-19 en el nivel

- superior desde el enfoque de las buenas prácticas educativas», *IE Rev. Investig. Educ. REDIECH*, vol. 12, 2021, Accedido: 3 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/journal/5216/521665144048/html/>
- [16] «Spot», ROBOTS: Your Guide to the World of Robotics. Accedido: 3 de diciembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://robotsguide.com/robots/spot>
- [17] «Boston Dynamics' Cheetah Robot Now Faster than Fastest Human - IEEE Spectrum». Accedido: 3 de diciembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://spectrum.ieee.org/boston-dynamics-cheetah-robot-now-faster-than-fastest-human>
- [18] «cuadrupedo - BricoGeek.com». Accedido: 3 de diciembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://blog.bricogeek.com/tag/cuadrupedo>
- [19] «Isaac Sim», NVIDIA Developer. Accedido: 5 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://developer.nvidia.com/isaac/sim>
- [20] «Quadruped Extension — Omniverse IsaacSim». Accedido: 5 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: https://docs.omniverse.nvidia.com/isaacsim/latest/features/robots_simulation/ext_omni_isaac_quadruped.html
- [21] «Future now: 3D printing moves from prototyping to production | McKinsey». Accedido: 3 de diciembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/the-mainstreaming-of-additive-manufacturing>
- [22] Y. N. Zhang y M. Q. An, «Structure and software architecture design of an extremely low-cost quadruped robot for education», *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1931, n.º 1, p. 012007, may 2021, doi: 10.1088/1742-6596/1931/1/012007.
- [23] N. Kau, A. Schultz, N. Ferrante, y P. Slade, «Stanford Doggo: An Open-Source, Quasi-Direct-Drive Quadruped», en *2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, may 2019, pp. 6309-6315. doi: 10.1109/ICRA.2019.8794436.
- [24] «Design and Control of a Open-Source, Low Cost, 3D Printed Dynamic Quadruped Robot». Accedido: 14 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/9/3762>
- [25] «Hiwonder HTS-35H High Voltage Bus Servo 35KG Torque with Data Feedback», Hiwonder. Accedido: 2 de diciembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.hiwonder.com/products/hts-35h>
- [26] «Raspberry Pi 5 Expansion Board, Servo Motor Driver, ROS Robot Manipula», Hiwonder. Accedido: 4 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.hiwonder.com/products/expansion-board-for-raspberry-pi-5>

Apéndices

Apéndice A

Manual de ensamblaje mecánico

Se adjunta en esta sección foto de la portada principal como el link del pdf del manual.



Manual de construcción

Este manual técnico ha sido desarrollado para proporcionar una guía precisa del ensamblaje y configuración de nuestro robot cuadrúpedo. Incluye instrucciones detalladas y esquemas técnicos que aseguran el cumplimiento de las especificaciones del diseño, promoviendo el aprendizaje técnico y fomentando habilidades en robótica e ingeniería aplicada.

www.RamelTech.com



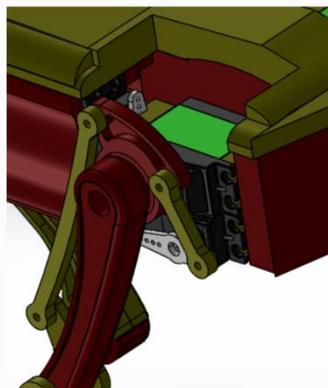
hello@reallygreatsite.com



+593 982784414



Guayaquil, Ecuador



ESPOL

ARGOS

Argos: El robot cuadrúpedo que transforma teoría en acción para futuros ingenieros
Argos es más que un robot; es una herramienta educativa diseñada para inspirar y desafiar a la próxima generación de ingenieros. Este innovador cuadrúpedo combina principios de mecánica, electrónica y programación, brindando una experiencia práctica en el diseño, control y optimización de sistemas robóticos avanzados. Concebido para enseñar a través de la acción, Argos permite a estudiantes y profesionales explorar conceptos complejos de manera tangible y efectiva, demostrando cómo la teoría se convierte en movimiento preciso y funcionalidad real. Su diseño modular y accesible fomenta el aprendizaje colaborativo y el desarrollo de nuevas ideas en el campo de la robótica.



Acerca de los Servos Seriales



Información Técnica del Servomotor

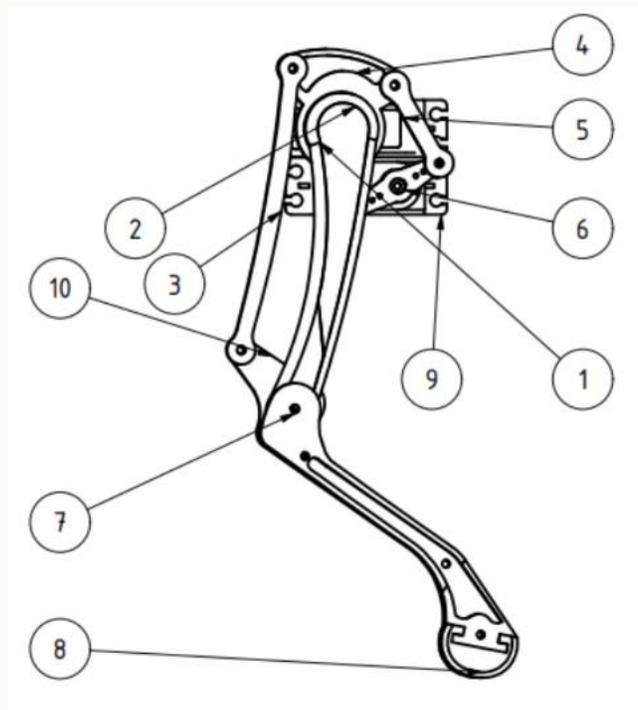
Característica	Descripción
Cableado limpio	Tres canales en la parte superior, izquierda y derecha, fáciles de cablear.
Gran par	Par máximo de hasta 77.2 lbs.cm a 7.4 V; rotación de 240 grados; rotación de 360 grados cuando está apagado, ideal para juntas de robots.
ID variable	Número predeterminado es 1, modificable. Puede reemplazar el servo xArm ID5.
Retroalimentación de ayuda	Retroalimentación de posición, temperatura y voltaje para proteger el servo contra quemaduras.
Detalles tutorial	Proporciona protocolo de comunicación de servo de bus, código fuente para 51 y STM32.
Dimensiones	2.14 x 0.79 x 1.79 pulgadas (54.36 x 20.14 x 45.47 mm); peso: 64 g (2.22 oz).

Parte de la Pierna

Las pierna derechas son simétricas, mientras que las del lado izquierdo si bien no difieren en su armado si difieren en su diseño mecánico, es importante colocar la posición del muslo como se indica para evitar problemas en su caminata.

Ensamble:

El movimiento de la pierna esta guiado por dos servomotores el inferior controla la articulación mediante el acople paleta (6) compuesta de las partes 3, 4 y 5 que moveran la pierna (7,10), mientras que el servo superior conecta por medio del acople redondo con el muslo antepierna 1, todas las uniones son por pernos, tuercas y contratuercas.

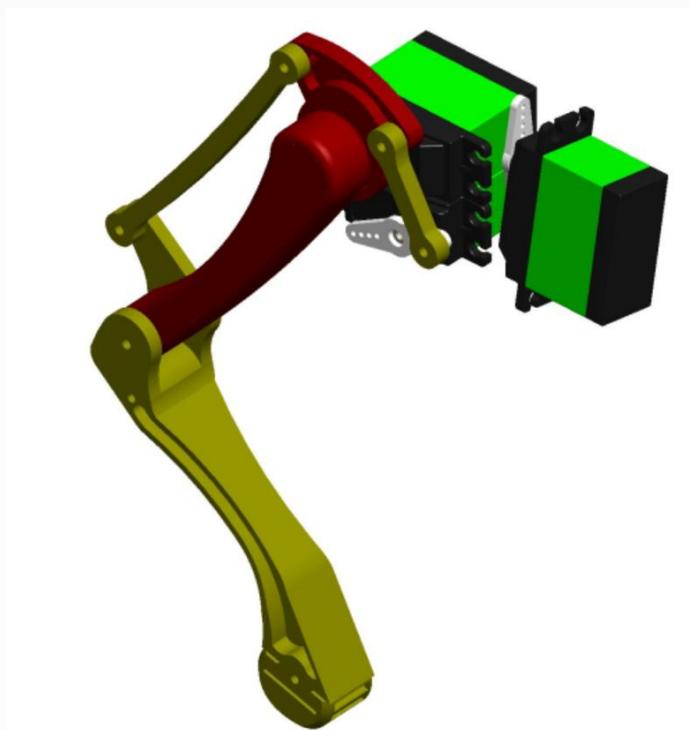


Pierna Completa hombro

El hombro se conecta directamente por el conector tipo paleta (de preferencia reducir su tamaño un poco), a los servos de la pierna.

