# UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

## SEDE CUENCA

## CARRERA DE MECATRÓNICA

DISEÑO DE UN PROTOTIPO DE ROBOT CUADRÚPEDO Y PROPUESTA DEL SISTEMA DE CONTROL

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniera en Mecatrónica

AUTOR: MAOLY MILENA PAUTE ESPINOZA
TUTOR: ING. DIEGO RENE URGILES CONTRETRAS, MGTR.
CO-TUTOR: ING. IVAN MARCELO ESCANDON DEIDAN, MGTR.

Cuenca – Ecuador

2025

# CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Maoly Milena Paute Espinoza con documento de identificación N° 0106480635 manifiesto que:

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

Ciudad, 20 de febrero del 2025

Atentamente,

Maoly Milena Paute Espinoza
0106480635

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

Yo, Maoly Milena Paute Espinoza con documento de identificación N° 0106480635, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autora de la propuesta tecnológica: "Diseño de un prototipo de robot cuadrúpedo y propuesta del sistema de control", la cual ha sido desarrollada para optar por el título de: Ingeniera en Mecatrónica, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

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

Cuenca, 20 de febrero del 2025

Atentamente,

Maoly Milena Paute Espinoza
0106480635

# CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Diego Rene Urgiles Contreras con documento de identificación N° 0104431374, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: DISEÑO DE UN PROTOTIPO DE ROBOT CUADRÚPEDO Y PROPUESTA DEL SISTEMA DE CONTROL, realizado por Maoly Milena Paute Espinoza con documento de identificación N° 0106480635, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Propuestas Tecnológicas que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 20 de febrero del 2025

Atentamente,

Ing. Diego Rene Urgiles Contreras MGTR.
0104431374

# Dedicatoria

***Maoly Paute Espinoza***

Este proyecto va dedicado a mi mami Katty, quien ha sido mi guía y mi apoyo en todo este camino, a mi familia quienes han estado al pendiente de todos mis avances y su preocupación ha sido motor para poder culminar este proyecto.

A Henry quien ha sido un apoyo muy grande y ha estado presente desde el inicio de esta etapa de mi vida.

A mi Mamita Olguita, quien desde el cielo me ha estado cuidando, protegiendo y guiando a lo largo de este camino.

# Agradecimientos

***Maoly Paute Espinoza***

Agradezco a mi madre y mi familia, quienes me apoyaron en esta decisión y se preocuparon por mi en todo momento, siendo parte fundamental de este logro.

A mi amigos y compañeros, en especial a Samu, Mateo, Samy, Henry, Andy, Santi y Gerardo, quienes han estado al pendiente de todo el proceso y me han brindado su apoyo y comprensión en cada instante y con quienes he compartido mis logros y mis tristezas.

Al Ing. Diego Urgiles, quien se ha convertido en un amigo y ha sido el promotor de este proyecto, me ha brindado de su guía y ha hecho posible esto con trabajo duro y esfuerzo.

Y finalmente agradezco a Dios por haberme brindado la oportunidad de poder vivir esta etapa universitaria y por darme la sabiduría para poder culminarla.

Este documento fue realizado enteramente en LaTeX

# Índice

**Certificado de responsabilidad y autoría del trabajo de titulación** **I**

**Certificado de cesión de derechos de autor del trabajo de titulación a la Universidad Politécnica Salesiana** **II**

**Certificado de dirección del trabajo de titulación** **III**

**Dedicatoria** **IV**

**Agradecimientos** **V**

**Resumen** **XIII**

**Abstract** **XIV**

**1. Introducción** **1**

**2. Problema** **1**

2.1. Descripción del problema . . . . . 1

2.2. Antecedentes . . . . . 2

2.3. Importancia y alcances . . . . . 2

2.4. Delimitación . . . . . 3

2.4.1. Espacial o geográfica . . . . . 3

2.4.2. Temporal . . . . . 4

2.4.3. Sectorial o institucional . . . . . 4

**3. Objetivos** **4**

3.1. Objetivo general . . . . . 4

3.2. Objetivos Específicos . . . . . 4

**4. Hipótesis** **4**

4.1. Hipótesis General . . . . . 4

4.2. Hipótesis Específicas . . . . . 5

**5. Marco Teórico** **5**

**6. Marco metodológico** **14**
6.1. Elaboración de prototipos de Robot cuadrúpedo . . . . . 14
6.1.1. Elaboración del primer boceto . . . . . 15
6.1.2. Elaboración del segundo boceto . . . . . 16
6.1.3. Elaboración del tercer boceto . . . . . 17
6.2. Matriz de decisión . . . . . 18
6.3. Diseño mecánico del robot cuadrúpedo . . . . . 19
6.4. Diseño del control del robot cuadrúpedo . . . . . 58
6.5. Simulación de esfuerzos del Robot . . . . . 79
6.6. Diseño electrónico del Robot Cuadrupedo . . . . . 84

**7. Resultados** **87**
7.1. Resultados de la parte mecánica del robot cuadrúpedo . . . . . 87
7.2. Resultados de la parte electroónica del robot cuadrúpedo . . . . . 87
7.3. Resultados del diseño de la propuesta de control del robot cuadrúpedo . . . 88

**8. Cronograma** **89**

**9. Conclusiones** **91**

**10. Recomendaciones** **91**

**Referencias** **97**

**ANEXOS** **98**

# Lista de Tablas


1. Matriz de decisión para los diseños del robot cuadrúpedo . . . . . 19
2. *Especificaciones de Motores* . . . . . 57
3. *Especificaciones Adicionales de Motores* . . . . . 58
4. *Aplicaciones y Tipo de Control de Motores* . . . . . 58
5. Comparación del esfuerzo de aplastamiento analítico y la simulación en SOLIDWORKS . . . . . 87
6. *Comparación de parámetros PID para la pata en el suelo* . . . . . 88
7. *Comparación de parámetros PID para la pata en el aire* . . . . . 89
8. Cronograma de actividades. . . . . 90

# Lista de Figuras


1. Ubicación satelital . . . 3
2. *Big Dog* . . . 6
3. *Cheetah* . . . 6
4. *Locomoción* . . . 8
5. *Locomoción por ruedas* . . . 9
6. *Locomoción por extremidades* . . . 10
7. *Locomoción por oruga* . . . 10
8. *Batería ion litio* . . . 12
9. *Batería de polímero de litio* . . . 13
10. *Primer boceto del robot cuadrúpedo* . . . 16
11. *Segundo boceto del robot cuadrúpedo* . . . 17
12. *Tercer boceto del robot cuadrúpedo* . . . 18
13. *Anatomía del elefante* . . . 20
14. *Fases de apoyo* . . . 21
15. *Fase de oscilación* . . . 21
16. *Zancada* . . . 22
17. *Frecuencia de paso* . . . 23
18. *Tiempo de ciclo* . . . 24
19. *Velocidad* . . . 25
20. *Porpiedades de materiales* . . . 27
21. *Eslabon 1* . . . 29
22. *Eslabon 2* . . . 30
23. *Eslabón 3 seccionado* . . . 31
24. *Eslabon 3* . . . 32
25. *Chasis* . . . 33
26. *Robot cuadrúpedo* . . . 34
27. *Diagrama de cuerpo libre una estructura* . . . 37
28. *Diagrama de cuerpo libre estructura lado izquierdo* . . . 38
29. *Diagrama de cuerpo libre con eslabones* . . . 39
30. *Diagrama de cuerpo libre lado izquierdo con eslabones* . . . 40
31. *Robot en posicion cero* . . . 43
32. *Diagrama de cuerpo libre eslabon 1* . . . 44
33. *Diagrama de cuerpo libre eslabon 2* . . . 45

34. *Diagrama de cuerpo libre eslabon 3* . . . . . 46
35. *Cinemática directa e inversa* . . . . . 59
36. *Pata en su mínima posición* . . . . . 60
37. *Trayectoria de la pata en el suelo* . . . . . 61
38. *Trayectoria de la pata en el aire* . . . . . 62
39. *Caminata del robot* . . . . . 63
40. *Caminata del robot fase 2* . . . . . 63
41. *Caminata del robot fase 3* . . . . . 64
42. *PID ajustado manualmente para el eslabón 1 y pata en el suelo* . . . . . 66
43. *PID ajustado automáticamente para el eslabón 1 y pata en el suelo* . . . . . 67
44. *PID ajustado manualmente para el eslabón 2 y pata en el suelo* . . . . . 68
45. *PID ajustado automáticamente para el eslabón 2 y pata en el suelo* . . . . . 69
46. *PID ajustado manualmente para el eslabón 3 y pata en el suelo* . . . . . 70
47. *PID ajustado automaticamente para el eslabón 3 y pata en el suelo* . . . . . 71
48. *PID ajustado manualmente para el eslabón y pata en el aire* . . . . . 73
49. *PID ajustado automáticamente para el eslabón 1 y pata en el aire.* . . . . . 74
50. *PID ajustado manualmente para el eslabón 2 y pata en el aire* . . . . . 75
51. *PID ajustado automáticamente para el eslabón 2 y pata en el aire* . . . . . 76
52. *PID ajustado manualmente para el eslabón 3 y pata en el aire* . . . . . 77
53. *PID ajustado automáticamente para el eslabón 3 y pata en el aire* . . . . . 78
54. *Simulación eslabón 1* . . . . . 80
55. *Simulación eslabón 2* . . . . . 81
56. *Simulación eslabón 3* . . . . . 82
57. *Simulación del chasis* . . . . . 83
58. *Esquema de conexión para el motor* . . . . . 86
59. *Código de cinemática inversa* . . . . . 99
60. *Código para el cálculo de ángulos* . . . . . 100
61. *Código de cinemática directa* . . . . . 101
62. *Código de verificación de errores* . . . . . 102
63. *Código para mostrar los resultados* . . . . . 103
64. *Gráfica y datos de las cinemáticas* . . . . . 104
65. *Código de trayectoria de la pata en el suelo* . . . . . 105
66. *Código cálculo de ángulos para la pata en el suelo* . . . . . 106
67. *Código para la gráfica* . . . . . 106
68. *Gráfica de la pata en el suelo* . . . . . 107

69. *Código para la generación de la trayectoria* . . . . . 108
70. *Código cálculo de ángulos de la pata en el aire* . . . . . 109
71. *Código como la gráfica de la trayectoria de la pata en el aire* . . . . . 110
72. *Gráfica trayectoria de la pata en el aire* . . . . . 111
73. *Código de cálculos de momentos de inercia* . . . . . 112
74. *Código de cinemática inversa* . . . . . 113
75. *Código para valores manuales de PID* . . . . . 114
76. *Gráfica PID manual y automático* . . . . . 115
77. *Gráfica de comparación* . . . . . 116
78. *Especificaciones del motor* . . . . . 121

# Resumen

El proyecto de titulación intitulado "Diseño de un prototipo de robot cuadrúpedo y propuesta del sistema de control"tiene como objetivo desarrollar un robot cuadrúpedo mejorado en sus sistemas mecánico, electrónico y de control. Este trabajo se basa en un diseño previo al que se han implementado mejoras en el chasis, reduciendo peso y tamaño mediante técnicas de optimización topológica, y redimensionado los componentes electrónicos para aumentar la autonomía y la eficiencia energética.

El diseño mecánico se inspira en la anatomía del elefante, adaptando las proporciones de sus extremidades a un robot compacto y funcional. Se utilizaron materiales ligeros como PLA para facilitar la fabricación mediante impresión 3D. El sistema de control integra sensores, actuadores y un controlador.

El proyecto busca servir como material educativo para estudiantes de mecatrónica, fomentando el desarrollo de habilidades prácticas y teóricas. Las simulaciones y pruebas realizadas verifican la viabilidad del diseño, destacando su potencial para aplicaciones en investigación y exploración en terrenos desafiantes.

**Palabras clave:** Robot cuadrúpedo, diseño mecatrónico, impresión 3D, locomoción en terrenos irregulares, optimización estructural, sistema de control, material PLA

# Abstract

The thesis project titled "Design of a Quadruped Robot Prototype and Control System Proposal", aims to develop a quadruped robot enhanced in its mechanical, electronic, and control systems. This work builds upon a previous design, implementing improvements to the chassis by reducing weight and size through topological optimization techniques and resizing electronic components to increase battery life and energy efficiency.

The mechanical design is inspired by the anatomy of the elephant, adapting the proportions of its limbs to a compact and functional robot. Lightweight materials such as PLA were used to facilitate manufacturing through 3D printing. The control system integrates sensors, actuators, and advanced control techniques to ensure stability and precision on uneven terrain.

The project aims to serve as an educational resource for mechatronics students, fostering the development of practical and theoretical skills. Simulations and tests conducted verify the feasibility of the design, highlighting its potential for applications in research and exploration in challenging terrains.



**Keywords:** Quadruped robot, Mechatronic design, 3D printing, Locomotion on uneven terrain, Structural optimization, Control system, PLA material

# 1. Introducción

Los robots cuadrúpedos han ganado un lugar destacado en el ámbito de la robótica debido a su capacidad para desplazarse en terrenos irregulares, ofreciendo soluciones en áreas como exploración, misiones de rescate y educación. Inspirados en la anatomía y locomoción de animales cuadrúpedos, estos robots destacan por su versatilidad y adaptabilidad. El diseño de estos sistemas requiere un enfoque integral que integre elementos mecánicos, electrónicos y de control para garantizar un desempeño eficiente.

Este proyecto de titulación se centra en el desarrollo de un prototipo de robot cuadrúpedo con mejoras en el diseño mecánico, los sistemas electrónicos y la arquitectura de control. La estructura mecánica es ligera y robusta, basada en las proporciones de las extremidades de un elefante, y fabricada con materiales accesibles como PLA mediante impresión 3D. El sistema de control incorpora técnicas avanzadas para asegurar estabilidad y locomoción eficiente en terrenos desafiantes.

El trabajo se basa en investigaciones previas, abordando retos como la reducción de peso, el aumento de la eficiencia energética y la mejora del rendimiento general. Además, busca contribuir al desarrollo educativo de los estudiantes de mecatrónica, sirviendo como referencia práctica para la aplicación de conceptos teóricos. Los resultados del proyecto tienen un alto potencial para aplicaciones en investigación, educación y exploración, demostrando la importancia de los enfoques interdisciplinarios en la robótica.

# 2. Problema

## 2.1. Descripción del problema

El proyecto titulado “Diseño de un Mecanismo de Movilidad para un Robot Cuadrúpedo” (CUADRADO, 2022) , se identifica la necesidad de optimizar el chasis del robot. Se busca reducir su peso y tamaño mediante técnicas de optimización topológica, manteniendo sus capacidades mecánicas.

Para propósitos de este trabajo de titulación, al modelo propuesto en “Diseño de un Mecanismo de Movilidad para un Robot Cuadrúpedo” (CUADRADO, 2022) se le denominará robot cuadrúpedo uno"

Adicionalmente, se han identificado oportunidades de mejora en el sistema electrónico del robot cuadrúpedo. Se propone un redimensionamiento de los componentes electrónicos con

el objetivo de reducir el peso y mejorar las prestaciones energéticas del sistema de baterías. Esta optimización es esencial para prolongar la autonomía del robot y mejorar su eficiencia operativa. Por último, uno de los aspectos que requiere atención en el diseño actual del robot cuadrúpedo es la ausencia de un sistema de control. La implementación de un sistema de control adecuado es fundamental para coordinar y gestionar de manera eficiente las funciones mecánicas y electrónicas del robot, garantizando su correcto funcionamiento y facilitando su integración en diferentes aplicaciones y entornos operativos.

## 2.2. Antecedentes

Los avances recientes en robótica han impulsado a la carrera de mecatrónica de la Universidad Politécnica Salesiana (UPS) sede Cuenca a proponer el diseño de un robot cuadrúpedo. Este proyecto se centra no solo en la mecánica del chasis, sino también en el diseño integrado del sistema electrónico, buscando una sinergia entre ambas áreas para optimizar el rendimiento del robot. La propuesta realizada en el proyecto de titulación "Diseño de un Mecanismo de Movilidad para un Robot Cuadrúpedo" (CUADRADO, 2022), contiene una propuesta inicial del diseño de un robot cuadrúpedo de la carrera de mecatrónica, aborda tanto la mecánica como la electrónica como componentes interdependientes. El diseño del chasis busca garantizar una estructura robusta y ligera, mientras que el sistema electrónico se diseñó con el objetivo de ofrecer un control adecuado para la correcta operación del robot, cuando este sea construido.

Este proyecto representa un antecedente significativo en el campo de la mecatrónica, demostrando la capacidad de la carrera y la universidad para integrar diferentes disciplinas y tecnologías en la creación de soluciones robóticas avanzadas. La combinación de un diseño mecánico y un sistema electrónico son las bases fundamentales para futuras investigaciones y desarrollos en el ámbito de los robots cuadrúpedos.

## 2.3. Importancia y alcances

La investigación propone el diseño mecatrónico de un robot cuadrúpedo como material para guiar a los estudiantes de la carrera de mecatrónica en la aplicación práctica de conceptos mecánicos, electrónicos y de control. Este proyecto de diseño se desarrollará como trabajo de titulación, ofreciendo una alternativa educativa integral y práctica para los futuros profesionales en el campo de la mecatrónica.

En el trabajo de titulación presente propuesto va a brindar solución a problemas en la mecánica como el rediseño del chasis mejorando sus capacidades mecánicas y en el diseño electrónico redimensionado los componentes y mejorando la autonomía de las baterías, estas necesidades fueron identificados en el trabajo de titulación "DISEÑO DE UN MECANISMO DE MOVILIDAD PARA UN ROBOT CUADRÚPEDO"(CUADRADO, 2022), además de proponer el diseño de un sistema de control para el robot cuadrúpedo.

## 2.4. Delimitación

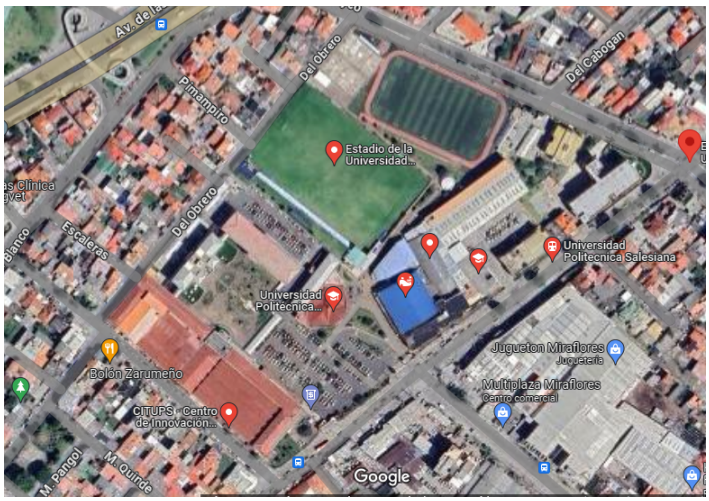
El problema de estudio se delimitará en las siguientes dimensiones:

### 2.4.1. Espacial o geográfica

El desarrollo del trabajo de titulación fue realizado en la Matriz de la Universidad Politécnica Salesiana, la cual se encuentra ubicada en C. Vieja 12-30 y Av. Elia Liut, en el cantón Cuenca, provincia del Azuay, sector el Vecino.

**Figura 1**

*Ubicación satelital*




*Ubicación Universidad Politécnica Salesiana* (2022)

#### 2.4.2. Temporal

El desarrollo del trabajo de titulación se llevará a cabo durante la asignatura de Integración Curricular con un total de 240 horas.

#### 2.4.3. Sectorial o institucional

La Universidad Politécnica Salesiana se encuentra dentro del sector de la educación.

# 3. Objetivos

## 3.1. Objetivo general

- Diseñar un robot cuadrúpedo y proponer un sistema de control aplicando mejoras al sistema mecánico y electrónico del robot cuadrúpedo uno.

## 3.2. Objetivos Específicos

- Definir las condiciones actuales del diseño del sistema mecatrónico del robot cuadrúpedo uno .
- Establecer el diseño mecánico aplicando mejoras a la estructura del robot cuadrúpedo uno.
- Establecer diseño electrónico aplicando mejoras al robot cuadrúpedo uno.
- Diseñar una propuesta para el sistema de control para el robot cuadrúpedo.

# 4. Hipótesis

## 4.1. Hipótesis General

Se diseñará el sistema mecatrónico de un robot cuadrúpedo y proponer un sistema de control aplicando mejoras al sistema mecánico y electrónico del diseño propuesto en el trabajo de titulación “Diseño de un Mecanismo de Movilidad para un Robot Cuadrúpedo” (CUADRADO, 2022).

### 4.2. Hipótesis Específicas

- Se definirá las condiciones actuales del diseño del sistema mecatrónico del robot cuadrúpedo propuesto en el trabajo de titulación "Diseño de un Mecanismo de Movilidad para un Robot Cuadrúpedo" (CUADRADO, 2022).
- Se establecerá las mejoras a aplicar en el diseño mecánico del robot cuadrúpedo uno.
- Se establecerá las mejoras a aplicar al diseño electrónico del robot cuadrúpedo uno.
- Se diseñará una propuesta para el sistema de control para el robot cuadrúpedo uno.

## 5. Marco Teórico

El avance en la robótica ha permitido desarrollar robots con capacidades, destacando especialmente los robots cuadrúpedos por su versatilidad y capacidad para moverse en terrenos complicados. Empresas como Boston Dynamics han liderado estos avances, demostrando la integración efectiva de sistemas mecánicos y electrónicos.

Boston Dynamics es una empresa líder en avances robóticos, conocida por los resultados de sus investigaciones. La compañía ha logrado que el desarrollo de los robots aumente sus prestaciones estándar con productos cada vez más ágiles, inteligentes, flexibles e innovadores. Fundada por Marc Raibert, un ingeniero eléctrico con doctorado del Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT), Boston Dynamics ha marcado un hito en la robótica. Su primer robot, BigDog como se muestra en la Figura 2, impresionó desde el principio. Este robot de cuatro patas es un transportador automatizado que utiliza varios sensores de navegación para moverse en terrenos difíciles, como áreas rocosas o pantanos. BigDog tenía unas dimensiones de 76 cm de alto, 91 cm de largo y un peso de 109 kg. El modelo inicial podía transportar cargas de hasta 155 kg y caminar a una velocidad de 6 km/hora, incluso en pendientes. (Boston Dynamics, 2008)

**Figura 2**

*Big Dog*

*Nota: Big dog es el robot cuadrupedo de Boston Dynamics. (Generation Robots, 2008)*

Por otra parte, el proyecto Cheetah es un robot de cuatro extremidades conocido por caminar a una velocidad de 46 km/h como se observa en la Figura 3, más rápido que BigDog. Accionado por una bomba hidráulica externa, funciona en una cinta de correr de alta velocidad en el laboratorio. En 2013, Boston Dynamics desarrolló su versión gratuita y la llamó WildCat. Puede correr a una velocidad de 32 km/h sin perder el equilibrio. Corre con una marcha galopante que se asemeja a la de un caballo o un perro.(Boston Dynamics, 2013)

**Figura 3**

*Cheetah*

*Nota: Cheetah, su diseño se inspira en otros modelos basados en animales creados por Boston Dynamics. (Wired, 2022)*

En Latinoamérica, la investigación y desarrollo de robots cuadrúpedos han mostrado avances significativos en los últimos años, la Universidad de São Paulo (USP) en Brasil, investigadores han trabajado en el desarrollo de robots cuadrúpedos, centrándose en la locomoción y la adaptación a terrenos irregulares. El Instituto Politécnico Nacional (IPN) en México, ha desarrollado varios proyectos de robótica, incluyendo robots cuadrúpedos para aplicaciones de rescate y exploración. La Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), ha estado trabajando en la integración de inteligencia artificial y aprendizaje automático en robots cuadrúpedos para mejorar su capacidad de navegación y toma de decisiones en tiempo real.

En Ecuador, la investigación y desarrollo de robots cuadrúpedos está en una fase emergente, impulsada por universidades y centros de investigación, La Universidad Politécnica Salesiana (UPS) ha sido una de las instituciones pioneras en Ecuador en el campo de la robótica. Han desarrollado varios proyectos de robótica, incluyendo robots cuadrúpedos. Los estudiantes y profesores de la carrera de Mecatrónica han trabajado en el diseño y construcción de robots cuadrúpedos con el objetivo de explorar sus aplicaciones en educación e investigación con proyectos titulados como "Diseño de un mecanismo de movilidad para un robot cuadrúpedo"(Astudillo Cuadrado, 2023) ó .Estudio, diseño y construcción de un robot cuadrúpedo omnidireccional"(Ávila Torres y Zambrano Abad, 2007).

La Escuela Politécnica Nacional (EPN) también ha realizado avances en robótica, con proyectos que incluyen el desarrollo de robots cuadrúpedos con proyectos titulados como Çontrol y ensamblaje de un robot que emule un perro doméstico"(Cueva Robles, Redrobán Matute, y Sotomayor, 2005) y "Diseño y construcción de un robot de vigilancia"(Pinta Arrobo, 2007)

Y por último la Universidad de las Fuerzas Armadas (ESPE) ha estado involucrada en proyectos de robótica enfocados en la mejora de la tecnología militar y de defensa con proyectos como "Diseño y construcción de un prototipo de robot cuadrúpedo bio-inspirado orientado hacia agility robots con capacidad de navegación teledirigida"(Chicaiza y Morales, 2015) y "Desarrollo del sistema de navegación para robot cuadrúpedo de dimensiones reducidas en entornos no definidos con perspectiva cenital"(Alexandra y Eduardo, 2018)

Específicamente, en lo referente a robots cuadrúpedos, la locomoción estudia el movimiento de un cuerpo en una dirección específica. En el caso de un robot con patas, la locomoción se logra mediante una serie de movimientos coordinados de sus articulaciones. Generalmente, se consideran tres tipos básicos de locomoción en un robot cuadrúpedo: caminar, trotar y

galopar. Algunos expertos también mencionan un cuarto tipo: el medio galope, analizado particularmente en las velocidades de desplazamiento en relación con los tipos trotar y galopar; el desafío significativo que el análisis del movimiento arroja, es mantener la estabilidad del robot durante la transición entre estos diferentes tipos de locomoción.(Buehler y McGhee, 2005)

**Figura 4**

*Locomoción*

*Nota: Esta imagen muestra las diferentes formas de locomoción de un perro. Cada forma de movimiento se caracteriza por una combinación distinta de posiciones de las patas, lo cual ilustra la diversidad de patrones de marcha en los cuadrúpedos. (Cultura Inquieta, 2018)*

Asimismo, los robots con ruedas son ideales para desplazarse sobre superficies planas, ya que pueden alcanzar altas velocidades en estas condiciones. No obstante, los robots con patas tienen la ventaja de superar obstáculos bajos en relación con su tamaño, donde un robot con ruedas podría atascarse si el obstáculo es más grande que el radio de la rueda. (Boletín UPIITA, IPN, 2024)

Por consiguiente, la locomoción con patas requiere más grados de libertad y una mayor

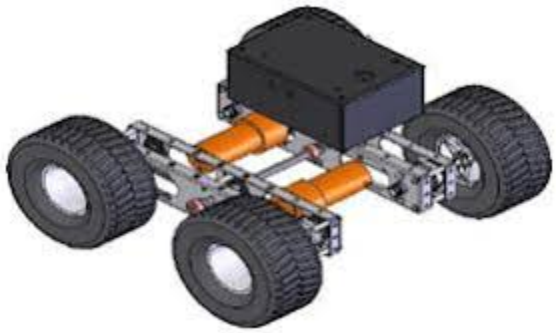
complejidad mecánica. En un robot cuadrúpedo, existen numerosas formas de desplazamiento que pueden ser implementadas, similar a los movimientos de un caballo, como caminar, trotar, galopar y medio galope. En general, la cantidad de patrones de marcha que una máquina con extremidades puede realizar, depende del número de miembros, y cada tipo de marcha sigue un patrón específico de movimientos.(Buehler y McGhee, 2005)

De este modo, en un particular análisis de los tipos de locomoción aplicada a robots que se desplazan por tierra, se identifican 3 formas:

- Por ruedas: Esta locomoción posee diferentes estados, el primero se llama diferencial, son movimientos generados por la diferencia de velocidad entre las ruedas, su principal ventaja es su giro sobre si mismo, el segundo es conocido como mecanismo de Ackermann, consiste en una barra de dirección de las llantas delanteras para que el vehículo gire.