Ensamble:

El servomotor del hombro reposa sobre la estructura principal del perro robot (11) y se asegura mediante pernos pasantes y concéntricos a los huecos laterales del servomotor (7), se conecta a los otros servos pierna mediante un conector paleta(9) y para asegurar un movimiento continuo y sin atascos se tiene un acople saliente(12) junto con eje concéntrico que realizará el movimiento del servo con un rodamiento (10), todas las uniones antes mencionadas son con pernos y contratuercas o entradas de los componentes (servomotores).

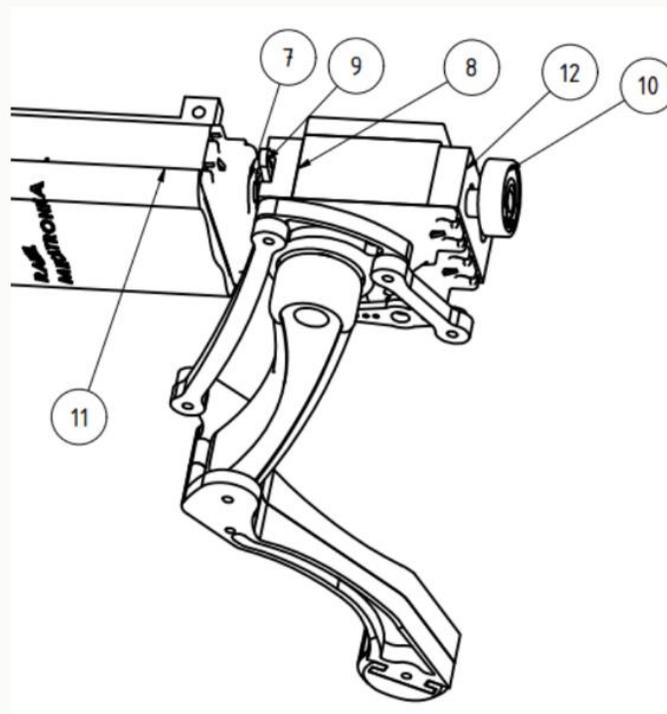


Pierna Completa hombro

El hombro se conecta directamente por el conector tipo paleta (de preferencia reducir su tamaño un poco), a los servos de la pierna.

Ensamble:

El servomotor del hombro reposa sobre la estructura principal del perro robot (11) y se asegura mediante pernos pasantes y concéntricos a los huecos laterales del servomotor (7), se conecta a los otros servos pierna mediante un conector paleta(9) y para asegurar un movimiento continuo y sin atascos se tiene un acople saliente(12) junto con eje concéntrico que realizará el movimiento del servo con un rodamiento (10), todas las uniones antes mencionadas son con pernos y contratueras o entradas de los componentes (servomotores).

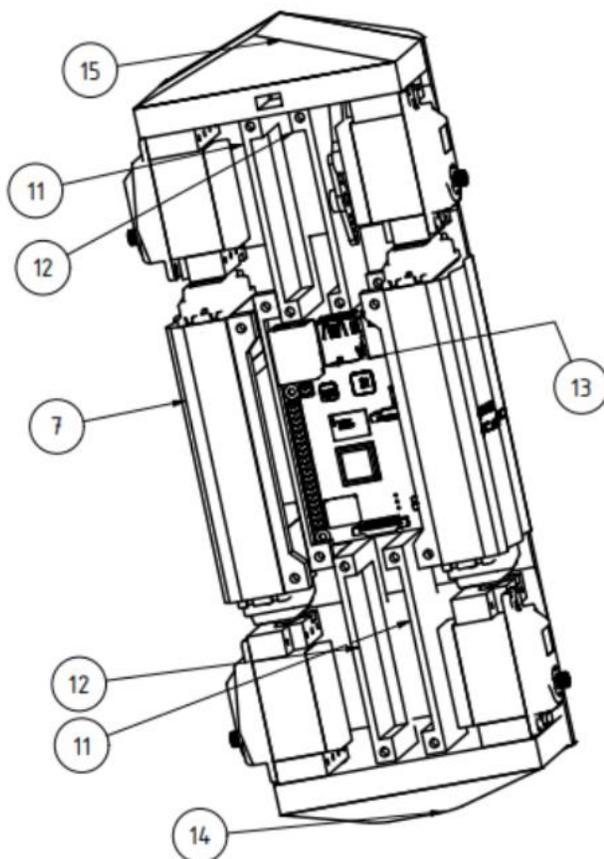


Ensamble estructura

La estructura esta correlacionada y acoplada por pernos y son dos grandes grupos, estructura principal (superior) y laterales.

Ensamble:

Para la parte superior tenemos unas paredes laterales internas (11 y 12) de ambos lados del robot, estas sirven para hacer canal para los cables y la batería dentro de estas cavidades se deben acomodar, en la parte central tenemos las estructuras laterales (7) estas son la parte central del cuerpo del perro que en su centro tiene la placa Raspberry PI junto con el controlador de servomotor (13), el mismo que se acopla con cuatro tornillos, para finalizar tenemos tambien como parte del cuerpo la tapa frontal (15) y posterior (14), estas se acoplan por pernos en la parte superior y ademas son concetricos a los rodamientos de cada eje.

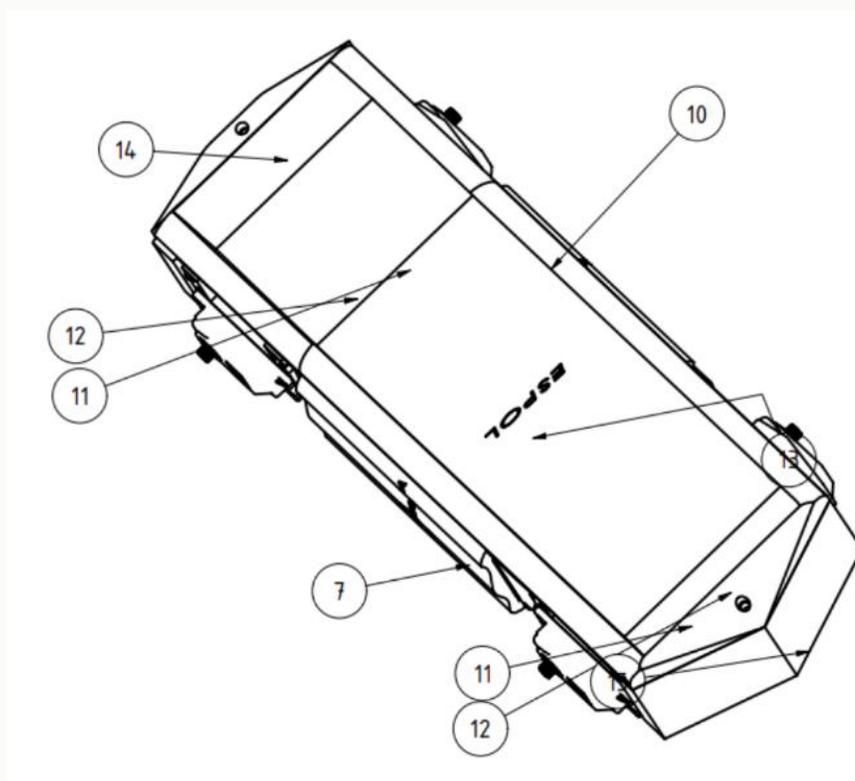


Ensamble estructura

La estructura esta correlacionada y acoplada por pernos y son dos grandes grupos, estructura principal (superior) y laterales.

Ensamble:

La parte superior (10), solo se acoplan dos pernos con contratuerca, a la estructura de las tapas frontal (15) y posterior (14).

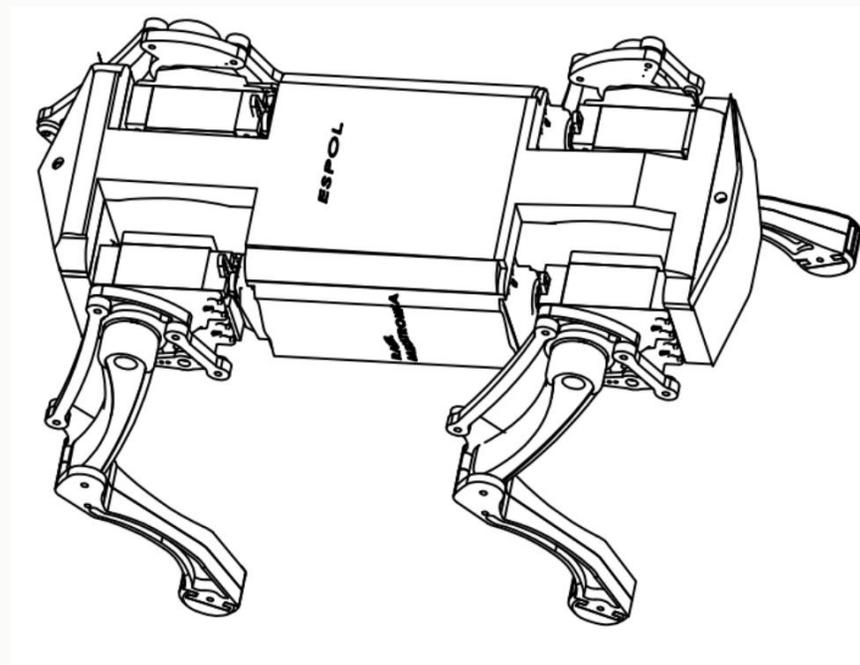


Ensamble Total

Es importante que los servos estén encerrados de forma correcta para que el movimiento mecánico de salida no dañe ni comprometa las piezas.

El armado en su mayor parte es con pernos y contratuercas y hay partes de sumensables que requieren tornillos propios de los servomotores, estos son por ejemplo el caso del acoplamiento muslo-servomotor, en la pierna.

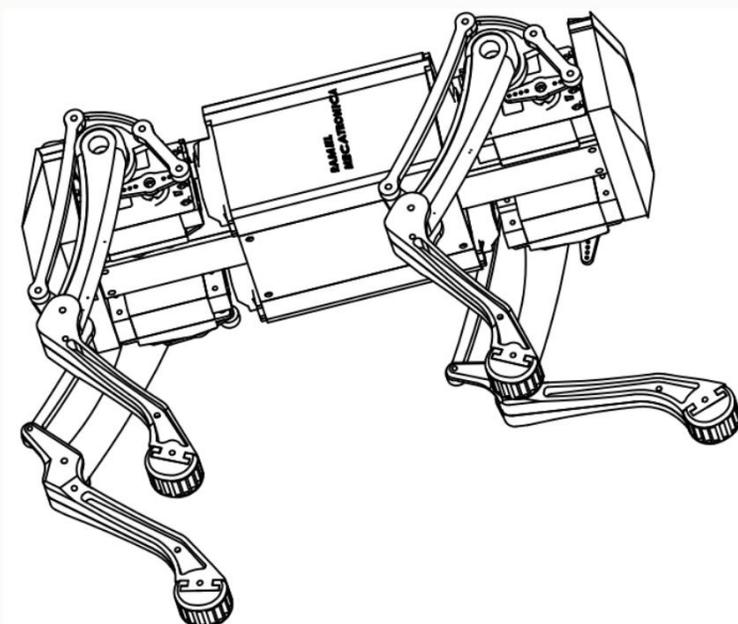
Los dedos serán pegados con pegamento para plásticos, de forma que aseguren permanencia en el proceso, recordar que los dedos son flexibles y perforarlos no es lo más adecuado.



ESPOL

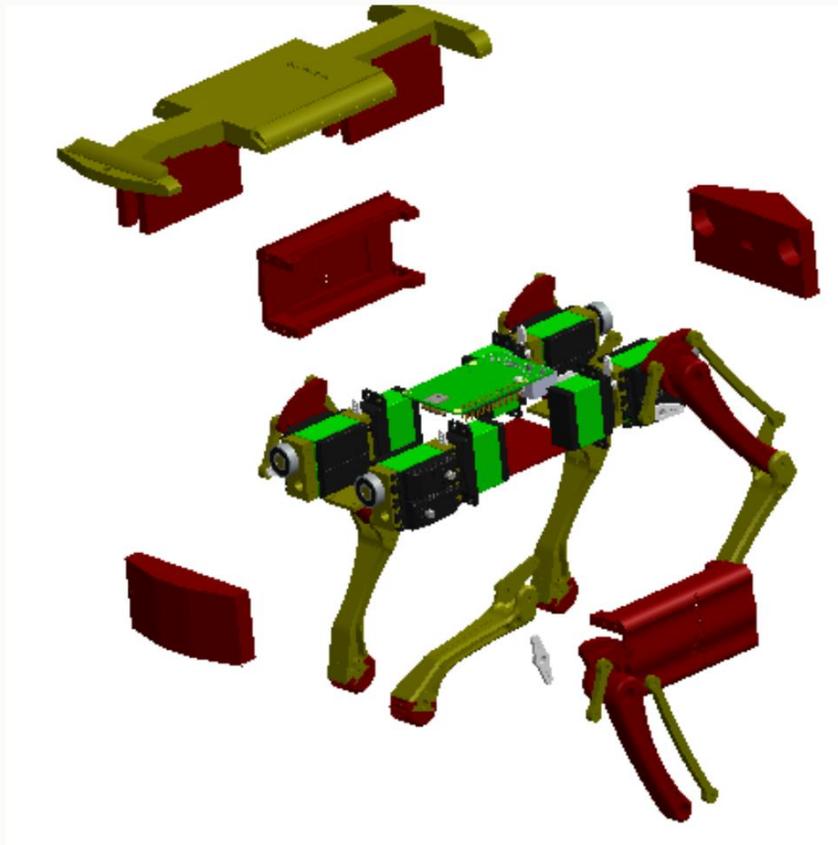
Herramientas Necesarias

- Juegos de destornilladores de precisión o en su defecto para tornillos pequeños.
- Pinzas para ajustar tuercas.
- Pegamento para plástico.
- funjibles.
- Cortador de cables.
- Peladora de cables.



Materiales

- Piezas Mecánicas.
- Rodamientos.
- Placas de control.
- Cables.
- Conectores y terminales para cables.
- Tornillos. M4
- Tuercas M4 Sujeción.
- Ajustadores plasticos.



Contactos

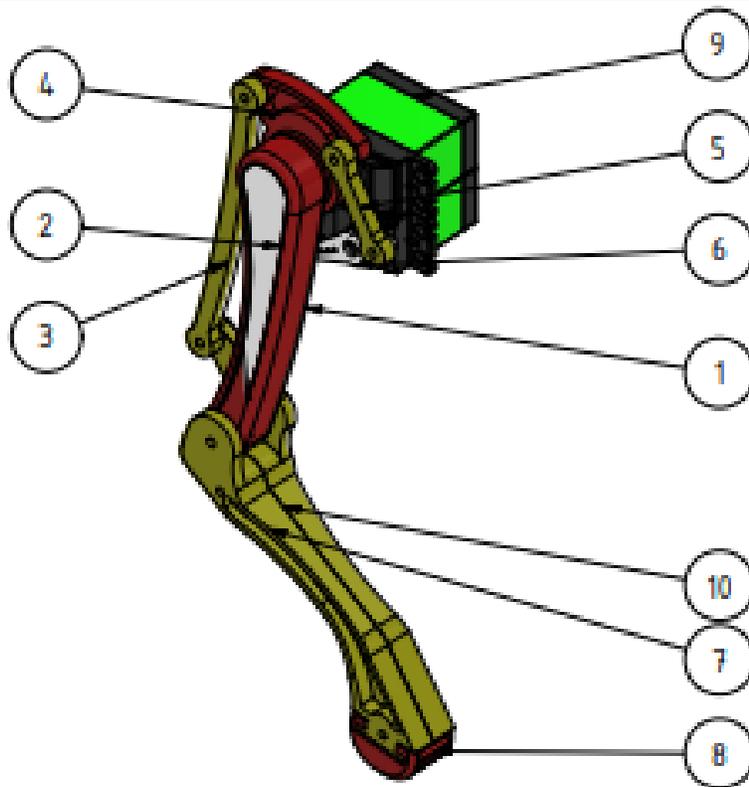
- Autores:
Carlos González Ch.
Cesar Aulestia T.
- Correo:
carjgonz@espol.edu.ec
- Telefono:
0982784414



Apéndice B
Planos mecánicos



LISTA DE PIEZAS			
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA	DESCRIPCIÓN
1	1	Muslo	
2	1	TapaMuslo	
3	1	Extencion Pierna larga	
4	1	Acople Mecanismo Pierna	
5	1	Extencion Pierna Corta	
6	1	Conector paleta Servo	
7	1	P1 Pierna	
8	1	Dedo	
9	2	Bus Servo Hiwonder 35Kg	
10	1	P2 Pierna	