**Figura 5**

*Locomoción por ruedas*



*Nota: La imagen ilustra un sistema de locomoción por ruedas, utilizado en robots móviles para desplazarse de manera eficiente en superficies planas y moderadamente irregulares. (LAFMIA, Universidad Tecnológica de Compiègne, 2016)*

- Por legs (extremidades): Consiste en el desplazamiento del robot por medio de extremidades, son de alta complejidad, mientras menos extremidades posea es más complicado controlar su estabilidad.

**Figura 6**

*Locomoción por extremidades*

*Nota: Un robot con locomoción por extremidades, diseñado para desplazarse en terrenos complejos e irregulares. Este tipo de locomoción se caracteriza por su versatilidad y capacidad de adaptarse a diferentes superficies, imitando los movimientos de los animales cuadrúpedos para lograr un mayor equilibrio y tracción. (Noticias de la Ciencia, 2024)*

- Por orugas: Usa cadenas o bandas para realizar su desplazamiento, este posee limitaciones al desplazarse por superficies irregulares. (González y Guzmán, 2019)

**Figura 7**

*Locomoción por oruga*

*Nota: La imagen muestra un sistema de locomoción por oruga, ideal para terrenos difíciles y superficies irregulares, proporcionando estabilidad y tracción mejoradas. (Hinowa S.p.A., 2022)*

En el caso del sistema mecánico, es el encargado del movimiento del robot. Esto contiene motores y articulaciones, tiene piezas auxiliares como los tubos y ruedas. Para armarlo se puede usar materiales plásticos o metálicos para la estructura interna o externa de modo que pueda moverse sin problemas.

Al abordar el sistema eléctrico y electrónico, la alimentación es fundamental para asegurar la energía necesaria que posibilite el movimiento electromecánico. Las baterías de alto rendimiento se destacan por su capacidad superior para almacenar energía y proporcionar una potencia estable y eficiente. Están especialmente diseñadas para satisfacer las necesidades energéticas de los robots exploradores, que requieren una fuente de energía confiable y duradera. Entre los tipos de baterías de alto rendimiento más comunes en robótica, se encuentran:

- Baterías de ion de litio: Estas baterías son muy populares en la robótica debido a su alta capacidad de energía y su capacidad para mantener una entrega de potencia estable. Son compactas, ligeras y tienen una vida útil prolongada, haciéndolas perfectas para robots exploradores. Además, permiten una carga rápida y tienen una baja tasa de autodescarga, lo que las hace ideales para aplicaciones que requieren energía constante durante periodos prolongados. Al ser muy usadas también cuentan con algunas desventajas como; duración media escasa, casi independientemente de su uso, sólo tienen una vida útil de unos 3 años, soportan un número limitado de cargas entre 500 - 1000, son caras ,su fabricación es más costosa que otras soluciones similares, si bien actualmente el precio se aproxima rápidamente al de las otras tecnologías, pueden sobrecalentarse, están fabricadas con materiales inflamables que las hace propensas a detonaciones o incendios.(Emtez, 2024)

**Figura 8**

*Batería ion litio*

*Nota: La imagen representa una batería de ion litio, conocida por su alta densidad de energía y eficiencia, utilizada comúnmente en dispositivos electrónicos portátiles y robótica. (Honor, 2018)*

- Baterías de polímero de litio: Similar a las baterías de ion de litio en tecnología y desempeño, las baterías de polímero de litio son aún más delgadas y flexibles. Esta característica las hace perfectas para robots exploradores que necesitan un diseño ligero y compacto. Ofrecen una alta densidad energética y una tasa de autodescarga baja, asegurando una energía constante y duradera. Además, estas baterías son seguras y estables, lo que las convierte en una opción confiable para los robots exploradores. Al ser muy usadas también cuentan con algunas desventajas como: Riesgo de incendio y explosión, ya que químicamente son más inestables y peligrosas si se dañan o cargan incorrectamente, costo son más caras que otras baterías recargables, ciclo de vida corto su capacidad disminuye significativamente después de unos cientos de ciclos de carga, fragilidad física son más susceptibles a daños por impacto o perforación.(Dan-Tech, 2023)

**Figura 9**

*Batería de polímero de litio*

*Nota: La imagen muestra una batería de polímero de litio, destacada por su flexibilidad de forma y bajo peso, ideal para aplicaciones en dispositivos compactos y robótica avanzada. (Óscar González, 2016)*

En el ámbito electrónico, un robot cuadrúpedo está formado por una variedad de componentes esenciales para su funcionamiento:

- Sensores: Estos dispositivos son responsables de detectar y reaccionar ante cambios en el ambiente. Existen distintos tipos de sensores, como los de luz, sonido, presión, temperatura, entre otros. (Dewesoft, 2024)
- Actuadores: Son componentes que posibilitan que el robot cuadrúpedo interactúe con su entorno. Pueden tomar diferentes formas, como motores, servomotores, actuadores hidráulicos o neumáticos. (Roboticoss, 2024)
- Controladores: Estos dispositivos tienen la función de procesar la información captada por los sensores y de regular los actuadores. Pueden ser desde microcontroladores como Arduino o Raspberry Pi hasta sistemas embebidos más avanzados. (Fernández, 2024)

En robótica, existen varios tipos de sistemas de control:

- Control en Lazo Abierto: Este método de control no emplea retroalimentación para ajustar posibles errores. La acción de control se basa exclusivamente en la entrada sin considerar la salida o la condición actual del sistema. Se utiliza en tareas sencillas donde la precisión no es esencial, como movimientos programados o acciones repetitivas. (Control Automático Educación, 2024b)

- Control en Lazo Cerrado: Este sistema utiliza retroalimentación para corregir y mantener el sistema en un estado determinado. Es el más utilizado en robótica para mantener la posición, velocidad o trayectoria del robot ajustando los actuadores mediante la información de los sensores. (Control Automático Educación, 2024b)

- Control PID (Proporcional-Integral-Derivativo): Este método combina tres componentes para generar una acción de control que se adapta a los cambios en el sistema. Es común en robots para garantizar estabilidad y precisión en tareas como navegación, manipulación de objetos y control de movimiento.(Control Automático Educación, 2024a)

- Control Adaptativo: Este sistema ajusta automáticamente los parámetros del controlador según las condiciones cambiantes del sistema o del entorno. Es beneficioso en entornos dinámicos donde las condiciones varían rápidamente, permitiendo al robot mantener un rendimiento óptimo. (StudySmarter, 2024a)

- Control Predictivo (MPC - Model Predictive Control): Este enfoque utiliza un modelo del sistema para prever su comportamiento futuro y optimizar la acción de control en un horizonte de tiempo determinado. Se emplea en robots avanzados para tareas complejas como navegación autónoma e interacción con el entorno. (StudySmarter, 2024b)

En resumen, el diseño de robots cuadrúpedos revela avances importantes en locomoción, sistemas de control y tecnologías de alimentación, como lo demuestran los desarrollos de Boston Dynamics. Estas innovaciones permiten superar obstáculos complejos y adaptarse a diferentes condiciones, aunque persisten desafíos relacionados con la estabilidad y la eficiencia energética. El objetivo general de este trabajo es desarrollar un robot cuadrúpedo y proponer un sistema de control mejorando los sistemas mecánicos y electrónicos. Este objetivo está alineado con los logros y desafíos identificados, que apuntan a optimizar la eficiencia estructural y la estabilidad cinemática, proponiendo un rendimiento en aplicaciones del mundo real.

# 6. Marco metodológico

## 6.1. Elaboración de prototipos de Robot cuadrúpedo

Considerando la falta de sistemas eficientes de movilidad y adaptabilidad en robots cuadrúpedos para aplicaciones específicas, el desarrollo del prototipo de un robot cuadrúpedo capaz de operar en terrenos representa una contribución significativa que fortalecerá la funcionalidad y versatilidad de estos robots en entornos desafiantes. Para la elaboración de

este prototipo, se empleará la metodología hipotético-deductiva, que se basa en formular una hipótesis inicial sobre el desempeño y comportamiento del robot, seguida de la obtención de conclusiones específicas a partir de esta hipótesis. Esto será verificado mediante pruebas experimentales, siguiendo los pasos detallados a continuación:

En primer lugar, se realizará un análisis de todas las variables necesarias para el modelado del prototipo, identificando las características fundamentales que debe poseer el sistema de locomoción del robot cuadrúpedo. Esto incluye parámetros esenciales como los rangos de movimientos de las extremidades, la estabilidad en terrenos irregulares y los materiales para la estructura. Además, se analizarán los aspectos mecánicos del modelado en términos de tamaño, sujeción y resistencia de las articulaciones. Una vez definidas las variables mecánicas, se revisará los requerimientos necesarios para el diseño del modelo electrónico y el sistema de control.

En una segunda etapa, una vez definidos todos los parámetros necesarios, se procederá al diseño del prototipo en 2D y 3D utilizando software especializado en diseño mecánico. La parte electrónica del robot se desarrollará con herramientas de simulación que permitan analizar el comportamiento de los distintos subsistemas, así como el monitoreo del sistema de control. Finalmente, se integrarán todos los subsistemas para conformar un sistema mecatrónico completo.

Para la experimentación y análisis de resultados, se llevarán a cabo simulaciones en diferentes ámbitos, tanto mecánicos como electrónicos, evaluando el funcionamiento del robot. Estas simulaciones permitirán verificar la fiabilidad y el comportamiento del sistema en un entorno simulado, considerando posibles escenarios de aplicación.

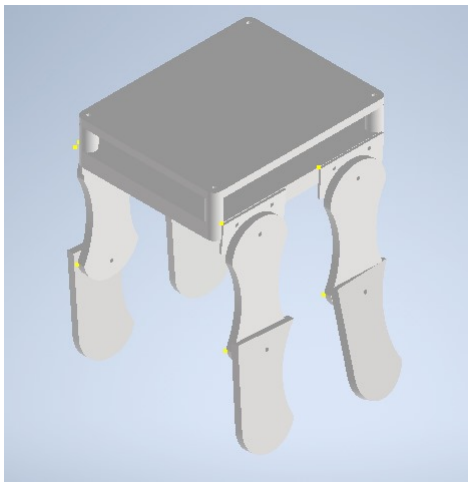
### 6.1.1. Elaboración del primer boceto

El primer boceto del robot cuadrúpedo presenta una estructura principal sólida que sirve de soporte para el sistema de locomoción. Este diseño incluye cuatro patas articuladas fijas a la base superior del robot, la cual está diseñada para alojar el sistema de control y la electrónica necesaria para su funcionamiento. Las patas, compuestas de dos eslabones y simétricas entre sí, permiten la estabilidad del robot y facilitan la adaptación a terrenos irregulares.

Cada pata está diseñada para moverse de forma independiente, ofreciendo flexibilidad en los desplazamientos y mejorando la capacidad del robot para superar obstáculos.

**Figura 10**

*Primer boceto del robot cuadrúpedo*



*Nota: La imagen muestra el primer diseño realizado para el robot cuadrúpedo. (Paute, 2024)*

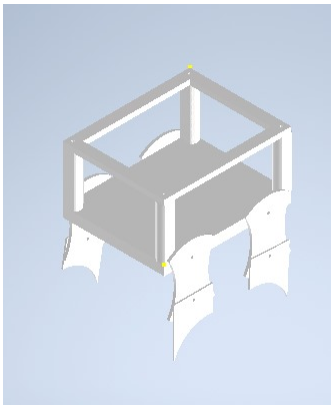
### 6.1.2. Elaboración del segundo boceto

El segundo boceto del robot cuadrúpedo introduce una estructura más optimizada que mejora la estabilidad y la distribución de la carga. En este diseño, la base superior está reforzada con un marco adicional que proporciona un espacio seguro para los componentes electrónicos y el sistema de control. Esta configuración de la base garantiza una mayor durabilidad y resistencia a posibles torsiones durante el movimiento.

El diseño de las patas incorpora elementos curvados y amplios que aumentan el área de contacto con el suelo, lo que ayuda a evitar deslizamientos y mejora el agarre en distintas superficies. Además, cada pata está conectada al marco reforzado de la base, lo que proporciona una sujeción firme. Estas patas articuladas permiten un movimiento, adaptándose eficientemente a variaciones en el terreno y facilitando la navegación en condiciones desafiantes.

**Figura 11**

*Segundo boceto del robot cuadrúpedo*



*Nota: La imagen muestra el segundo diseño realizado para el robot cuadrúpedo. (Paute, 2024)*

### 6.1.3. Elaboración del tercer boceto

El tercer boceto del robot cuadrúpedo presenta un diseño avanzado con una estructura compacta en la base superior, de forma optimizada para proteger los componentes electrónicos. La estructura superior (chasis) está diseñada para ser resistente, brindando soporte a las patas y protegiendo el sistema de control y los sistemas de alimentación.

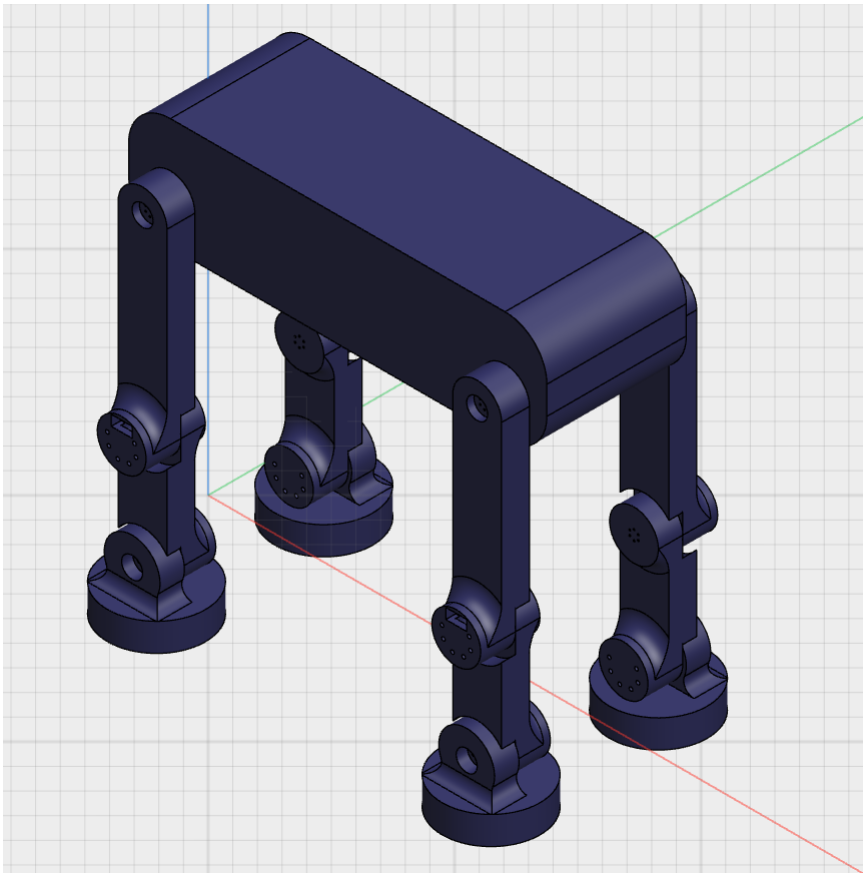
Cada una de las cuatro patas del robot está equipada con una serie de articulaciones que permiten movimientos flexibles. Estas patas constan de tres secciones principales, cada una de ellas conectadas entre sí, permitiendo libertad de rotación en el plano vertical. Este sistema articulado permite al robot adoptar diferentes alturas y adaptarse a terrenos irregulares, manteniendo el equilibrio y estabilidad.

Las patas están finalizadas con soportes anchos y esféricos en los extremos, que funcionan como "pies". Estos pies tienen una base para mejorar la estabilidad.

Este modelo optimiza la estabilidad, también permite que el robot mantenga una postura estable en todo. El diseño modular de las patas contribuyen a la durabilidad y resistencia general del robot, haciéndolo ideal para aplicaciones en terrenos difíciles.

**Figura 12**

*Tercer boceto del robot cuadrúpedo*



*Nota: La imagen muestra el tercer diseño realizado para el robot cuadrúpedo. (Paute, 2024)*

## 6.2. Matriz de decisión

Los diferentes diseños de prototipos del robot cuadrúpedo fueron evaluados en función de múltiples criterios relevantes para su desempeño, tomando en cuenta un factor de ponderación específico para cada uno. A cada diseño se le asignó una puntuación en una escala ascendente de 1 a 10, según su rendimiento en cada aspecto. Esta evaluación sistemática permite identificar el diseño más eficiente y adecuado, considerando aspectos clave como estabilidad, eficiencia energética, adaptabilidad al terreno y facilidad de ensamblaje como se observa en la tabla 1.

**Tabla 1**

*Matriz de decisión para los diseños del robot cuadrúpedo*

| | **Adaptabilidad** | **Costos** | **Desempeño** | **Mantenibilidad** | **Seguridad** | **Rango** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Factor de ponderación** | 0.15 | 0.3 | 0.2 | 0.2 | 0.15 | 1 |
| **Diseño 1** | | | | | | |
| Valor Asignado | 3 | 3 | 4 | 5 | 6 | |
| Resultado | 0.45 | 0.9 | 0.8 | 1 | 0.9 | 4.05 |
| **Diseño 2** | | | | | | |
| Valor Asignado | 3 | 3 | 5 | 5 | 6 | |
| Resultado | 0.45 | 0.9 | 1.0 | 1 | 0.9 | 4.25 |
| **Diseño 3** | | | | | | |
| Valor Asignado | 4 | 5 | 6 | 7 | 7 | |
| Resultado | 0.6 | 1.5 | 1.2 | 1.4 | 1.05 | 5.75 |

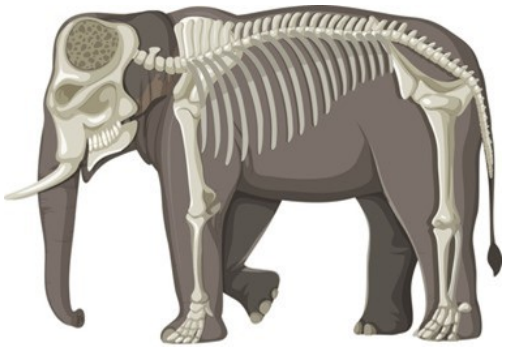
## 6.3. Diseño mecánico del robot cuadrúpedo

El diseño mecánico está basado en la estructura anatómica de los elefantes, ya que estos presentan unas extremidades bastante robustas, las patas de elefante son enormes. Pueden pesar hasta 250 libras cada uno y son aproximadamente del tamaño de un automóvil pequeño. Las plantas de los pies están cubiertas de una piel gruesa y dura que protege al animal del terreno accidentado. Los pies y las piernas de los elefantes son estructuras increíblemente únicas y fascinantes. Desempeñan un papel crucial en la supervivencia del animal, permitiéndoles soportar su gran peso, navegar por terrenos accidentados y comunicarse con otros elefantes. (elephantfreedom, 2022)

Las patas son forma cilíndrica y el número de dedos varía, pues en las patas anteriores presentan 5 dedos en cada una, mientras en las posteriores hay tres. Representan el 25% de todo su peso. (zooguadalajara, 2020)

**Figura 13**

*Anatomía del elefante*



*Nota: La imagen muestra la anatomia del elefante. (Shutterstock, 2024)*

Como se puede observar en la figura 13, la anatomía de las patas del elefante está compuesta por 3 articulaciones, las cuales van desde la cadera a la rodilla, de la rodilla al tobillo y del tobillo al pie, la primera articulación del elefante tiene una medida de aproximadamente 1 m, la segunda la cual corresponde de la rodilla al tobillo tiene una longitud de 50-70 cm, mientras que la tercera tiene una longitud de 20-30 cm.

Con respecto a la marcha o caminata, está basado en los caninos, la locomoción canina hace referencia al modo en que perros y animales cuadrúpedos en general se mueven, al ser cuadrúpedos, los caninos utilizan cuatro patas para sostenerse y moverse, esto les proporciona estabilidad y equilibrio. (Biewener, 2003)

Los caninos en específico usan diferentes modos de locomoción como:

- Caminata
- Trote
- Carrera

El ciclo de marcha que se muestra en la figura 14 es la secuencia de movimientos de las patas de un perro, cada ciclo de marcha puede medirse en términos de tiempo y distancia, el ciclo de marcha se puede dividir en varias fases (Griffin, Main, y Farley, 2004) :

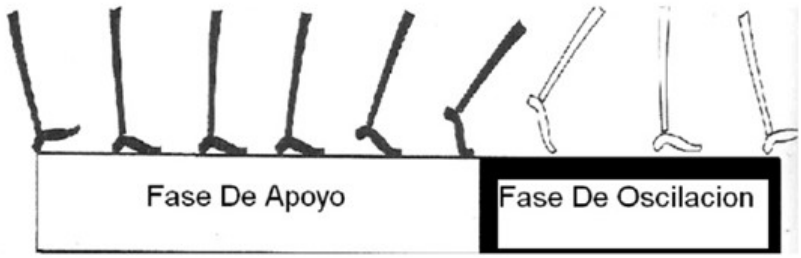
Fase de apoyo: en esta fase la pata está en contacto con el suelo y se dividen en dos sub fases:

- Cargado: El peso del canino se transfiere a la pata que está en el suelo.

- Despegue: Es la fase final de la fase de apoyo, el can comienza a levantar la pata del suelo.

**Figura 14**

*Fases de apoyo*



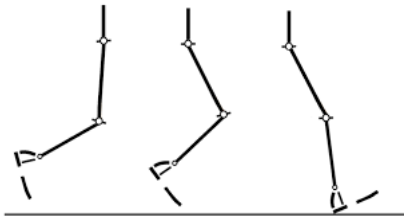

*Nota:La imagen muestra la fase de apoyo. (Grupo de Instrumentación y Rehabilitación Biomédica GIRB, 2024)*

Fase de oscilación: La pata se levanta del suelo y se mueve hacia adelante, preparándose para el próximo contacto con el suelo como se ve en la figura 15.

- Elevación: La pata se levanta mientras se mueve hacia adelante.
- Movimiento delantero: La pata se mueve en dirección a la trayectoria de la marcha.
- Aterrizaje: La pata toca el suelo, comenzando nuevamente la fase de apoyo.

**Figura 15**

*Fase de oscilación*



*Nota:La imagen muestra la fase de oscilación. (Grupo de Instrumentación y Rehabilitación Biomédica GIRB, 2024)*

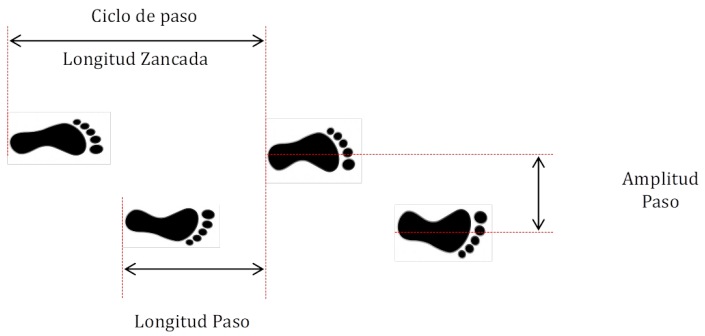
La marcha de un cuadrúpedo implica analizar varios parámetros relacionados con su movimiento, para el análisis se usan varios parámetros como la longitud de zancada, frecuencia de paso, tiempo de ciclo y velocidad. La marcha se puede entender como el patrón rítmico y secuencial en el que se mueven las patas de un animal. (Hildebrand, 1989)

Para analizar el análisis de la marcha de un cuadrúpedo se deben tener en cuentas algunos parámetros como:

- Longitud de zancada (L): La distancia recorrida por un cuadrúpedo en un ciclo de marcha. Se mide entre dos contactos sucesivos de la misma pata como se observa en la figura 16.

**Figura 16**

*Zancada*

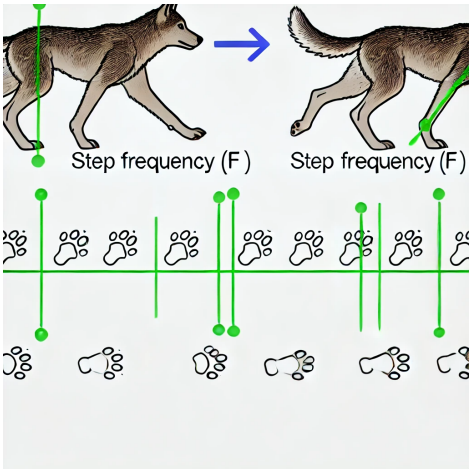



*Nota: La imagen ilustra los componentes de una zancada, incluyendo la longitud de zancada, la longitud del paso y la amplitud del paso, elementos clave para analizar el ciclo de marcha y la eficiencia del movimiento. (Juan Pedro Martín, Santos Villafaina, Jorge Pérez-Gómez, 2024)*

- Frecuencia de paso (F): El número de pasos por unidad de tiempo, generalmente expresado en pasos por segundo.

**Figura 17**

*Frecuencia de paso*



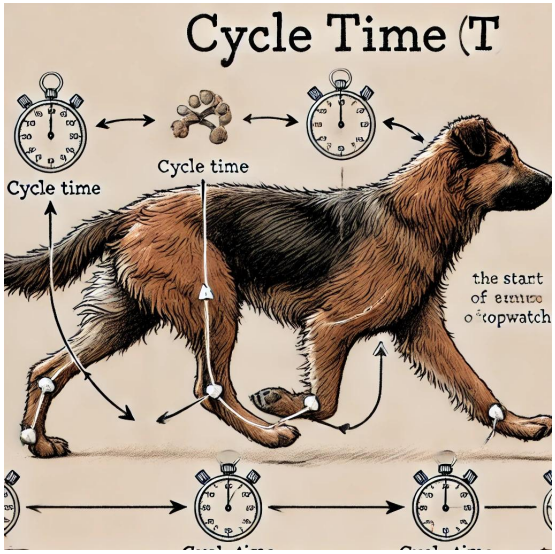

*Nota: La imagen representa la frecuencia de paso en un cuadrúpedo, mostrando cómo se distribuyen las pisadas durante el movimiento y la correlación entre la secuencia de pasos y la velocidad de avance. (Hildebrand, 1965)*

- Tiempo de ciclo (T): El tiempo que tarda un cuadrúpedo en completar un ciclo de marcha, es decir, el tiempo desde que una pata vuelve a tocar el suelo. Se puede calcular utilizando la longitud de zancada y la frecuencia de paso:

$$V = L \times F$$

**Figura 18**

*Tiempo de ciclo*



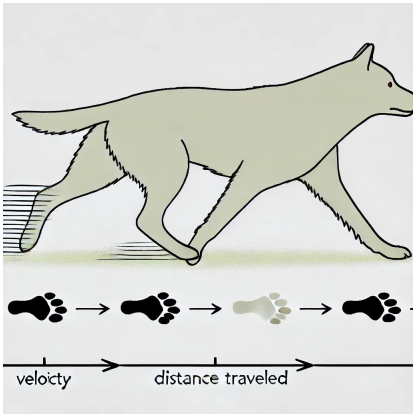

*Nota: La imagen muestra el tiempo de ciclo en la marcha de un cuadrúpedo, destacando el período completo que transcurre desde que una pata comienza un paso hasta que vuelve a la misma posición, fundamental para analizar la velocidad y eficiencia del movimiento. (Alexander, 2003)*

- Velocidad (V): La velocidad de marcha del cuadrúpedo, generalmente expresada en metros por segundo. La velocidad ($V$) de un cuadrúpedo en movimiento se calcula como la distancia recorrida dividida entre el tiempo tomado. En el caso específico de un cuadrúpedo, la velocidad también se puede relacionar con la longitud de zancada ($L$) y la frecuencia de paso ($F$).

$$V = \frac{d}{t}$$

**Figura 19**

*Velocidad*




*Nota: La imagen representa la relación entre la velocidad y la distancia recorrida por un cuadrúpedo durante su marcha, destacando cómo la frecuencia de los pasos y la longitud del ciclo contribuyen a la velocidad total del desplazamiento. (Alexander, 2003)*

El objetivo del diseño es mantenerlo ligero. Todas las piezas deben ser de fácil acceso o se pueden imprimir en 3D, y el robot se debe ensamblar solo con herramientas manuales. Esto hace que el diseño, sea económico pero efectivo. El robot cuadrúpedo es un robot de 1.37 m de largo y 1 m de ancho, y puede extender sus patas entre 23 cm y 68 cm.
El material principal para este diseño va a ser el PLA (Ácido Poliláctico), porque es un material fácil de conseguir y hará que el robot sea mucho más didáctico y fácil de armar.