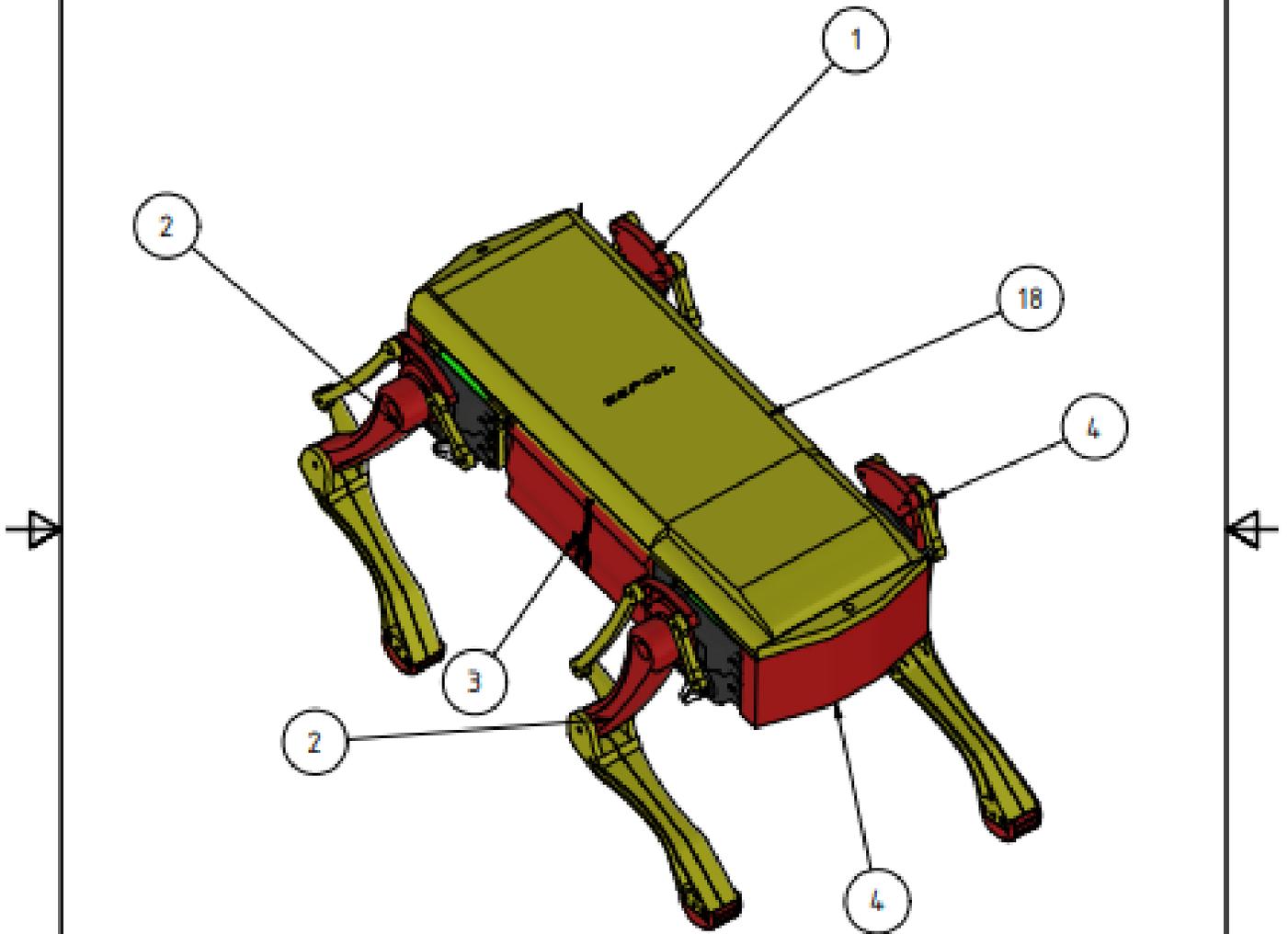
	NOMBRE	FECHA	 Escuela Superior Politécnica del Litoral
Dibujado	Carlos González	19/12/2024	
Ciente	RAMEL	19/12/2024	
Ciente	Ing. Fransisco Yumbia	19/12/2024	
ESCALA 1:2	DIBUJO		FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN
	Ensamble Pierna		Nº 1
			UNIDAD mm





LISTA DE PIEZAS

ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA	DESCRIPCIÓN
1	4	Piernas	
2	4	AntePierna	
3	2	PartesLaterales	
4	1	TapaAdelante	
18	1	Carcasa	



	NOMBRE	FECHA
Dibujado	Carlos González	19/12/2024
Cliente	RAHEL	19/12/2024
Cliente	Ing. Francisco Yumbia	19/12/2024

espol Escuela Superior
Politécnica del Litoral

ESCALA
1:3

DIBUJO
Ensamble Completo

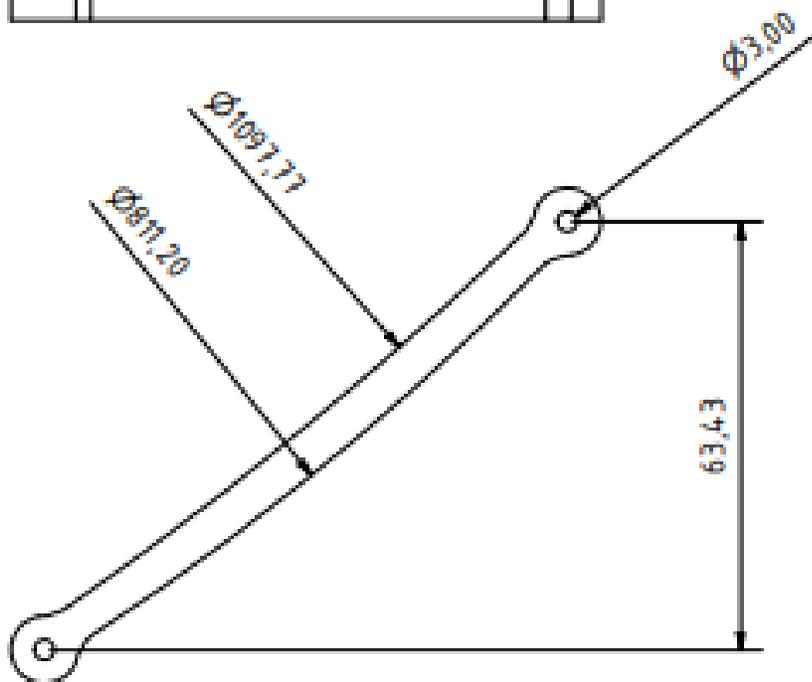
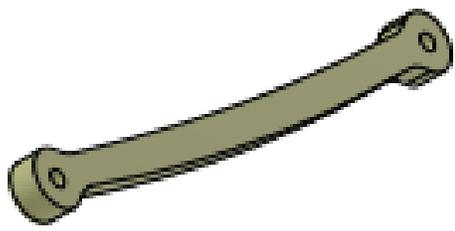
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y
CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN



Nº 2

UNIDAD
mm





	NOMBRE	FECHA
Dibujado	Carlos González	19/12/2024
Ciente	RAMEL	19/12/2024
Ciente	Ing. Fransisco Yumbia	19/12/2024

espol Escuela Superior
Politécnica del Litoral

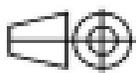
ESCALA
1:1.25

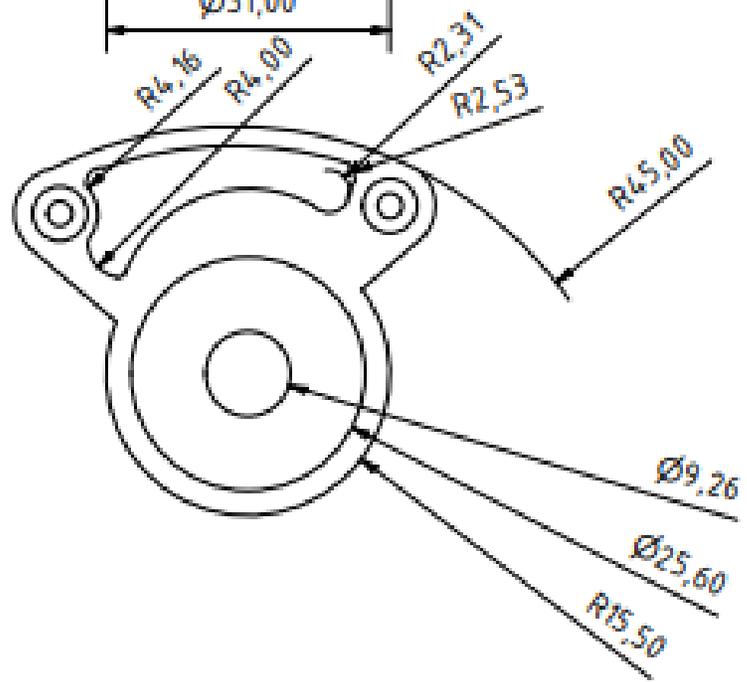
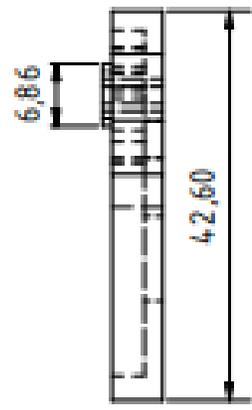
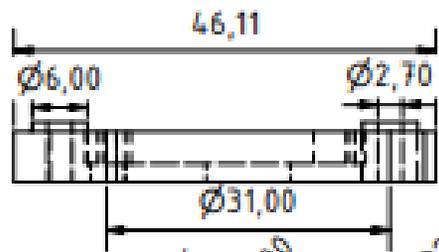
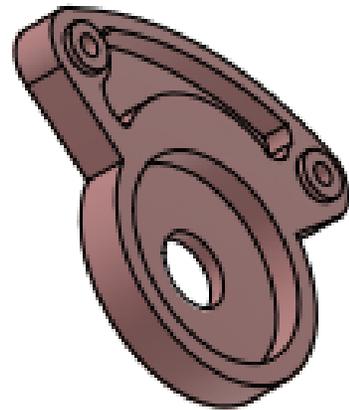
DIBUJO
Extencion Larga