Además, el PLA posee varias ventajas:

- Facilidad de impresión 3D: El PLA es uno de los materiales más comunes y fáciles de usar en impresoras 3D. Tiene una baja temperatura de fusión ( 180-220°C). El PLA se caracteriza por su buena precisión en la impresión de detalles, lo que resulta útil para diseñar componentes que necesitan tener tolerancias ajustadas y formas complejas. (Sicnova, 2024)
- Peso ligero: El PLA es un material ligero en comparación con otros materiales, como metales o algunos plásticos industriales. Esto es un beneficio, porque un peso más bajo reduce la carga sobre los actuadores y motores, permitiendo movimientos más eficientes y rápidos, y reduciendo el consumo de energía. (Goldsupplier, 2024)

- Resistencia adecuada para prototipos: El PLA tiene una rigidez relativamente alta, lo que ayuda a mantener la forma estructural sin deformarse fácilmente bajo tensiones moderadas. (Rodríguez Panes, 2022)
- Costo accesible: El PLA es uno de los materiales de impresión 3D más económicos, el costo bajo del PLA es ideal, ya que permite producir múltiples versiones de las piezas sin un gasto significativo. (Manfacter, 2024)
- Baja expansión térmica: El PLA tiene una baja expansión térmica en comparación con otros plásticos, lo que significa que las piezas impresas no se deforman fácilmente debido a cambios de temperatura. (Blanco Prieto, 2020)

Según Ashby, la selección de materiales debe considerar propiedades mecánicas, térmicas, económicas y sostenibles. Para el PLA, se destacan:

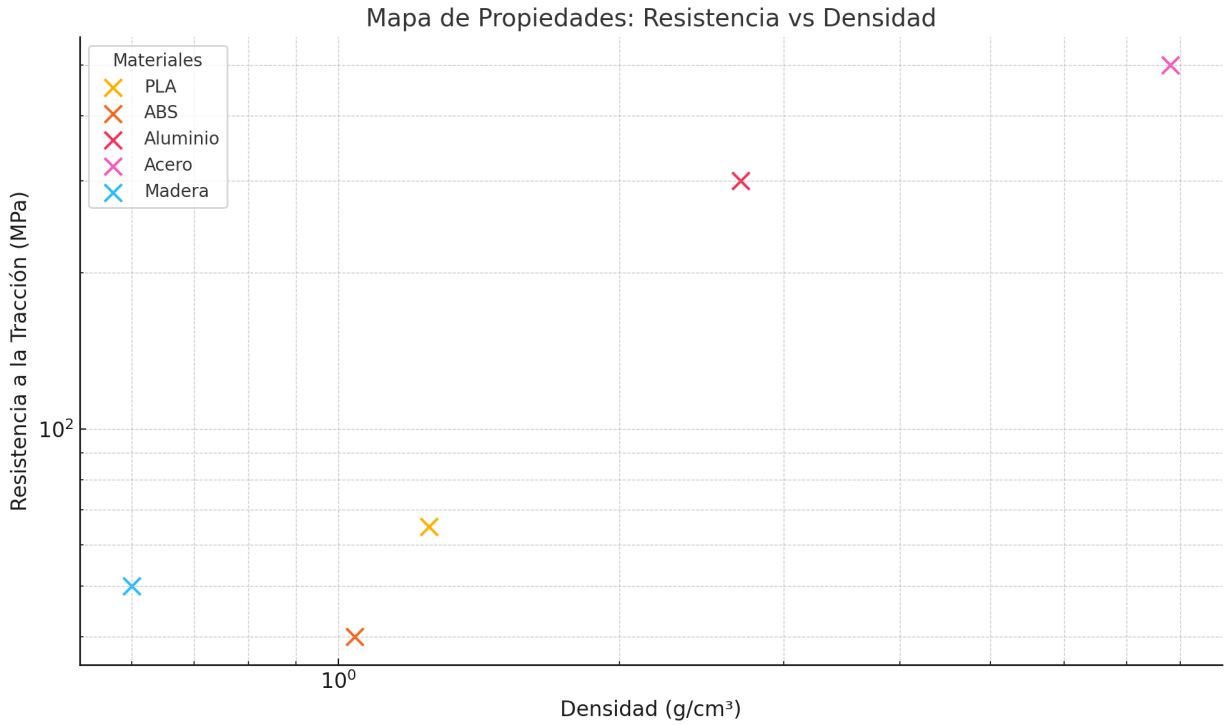
- **Baja densidad (1.25 g/cm$^3$ aprox.):** Ideal para componentes donde la ligereza es clave, como en un robot cuadrúpedo.
- **Resistencia mecánica moderada:** El PLA tiene una resistencia a la tracción de 50-70 MPa, suficiente para soportar esfuerzos típicos en diseños mecatrónicos no sometidos a cargas extremas.
- **Fácil procesado:** Compatible con impresión 3D (FDM), lo que facilita la fabricación rápida y económica de prototipos y piezas complejas.
- **Estabilidad dimensional:** Buena precisión en piezas impresas, lo que es crítico para ensamblajes en robots.
- **Bajo impacto ambiental:** El PLA es biodegradable y se fabrica a partir de recursos renovables (como almidón de maíz), alineándose con los principios de diseño sostenible.

Los diagramas de Ashby comparan materiales basándose en sus propiedades. En este caso:

- **Relación resistencia/densidad:** El PLA se encuentra en una zona favorable para aplicaciones ligeras con requerimientos moderados de resistencia.
- **Costo/impacto ambiental:** El PLA es económico y tiene una huella ambiental reducida comparado con plásticos como ABS o PC.
- **Procesabilidad:** Los materiales compatibles con tecnologías de fabricación como la impresión 3D ganan puntos en proyectos donde se requiere agilidad en la iteración de diseños.

**Figura 20**

*Porpiedades de materiales*




*Nota: La imagen representa el mapa de propiedades de ciertos materiales que incluye el PLA.(Ashby, 2011)*

Para iniciar con el diseño mecánico se deben tener en cuenta los parámetros del material que se va a considerar para la posible construcción el cual va a ser PLA (Acido Poliláctico), el cual posee una densidad de 1.25 g/cm$^3$, también posee un módulo de elasticidad de 3,36 GPa, una vez establecidos estos datos y teniendo en cuenta las dimensiones de los eslabones se puede calcular el volumen y peso de cada eslabón.

Para realizar los cálculos de proporción de los eslabones y escalar las dimensiones de las patas del elefante para poder adaptarlas al robot cuadrúpedo con la altura máxima de 135 cm, primero se realiza la suma de las articulaciones del elefante:

$$Articulaciones_elefantes = 1m + 0,6m + 0,25m$$

$$Articulaciones_elefantes = 1,85m$$

Luego se realiza la proporción de reducción:

$$Escalaalrobot = \frac{135}{185}cm = 0,72cm$$

Luego se escalan las dimensiones de las articulaciones del elefante a los eslabones del robot:

- **Primera articulación:** $1 \times 0.72 = 72\,\text{cm}$
- **Segunda articulación:** $0,6 \times 0.72 = 43\,\text{cm}$
- **Tercera articulación:** $0,25 \times 0.72 = 18\,\text{cm}$

Una vez calculadas las proporciones de los eslabones del robot, se procede a establecer las dimensiones de los eslabones:

- **Primera articulación:** = 68 cm
- **Segunda articulación:** = 46 cm
- **Tercera articulación:** = 23 cm

La proporción que utilizamos es directa. Esto se debe a que estamos escalando las dimensiones manteniendo la relación entre los tamaños de los eslabones del elefante y los eslabones del robot cuadrúpedo.

**Eslabón 1:**
Largo: 680 mm
Ancho: 140 mm
Profundidad: 79 mm

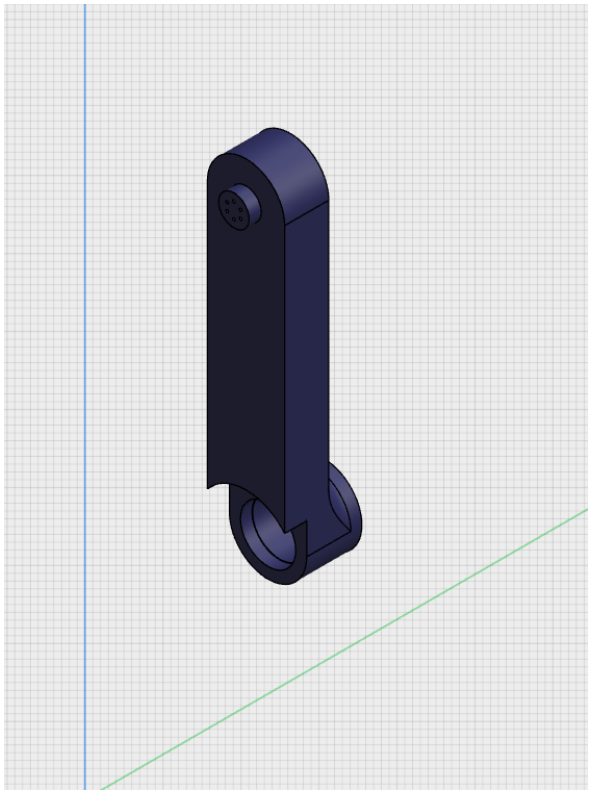
$$V_1 = 680\,\text{mm} \times 140\,\text{mm} \times 79\,\text{mm} = 7'520.800\,\text{mm}^3$$

$$Peso = 7'520.800\,\text{mm}^3 \times 0,00125\,\text{g/mm}^3 = 9,40\,\text{kg}$$

$$\text{Sección Transversal} = 140\,\text{mm} \times 79\,\text{mm} = 11.060\,\text{mm}^2$$

**Figura 21**

*Eslabon 1*



*Nota: La imagen representa el primer eslabon del robot cuadrupedo. (Paute, 2024)*

Ya que si se considera que los eslabones sean sólidos el peso es extremadamente alto, se calcula un porcentaje de relleno, el cual reducirá el peso de los eslabones.

**Peso con 10 % de relleno:**

$$Peso\,con\,relleno = peso\,actual \times \frac{porcentaje\,de\,relleno}{100}$$

$$Peso\,con\,relleno = 9,40\,kg \times \frac{10\,\%}{100} = 0,940\,kg$$

**Eslabón 2:**
Largo: 460 mm
Ancho: 140 mm
Profundidad: 79 mm

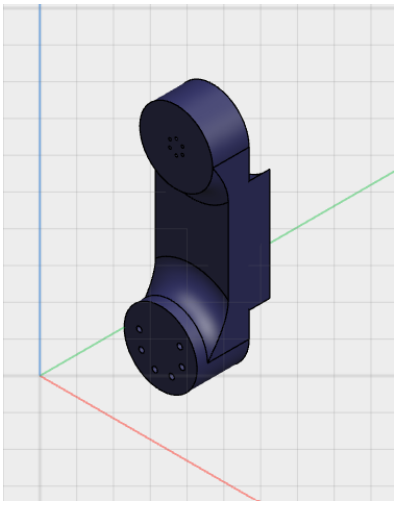
$$V_1 = 460\,\text{mm} \times 140\,\text{mm} \times 79\,\text{mm} = 5'087.600\,\text{mm}^3$$

$$Peso = 24.300\,\text{mm}^2 \times 0,00125\,\text{g/mm}^3 = 6,35\,\text{kg}$$

$$\text{Sección Transversal} = 140\,\text{mm} \times 79\,\text{mm} = 11.060\,\text{mm}^2$$

**Figura 22**

*Eslabon 2*



*Nota: La imagen representa el segundo eslabon del robot cuadrupedo. (Paute, 2024)*

**Peso con 10 % de relleno:**

$$Peso\,con\,relleno = peso\,actual \times \frac{porcentaje\,de\,relleno}{100}$$

$$Peso\,con\,relleno = 6,35\,kg \times \frac{10}{100} = 0,635\,kg$$

**Eslabón 3:**

Largo: 230 mm

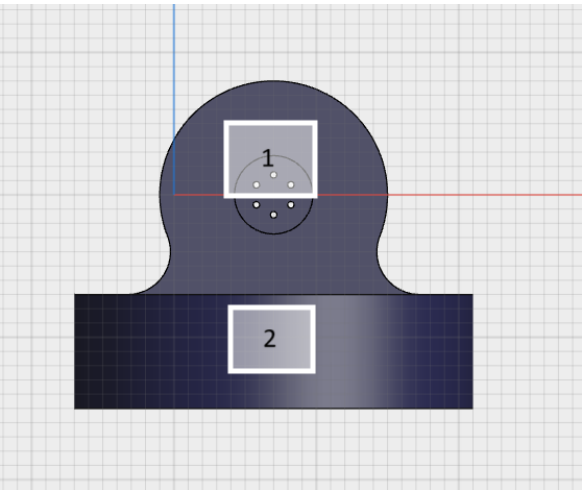
Ancho: 140 mm

Profundidad: 140 mm

Para el análisis del tercer eslabón, como se considera una geometría compleja, el análisis se va a realizar, como una circunferencia y un rectángulo.

**Figura 23**

*Eslabón 3 seccionado*




*Nota: La imagen representa el tercer eslabon seccionado del robot cuadrupedo. (Paute, 2024)*

Como se puede observar en la figura, se divide en dos secciones, de las cuales se va a calcular las áreas individualmente.

Para la primera sección (1) se obtienen las medidas y se calcula el volumen:

$$V_{circulo} = \frac{1}{2}\pi r^2 \times espesor$$

$$V_{circulo} = \frac{1}{2}\pi 80^2 \times 140 = 1'407.433,509$$

Para la primera sección (2) se obtienen las medidas y se calcula el volumen:

$$V_{rectangulo} = B \times H \times Espesor$$

$$V_{rectangulo} = 280 \times 80 \times 140 = 3'136.000$$

Se suman los volúmenes para obtener el volumen total del eslabón 3

$$VT_{e3} = 1'407.433,509\,\text{mm}^3 + 3'136.000\,\text{mm}^3$$

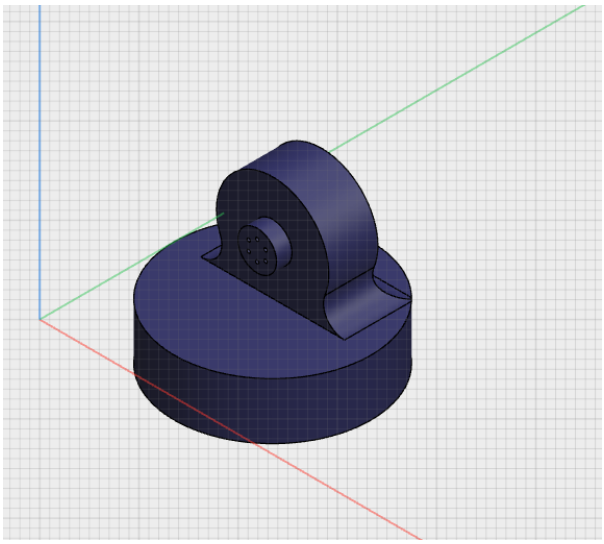
$$VT_{e3} = 4'543.433,509\,\text{mm}^3$$

$$Peso = 4'543.433,509\,\text{mm}^3 \times 0,00125\,\text{g/mm}^3 = 5,67\,\text{kg}$$

$$\text{Sección Transversal} = 140\,\text{mm} \times 140\,\text{mm} = 19.600\,\text{mm}^2$$

**Figura 24**

*Eslabon 3*



*Nota: La imagen representa el tercer eslabon del robot cuadrupedo. (Paute, 2024)*

**Peso con 10 % de relleno:**

$$Peso\,con\,relleno = peso\,actual \times \frac{porcentaje\,de\,relleno}{100}$$

$$Peso\,con\,relleno = 5,67\,kg \times \frac{10\,\%}{100} = 0,57\,kg$$

Una vez obtenidos todos los pesos, se puede calcular el peso total de una pata del robot:

$$VT = 0,940\,kg + 0,635\,kg + 0,57\,kg = 2,14\,kg$$

Se realiza el mismo proceso de cálculos para el chasis:

Largo: 1 m
Ancho: 320 mm
Profundidad: 400 mm

$$V_1 = 1000\,\text{mm} \times 320\,\text{mm} \times 400\,\text{mm} = 128'000.000\,\text{mm}^3$$

$$Peso = 128'000.000\,\text{mm}^3 \times 0,00125\,\text{g/mm}^3 = 160\,\text{kg}$$

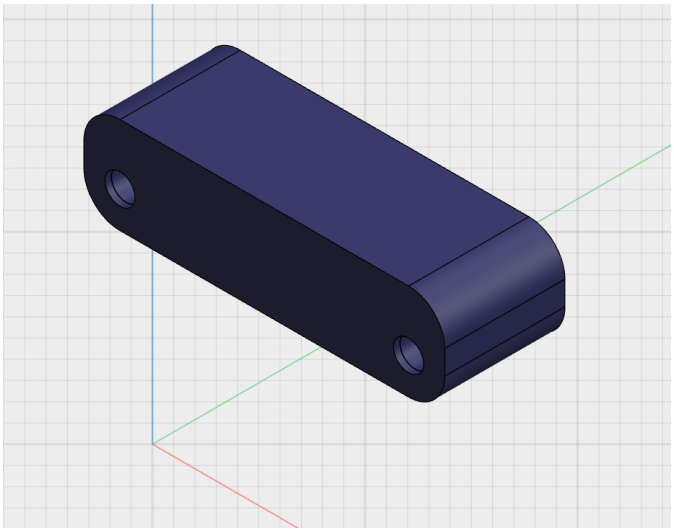
**Peso con 10 % de relleno:**

$$Peso\,con\,relleno = peso\,actual \times \frac{porcentaje\,de\,relleno}{100}$$

$$Peso\,con\,relleno = 160\,kg \times \frac{10}{100} = 16\,kg$$

**Figura 25**

*Chasis*



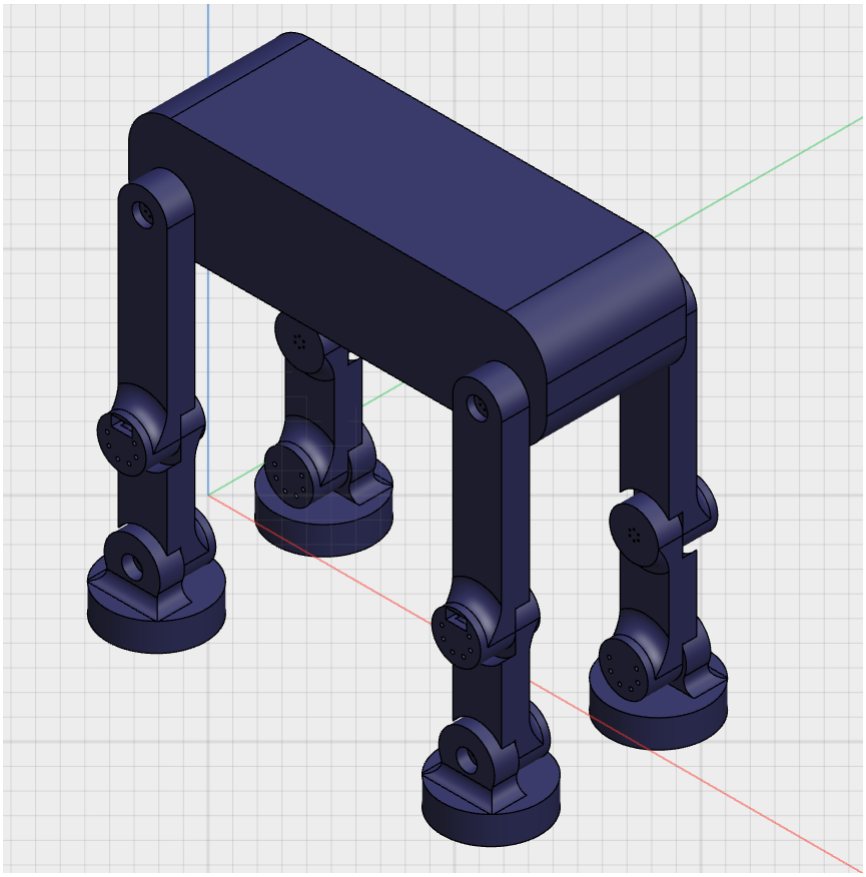
*Nota: La imagen representa el chasis del robot cuadrupedo. (Paute, 2024)*

Luego se obtiene el peso total del robot:

$$PesoTotal = 2,14\,kg \times 4 + 16\,kg = 18,14\,kg$$

**Figura 26**

*Robot cuadrúpedo*



*Nota: La imagen representa el robot cuadrupedo. (Paute, 2024)*

Carga por pata:

$$Carga\,por\,pata = \frac{18,14\,kg}{4} = 4,53\,kg$$

Para calcular el peso que va a soportar se calcula la multiplicación de la fuerza por la gravedad:

$$5\,kg \times 9{,}81\,m/s^2 = 49{,}05\,N$$

Y se divide para las 4 patas:

$$Por\,pata : \tfrac{49{,}05\,N}{4} = 12{,}26\,N$$

Para calcular la tensión de carga dividida por pata:

**Eslabón 1:**

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{12.26\,N}{11.060\,mm^2 \times 0.10} = 0.0118\,MPa$$

**Eslabón 2:**

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{12.26\,N}{11.060\,mm^2 \times 0.10} = 0.0118\,MPa$$

**Eslabón 3:**

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{12.26\,N}{19.600\,mm^2 \times 0.10} = 0.0062\,MPa$$

Para calcular el peso que va a soportar el chasis, se calcula la multiplicación de la fuerza por la gravedad:

Largo: 1000 mm (L)
Ancho: 320 mm (W)
Profundidad: 400 mm (D)

$$5\,kg \times 9{,}81\,m/s^2 = 49{,}05\,N$$

Luego se calcula el área transversal, teniendo en cuenta que es una pieza hueca:

$$A = 320 \times 400 = 128.000\,\mathrm{mm}^2$$

Se calcula la deformación del chasis:

$$\varepsilon_c = \frac{F \times L}{A \times \varepsilon_{PLA}} = \frac{49.05 \times 1000}{(128.000 \times 0.10) \times 3.500} = 0.00104\,mm$$

Para calcular la deformación axial por pata:

**Eslabón 1:**

$$\varepsilon_1 = \frac{F \times L}{A \times \varepsilon_{PLA}} = \frac{12.26 \times 680}{(11.060 \times 0.10) \times 3.500} = 0.00215\,mm$$

**Eslabón 2:**

$$\varepsilon_1 = \frac{F \times L}{A \times \varepsilon_{PLA}} = \frac{12.26 \times 460}{(11.060 \times 0.10) \times 3.500} = 0.00145\,mm$$

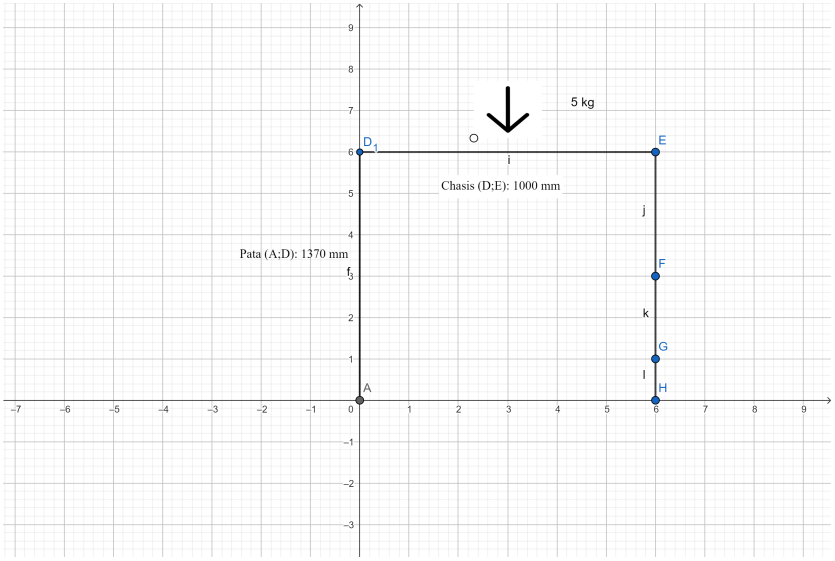
**Eslabón 3:**

$$\varepsilon_1 = \frac{F \times L}{A \times \varepsilon_{PLA}} = \frac{12.26 \times 230}{(19.600 \times 0.10) \times 3.500} = 0.000411\,mm$$

Una vez obtenidos esos datos, se realiza el análisis estático de la estructura, teniendo en cuenta que su representación va a ser en eslabonamiento.