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y
CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN

N° 3

UNIDAD
III





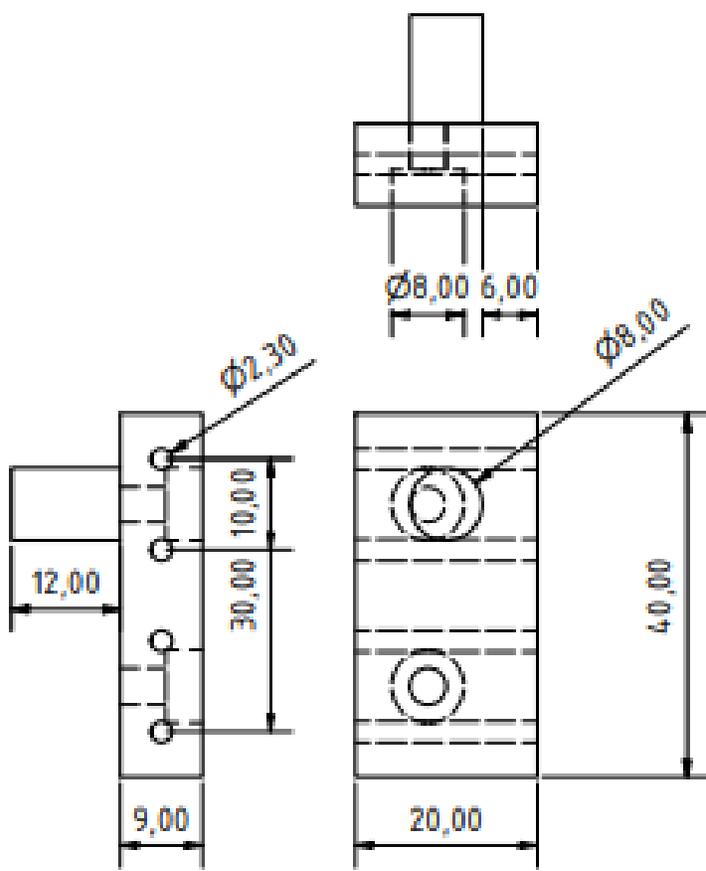
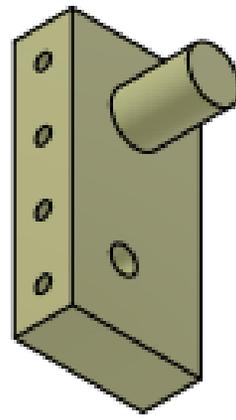
	NOMBRE	FECHA
Dibujado	Carlos González	19/12/2024
Ciente	RAMEL	19/12/2024
Ciente	Ing. Francisco Yumbra	19/12/2024

espol Escuela Superior
Politécnica del Litoral

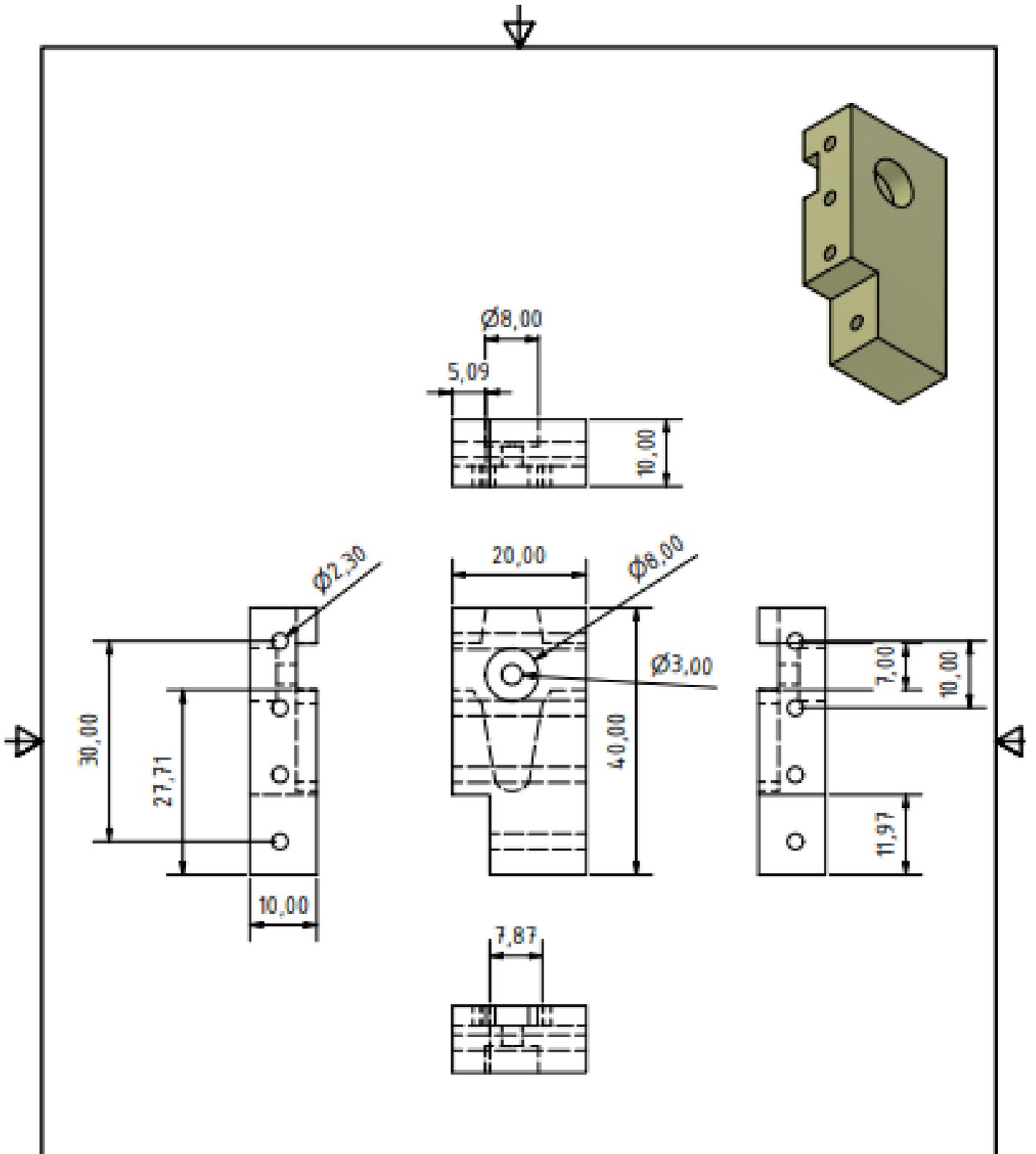
ESCALA 1:0.75	DIBUJO
Acople Principal Mecanismo Pierna	

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN	
N° 5	UNIDAD mm

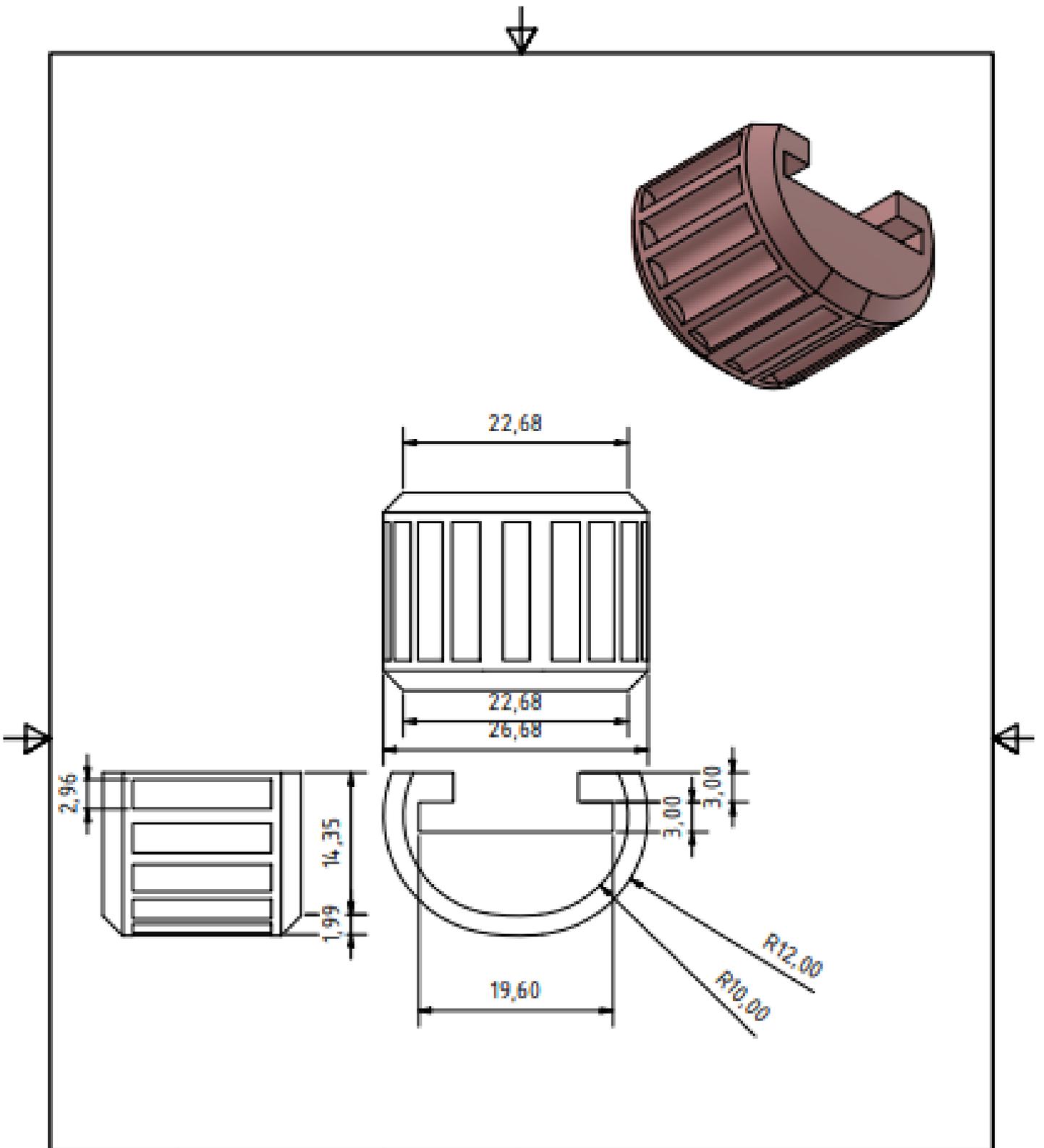




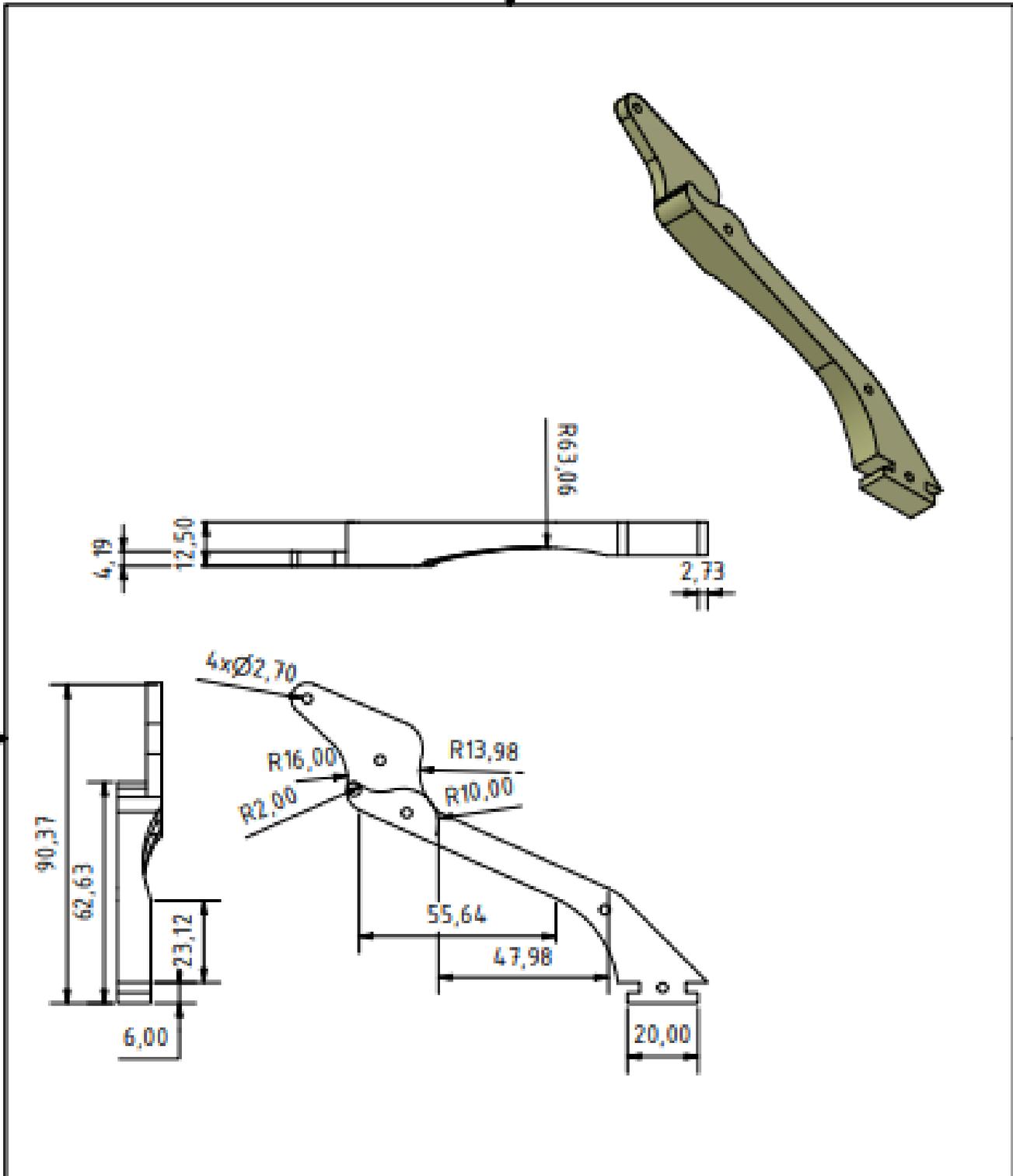
	NOMBRE	FECHA		
Dibujado	Carlos González	19/12/2024		
Cliente	RAHEL	19/12/2024		
Cliente	Ing. Francisco Yumbra	19/12/2024		
ESCALA 1:0.75	DIBUJO		FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN	
	Acople Servo Rodamiento		N° 6	UNIDAD mm



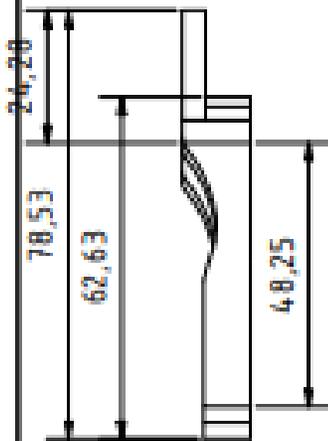
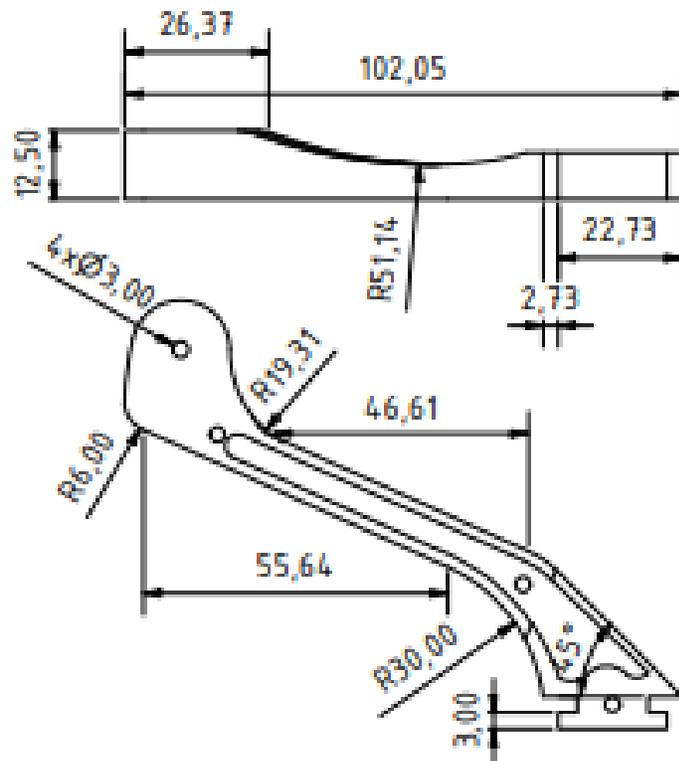
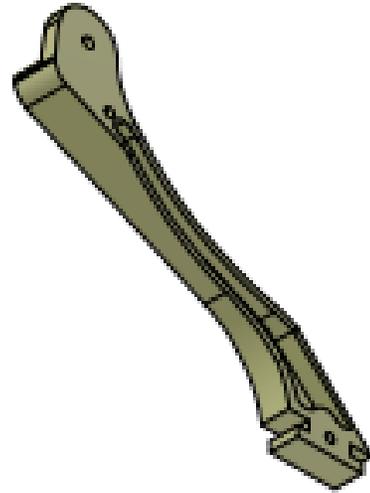
	NOMBRE	FECHA	
Dibujado	Carlos González	19/12/2024	
Cliente	RAMEL	19/12/2024	
Cliente	Ing. Francisco Yumbra	19/12/2024	
ESCALA 1:0.75	DIBUJO		FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN
	Acople Servo Rodamiento Derecha		N° 7
			UNIDAD mm