**Figura 27**

*Diagrama de cuerpo libre una estructura*




*Nota: La imagen representa el diagrama de cuerpo libre del robot. (Paute, 2024)*

Luego se realizan cálculos de sumatorias de fuerzas y momentos:

$$\sum F_x = 0$$

$$-A_x - 1261,3 + 4800 = 0$$

$$A_x = -3538,7 \, \frac{kg}{mm^2}$$

$$\sum F_y = 0$$

$$A_y - 5 + 3363,5 = 0$$

$$A_y = 3358,5$$

$$\sum M_A = 0$$

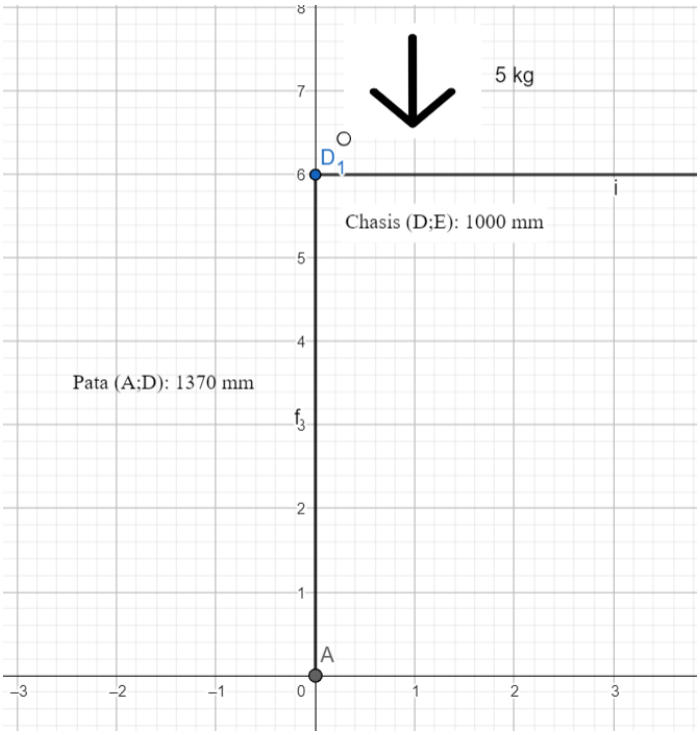
$$F_y(1.370) - 4.800(480) - 4.800(480) = 0$$

$$F_y = \frac{4.800(480)+4.800(480)}{1.321}$$

$$F_y = 3.367,5$$

**Figura 28**

*Diagrama de cuerpo libre estructura lado izquierdo*




*Nota: La imagen representa el diagrama del cuarpo libre del lado izquierdo del robot representado en una sola estructura. (Paute, 2024)*

$$\sum M_2 = 0$$

$$4.800(480) + F_x(1.370) - 2.400(240) = 0$$

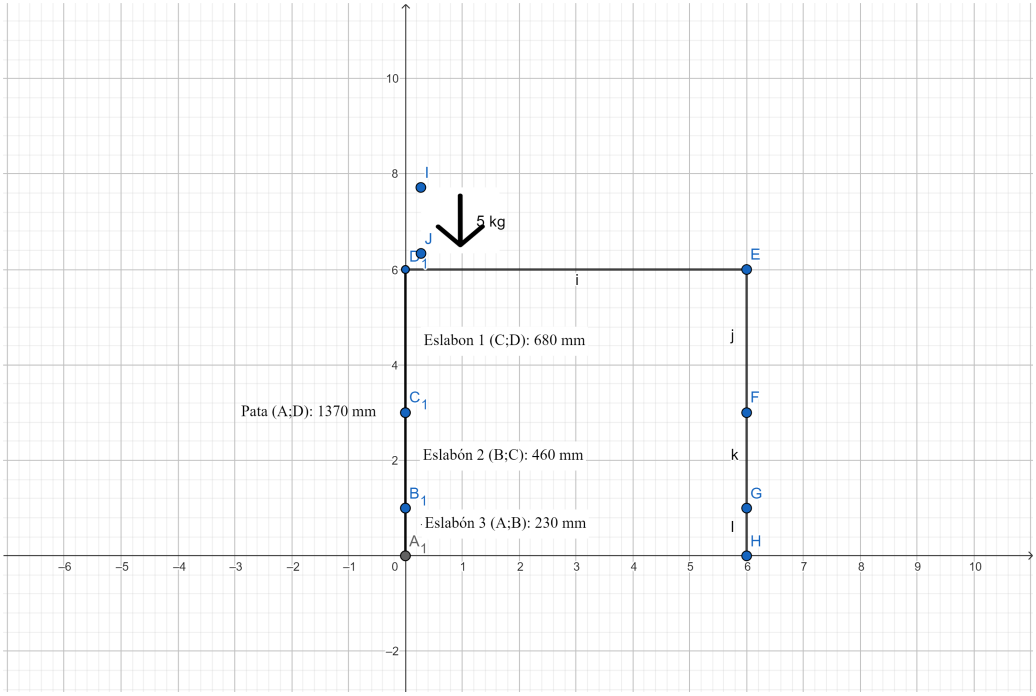
$$F_x = \frac{4.800(480)+2.400(240)}{1.370}$$

$$F_x = 1.261,31\,\frac{kg}{mm^2}$$

Estos cálculos hacen referencia a que se tomara el eslabonamiento y solo seria una sola estructura, sin tener en cuenta los puntos de unión.

**Figura 29**

*Diagrama de cuerpo libre con eslabones*




*Nota: La imagen representa el diagrama del cuerpo libre del robot con los eslabones. (Paute, 2024)*

$$\sum M_H = 0$$

$$-A_y(960) - 5(230) - 5(460) - 5(680) + 4.800(480) + 5(680) + 5(460) + 5(230) = 0$$

$$A_y = \frac{-5(230)+5(460)+5(680)+4.800(480)+5(680)+5(460)+5(230)}{960}$$

$$A_y = 2.414,27\,\frac{kg}{mm^2}$$

$$\sum F_y = 0$$

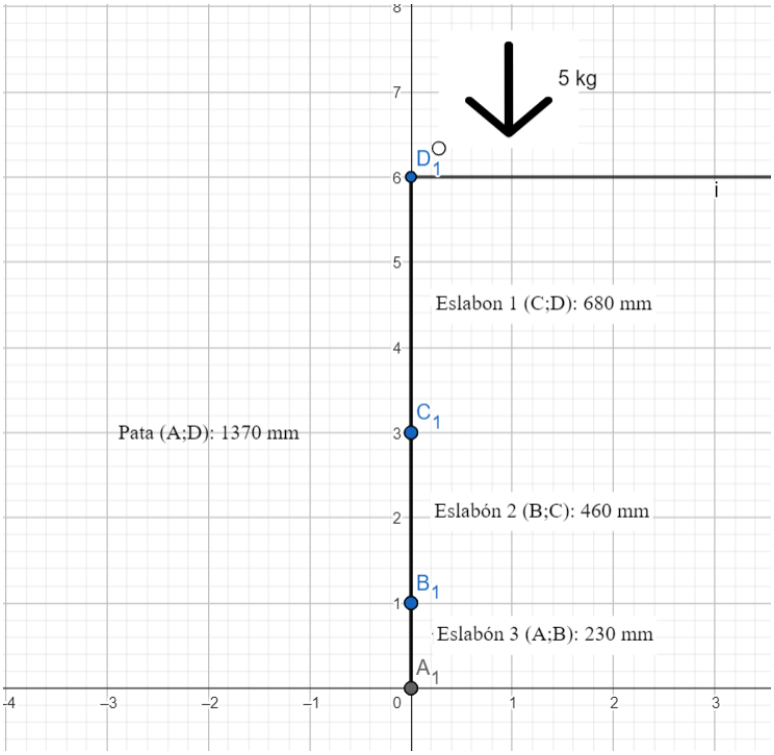
$$A_y + 5kg + F_y = 0$$

$$F_y = 2.414,27 - 5$$

$$F_y = -2.136,27 \frac{kg}{mm^2}$$

**Figura 30**

*Diagrama de cuerpo libre lado izquierdo con eslabones*




*Nota: La imagen representa el diagrama del cuerpo libre del robot con los eslabones del lado izquierdo. (Paute, 2024)*

$$\sum M_{iz} = 0$$

$$-2.136,27(480) + A_x(1.370) + 5(230) + 5(460) + 5(680) + 2.400(240) = 0$$

$$A_x = \frac{2.136,27(480) - 5(230) - 5(460) - 5(680) - 2.400(240)}{1.370}$$

$$A_x = 1.173,91 \frac{kg}{mm^2}$$

$$\sum F_x = 0$$

$$A_x + 15 - 15 - F_x = 0$$

$$F_x = 1.173,91 \frac{kg}{mm^2}$$

**Ahora se analiza el esfuerzo cortante en la pata del robot**

$$5\,Kg = 49.05\,N$$

$$Te_1 = \frac{V}{A} = \frac{49.05\,N}{11.060 \times 0.10\,mm^2} = 0.044\,kPa$$

$$Te_2 = \frac{V}{A} = \frac{49.05\,N}{11.060 \times 0.10\,mm^2} = 0.044\,kPa$$

$$Te_3 = \frac{V}{A} = \frac{49.05\,N}{19.600 \times 0.10\,mm^2} = 0.025\,kPa$$

**Se calculan los momentos**

$$Me_3 = 49.05\,N \times 230\,mm = 11.281.5\,N \cdot mm$$

$$Me_2 = 49.05\,N \times 460\,mm = 22.563\,N \cdot mm$$

$$Me_1 = 49.05\,N \times 680\,mm = 33.354\,N \cdot mm$$

**Se analizan el esfuerzo cortante por eslabón:**

$$Te = \frac{49.05}{3} = 16.35\,N$$

$$Te_1 = \frac{V}{A} = \frac{16.35\,N}{11.060 \times 0.10\,mm^2} = 0.014\,kPa$$

$$Te_2 = \frac{V}{A} = \frac{16.35\,N}{11.060 \times 0.10\,mm^2} = 0.014\,kPa$$

$$Te_3 = \frac{V}{A} = \frac{16.35\,N}{19.600 \times 0.10\,mm^2} = 0.0083\,kPa$$

Se calculan los momentos:

$$Me_3 = 16,35\,N \times 230\,\text{mm} = 3.760,5\,N \cdot \text{mm}$$

$$Me_2 = 16,35\,N \times 460\,\text{mm} = 7.521\,N \cdot \text{mm}$$

$$Me_1 = 16,35\,N \times 680\,\text{mm} = 11.118\,N \cdot \text{mm}$$

Se calcula el esfuerzo de aplastamiento de cada eslabón, con carga de $1.25\,kg$ y carga de $2.1\,kg$ la cual incluye el peso del motor.

Se usa la fórmula de $\sigma_b = \frac{F}{A}$, donde $A = d \times t$ y $t$ es el espesor:
**Cargas:**

$$C_1 = 1.25\,kg \times 9.81 = 12.26\,N$$

$$C_1 = 2.1\,kg \times 9.81 = 20.6\,N$$

**Eslabón 1:**

$$\varepsilon_1 = \frac{12.26}{(140 \times 79) \times 0.10} = 0.011\,MPa$$

$$\varepsilon_1 = \frac{20.6}{(140 \times 79) \times 0.10} = 0.018\,MPa$$

**Eslabón 2:**

$$\varepsilon_1 = \frac{12.26}{(140 \times 79)} = 0.011 Mpa$$

$$\varepsilon_1 = \frac{20.6}{(140 \times 79)} = 0.018 Mpa$$

**Eslabón 3:**

$$\varepsilon_1 = \frac{12.26}{(160 \times 280)} = 0.006 Mpa$$

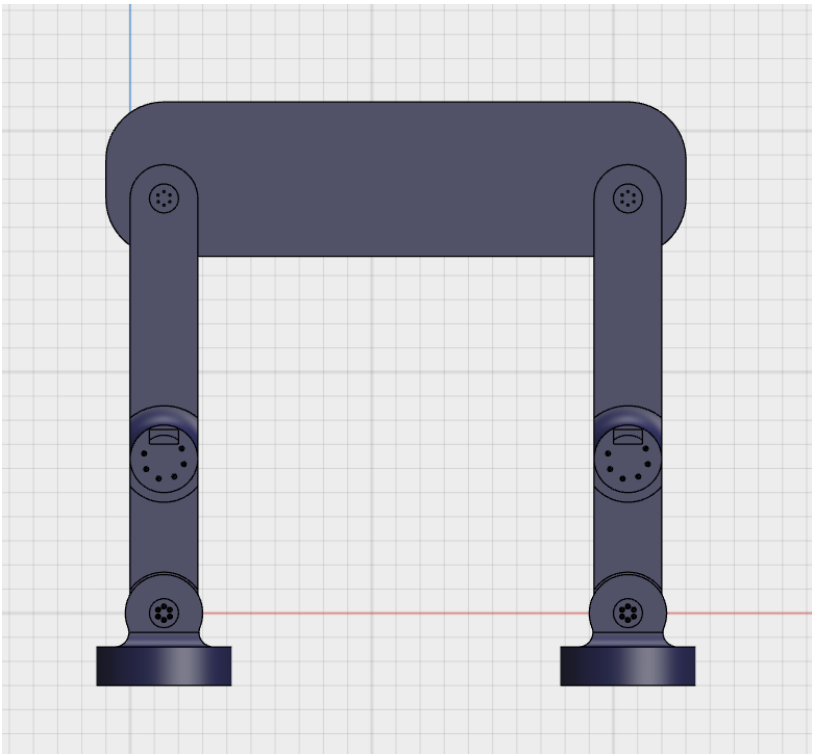
$$\varepsilon_1 = \frac{20.6}{(160 \times 280)} = 0.003 Mpa$$

Se debe tomar en cuenta que todos los cálculos realizados anteriormente son en la posición inicial del robot, es decir, todas sus articulaciones están alineadas a los ejes sin ningún

movimiento.

**Figura 31**

*Robot en posicion cero*



*Nota: La imagen representa el con todas sus articulaciones totalmente estiradas. (Paute, 2024)*

**Ahora se van a analizar los eslabones en ciertos grados de inclinación:**

$$\theta_1 = -121.61^\circ$$

$$\theta_1 = 2.24^\circ$$

$$\theta_1 = 389.31^\circ$$

**Eslabón 1:**

$$F_a = 49.05\,N\cos(-121.61^\circ) = -25.70\,N$$

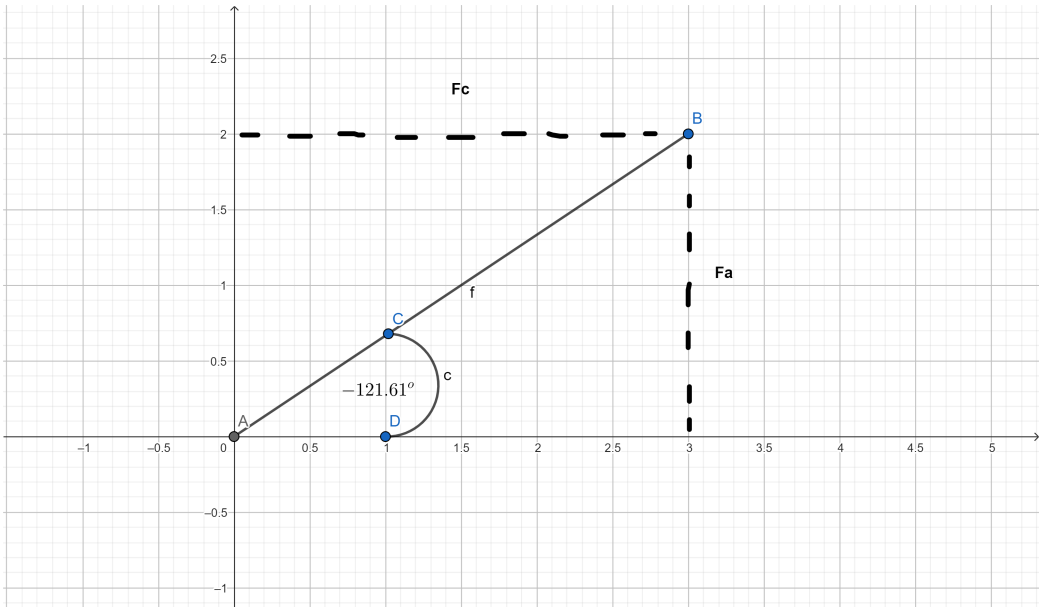
$$F_c = 49.05\,N \sin(-121.61°) = -41.77\,N$$

**Esfuerzo cortante:**

$$\tau = \frac{V}{A} = \frac{45.53}{11.060 \times 0.10\,mm^2} = -0.03\,kPa$$

**Figura 32**

*Diagrama de cuerpo libre eslabon 1*




*Nota: La imagen representa el eslabon 1 en inclinacion. (Paute, 2024)*

**Eslabón 2:**

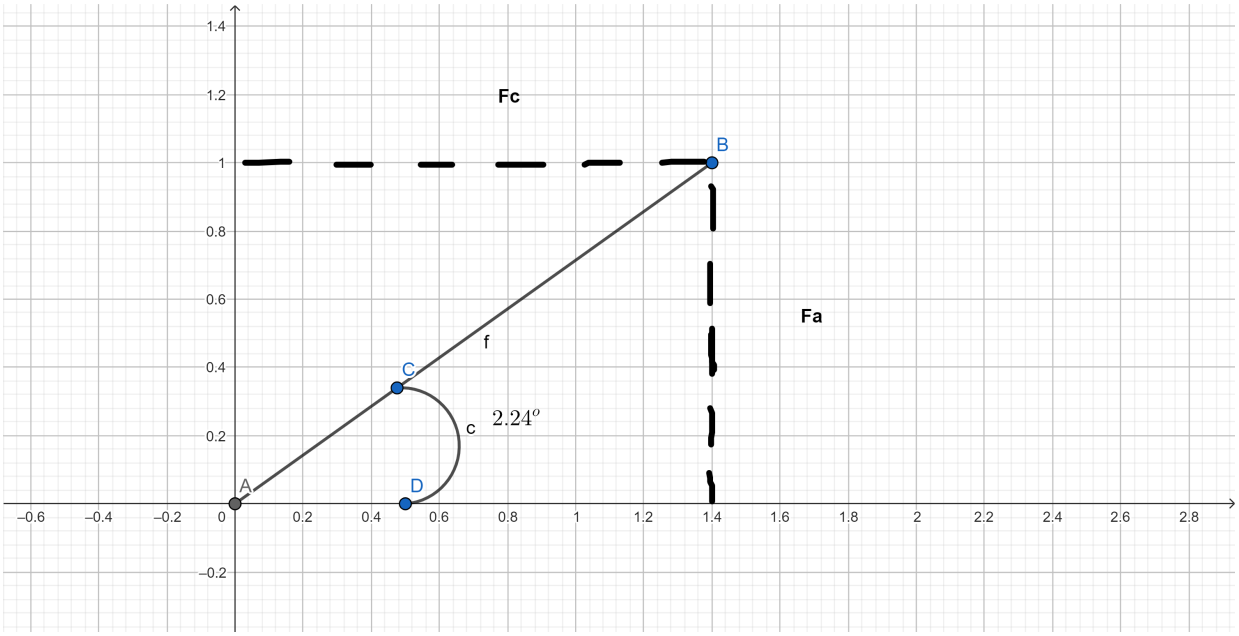
$$F_a = 49.05\,N \cos(2.24°) = 49.01\,N$$

$$F_c = 49.05\,N \sin(2.24°) = 1.91\,N$$

$$\tau = \frac{V}{A} = \frac{1.91}{11.060 \times 0.10\,mm^2} = 0.00017\,kPa$$

**Figura 33**

*Diagrama de cuerpo libre eslabon 2*




*Nota: La imagen representa el eslabon 2 en inclinacion. (Paute, 2024)*

**Eslabón 3:**

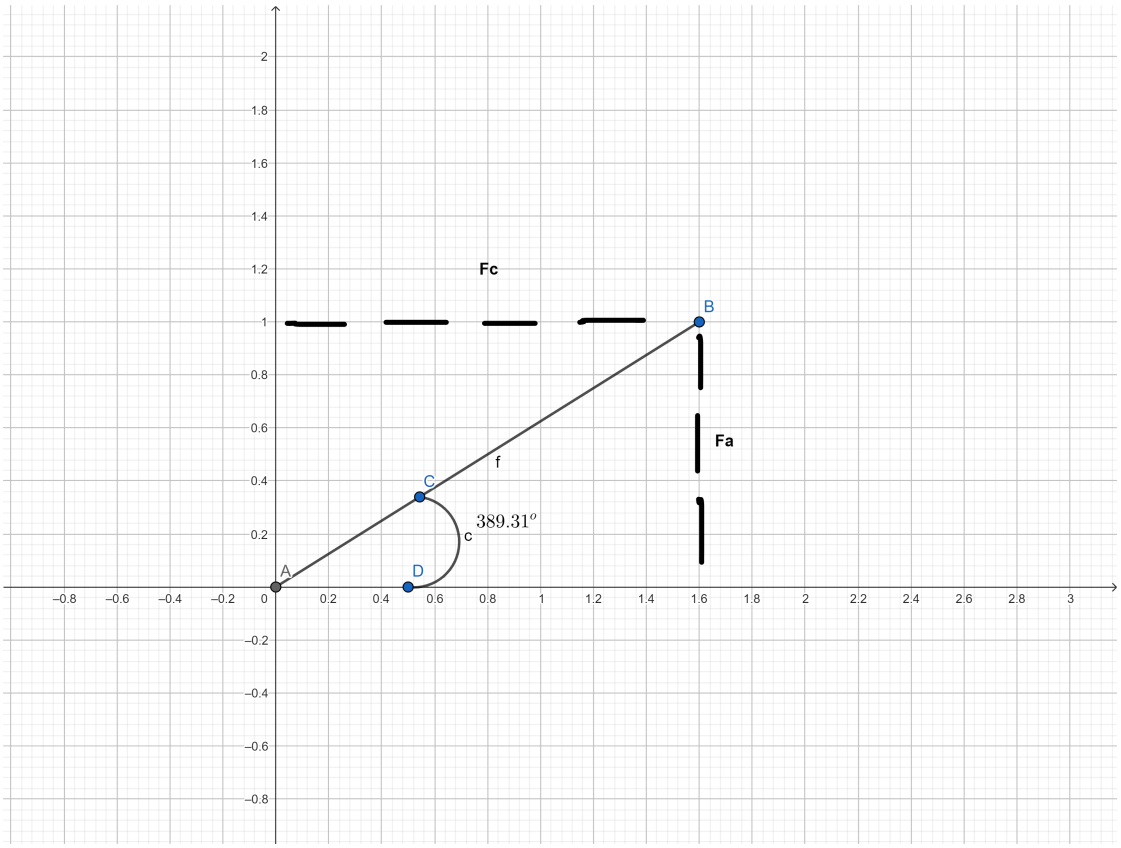
$$F_a = 49,05\,N\,\cos(52,13°) = 30,11\,N$$

$$F_c = 49,05\,N\,\sin(52,13°) = 38,72\,N$$

$$\tau = \frac{V}{A} = \frac{32,78}{19.600\,\text{mm}^2} = 0,00016\,kPa$$

**Figura 34**

*Diagrama de cuerpo libre eslabon 3*




*Nota: La imagen representa el eslabon 3 en inclinación. (Paute, 2024)*

**Para obtener los ángulos con los que se realizaron los análisis anteriores, se aplica la ley del coseno.**

**Calculamos la distancia proyectada y distancia total:**

$$x = -582\,mm$$

$$y = -1210 + 230 = -980\,mm$$

$$r = \sqrt{Px^2 + Py^2} = \sqrt{-582^2 + (-980)^2} = 1139.36\,mm$$

**Se calcula si la posición es alcanzable:**

$$D \leq L_1 + L_2$$

$$D \leq 680 + 460 = 1140$$

$$D \leq 1139.6$$

**Calculamos** $\theta_1, \theta_2, \theta_3$:

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{-980}{-582}\right) = 59.34^\circ$$

$$\beta = \cos^{-1}\left(\frac{L_1^2 + r^2 - L_2^2}{2L_1 r}\right) = \cos^{-1}\left(\frac{680^2 + 1139.36^2 - 460^2}{2 \times 680 \times 1139.6}\right) = 5.93^\circ$$

$$\theta_1 = \alpha - \beta = 59.34 - 5.93 = 53.41$$

$$\theta_1 = 53.41 - 180 = -121.61$$

$$\theta_2 = \cos^{-1}\left(\frac{D - L_1^2 - L_2^2}{2L_1 L_2}\right) = \cos^{-1}\left(\frac{1139.36^2 - 680^2 - 460^2}{2 \times 680 \times 460}\right) = 2.24^\circ$$

$$\theta_3 = -(\theta_1 + \theta_2) + 270$$

$$\theta_3 = -(-119.37) + 270 = 389.37$$

En esta sección se desarrollará el cálculo del centro de gravedad del robot cuadrúpedo, un paso esencial para garantizar su estabilidad y funcionalidad. El análisis se realizará considerando la distribución de masas de cada uno de los componentes del robot, incluyendo el cuerpo principal y las extremidades.

Teniendo en cuenta que:
X = Largo

Y = Profundidad
Z = Ancho

Se comienza por el cálculo del centro de gravedad del chasis:

Largo: 1000 mm (L)
Ancho: 320 mm (h)
Profundidad: 400 mm (d)

Peso del chasis: 16 kg

$$I_x = \frac{1}{12}m(h^2 + d^2) = \frac{1}{12}(16\,kg)(320^2 + 400^2) = 349.866,66\,kg/mm^2$$

$$I_y = \frac{1}{12}m(L^2 + d^2) = \frac{1}{12}(16\,kg)(1000^2 + 400^2) = 1.55 \times 10^{12}\,\mathrm{kg/m^2}$$

$$I_z = \frac{1}{12}m(L^2 + h^2) = \frac{1}{12}(16\,kg)(1000^2 + 320^2) = 1.47 \times 10^{12}\,\mathrm{kg/m^2}$$

Ahora se realiza el cálculo por pata:

**Eslabón 1:**
Largo: 680 mm (L)
Ancho: 140 mm (h)
Profundidad: 79 mm (d)
Peso del chasis: 0,940 kg

$$I_x = \frac{1}{12}m(h^2 + d^2) = \frac{1}{12}(0,940\,kg)(140^2 + 79^2) = 2.024,21\,\frac{kg}{mm^2}$$

$$I_y = \frac{1}{12}m(L^2 + d^2) = \frac{1}{12}(0,940\,kg)(680^2 + 79^2) = 36.710,21\,\frac{kg}{mm^2}$$

$$I_z = \frac{1}{12}m(L^2 + h^2) = \frac{1}{12}(2,28\,kg)(680^2 + 140^2) = 37.756,66\,\frac{kg}{mm^2}$$

**Eslabón 2:**
Largo: 460 mm (L)
Ancho: 140 mm (w)
Profundidad: 79 mm (t)

Masa: 0,635 kg (m)

$$I_x = \frac{1}{12}m(w^2+t^2) = \frac{1}{12}(0,635\,kg)(140^2+79^2) = 1.367,41\,\frac{kg}{mm^2}$$

$$I_y = \frac{1}{12}m(L^2+t^2) = \frac{1}{12}(0,635\,kg)(460^2+79^2) = 11.527,41\,\frac{kg}{mm^2}$$

$$I_z = \frac{1}{12}m(L^2+w^2) = \frac{1}{12}(0,635\,kg)(460^2+140^2) = 12.234,33\,\frac{kg}{mm^2}$$

**Eslabón 3:**
Largo: 230 mm (L)
Ancho: 140 mm (w)
Profundidad: 140 mm (t)
Masa: 0,57 kg (m)

$$I_x = \frac{1}{12}m(w^2+t^2) = \frac{1}{12}(0,57\,kg)(140^2+140^2) = 1.862\,\frac{kg}{mm^2}$$

$$I_y = \frac{1}{12}m(L^2+t^2) = \frac{1}{12}(0,57\,kg)(230^2+140^2) = 3.443,75\,\frac{kg}{mm^2}$$

$$I_z = \frac{1}{12}m(L^2+w^2) = \frac{1}{12}(0,57\,kg)(230^2+140^2) = 3.443,75\,\frac{kg}{mm^2}$$

Luego se calculan las distancias aproximadas e inercias globales:

**Eslabón 1:**

$$x_L = \frac{680}{2} = 340\,mm$$
$$y_L = 0\,mm$$
$$z_L = -\frac{680}{2} = -340\,mm$$
$$x_G = 0\,mm$$
$$y_G = 0\,mm$$
$$z_G = 0\,mm$$

$$d_1 = \sqrt{(x_G - x_L)^2 + (y_G - y_L)^2 + (z_G - z_L)^2}$$

$$d_1 = \sqrt{(0-340)^2 + (0-0)^2 + (-340-0)^2}$$

$$d_1 = 480,83\,mm$$

**Ejes paralelos:**

$$I_x = 2.024,21\,\frac{kg}{mm^2}$$
$$I_y = 36.710,21\,\frac{kg}{mm^2}$$
$$I_z = 37.756,66\,\frac{kg}{mm^2}$$
$$m_1 = 0,940\,kg$$
$$d_1 = 480,83\,mm$$

$$I_{xg} = I_x + m_1 \cdot d_1^2$$

$$I_{xg} = 2.024,21\,\tfrac{kg}{mm^2} + 0,940\,kg \cdot 480,83^2\,mm = 219.349,84\,\tfrac{kg}{mm^2}$$

$$I_{yg} = I_y + m_1 \cdot d_1^2$$

$$I_{yg} = 36.710,21\,\tfrac{kg}{mm^2} + 0,940\,kg \cdot 480,83^2\,mm = 254.035,84\,\tfrac{kg}{mm^2}$$

$$I_{zg} = I_z + m_1 \cdot d_1^2$$

$$I_{zg} = 37.756,66\,\tfrac{kg}{mm^2} + 0,940\,kg \cdot 480,83^2\,mm = 255.082,29\,\tfrac{kg}{mm^2}$$

**Eslabón 2:**

$$x_L = \frac{460}{2} = 230\,mm$$
$$y_L = 0\,mm$$
$$z_L = -\frac{460}{2} - 230 - 340 = -124\,mm$$
$$x_G = 0\,mm$$
$$y_G = 0\,mm$$
$$z_G = 0\,mm$$

$$d_2 = \sqrt{(x_G - x_L)^2 + (y_G - y_L)^2 + (z_G - z_L)^2}$$

$$d_2 = \sqrt{(230)^2 + (0-0)^2 + (-570)^2}$$

$$d_2 = 614,65\,mm$$

**Ejes paralelos:**

$$I_x = 1.367,41\,\frac{kg}{mm^2}$$
$$I_y = 11.527,41\,\frac{kg}{mm^2}$$
$$I_z = 12.234,33\,\frac{kg}{mm^2}$$
$$m_1 = 0,635\,kg$$
$$d_1 = 614,65\,mm$$

$$I_{xg} = I_x + m_1 \cdot d_1^2$$

$$I_{xg} = 1.367,41\,\tfrac{kg}{mm^2} + 0,635\,kg \cdot 614,65^2\,mm = 214.266,99\,\tfrac{kg}{mm^2}$$

$$I_{yg} = I_y + m_1 \cdot d_1^2$$

$$I_{yg} = 11.527,41\,\tfrac{kg}{mm^2} + 0,635\,kg \cdot 614,65^2\,mm = 251.426,99\,\tfrac{kg}{mm^2}$$

$$I_{zg} = I_z + m_1 \cdot d_1^2$$

$$I_{zg} = 12.234,33\,\frac{kg}{mm^2} + 0,635\,kg \cdot 614,65^2\,mm = 252.133,91\,\frac{kg}{mm^2}$$

**Eslabón 3:**

$$x_L = \frac{230}{2} = 115\,mm$$
$$y_L = 0\,mm$$
$$z_L = -\frac{230}{2} - 115 - 124 = -239\,mm$$
$$x_G = 0\,mm$$
$$y_G = 0\,mm$$
$$z_G = 0\,mm$$

$$d_3 = \sqrt{(x_G - x_L)^2 + (y_G - y_L)^2 + (z_G - z_L)^2}$$

$$d_3 = \sqrt{(36,5)^2 + (0-0)^2 + (-156,5)^2}$$

$$d_3 = 265,22\,mm$$

**Ejes paralelos:**

$$I_x = 1.862\,\frac{kg}{mm^2}$$
$$I_y = 3.443,75\,\frac{kg}{mm^2}$$
$$I_z = 3.443,75\,\frac{kg}{mm^2}$$
$$m_1 = 0,57\,kg$$
$$d_1 = 265,22\,mm$$

$$I_{xg} = I_x + m_1 \cdot d_1^2$$

$$I_{xg} = 1.862\,\frac{kg}{mm^2} + 0,57\,kg \cdot 265,22^2\,mm = 41.956,73\,\frac{kg}{mm^2}$$

$$I_{yg} = I_y + m_1 \cdot d_1^2$$

$$I_{yg} = 3.443,75\,\frac{kg}{mm^2} + 0,57\,kg \cdot 265,22^2\,mm = 43.538,48\,\frac{kg}{mm^2}$$

$$I_{zg} = I_z + m_1 \cdot d_1^2$$

$$I_{zg} = 3.443,75\,\frac{kg}{mm^2} + 0,57\,kg \cdot 265,22^2\,mm = 43.538,48\,\frac{kg}{mm^2}$$

Se calcula la inercia total de la pata:

$$I_{xpata} = 2.024,21\,\frac{kg}{mm^2} + 1.367,41\,\frac{kg}{mm^2} + 1.862\,\frac{kg}{mm^2} = 5.253,62\,\frac{kg}{mm^2}$$

$$I_{ypata} = 36.710,21\,\frac{kg}{mm^2} + 11.527,41\,\frac{kg}{mm^2} + 3.443,75\,\frac{kg}{mm^2} = 51.681,37\,\frac{kg}{mm^2}$$

$$I_{zpata} = 37.756,66\,\frac{kg}{mm^2} + 12.234,33\,\frac{kg}{mm^2} + 3.443,75\,\frac{kg}{mm^2} = 53.434,74\,\frac{kg}{mm^2}$$

Se calcula la inercia total del sistema:

**Momentos del chasis:**

$$Ixchasis = 349.866,66\,kg/mm^2$$
$$Iychasis = 1.55 \times 10^{12}\,kg/m^2$$
$$Izchasis = 1.47 \times 10^{12}\,kg/m^2$$

**Inercia total del sistema:**

$$I_{xt} = 5.253,62\,kg/mm^2 + 349.866,66\,kg/mm^2 = 355.120,28\,kg/mm^2$$

$$I_{yt} = 51.681,37\,kg/mm^2 + 1.55 \times 10^{12}\,\mathrm{kg/m^2} = 1.60 \times 10^{12}\,\mathrm{kg/m^2}$$
$$I_{zt} = 53.434,74\,kg/mm^2 + 1.47 \times 10^{12}\,\mathrm{kg/m^2} = 1.52 \times 10^{12}\,\mathrm{kg/m^2}$$

Calculo de los grados de libertad: Para calcular los grados de libertad (DoF) del robot cuadrúpedo, necesitamos analizar su diseño y el tipo de articulaciones que posee.
El robot cuadrúpedo está diseñado con cuatro patas, cada una compuesta por tres eslabones.

A continuación, se describe su estructura:

1. **Estructura de cada pata:**
   - **Eslabón 1**: Desde el chasis hasta la articulación de la çadera".
   - **Eslabón 2**: Desde la çadera"hasta la rodilla".
   - **Eslabón 3**: Desde la rodilla"hasta el "pie".
2. **Articulaciones:**
   - Cada pata cuenta con tres articulaciones rotacionales, una para cada eslabón, permitiendo movimientos independientes en los planos de interés.
3. **Grados de libertad totales (DoF):**
   - Cada articulación rotacional aporta un grado de libertad.
   - Dado que cada pata tiene tres articulaciones, el total de movimientos independientes por pata es:
   $$DoF \text{ por pata} = 3$$
   - Con cuatro patas, el total de grados de libertad del robot cuadrúpedo es:
   $$DoF \text{ total} = 3 \times 4 = 12$$

Por lo tanto, el robot cuadrúpedo tiene **12 grados de libertad totales**, distribuidos equitativamente entre las cuatro patas.

**Cálculos de motores:**

Para establecer el torque necesario para los motores pertenecientes a cada eslabón, se deben tomar en cuenta que las extremidades del robot cuadrúpedo están sometidas a 2 tipos de condiciones: la primera cuando 2 de sus extremidades se encuentran en contacto con el suelo y la segunda cuando dos de sus extremidades se encuentran en el aire al momento de realizar

la caminata. Teniendo en cuenta esto, se realizan los siguientes cálculos:

Se calculan las fuerzas individuales de cada eslabón:

$$F = m \cdot g \cdot d$$

$$F_1 = 0,940 \cdot 0,68 \cdot 9,81 = 6,27 \, \frac{N}{m}$$

$$F_2 = 0,635 \cdot 0,46 \cdot 9,81 = 2,86 \, \frac{N}{m}$$

$$F_3 = 0,57 \cdot 0,23 \cdot 9,81 = 1,28 \, \frac{N}{m}$$

Se calcula la masa del chasis y de la carga distribuida para las 4 extremidades:

$$\begin{aligned} mchd &= \frac{16}{4} = 4\,kg \\ mcd &= \frac{5}{4} = 1,25\,kg \\ mt &= 4\,kg + 1,25\,kg = 5,25\,kg \\ Ft &= 5,25\,kg \cdot 9,81 = 51,50\,\frac{N}{m} \end{aligned}$$

Se calcula el centro de gravedad del chasis a las patas:

$$\begin{aligned} x &= \frac{960}{2} = 480\,mm \\ y &= \frac{320}{2} = 160\,mm \\ z &= \frac{400}{2} = 200\,mm \end{aligned}$$

Se calcula la distancia radial, que es la distancia del centro de masa del chasis a una de las extremidades:

$$dr = \sqrt{(x)^2 + (y)^2 + (z)^2}$$
$$dr = \sqrt{(480)^2 + (160)^2 + (200)^2} = 544\,mm \approx 0,54\,m$$

Se calcula el torque por extremidad:

$$\tau_e = Ft \cdot dr$$
$$\tau_e = 51,50 \cdot 0,54$$
$$\tau_e = 27,81\,\frac{N}{m}$$

Se calcula el torque en caminata del primer eslabón:

$$\tau_{c1} = \tau_e \cdot 2 + (F_1 + F_2 + F_3) \cdot 2$$
$$\tau_{c1} = 27,81 \cdot 2 + (6,27 + 2,86 + 1,28) \cdot 2$$
$$\tau_{c1} = 77,03\,\frac{N}{m}$$

Se calcula el torque en caminata del segundo eslabón:

$$\tau_{c2} = \tau_{c1} + F_1$$
$$\tau_{c2} = 66,03 + 6,27\,\frac{N}{m}$$
$$\tau_{c2} = 72,3\,\frac{N}{m}$$

Se calcula el torque en caminata del eslabón 3:

$$\tau_{c2} = \tau_{c1} + F_1 + F_2$$
$$\tau_{c2} = 66,03\,\frac{N}{m} + 6,27\,\frac{N}{m} + 2,86\,\frac{N}{m}$$
$$\tau_{c2} = 75,16\,\frac{N}{m}$$

Se calculan los torques de las extremidades elevadas:

$$\tau_1 = F_1 + F_2 + F_3$$
$$\tau_1 = 6,27\,\frac{N}{m} + 2,86\,\frac{N}{m} + 1,28\,\frac{N}{m}$$
$$\tau_1 = 10,41\,\frac{N}{m}$$

$$\tau_2 = F_2 + F_3$$
$$\tau_2 = 2,86\,\frac{N}{m} + 1,28\,\frac{N}{m}$$
$$\tau_2 = 4,14\,\frac{N}{m}$$

$$\tau_3 = F_3$$
$$\tau_3 = 1,28\,\frac{N}{m}$$

Selección del motor para articulaciones del robot

Una vez obtenido el torque necesario para mover una articulación del robot, el cual es de $77\,\frac{N}{m}$, se comienza con la selección de un motor. Para un robot cuadrúpedo, se necesitará un motor que combine ligereza, alto par y precisión. Para esto, tenemos series de motores ideales para aplicaciones en robots cuadrúpedos debido a su alta potencia y diseño compacto.

**Tabla 2**

*Especificaciones de Motores*

| Serie | Modelo | Par Nominal (N·m) | Par Máximo (N·m) | Velocidad Máxima (rpm) |
|---|---|---|---|---|
| **T-Motor AK** | AK10-9 V2.0 | 18 | 48 | 26 rad/s |
| **T-Motor AK** | AK80-64 | 48 | 120 | 80 |
| **CubeMars AK** | AK70-10 | 8.3 | 24.8 | 310 |
| **CubeMars AK** | AK80-9 | 9 | 18 | 533 |

*Nota.* La tabla presenta las especificaciones de los motores en términos de par nominal, par máximo y velocidad máxima.

**Tabla 3**

*Especificaciones Adicionales de Motores*

| Serie | Modelo | Peso (g) | Voltaje de Operación (V) | Modos de Control |
|---|---|---|---|---|
| **T-Motor AK** | AK10-9 V2.0 | 960 | 48 | Servo y MIT |
| **T-Motor AK** | AK80-64 | 485 | 24/48 | Servo y MIT |
| **CubeMars AK** | AK70-10 | 521 | 24/48 | Servo y MIT |
| **CubeMars AK** | AK80-9 | 485 | 48 | Servo y MIT |

*Nota.* La tabla presenta especificaciones adicionales de los motores, incluyendo peso, voltaje de operación y modos de control.

**Tabla 4**

*Aplicaciones y Tipo de Control de Motores*

| Serie | Modelo | Aplicaciones | Uso |
|---|---|---|---|
| **T-Motor AK** | AK10-9 V2.0 | Robots cuadrúpedos, exoesqueletos, AGV | Alta potencia para carga y tracción |
| **T-Motor AK** | AK80-64 | Exoesqueletos y robots de asistencia | Ligero y eficiente para asistencia |
| **CubeMars AK** | AK70-10 | Robots cuadrúpedos y exoesqueletos | Versátil para robótica avanzada |
| **CubeMars AK** | AK80-9 | Robots cuadrúpedos y exoesqueletos | Equilibrio entre potencia y eficiencia |

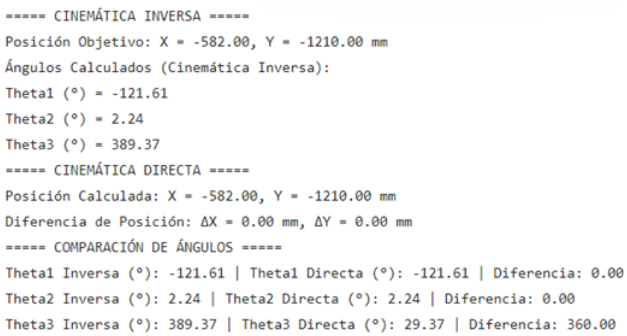
*Nota.* La tabla presenta las aplicaciones y tipo de control de los motores utilizados.

## 6.4. Diseño del control del robot cuadrúpedo

Una vez obtenida la información de las opciones de los motores, se elige el motor AK80-64, el cual tiene una buena relación entre torque y peso. Con esta informacion, se realiza el control de los motores en base a la caminata. Para esto se desarrollaron varios códigos en Matlab, los cuales permitieron primero obtener la Cinemática directa e Inversa:

**Figura 35**

*Cinemática directa e inversa*

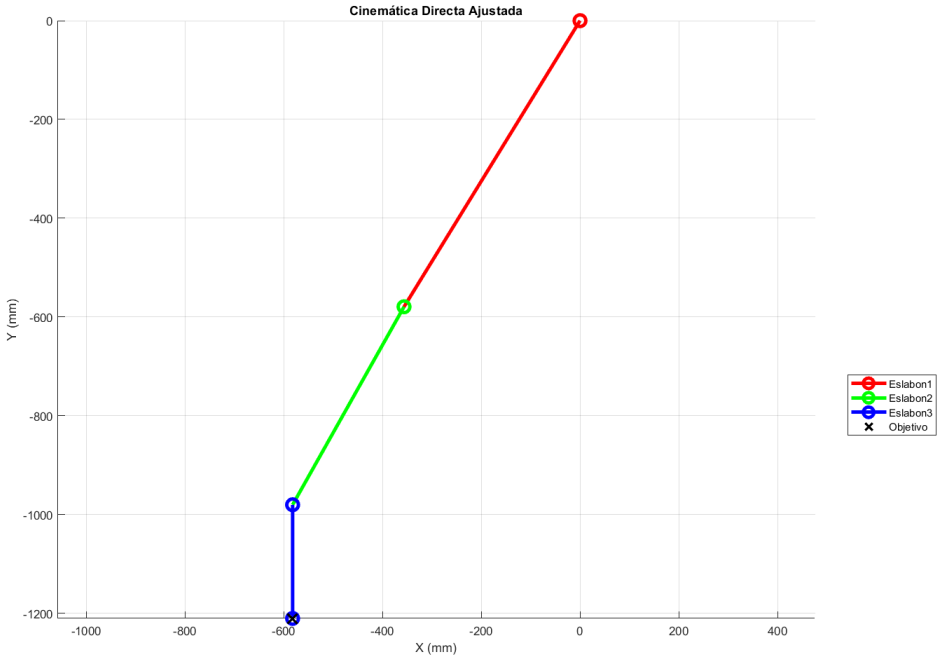



*Nota: La imagen representa el calculo de ambas cinemáticas. (Paute, 2024)*

En la figura 36, se puede observar que la posición objetiva es la máxima posible alcanzar es X=±582 mm, mostrándose los ángulos en esas posiciones, siendo esos también sus ángulos máximos de rotación como se observa en la figura 37.

**Figura 36**

*Pata en su mínima posición*



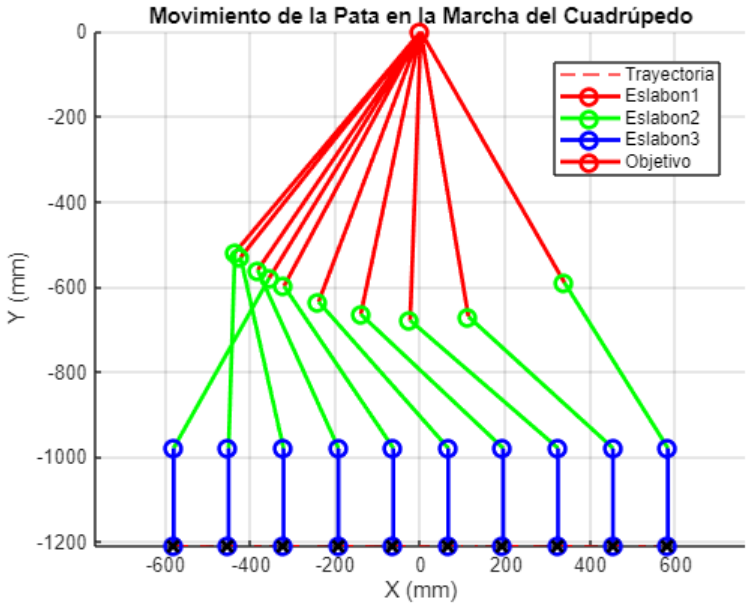

*Nota: La imagen representa la pata del robot en su minima posicion alcanzable. (Paute, 2024)*

Una vez obtenido los puntos máximos y mínimos, con sus respectivos ángulos, se puede crear la trayectoria de marcha de una pata en el suelo y otra en el aire:

**Figura 37**

*Trayectoria de la pata en el suelo*

```
===== ÁNGULOS DE MARCHA =====
Paso 1: Theta1 = -121.61°, Theta2 = 2.24°, Theta3 = 389.37°
Paso 2: Theta1 = -130.09°, Theta2 = 38.25°, Theta3 = 361.84°
Paso 3: Theta1 = -128.62°, Theta2 = 51.32°, Theta3 = 347.30°
Paso 4: Theta1 = -124.39°, Theta2 = 58.80°, Theta3 = 335.59°
Paso 5: Theta1 = -118.28°, Theta2 = 62.32°, Theta3 = 325.96°
Paso 6: Theta1 = -110.73°, Theta2 = 62.32°, Theta3 = 318.41°
Paso 7: Theta1 = -102.00°, Theta2 = 58.80°, Theta3 = 313.19°
Paso 8: Theta1 = -92.11°, Theta2 = 51.32°, Theta3 = 310.78°
Paso 9: Theta1 = -80.50°, Theta2 = 38.25°, Theta3 = 312.26°
Paso 10: Theta1 = -60.20°, Theta2 = 2.24°, Theta3 = 327.96°
```



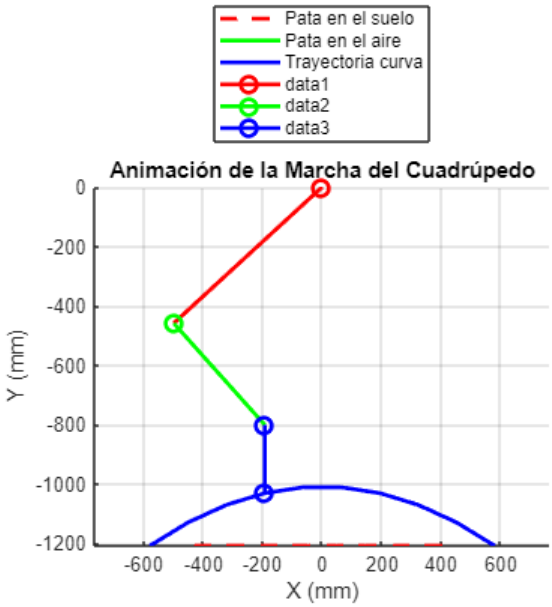

*Nota: La imagen representa la trayectoria que sigue la pata cuando esta en contacto con el suelo. (Paute, 2024)*

Como se puede observar en la Figura 38, la trayectoria de marcha seria recta con respecto al eje X ya que es la pata que estaría en contacto con el suelo siempre. Luego se realiza el mismo análisis con la pata en el aire y se analiza su trayectoria y la variación de los ángulos como se muestra en la figura 39.

**Figura 38**

*Trayectoria de la pata en el aire*

| Paso | Theta1_deg | Theta2_deg | Theta3_deg |
|---|---|---|---|
| 1 | -60.197 | 2.2352 | 327.96 |
| 2 | -85.762 | 56.786 | 298.98 |
| 3 | -98.814 | 77.158 | 291.66 |
| 4 | -110.27 | 89.341 | 290.93 |
| 5 | -120.97 | 95.279 | 295.69 |
| 6 | -130.41 | 95.279 | 305.14 |
| 7 | -137.46 | 89.341 | 318.12 |
| 8 | -140.84 | 77.158 | 333.68 |
| 9 | -139.11 | 56.786 | 352.33 |
| 10 | -121.61 | 2.2352 | 389.37 |

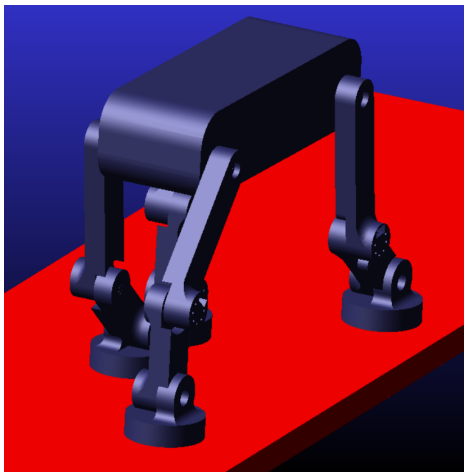



*Nota: La imagen representa la trayectoria que sigue la pata cuando esta en el aire. (Paute, 2024)*

Una vez obtenidos los ángulos y las trayectorias de ambas fases de la marcha se realizó una simulación en Adams View, la cual muestra como se movería el robot bajo esos ángulos, para la simulación se usaron los valores en X de 432 mm. Se puede observar el movimiento en las figuras 39, 40 y 41.

**Figura 39**

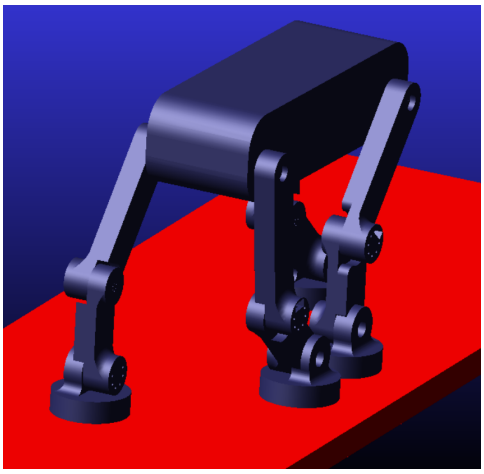
*Caminata del robot*



*Nota: La imagen representa la caminata del robot. (Paute, 2024)*

**Figura 40**

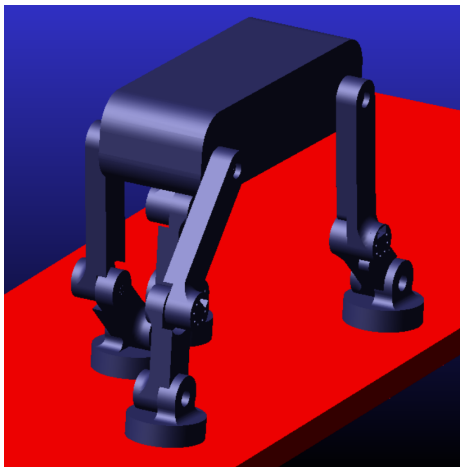
*Caminata del robot fase 2*



*Nota: La imagen representa la caminata del robot en segunda fase. (Paute, 2024)*

**Figura 41**

*Caminata del robot fase 3*



*Nota: La imagen representa la caminata del robot en tercera fase. (Paute, 2024)*

El control PID es utilizado en sistemas de control debido a su capacidad para regular con precisión variables como velocidad y aceleración. En el caso del robot cuadrúpedo, su implementación resulta adecuada, ya que permite alcanzar una marcha estable, reduciendo oscilaciones y movimientos bruscos. La sintonización de este controlador se realizó mediante el método de Ziegler-Nichols, el cual proporciona valores iniciales óptimos para los parámetros $K_p, K_i, K_d$. Este método es usado como base para el controlador, ya que los drivers del motor estan diseñados bajo el método mencionado anteriormente.

Sin embargo, este método puede generar sobre disparo, por lo que fue necesario realizar ajustes adicionales para mejorar la respuesta del sistema. Para optimizar el controlador, también se empleó la herramienta PID Tuner de MATLAB, la cual proporcionó valores iniciales que posteriormente fueron corregidos manualmente con el fin de obtener una respuesta más estable y precisa.

Es importante destacar la diferencia entre el PID y el PID Tuner: mientras que el PID es el algoritmo que regula el sistema a través de los términos proporcional, integral y derivativo, el PID Tuner es una herramienta que permite ajustar automáticamente sus parámetros para optimizar su desempeño.

Gracias a este enfoque, el robot es capaz de regular su velocidad y aceleración, compensando perturbaciones externas y asegurando transiciones suaves entre movimientos. Así, el

uso del PID en este sistema permite una marcha controlada y estable, validando su elección como una solución efectiva para el control del robot cuadrúpedo.

Una vez obtenidas ambas trayectorias con sus puntos máximos, mínimos y la variación de los ángulos respecto a cada posición, se realiza un control PID, el cual permitirá minimizar el error y estabilizar el torque del motor en un tiempo específico. Hay que tomar en cuenta que cada motor tendrá un torque diferente, dependiendo si la pata se encuentra en el aire o en el suelo, a continuación, se va a especificar los ángulos y los torques para ambas fases de las marchas con sus respectivos controladores.