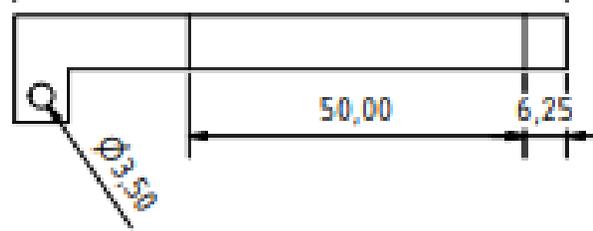
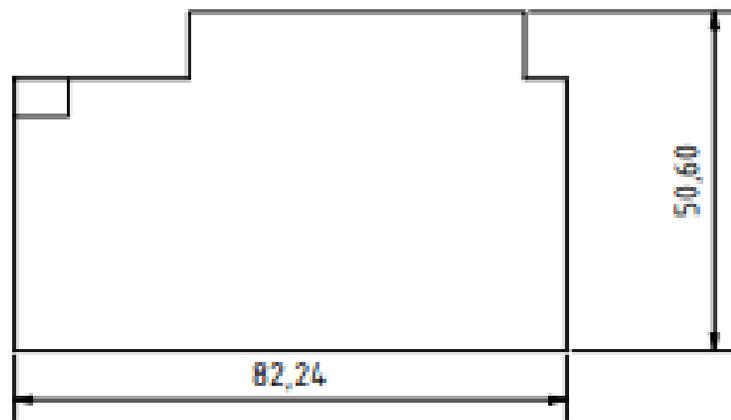
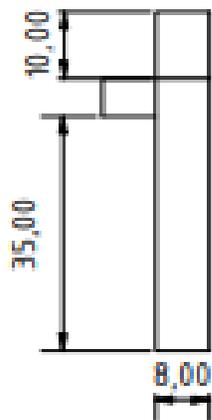
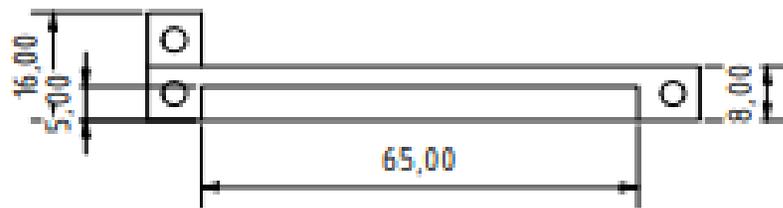
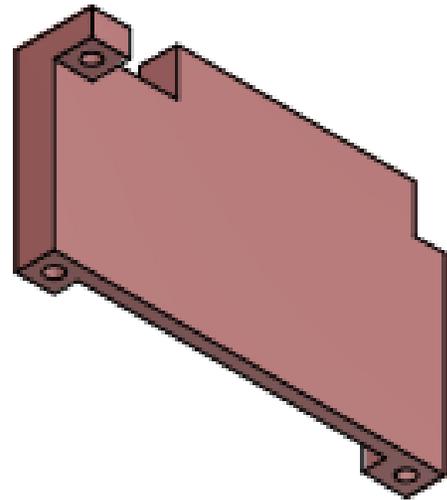
	NOMBRE	FECHA		
Dibujado	Carlos González	19/12/2024		
Ciente	RAMEL	19/12/2024		
Ciente	Ing. Francisco Yumbá	19/12/2024		
ESCALA 1:0.5	DIBUJO		FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN	
	Dedo de peirna		N° 8	UNIDAD mm



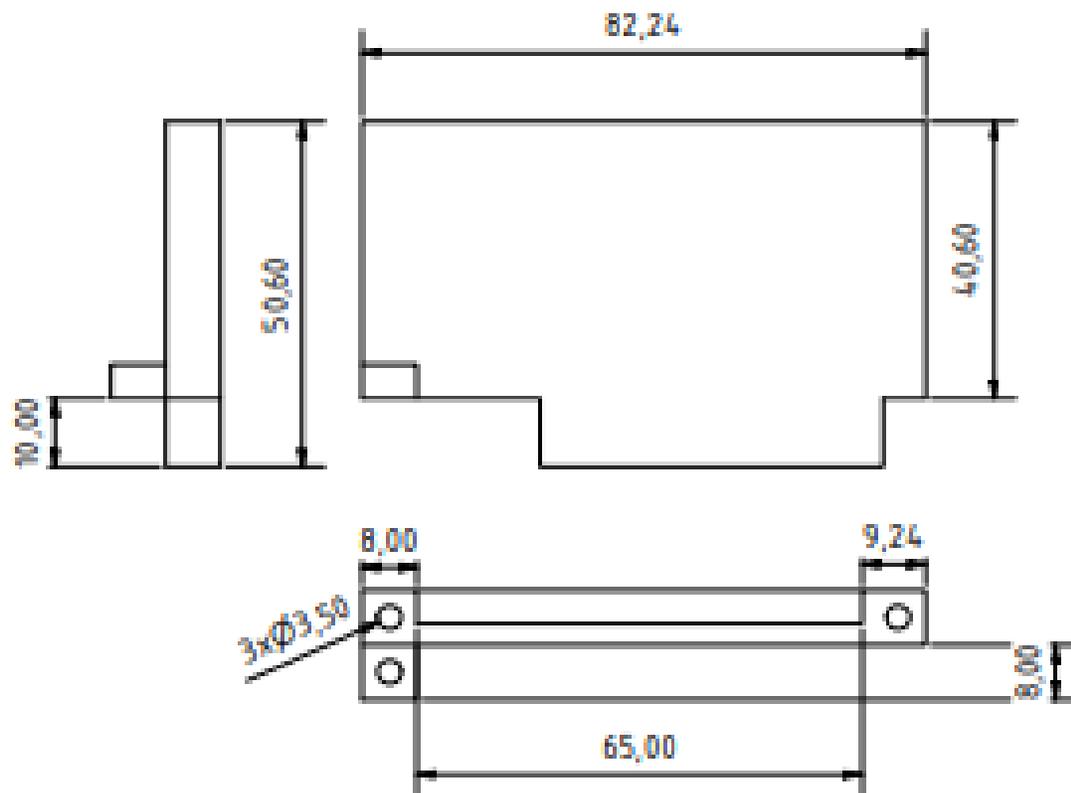
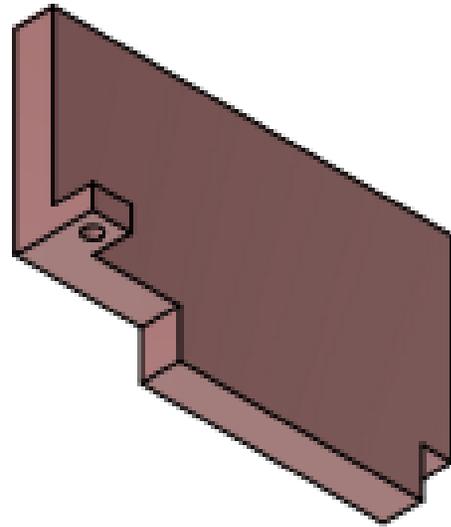
	NOMBRE	FECHA	
Dibujado	Carlos González	19/12/2024	
Ciente	RAMEL	19/12/2024	
Ciente	Ing. Francisco Yumbia	19/12/2024	
ESCALA 1:1.5	DIBUJO		FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN
	Pierna Parte Derecha		N° 9
			UNIDAD mm



NOMBRE		FECHA	
Dibujado	Carlos González	19/12/2024	
Cliente	RAMEL	19/12/2024	
Cliente	Ing. Francisco Yumbra	19/12/2024	
ESCALA 1:1.5	DIBUJO		FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN
Pierna Parte Izquierda			N° 10
			UNIDAD mm