**Pata en el suelo:**
**Eslabón 1:**
Torque: $77\,\mathrm{N}\cdot\mathrm{m}$
Ángulos: $[-121.61, -127.78, -114.6, -94.7, -60.2]$
Valores PID tuner:

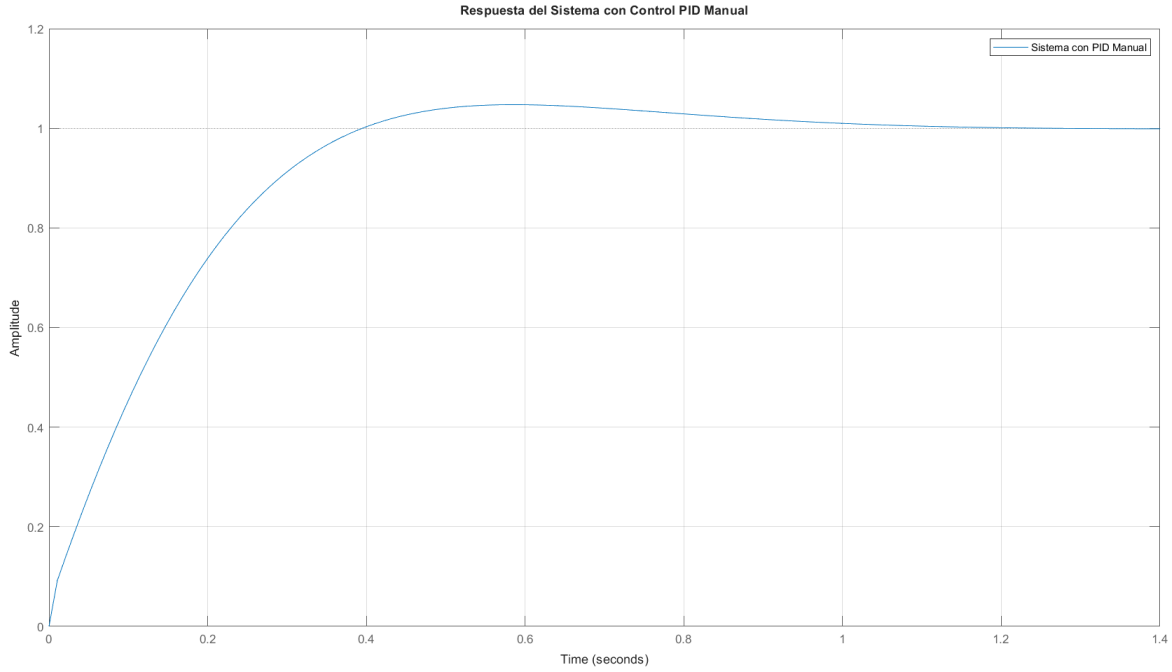
$$K_p = 1.1283, \quad K_i = 7.8211, \quad K_d = 0.0000$$

Valores PID ajustados manualmente:

$$K_p = 1.10, \quad K_i = 7, \quad K_d = 0.01$$

**Figura 42**

*PID ajustado manualmente para el eslabón 1 y pata en el suelo*



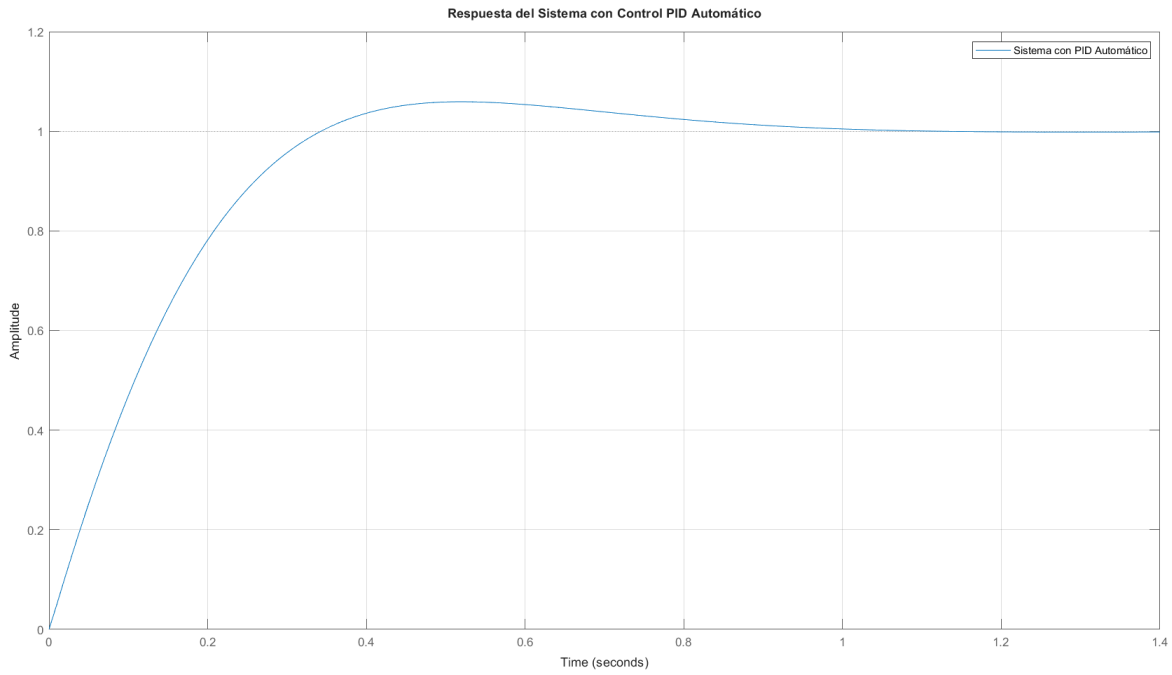

*Nota: La imagen representa el control PID con ajustes manuales del eslabon 1 mientras la pata está en contacto con el suelo. (Paute, 2024)*

La figura 42 muestra la respuesta del sistema con control PID manual, donde se analiza el comportamiento de la velocidad angular en función del tiempo. Se observa que el sistema presenta un sobre disparo inicial, alcanzando un valor superior al deseado antes de estabilizarse. Luego, se evidencia una ligera oscilación transitoria antes de converger de manera estable a la velocidad de referencia.

El tiempo de estabilización es aproximadamente 25 segundos, lo que indica que el sistema logra alcanzar su estado estacionario sin grandes fluctuaciones. El sobre disparo inicial sugiere que los parámetros del controlador PID pueden ajustarse para minimizar este efecto, reduciendo el impacto de variaciones bruscas en la respuesta.

**Figura 43**

*PID ajustado automáticamente para el eslabón 1 y pata en el suelo*




*Nota: La imagen representa el control PID obtenido con PID tunner para el eslabon 1 mientra la pata esta en contacto con el suelo. (Paute, 2024)*

La Figura 43 muestra la respuesta del sistema utilizando un control PID ajustado automáticamente, donde se analiza el comportamiento de la velocidad angular en función del tiempo. Se observa que el sistema presenta una respuesta con múltiples oscilaciones, indicando una menor estabilidad en comparación con el ajuste manual.

El sistema alcanza la velocidad deseada, pero presenta fluctuaciones considerables antes de estabilizarse, lo que sugiere que los parámetros del PID Tuner automático no están optimizados para minimizar la respuesta transitoria. En particular, el comportamiento oscilatorio indica que el coeficiente de amortiguación es bajo, lo que permite que la señal fluctúe alrededor del valor final antes de converger. El tiempo de establecimiento es similar al obtenido con el ajuste manual, aproximadamente 25-30 segundos, pero con una mayor variabilidad en la respuesta. Esto puede afectar la precisión y estabilidad del control.

**Eslabón 2:**

Torque: $73\,\mathrm{N}\cdot\mathrm{m}$

Ángulos: $[2.24, 53.62, 67.75, 53.52, 2.24]$

Valores PID tuner:

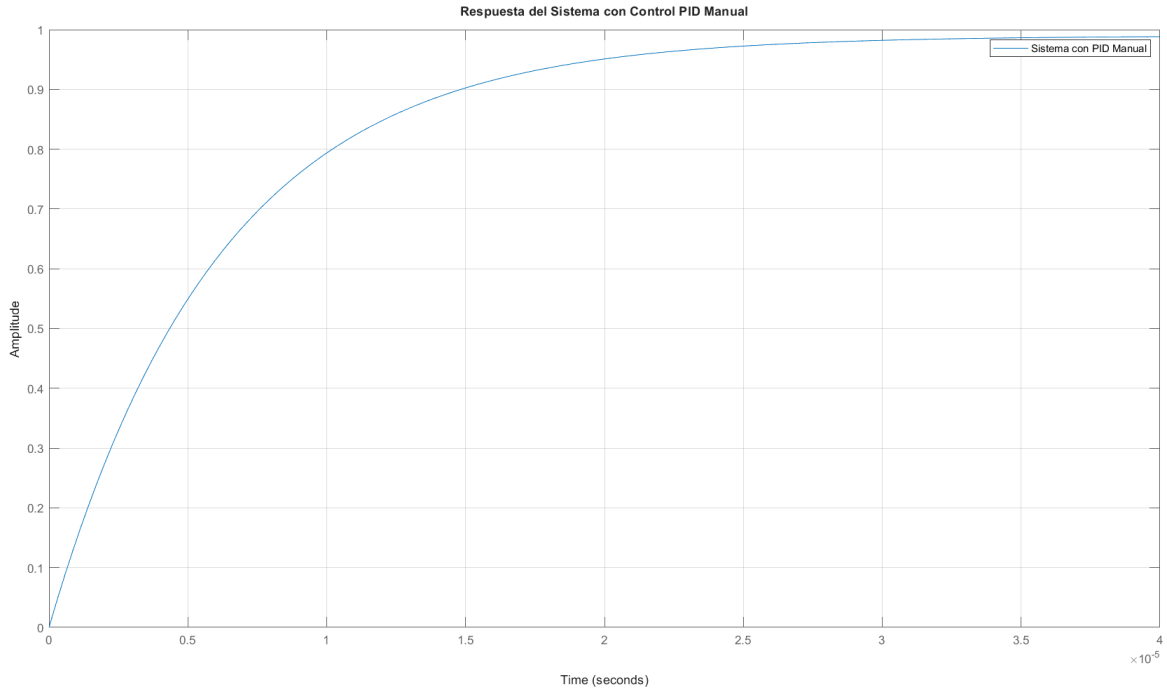
$$K_p = 1.1414, \quad K_i = 22.6268, \quad K_d = 0.0000$$

Valores PID ajustados manualmente:

$$K_p = 5, \quad K_i = 10, \quad K_d = 7$$

**Figura 44**

*PID ajustado manualmente para el eslabón 2 y pata en el suelo*



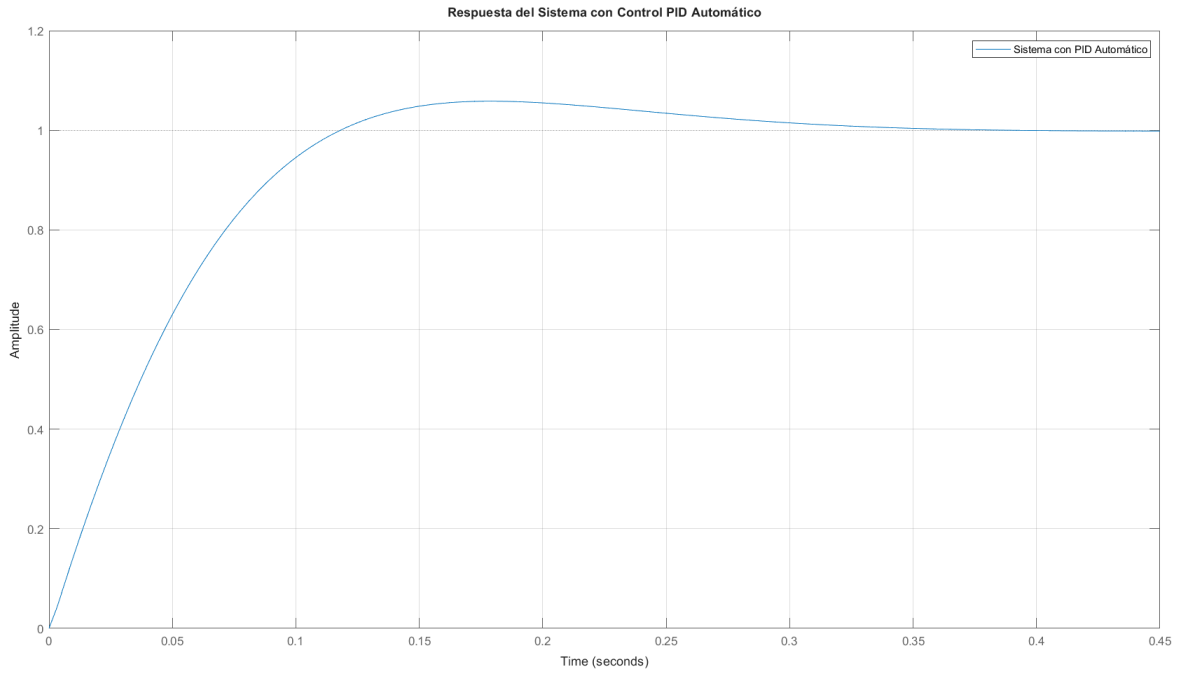

*Nota: La imagen representa el control PID obtenido con ajuste manual para el eslabon 2 mientra la pata esta en contacto con el suelo. (Paute, 2024)*

En esta figura 44 se muestra la respuesta del sistema con control PID manual, observando

el comportamiento de la velocidad angular en función del tiempo. A diferencia de la primera evaluación, este sistema presenta un sobreimpulso inicial más pronunciado, alcanzando un valor superior a la referencia antes de estabilizarse. Sin embargo, el sistema muestra un rápido tiempo de establecimiento, convergiendo a su valor final en aproximadamente 2.5 segundos.

**Figura 45**

*PID ajustado automáticamente para el eslabón 2 y pata en el suelo*




*Nota: La imagen representa el control PID obtenido con PID tunner para el eslabon 2 mientra la pata esta en contacto con el suelo.(Paute, 2024)*

La figura 45 muestra la respuesta del sistema con control PID ajustado automáticamente, evidenciando el comportamiento de la velocidad angular en función del tiempo. Se observa un sobre disparo inicial, donde la velocidad supera el valor de referencia antes de estabilizarse. Esta configuración presenta una respuesta más estable, con un tiempo de establecimiento reducido a aproximadamente 3.5 segundos y sin oscilaciones prolongadas.
El sobre disparo indica que el valor de Kp aún es elevado, aunque el sistema se estabiliza sin grandes fluctuaciones. Esto sugiere que el ajuste manual sigue siendo más eficiente en

términos de rapidez, aunque con un leve compromiso en la estabilidad inicial.

**Eslabón 3:**

Torque: $75\,\mathrm{N}\cdot\mathrm{m}$

Ángulos: $[389.37, 344.16, 321.91, 311.08, 327.96]$

Valores PID tuner:

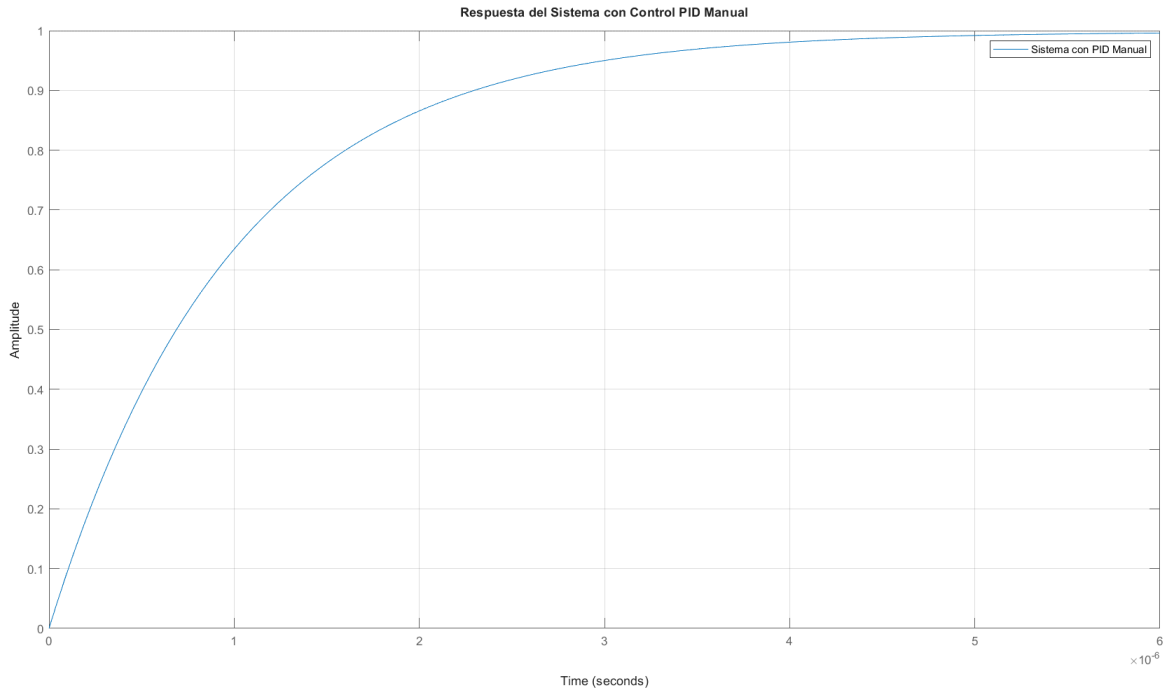
$$K_p = 1.1097, \quad K_i = 106.3209, \quad K_d = 0.0000$$

Valores PID ajustados manualmente:

$$K_p = 5, \quad K_i = 10, \quad K_d = 10$$

**Figura 46**

*PID ajustado manualmente para el eslabón 3 y pata en el suelo*

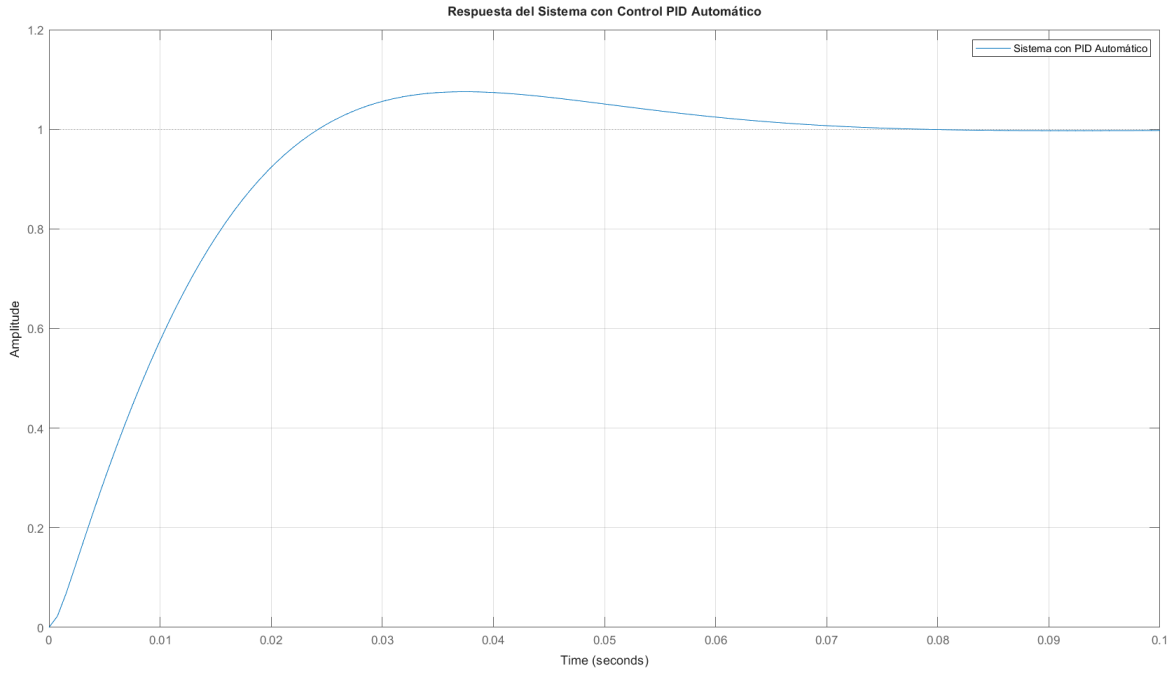



*Nota: La imagen representa el control PID obtenido con ajuste manual para el eslabon 3 mientra la pata esta en contacto con el suelo. (Paute, 2024)*

La Figura 46 muestra la respuesta del sistema con control PID manual, donde se observa un mínimo sobre disparo inicial, seguido de una convergencia suave hacia la velocidad de referencia, con una oscilación transitoria casi inexistente y un tiempo de establecimiento aproximado de 1.8 segundos.
El rápido tiempo de respuesta sugiere que la sintonización manual del PID ha sido optimizada para lograr una respuesta rápida y estable.

**Figura 47**

*PID ajustado automaticamente para el eslabón 3 y pata en el suelo*




*Nota: La imagen representa el control PID obtenido con PID tunner para el eslabon 3 mientra la pata esta en contacto con el suelo.(Paute, 2024)*

La figura 47 muestra la respuesta del sistema con control PID automático, se observa un sobre disparo inicial antes de que la señal se estabilice en el valor de referencia, pero con un tiempo de establecimiento reducido a aproximadamente 1.6 segundos, lo que indica una mejora en la rapidez de respuesta.
Este ajuste logra minimizar las oscilaciones y presenta una convergencia más suave, aunque aún se nota un leve descenso en la respuesta transitoria antes de alcanzar la estabilidad final.

Esto sugiere que la ganancia proporcional (Kp) sigue generando un sobre disparo, aunque el sistema logra amortiguarlo con un mejor ajuste de Kd.
Si bien esta configuración ha logrado una respuesta más rápida y estable, sigue mostrando un desempeño ligeramente inferior al PID manual, ya que la fase de ajuste final es más prolongada.

**Pata en el aire:**
**Eslabón 1:**
Torque: $10.41\,\mathrm{N}\cdot\mathrm{m}$
Ángulos: $[-60.19, -101.77, -125.91, -141.41, -121.61]$
Valores PID tuner:

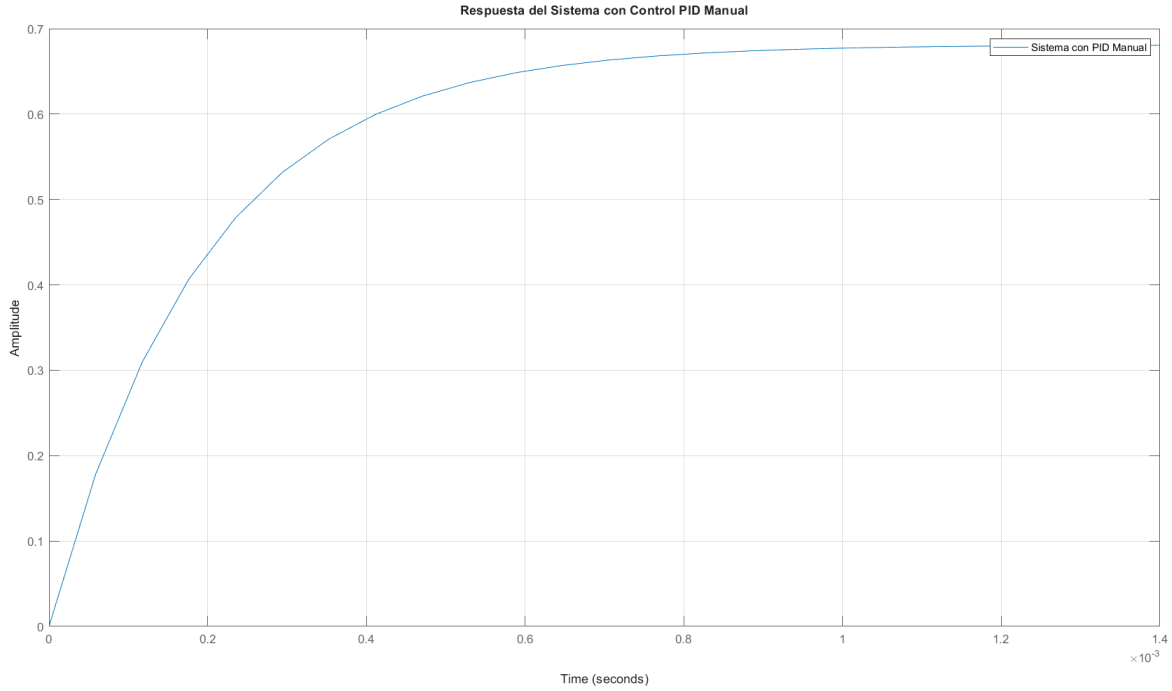
$$K_p = 1.3389, \quad K_i = 8.3865, \quad K_d = 0.0000$$

Valores PID ajustados manualmente:

$$K_p = 1.5, \quad K_i = 10, \quad K_d = 0.5$$

**Figura 48**

*PID ajustado manualmente para el eslabón y pata en el aire*



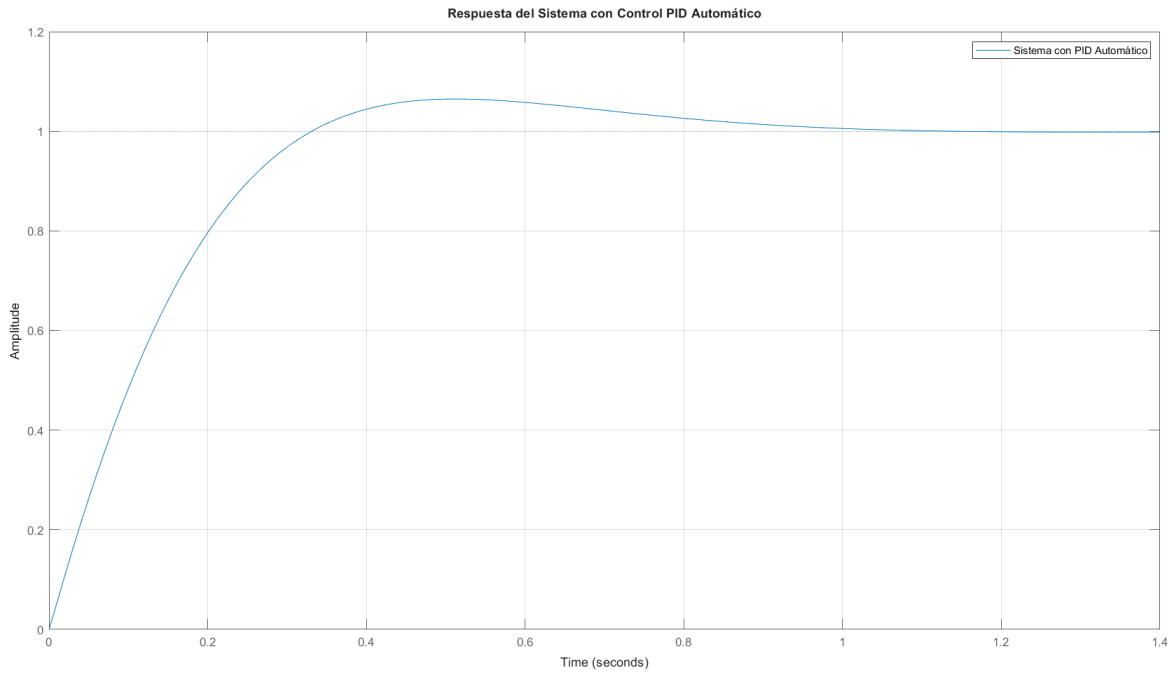

*Nota: La imagen representa el control PID ajustado manualmente para el eslabon 1 mientra la pata esta en el aire. (Paute, 2024)*

La figura 48 muestra la respuesta del sistema con control PID manual, donde se observa la evolución de la velocidad angular en función del tiempo. Se aprecia un sobre disparo inicial, lo que indica que la ganancia proporcional Kp genera una respuesta rápida, pero con una amplitud superior a la referencia antes de estabilizarse.