	NOMBRE	FECHA	
Dibujado	Carlos González	19/12/2024	
Ciente	RAMEL	19/12/2024	
Ciente	Ing. Francisco Yumbra	19/12/2024	Escuela Superior Politécnica del Litoral FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN
ESCALA 1:1	DIBUJO		
	Acople Covertor		
			N° 11
			UNIDAD 000



	NOMBRE	FECHA		
Dibujado	Carlos González	19/12/2024		
Ciente	RAMEL	19/12/2024		
Ciente	Ing. Francisco Yumbá	19/12/2024		
ESCALA 1:1	DIBUJO		FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN	
	ACOPLE COBERTOR SERVO DERECHA		N° 12	UNIDAD mm



































































































































































































































































































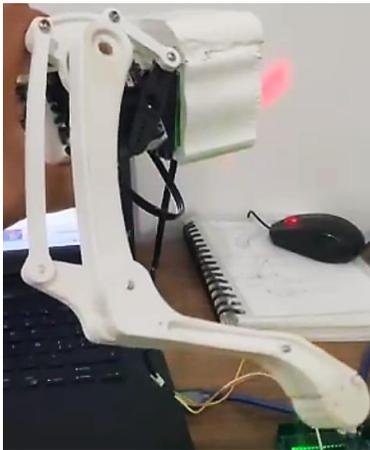
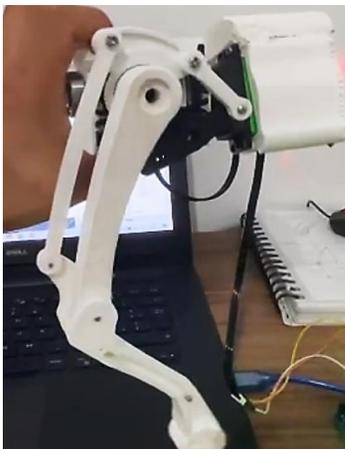
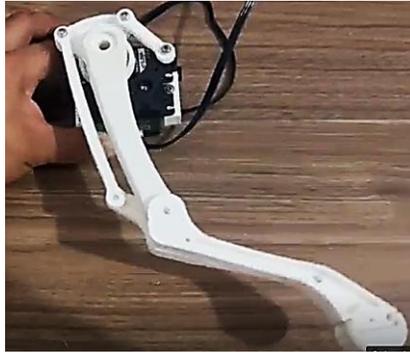







Apéndice C

Pruebas del movimiento de las piernas



Apéndice D

Fabricación adecuada en 3d

Legend

Tipo de función	Tiempo	Porcentaje	Filamento usado
Perimetro	17m	12,1%	2,60 m 7,75 g
Perimetro externo	26m	17,7%	2,53 m 7,55 g
Perimetro del voladizo	12s	0,1%	0,03 m 0,10 g
Relleno interno	53m	36,7%	8,27 m 24,68 g
Relleno sólido	13m	9,1%	1,70 m 5,07 g
Relleno sólido superior	4m	2,5%	0,35 m 1,06 g
Relleno del puente	4m	2,6%	0,58 m 1,73 g
Falda/Balsa	26s	0,3%	0,05 m 0,14 g
Personalizado	12s	0,1%	0,02 m 0,06 g

Tiempos estimados de impresión:
Primera capa: 5m
Total: 2h24m

Configuración de impresión:
0,28 mm SUPERDRAFT (0,6 mm nozzle) (modificado)
Filamento: Generic PLA (modificado)
Impresora: Creality Ender-3 V2 (0,6 mm nozzle)
Soportes: Sólo para forzado de soportes
Relleno: 50% Balsa:

Nombre: AntePierna.STL Edición:
MujoloContrano.STL Edición:

Manipulación de objetos
Coordenadas mundi... X Y Z mm
Posición: 99,03 94,6 8 mm
Girar (relativo): 0 0 0 °
Factores de escala: 100 100 100 %
Tamaño [Mundo]: 103,33 76,47 16 mm
 Pulgadas

Info
Tamaño: 103,33 x 76,47 x 16,00 Volumen: 27414,54
Exportar código G

Plataforma Configuración de Impresión Filamentos Impresoras

0,28 mm SUPERDRAFT (0,6 mm nozzle) @CREALITY...

Capas y perímetros
Relleno
 Falda y balsa
Material de soporte
 Velocidad
 Múltiples Extrusores
 Avanzado
 Opciones de salida
 Notas
 Dependencias

Material de soporte

- Generar material de soporte:
- Soportes generados automáticamente:
- Umbral de voladizos: 40 °
- Forzar soportes para la primera: 0 capas
- Densidad de la primera capa: 90 %
- Expansión de la primera capa: 3 mm

Balsa

- Capas de balsa: 0 capas
- Distancia Z de contacto de la balsa: 0,1 mm
- Expansión de la balsa: 1,5 mm

Opciones de material de soporte y balsa

- Estilo: Orgánico
- Distancia Z de contacto superior: 0,15 mm
- Distancia Z de contacto inferior: Igual que la superior mm
- Patrón: Rectilíneo
- Con protección alrededor del soporte:
- Separación entre patrones: 1,2 mm
- Ángulo del patrón: 0 °
- Radio de cierre: 2 mm
- Capas de la interfaz superior: 2 (por defecto) capas

Legend

Tipo de función	Tiempo	Porcentaje	Filamento usado
Perímetro	7m	13,6%	0,82 m 2,44 g
Perímetro externo	9m	18,1%	0,84 m 2,49 g
Perímetro del voladizo	3s	0,1%	0,01 m 0,02 g
Relleno interno	11m	21,5%	1,28 m 3,81 g
Relleno sólido	8m	16,4%	0,95 m 2,84 g
Relleno sólido superior	2m	4,4%	0,21 m 0,63 g
Relleno del puente	3m	5,8%	0,40 m 1,21 g
Falda/Balsa	15s	0,5%	0,03 m 0,08 g
Personalizado	12s	0,4%	0,02 m 0,06 g

Tiempos estimados de impresión:
Primera capa: 3m
Total: 51m

NOTA:
El objeto laminado "AcopleServoDerecha2.STL" (Mas) 0,30 (1)

Laminado finalizado.

Configuración de impresión:

0.28 mm SUPERDRAFT (0.6 mm nozzle) (modificado)

Filamento: Generic PLA (modificado)

Impresora: Creality Ender-3 V2 (0.6 mm nozzle)

Soportes: Sólo para forzado de soportes

Relleno: 50% Balsa:

Nombre	Edición
AcopleServoDerecha2.STL	
AcopleServoIzquierdo21.STL	

Manipulación de objetos

Coordenadas mundi... X Y Z

Posición: 137,58 109,83 10,5 mm

Girar (relativo): 0 0 0 °

Factores de escala: 100 100 100 %

Tamaño [Mundo]: 20 40 21 mm

Pulgadas

Info

Tamaño: 20,00 x 40,00 x 21,00 Volumen: 7056,92

Exportar código G

- Filamento
- Enfriamiento
- Avanzado
- Anulaciones de filamentos
- Código G personalizado
- Notas
- Dependencias

Filamento

- Color:
- Diámetro: mm
- Multiplicador de extrusión:
- Densidad: g/cm³
- Coste: dinero/kg
- Peso de la bobina: g

Temperatura

- Temperatura de reposo: °C
- Boquilla: Primera capa: °C Otras capas: °C
- Base: Primera capa: °C Otras capas: °C
- Cámara: Nominal: °C Mínima: °C

Legend

Tipo de función	Tiempo	Porcentaje	Filamento usado
Perímetro	40m	10,4%	6,10 m 18,19 g
Perímetro externo	1h3m	16,5%	6,21 m 18,52 g
Perímetro del voladizo	15s	0,1%	0,04 m 0,11 g
Relleno interno	3h16m	51,3%	32,88 m 98,06 g
Relleno sólido	22m	5,8%	2,77 m 8,27 g
Relleno sólido superior	5m	1,3%	0,51 m 1,53 g
Relleno del puente	6m	1,5%	0,87 m 2,59 g
Falda/Balsa	35s	0,2%	0,06 m 0,19 g
Personalizado	12s	0,1%	0,02 m 0,06 g

Tiempos estimados de impresión:
Primera capa: 7m
Total: 6h23m

Laminado finalizado.

Configuración de impresión:

0.28 mm SUPERDRAFT (0.6 mm nozzle) (modificado)

Filamento: Generic PLA (modificado)

Impresora: Creality Ender-3 V2 (0.6 mm nozzle)

Soportes: Sólo para forzado de soportes

Relleno: 50% Balsa:

Nombre	Edición
TapaAdelante.STL	
TapaAtras.STL	

Información del laminado

Filamento Usado (g): 147,53
Filamento Usado (m): 49,46
Filamento Usado (mm³): 118971,95
Coste: 2,95

Tiempo estimado de impresión:
- modo normal: 6h23m

Exportar código G