Tras el sobre disparo, el sistema presenta una fase de ajuste progresivo, con una leve pendiente de corrección antes de alcanzar su estado estacionario. El tiempo de estabilización es relativamente prolongado, lo que sugiere que el valor de Ki podría estar influenciando la compensación del error de estado estable.

**Figura 49**

*PID ajustado automáticamente para el eslabón 1 y pata en el aire.*




*Nota: La imagen representa el control PID ajustado con PID tunner para el eslabon 1 mientra la pata esta en el aire.(Paute, 2024)*

La figura 49 muestra la respuesta del sistema con control PID automático, donde se observa una progresión en la velocidad angular con un comportamiento oscilatorio antes de alcanzar la referencia. Se presentan varias fluctuaciones a lo largo de la fase transitoria, lo que sugiere que el sistema aún realiza correcciones significativas antes de estabilizarse.
El sobre disparo inicial no es pronunciado, pero la secuencia de oscilaciones indica que el sistema tiene un bajo nivel de amortiguamiento. Esto puede ser consecuencia de una ganancia proporcional Kp elevada, combinada con un coeficiente derivativo Kd insuficiente para reducir las oscilaciones.

**Eslabón 2:**

Torque: $4.14\,\mathrm{N}\cdot\mathrm{m}$

Ángulos: $[2.23, 80.81, 96.01, 80.84, 2.23]$

Valores PID tuner:

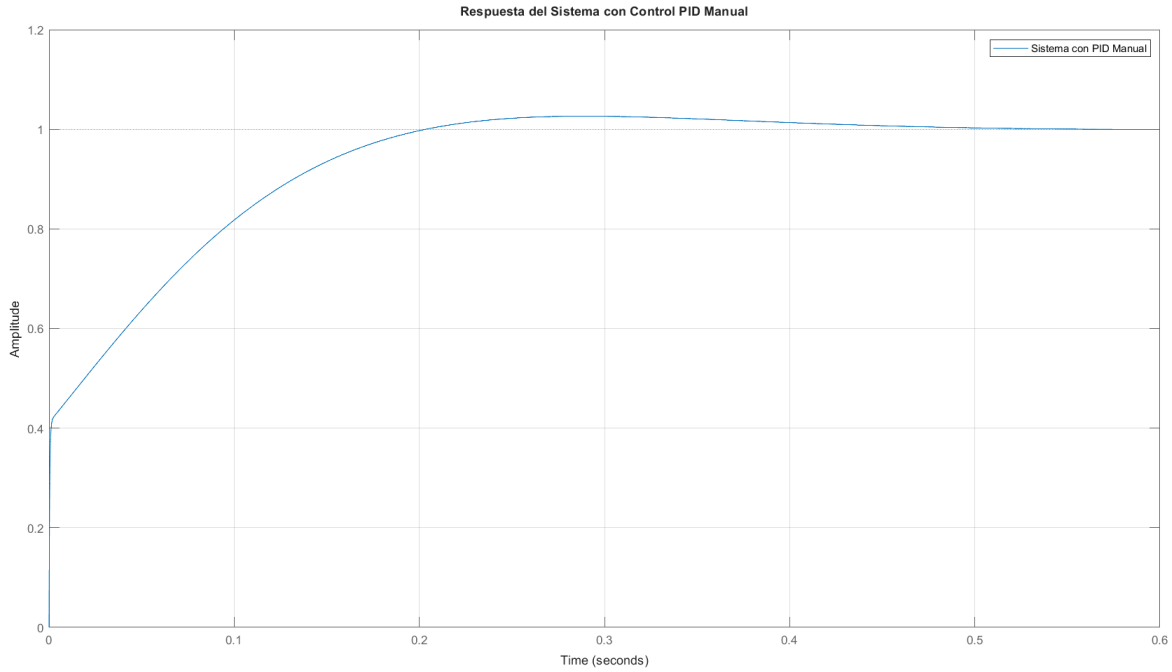
$$K_p = 1.1414, \quad K_i = 22.6268, \quad K_d = 0.0000$$

Valores PID ajustados manualmente:

$$K_p = 1.5, \quad K_i = 20, \quad K_d = 0.05$$

**Figura 50**

*PID ajustado manualmente para el eslabón 2 y pata en el aire*



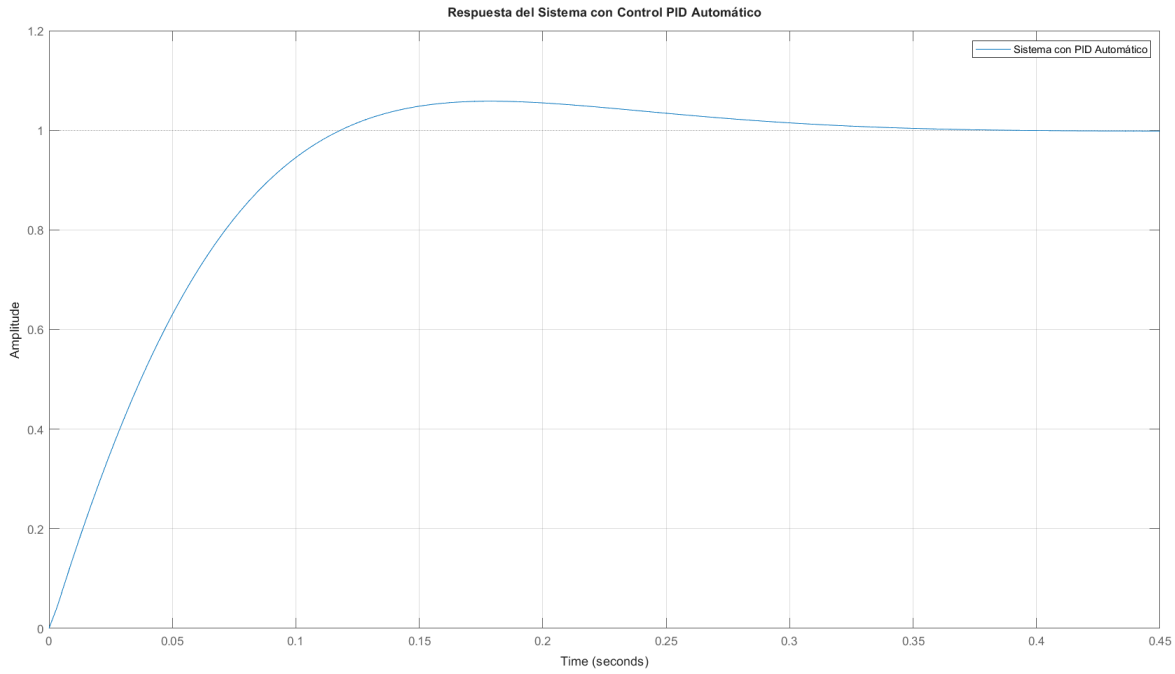

*Nota:La imagen representa el control PID ajustado manualmente para el eslabon 2 mientra la pata esta en el aire. (Paute, 2024)*

La figura 50 presenta la respuesta del sistema con control PID manual, donde se observa un sobre disparo inicial antes de que la señal comience su fase de ajuste. La curva muestra un comportamiento estable con una leve corrección antes de alcanzar su estado estacionario.
El tiempo de estabilización es relativamente corto, lo que indica que el sistema responde de

manera eficiente a la referencia. La fase transitoria no presenta oscilaciones significativas, lo que sugiere que los valores de Kd y Ki han sido ajustados adecuadamente para amortiguar la respuesta sin generar fluctuaciones prolongadas.

**Figura 51**

*PID ajustado automáticamente para el eslabón 2 y pata en el aire*




*Nota: La imagen representa el control PID ajustado con PID tunner para el eslabon 2 mientra la pata esta en el aire. (Paute, 2024)*

La figura 51 muestra la respuesta del sistema con control PID automático, donde se observa un sobre disparo inicial antes de que la señal se estabilice en su valor final. La curva presenta una transición suave sin oscilaciones prolongadas, lo que indica que el sistema ha sido ajustado para minimizar fluctuaciones en la fase transitoria.

El tiempo de estabilización es relativamente corto, lo que sugiere que la configuración del PID permite alcanzar la referencia de manera eficiente. Sin embargo, el sobre disparo inicial podría reducirse ajustando Kp o aumentando Kd para mejorar el amortiguamiento sin comprometer la rapidez del sistema.

**Eslabón 3:**

Torque: $1.28\,\mathrm{N}\cdot\mathrm{m}$

Ángulos: $[327.96, 290.93, 299.89, 329.57, 389.37]$

Valores PID tuner:

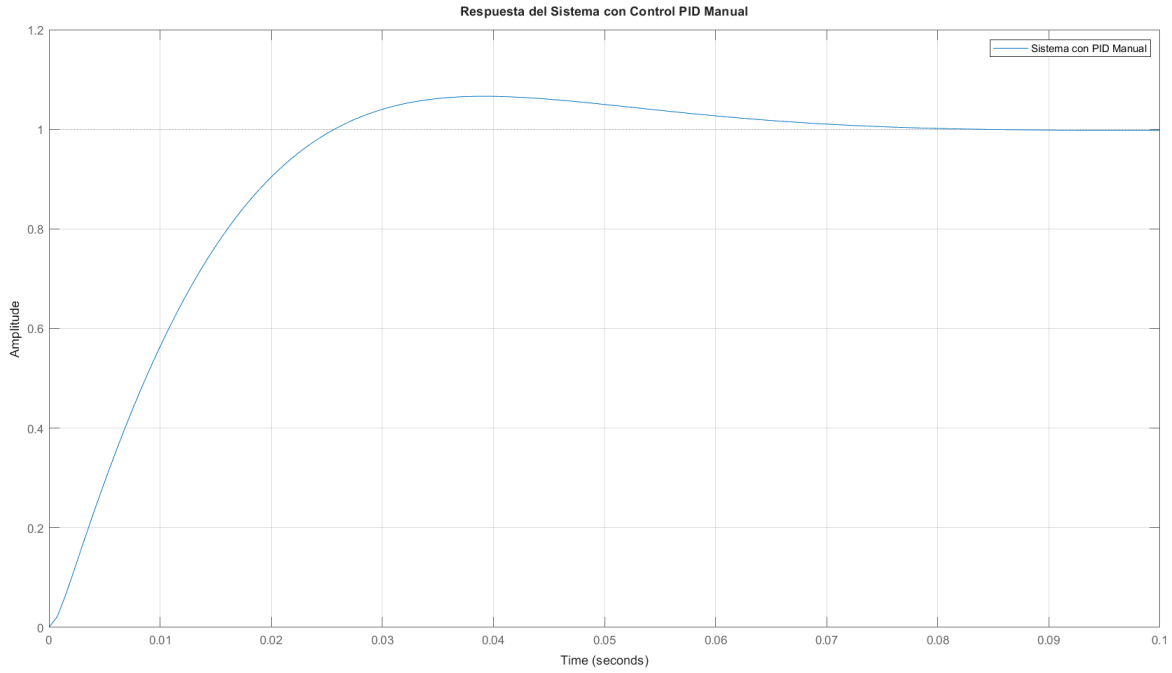
$$K_p = 1.1097, \quad K_i = 106.3209, \quad K_d = 0.0000$$

Valores PID ajustados manualmente:

$$K_p = 1.1, \quad K_i = 100, \quad K_d = 0$$

**Figura 52**

*PID ajustado manualmente para el eslabón 3 y pata en el aire*




*Nota: La imagen representa el control PID ajustado manualmente para el eslabon 3 mientra la pata esta en el aire. (Paute, 2024)*

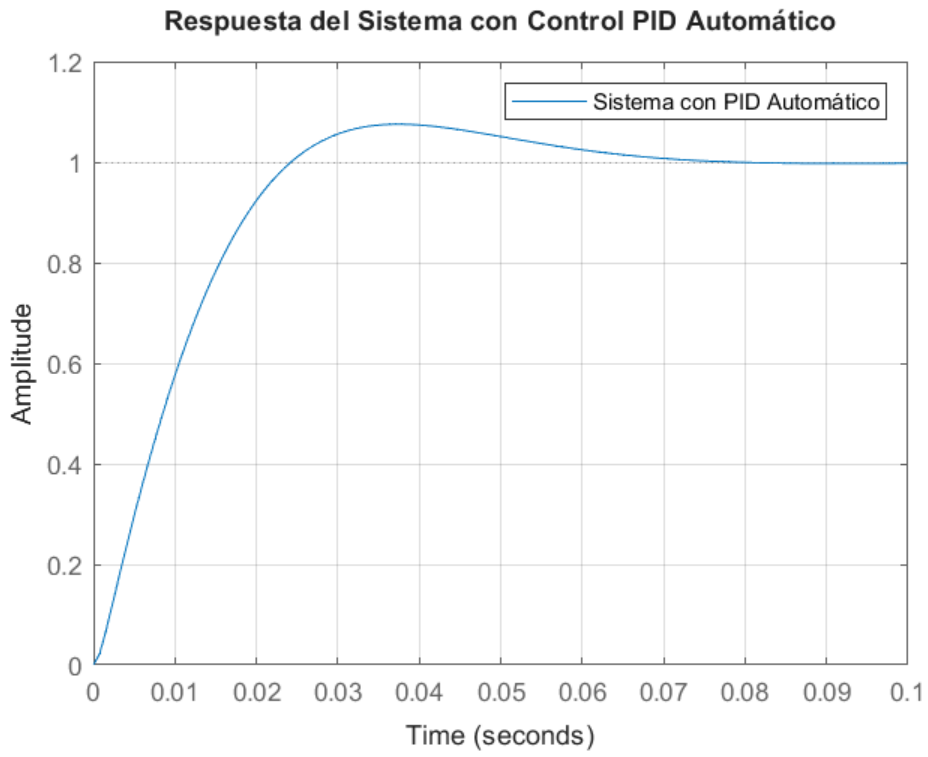
La figura 52 muestra la respuesta del sistema con control PID manual, donde se aprecia un

sobre disparo inicial moderado, seguido de una estabilización progresiva. La señal no presenta oscilaciones prolongadas y tiende a alcanzar su estado estacionario en un corto período de tiempo.

El tiempo de asentamiento es reducido, lo que indica una respuesta rápida y eficiente del sistema. La leve pendiente observada en la fase final sugiere que el sistema sigue realizando pequeños ajustes antes de estabilizarse completamente. Este comportamiento puede deberse a la interacción entre Ki y Kd, que están regulando el error residual de manera controlada.

**Figura 53**

*PID ajustado automáticamente para el eslabón 3 y pata en el aire*




*Nota: La imagen representa el control PID ajustado con PID tunner para el eslabon 3 mientra la pata esta en el aire. (Paute, 2024)*

La figura 53 muestra la respuesta del sistema con control PID automático, donde se observa un sobre disparo inicial antes de que la señal se estabilice en su valor final. La curva presenta un comportamiento con amortiguamiento adecuado, lo que indica que el sistema

responde de manera controlada sin generar oscilaciones prolongadas.

El tiempo de asentamiento es breve, lo que demuestra que el sistema alcanza su referencia de forma eficiente. Sin embargo, el sobre disparo inicial sugiere que la ganancia proporcional Kp podría estar ligeramente elevada, lo que provoca un incremento temporal antes de la estabilización.

## 6.5. Simulación de esfuerzos del Robot

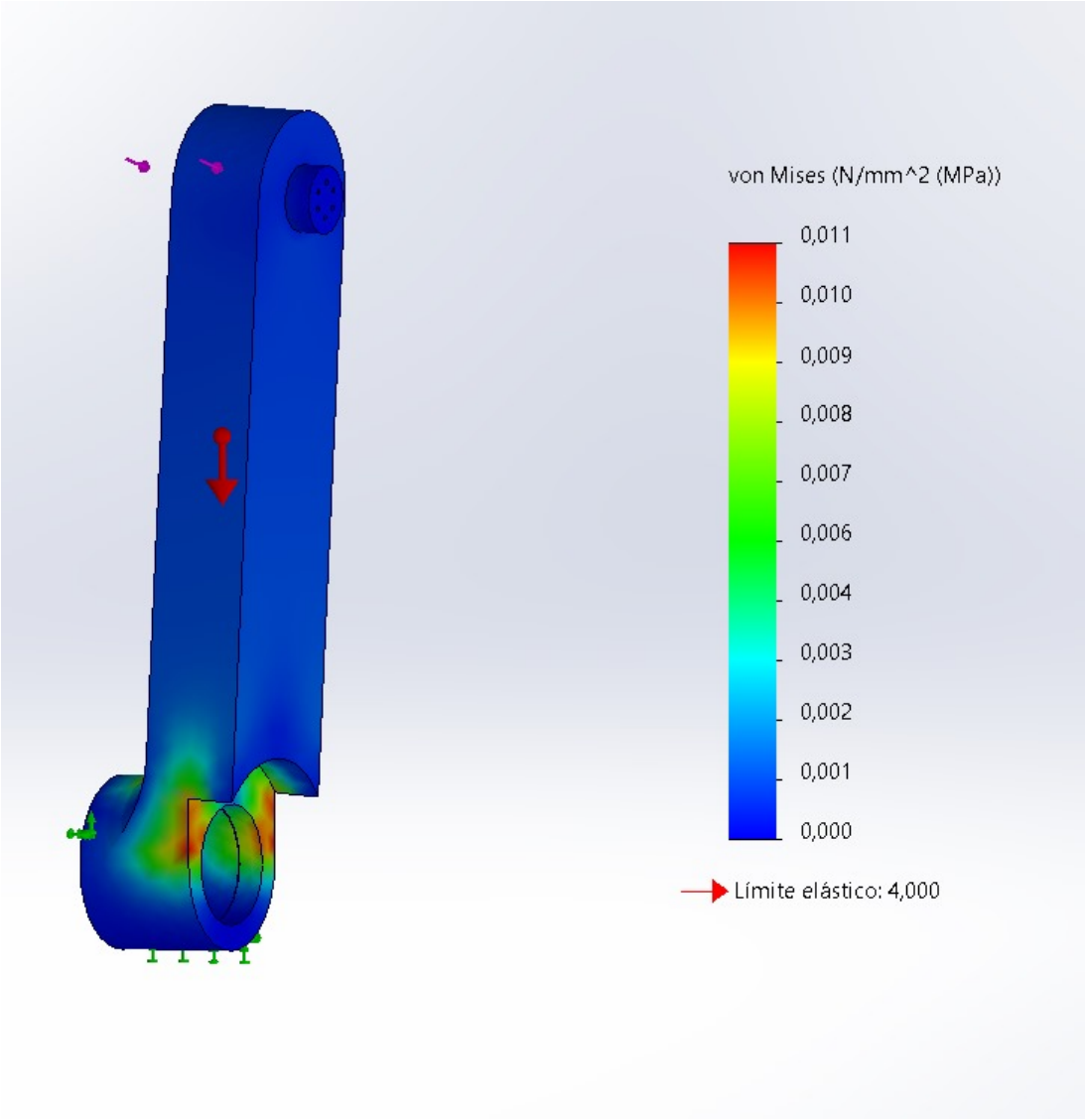
La simulación de esfuerzos es una herramienta fundamental en el diseño y validación de estructuras mecánicas, permitiendo evaluar la respuesta del material ante diferentes condiciones de carga. En este estudio, se realizó un análisis de esfuerzos sobre la estructura del robot cuadrúpedo utilizando el método de elementos finitos (MEF), con el objetivo de determinar la distribución de tensiones y deformaciones en los componentes críticos.

La simulación se llevó a cabo en SolidWorks Simulation, utilizando un modelo 3D del robot cuadrúpedo con material PLA, cuyas propiedades mecánicas incluyen un módulo de elasticidad de [0.35] MPa y un límite de resistencia a la tracción de [4] MPa. Se definieron condiciones de frontera que representaran la interacción real del robot con el entorno, aplicando una carga distribuida en el chasis equivalente a 5 kg y en las patas y eslabones a 1.25 kg, considerando impactos generados por el contacto de las patas con el suelo.

**Eslabón 1:** Al aplicar una masa distribuida de 2.1 kg considerando el peso del motor y un 10 % de relleno, se obtiene que la deformación en la figura 54 es de 0.011, coincidente con los cálculos.

**Figura 54**

*Simulación eslabón 1*

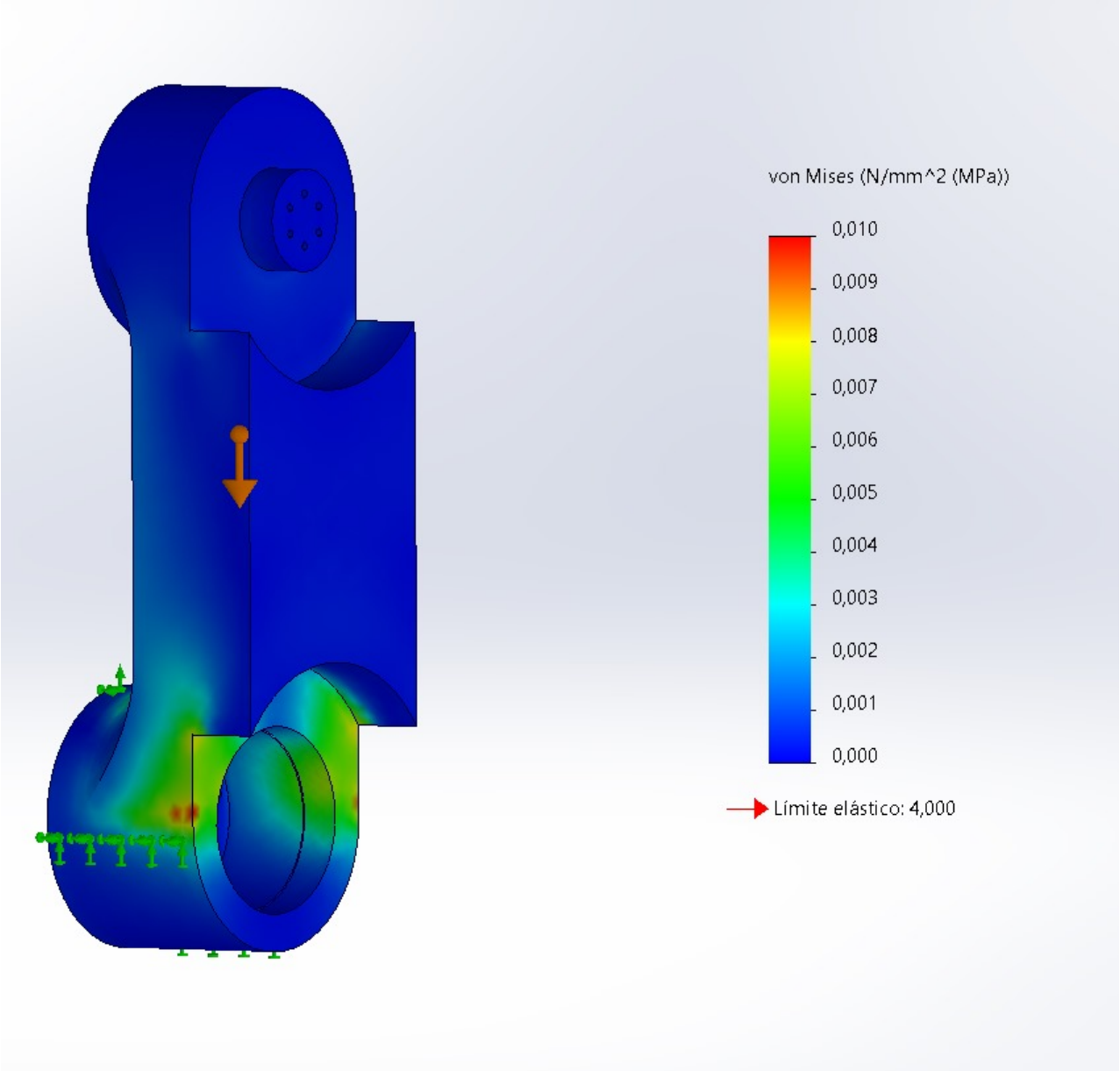



*Nota: La imagen representa la simulación de esfuerzos del eslabon 1. (Paute, 2024)*

**Eslabón 2:** Al aplicar una masa distribuida de 2.1 kg considerando el peso del motor y un 10 % de relleno, se obtiene que la deformación en la figura 55 es de 0.011, coincidente con los cálculos.

**Figura 55**

*Simulación eslabón 2*



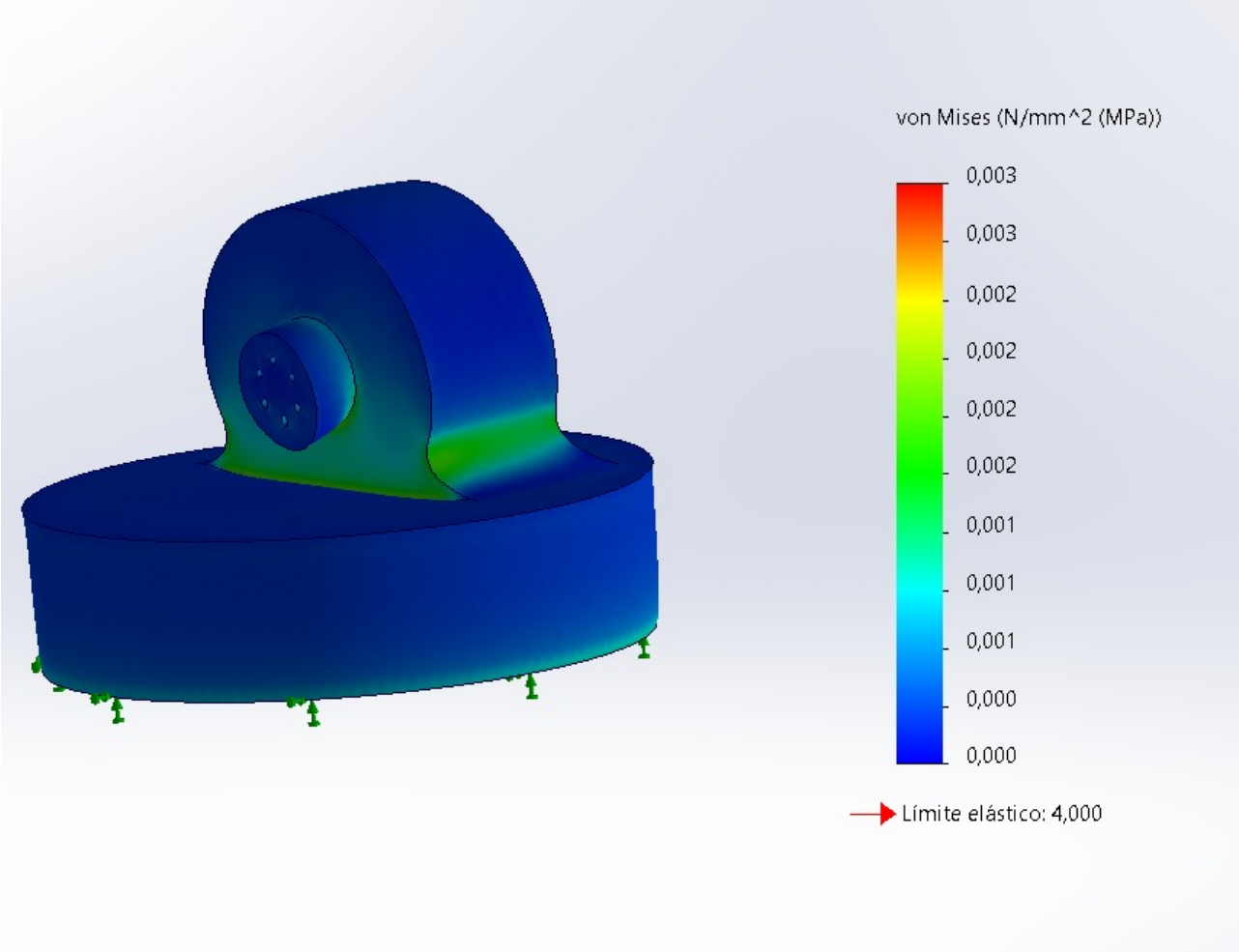

*Nota: La imagen representa la simulación de esfuerzos del eslabon 2. (Paute, 2024)*

**Eslabón 3:** Al aplicar una masa distribuida de 2.1 kg considerando el peso del motor y un 10 % de relleno, se obtiene que la deformación en la figura 56 es de 0.004, coincidente con los

cálculos.

**Figura 56**

*Simulación eslabón 3*

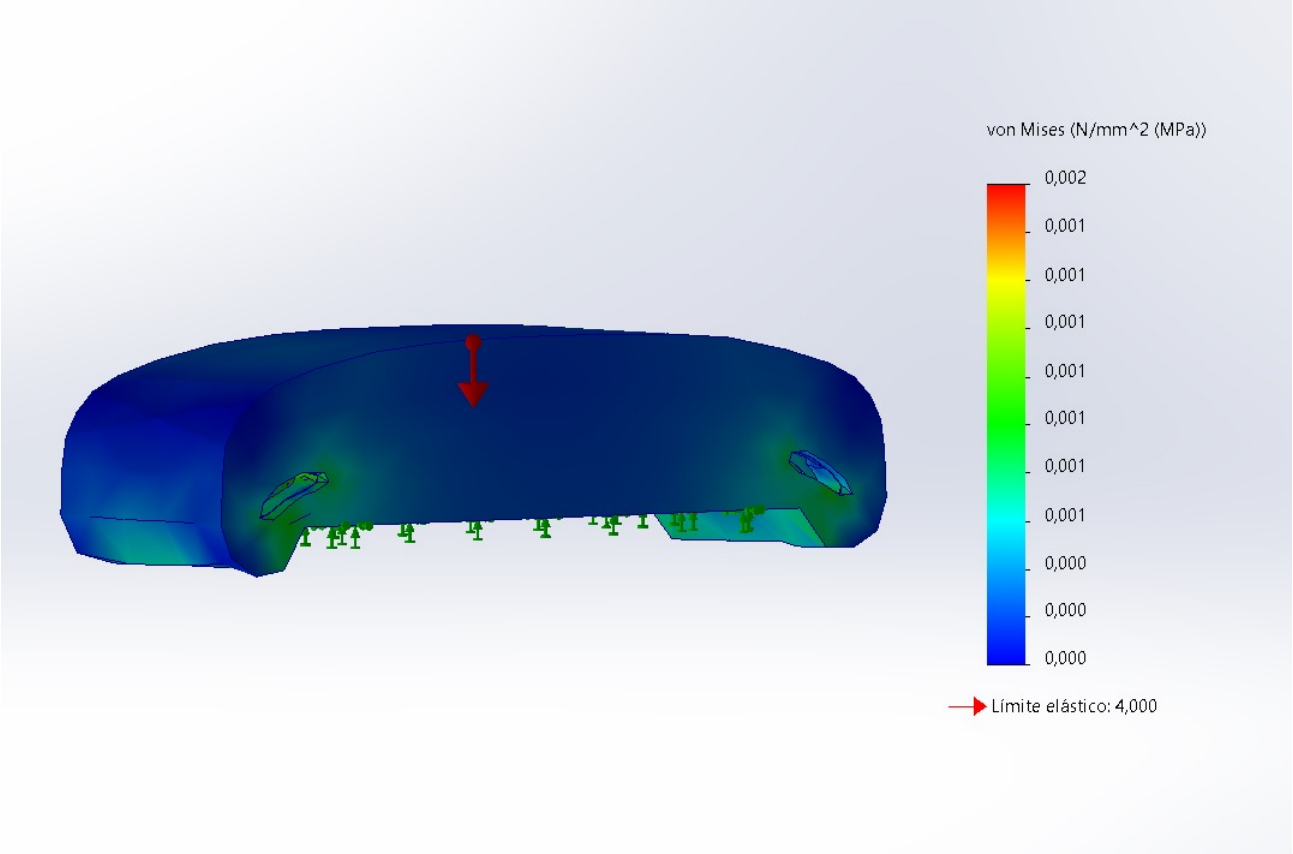



*Nota: La imagen representa la simulación de esfuerzos del eslabon 3. (Paute, 2024)*

**Chasis:** Al aplicar una masa distribuida de 5 kg y considerando un porcentaje de relleno de 10, se obtiene que la deformación en la figura 57 es de 0.001, coincidente con los cálculos.

**Figura 57**

*Simulación del chasis*




*Nota: La imagen representa la simulación de esfuerzos del chasis. (Paute, 2024)*

El análisis de esfuerzos realizado sobre los eslabones y el chasis demuestra que la estructura trabaja dentro de un rango seguro, ya que los valores máximos de esfuerzo se encuentran en 0.01 MPa, lo cual es significativamente menor al límite elástico del material considerado (4 MPa según la referencia de la simulación).

La distribución de esfuerzos muestra que las mayores concentraciones se encuentran en las zonas cercanas a las restricciones y en los bordes internos de la región circular, lo cual es un comportamiento esperado debido a la geometría del componente y la forma en que se aplican las cargas.

Dado que los esfuerzos generados son bajos, no se espera que los eslabones o el chasis sufra deformaciones permanentes ni fallas estructurales bajo las condiciones de carga simuladas.

## 6.6. Diseño electrónico del Robot Cuadrupedo

El sistema electrónico del robot cuadrúpedo es fundamental para el control y ejecución de los movimientos, actuadores y una unidad de procesamiento que permiten la sincronización de la marcha. En este estudio, se diseñó un sistema de control basado en una plataforma utilizada, el cual se encarga de gestionar las señales enviadas a los motores y procesar la retroalimentación de los sensores. Además, se ha incorporado un controlador PID para optimizar la respuesta de los actuadores, asegurando una locomoción estable y precisa.

Para usar el motor AK80-64 en el robot cuadrúpedo, se necesita una serie de componentes electrónicos que permitan su control eficiente. A continuación, se detalla los elementos esenciales:

# 1. Driver del Motor

El AK80-64 es un motor BLDC con encoder y requiere un driver de motor compatible. Se puede usar el CubeMars AK Driver, que es compatible con el modo de control de posición y velocidad.

**Funciones del Driver:**

- Controla la velocidad, posición y torque del motor.
- Recibe comandos desde un microcontrolador o PC.
- Gestiona la alimentación del motor.

# 2. Microcontrolador o Controlador Principal

Se necesitará un microcontrolador o placa de desarrollo para enviar comandos al driver del motor y coordinar el movimiento del robot.

**Opciones recomendadas:**

- **ESP32**: Conexión inalámbrica (WiFi/Bluetooth) y control en tiempo real.
- **Arduino Due** o **STM32**: Mayor precisión y capacidad de procesamiento.
- **Raspberry Pi**: Puede ser útil para procesamiento adicional (visión artificial, IA).
- **Controlador en MATLAB**: Simular y probar el sistema antes de la implementación real.

## 3. Fuente de Alimentación / Batería

El motor AK80-64 opera con un voltaje de 48V, por lo que es necesario contar con una fuente de alimentación adecuada.

**Opciones:**

- **Batería LiPo de 12S** ($44.4V$ nominal, $50.4V$ full charge), la cual proporciona suficiente capacidad de corriente.
- **Fuente de alimentación de 48V**, recomendada para entornos de prueba estáticos.

## 4. Convertidor DC-DC

Si el microcontrolador opera a $5V$ o $3.3V$, es necesario utilizar un convertidor DC-DC para reducir el voltaje de la batería ($48V$ a $5V/3.3V$).

**Ejemplos de convertidores:**

- **LM2596** (para $5V$)
- **MP1584** (para $3.3V$)

## 6. Comunicación y Control

Dependiendo del método empleado para enviar comandos al motor, se pueden utilizar diferentes protocolos de comunicación:

- **CAN Bus**: Preferido para alta velocidad y robustez en entornos ruidosos.
- **UART / Serial**: Más fácil de implementar en microcontroladores.
- **I2C / SPI**: Para comunicación con sensores adicionales.

En base a la información para el control del motor AK80-64 en el robot cuadrúpedo, se utilizará un ESP32 como microcontrolador principal debido a su capacidad de procesamiento en tiempo real y conectividad WiFi/Bluetooth, lo que permite una comunicación eficiente con otros módulos.

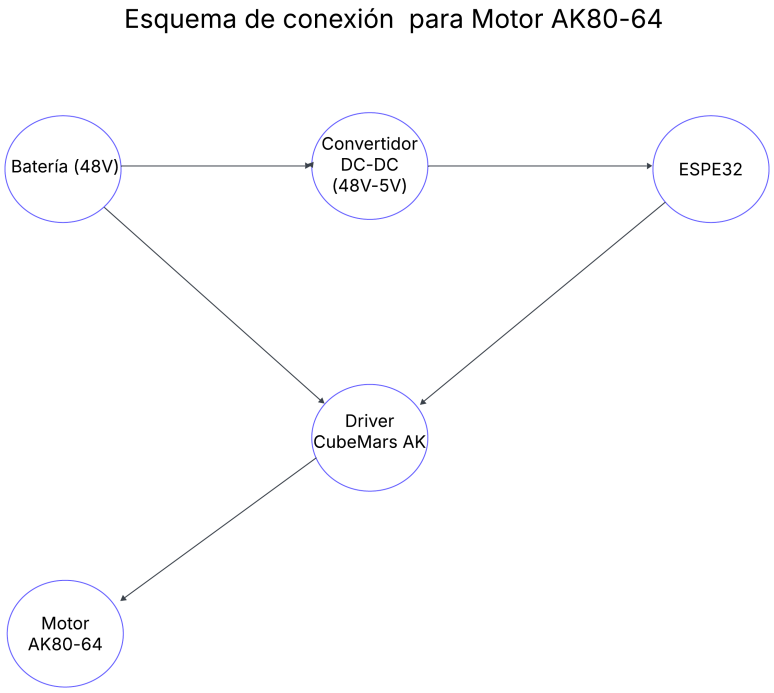
El driver seleccionado es el CubeMars AK Driver, que permitirá gestionar la velocidad, posición y torque del motor mediante comandos enviados a través de UART, facilitando la integración con el ESP32.

La alimentación del sistema se suministrará mediante una batería LiPo de 12S ($44.4V$ nominal, $50.4V$ carga completa) con una capacidad de corriente mínima de 10A por motor, asegurando un suministro estable.

Para la alimentación del microcontrolador, se empleará un convertidor DC-DC LM2596, que reducirá el voltaje de $48V$ a $5V$. Este sistema garantizará un control preciso del motor y una locomoción estable del robot cuadrúpedo, permitiendo futuras mejoras en el software de control.

**Figura 58**

*Esquema de conexión para el motor*




*Nota: La imagen representa el esquema de conexion para el motor AK80-64. (Paute, 2024)*

# 7. Resultados

## 7.1. Resultados de la parte mecánica del robot cuadrúpedo

Para definir las condiciones actuales del diseño del sistema mecatrónico del robot cuadrúpedo, se tomó como referencia la estructura anatómica de un elefante, estableciendo una proporción directa entre sus dimensiones y las del robot. A partir de este análisis, se determinó que la configuración óptima para las extremidades consistía en tres eslabones, lo que permite una mayor estabilidad y soporte de carga.

El diseño resultante proporciona una altura máxima de 1.37 metros cuando las extremidades están completamente extendidas, asegurando una estructura robusta y equilibrada. Esta configuración no solo busca replicar la biomecánica del movimiento de un cuadrúpedo, sino que también mejora la distribución de pesos y la eficiencia en la locomoción.

Para mejorar el diseño mecánico del robot cuadrúpedo, se implementó la adición de un tercer eslabón en la estructura de las extremidades. Esta modificación permitió una mejor distribución de cargas y una mayor estabilidad durante la locomoción.

**Tabla 5**

*Comparación del esfuerzo de aplastamiento analítico y la simulación en SOLIDWORKS*

| Pieza | Carga (kg) | Cálculo Analítico (MPa) | Simulación en SOLIDWORKS (MPa) |
|---|---|---|---|
| **Eslabón 1** | 2.1 | 0.018 | 0.011 |
| **Eslabón 2** | 2.1 | 0.018 | 0.010 |
| **Eslabón 3** | 2.1 | 0.004 | 0.003 |
| **Chasis** | 5.0 | 0.001 | 0.002 |

*Nota.* La tabla presenta la comparación entre el cálculo analítico del esfuerzo de aplastamiento y la simulación en SOLIDWORKS para diferentes piezas del sistema.

Los resultados de la simulación de esfuerzos confirmaron que la redistribución de cargas y la reducción de peso no comprometen la integridad estructural del diseño, garantizando su funcionalidad y estabilidad.

## 7.2. Resultados de la parte electroónica del robot cuadrúpedo

Para el diseño electrónico del robot cuadrúpedo, se seleccionó el motor AK80-64, un actuador de alto rendimiento con capacidad de control de torque, velocidad y posición. Para

su correcta operación, se integraron los drivers CubeMars AK, los cuales permiten gestionar el funcionamiento del motor mediante una comunicación eficiente con el microcontrolador.

Además, se incluyeron todos los componentes necesarios para garantizar un sistema de control estable, incluyendo una fuente de alimentación de 48V, un convertidor DC-DC para la reducción de voltaje a 3V O 5V para el microcontrolador, y una interfaz de comunicación basada en comunicación UART. Esta configuración asegura una integración fluida entre los distintos módulos electrónicos, permitiendo un control preciso de la locomoción del robot.

## 7.3. Resultados del diseño de la propuesta de control del robot cuadrúpedo

Para el diseño del sistema de control, se implementó un controlador PID con el objetivo de regular el torque necesario en los motores de los diferentes eslabones del robot cuadrúpedo. Este enfoque permitió optimizar la estabilidad y precisión del movimiento.

Se realizó una comparación entre dos métodos de sintonización del PID: PID Tuner (automático) y ajuste manual, evaluando el desempeño en términos de tiempo de respuesta, estabilidad y error en el seguimiento de la trayectoria.

**Tabla 6**

*Comparación de parámetros PID para la pata en el suelo*

| Eslabón | PID Tuner | PID Manual |
|---|---|---|
| **Eslabón 1** | $K_p = 1.1283, K_i = 7.8211, K_d = 0.0000$ | $K_p = 1.10, K_i = 7, K_d = 0.01$ |
| **Eslabón 2** | $K_p = 1.1414, K_i = 22.6268, K_d = 0.0000$ | $K_p = 5, K_i = 10, K_d = 7$ |
| **Eslabón 3** | $K_p = 1.1097, K_i = 106.3209, K_d = 0.0000$ | $K_p = 5, K_i = 10, K_d = 10$ |

*Nota.* La tabla presenta los valores de los parámetros $K_p$, $K_i$ y $K_d$ obtenidos por el método PID Tuner y el ajuste manual para la pata en el suelo.

Los resultados demostraron que el ajuste manual ofreció un mejor rendimiento, ya que permitió definir valores específicos de $K_p$, $K_i$ y $K_d$ según las características de cada motor. Esto resultó en un control más preciso y adaptado a las necesidades del sistema, reduciendo oscilaciones y mejorando la estabilidad general del robot.

Este análisis permitió validar la importancia de una sintonización personalizada del PID, asegurando que cada motor reciba el torque adecuado para un funcionamiento eficiente y estable del robot cuadrúpedo.

**Tabla 7**

*Comparación de parámetros PID para la pata en el aire*

| Eslabón | PID Tuner | PID Manual |
|---|---|---|
| **Eslabón 1** | $K_p = 1.3389, K_i = 83865, K_d = 0.0000$ | $K_p = 1.5, K_i = 10, K_d = 0.5$ |
| **Eslabón 2** | $K_p = 1.1414, K_i = 22.6268, K_d = 0.0000$ | $K_p = 1.5, K_i = 20, K_d = 0.05$ |
| **Eslabón 3** | $K_p = 1.1097, K_i = 106.3209, K_d = 0.0000$ | $K_p = 1.1, K_i = 100, K_d = 0.1$ |

*Nota.* La tabla presenta los valores de los parámetros $K_p$, $K_i$ y $K_d$ obtenidos por el método PID Tuner y el ajuste manual para la pata en el aire.

# 8. Cronograma

aquí se detallan las actividades del trabajo de titulación con el tiempo planificado para cada actividad.

## Tabla 8

*Cronograma de actividades.*

| CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **OBJETIVOS ESPECÍFICOS** | **ACTIVIDADES** | **MES 1** | | | | **MES 2** | | | | **MES 3** | | | | **MES 4** | | | | **MES 5** | | | | **MES 6** | | | | **Horas** |
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 | |
| Definir las condiciones actuales del diseño del sistema mecatrónico del robot cuadrúpedo (CUADRADO, 2022) | Indagación bibliográfica | X | X | X | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 30 |
| | Recopilación de datos de investigaciones | | | | X | X | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 20 |
| | Análisis de los datos | | | | | | X | X | | | | | | | | | | | | | | | | | | 20 |
| Establecer el diseño mecánico del robot cuadrúpedo | Análisis del diseño previo | | | | | | | | | | X | X | X | | | | | | | | | | | | | 30 |
| | Diseño de especificaciones y parámetros | | | | | | | | | | | | | X | X | X | | | | | | | | | | 30 |
| | Revisión del diseño y corrección de fallas | | | | | | | | | | | | | | | | X | X | | | | | | | | 20 |
| | Simulación del diseño | | | | | | | | | | | | | | | | | | X | X | X | | | | | 10 |
| Establecer el diseño electrónico del robot cuadrúpedo | Análisis del diseño electrónico previo | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | X | | | | 10 |
| | Diseño del sistema electrónico | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | X | | | 10 |
| | Redimensionamiento de componentes | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | X | X | 20 |
| Diseñar una propuesta para el sistema de control | Análisis de un sistema de control apropiado | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | X | X | 20 | |
| | Diseño del sistema de control | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | X | X | 20 |
| **Redacción de documento** | | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | **Total de horas empleadas** | 240 |

***Nota:*** *La tabla presenta las actividades para cumplir con los objetivos planteados.*

# 9. Conclusiones

El desarrollo del robot cuadrúpedo se llevó a cabo con un enfoque integral que incluyó mejoras en su diseño mecánico, como la adición de un tercer eslabón que mejoró su estabilidad y distribución de peso. También se implementó un sistema electrónico eficiente y se desarrolló un control basado en PID. Durante el análisis, se definieron las condiciones de diseño tomando como referencia la estructura anatómica de un elefante, lo que permitió diseñar un robot de 1.37 metros de altura con una configuración de eslabones que favorece la estabilidad y la distribución de cargas.

En el ámbito mecánico, la inclusión de un tercer eslabón incrementó a las extremidades más grados de libertad, lo que facilita ajustes más precisos en la estabilidad del robot durante su marcha.

En cuanto al diseño electrónico, dado que el torque aumentó, lo cual era previsible por la incorporación del tercer eslabón, se eligió el motor AK80-64 junto con su driver CubeMars AK. Esto permitió establecer un sistema de control con una fuente de alimentación de 48V y un convertidor DC-DC que asegura un suministro estable de 3V a 5V para el microcontrolador ESP32. La comunicación a través del protocolo UART garantizó una conexión eficiente entre los componentes electrónicos.

Finalmente, en el diseño del sistema de control, se implementó un PID para gestionar el torque en los motores de cada eslabón. Al comparar la sintonización automática (PID Tuner) con el ajuste manual, se determinó que el ajuste manual proporcionó un mejor rendimiento, permitiendo establecer valores específicos de Kp, Ki y Kd según las necesidades de cada motor.

En resumen, los resultados obtenidos validan el diseño del robot cuadrúpedo, asegurando su estabilidad.

# 10. Recomendaciones

Para optimizar el diseño del robot cuadrúpedo, es importante revisar el diseño actual para asegurar que sea adecuado para la manufactura y el ensamblaje en el futuro. Además, el uso de PLA con un 10 % de relleno ayudará a reducir el peso sin comprometer la resistencia del sistema. También se debe evaluar el uso de materiales más resistentes y ligeros, como nylon con fibra de carbono o PETG reforzado, para aumentar la durabilidad sin añadir peso innecesario.

En el área electrónica, se recomienda implementar un sistema de monitorización en tiempo

real que controle variables clave como el torque yla velocidad. Además, sería beneficioso considerar un protocolo de comunicación CAN Bus en lugar de UART para mejorar la comunicación. También, optimizar el consumo energético a través de una gestión eficiente de la batería ayudaría a mantener un rendimiento más estable.

En lo que respecta al control, se sugiere explorar técnicas alternativas como el control adaptativo o el aprendizaje automático, para mejorar la estabilidad del robot en terrenos irregulares. Por último, se recomienda realizar pruebas en diferentes tipos de superficies y pendientes, incorporando sensores adicionales para mejorar el equilibrio y la estabilidad.

# Referencias


Alexander, R. M. (2003). *Principles of animal locomotion*. Princeton University Press.

Alexandra, C. J., y Eduardo, S. D. (2018). *Desarrollo del sistema de navegación para robot cuadrúpedo de dimensiones reducidas en entornos no definidos con perspectiva cenital* (Tesis de Master, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Sangolquí, Ecuador). Descargado de https://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/14923 (Accessed: 2024-10-27)

Ashby, M. F. (2011). *Materials selection in mechanical design* (4th ed.). Butterworth-Heinemann.

Astudillo Cuadrado, C. M. (2023). *Diseño de un mecanismo de movilidad para un robot cuadrúpedo* (Tesis de Master, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador). Descargado de https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/27034/1/UPS-CT011215.pdf (Accessed: 2024-10-27)

Biewener, A. A. (2003). *Animal locomotion*. Oxford, UK: Oxford University Press.

Blanco Prieto, A. (2020). *Estudio comparativo entre la obtención de piezas mediante impresoras 3d y su obtención mediante moldes u otros procesos de fabricación.* Descargado de https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/153236/Blanco%20-%20Estudio%20comparativo%20entre%20la%20obtenci%C3%B3n%20de%20piezas%20mediante%20impresoras%203D%20y%20su%20obtenci%C3%B3n%20m...pdf?sequence=4 (Accessed: 2025-01-31)

Boletín UPIITA, IPN. (2024). *Robots móviles de ruedas: generalidades.* Instituto Politécnico Nacional, UPIITA. Descargado de https://www.boletin.upiita.ipn.mx/index.php/ciencia/593-cyt-numero-45/1081-robots-moviles-de-ruedas-generalidades (Accessed: 2024-10-27)

Boston Dynamics. (2008). *Bigdog - the most advanced rough-terrain robot on earth.* Descargado de https://www.bostondynamics.com/bigdog (Accessed: 2024-10-27)

Boston Dynamics. (2013). *Wildcat - the agile quadruped robot.* Descargado de https://www.bostondynamics.com/wildcat (Accessed: 2024-10-27)

Buehler, M., y McGhee, R. B. (2005). Principles of locomotion in legged robots. En B. Siciliano y O. Khatib (Eds.), *Springer handbook of robotics* (pp. 529–549). Springer.

Chicaiza, L. F., y Morales, C. A. (2015). *Diseño y construcción de un robot cuadrúpedo para la investigación de algoritmos de locomoción* (Tesis de Master, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Sangolquí, Ecuador). Descargado de https://repositoriobe.espe.edu.ec/server/api/core/bitstreams/113eccea

-ecd7-46f7-af88-dae1b337dea2/content (Accessed: 2024-10-27)

Control Automático Educación. (2024a). *Controlador pid: Qué es y cómo funciona.* Descargado de https://controlautomaticoeducacion.com/control-realimentado/controlador-pid/ (Accessed: 2024-10-05)

Control Automático Educación. (2024b). *Lazo abierto y lazo cerrado.* Descargado de https://controlautomaticoeducacion.com/control-realimentado/lazo-abierto-y-lazo-cerrado/ (Accessed: 2024-09-10)

CUADRADO, C. M. A. (2022, 8). *DiseÑo de una cortadora de ladrillos refractarios para la optimizaciÓn del tiempo de operaciÓn en la fabricaciÓn de hornos.* file:///C:/Users/milen/OneDrive%20-%20Universidad%20Politecnica%20Salesiana/P63/TESIS/Trabajo%20de%20titulacion%20Final%20de%20Christian%20Astudillo.pdf. ((Accessed on 04/30/2024))

Cueva Robles, J. C., Redrobán Matute, M. G., y Sotomayor, N. (2005). Control y ensamblaje de un robot que emule un perro doméstico. En *Anales de las xix jornadas en ingeniería eléctrica y electrónica.* Quito, Ecuador. Descargado de https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/9840/1/2005AJIEE-9.pdf (Accessed: 2024-10-27)

Cultura Inquieta. (2018). *Una animación ilustra los movimientos de los animales cuadrúpedos.* Cultura Inquieta. Descargado de https://culturainquieta.com/arte/ilustracion/una-animacion-ilustra-los-movimientos-de-los-animales-cuadrupedos/ (Accessed: 2024-10-27)

Dan-Tech. (2023). *Ión de litio vs polímero de litio.* Descargado de https://www.danenergy.com/es/blog-posts/lionvspolymer (Accessed: 2024-10-27)

Dewesoft. (2024). *¿qué es un sensor y qué hace?* Descargado de https://dewesoft.com/es/blog/que-es-un-sensor (Accessed: 2024-10-27)

elephantfreedom. (2022, 11). *Datos interesantes sobre las patas y los pies de los elefantes - elephant freedom project chiang mai tailandia.* https://elephantfreedom.org/es/interesting-facts-about-elephants/. ((Accessed on 09/28/2024))

Emtez. (2024). *¿cuáles son las ventajas y desventajas de las baterías de iones de litio?* Descargado de https://www.emtez.es/blog/ventajas-desventajas-litio (Accessed: 2024-10-27)

Fernández, Y. (2024). *Qué es arduino, cómo funciona y qué puedes hacer con uno.* Descargado de https://www.xataka.com/basics/que-arduino-como-funciona-que-puedes-hacer-uno (Accessed: 2024-10-27)

Generation Robots. (2008). *Spot enterprise package.* Generation Robots. Descargado de https://www.generationrobots.com/en/403823-spot-enterprise-package

.html (Accessed: 2024-10-27)

Goldsupplier. (2024). *Liberando el potencial del filamento pla para impresoras 3d: una guía completa.* Descargado de https://blog.goldsupplier.com/es/pla-4/ (Accessed: 2025-01-25)

González, R., y Guzmán. (2019). *Robots móviles con orugas: Historia, modelado, localización y control.* Universitat Politècnica de València. Descargado de https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/143838/Gonz%C3%A1lez%3BRodr%C3%ADguez%3BGuzm%C3%A1n%20-%20Robots%20M%C3%B3viles%20con%20Orugas%20Historia%2C%20Modelado%2C%20Localizaci%C3%B3n%20y%20Control.pdf?sequence=1 (Accessed: 2024-10-27)

Griffin, T. M., Main, R. P., y Farley, C. T. (2004). Biomechanics of quadrupedal walking: How do four-legged animals achieve economical locomotion? *Journal of Experimental Biology*, *207*(20), 3545–3558.

Grupo de Instrumentación y Rehabilitación Biomédica GIRB. (2024). Artículo de la revista nova. Descargado de https://revistas.unicolmayor.edu.co/index.php/nova/article/download/136/272?inline=1 (Accessed: 2024-10-27)

Hildebrand, M. (1965). Symmetrical gaits of horses. *Science*, *150*(3697), 701–708.

Hildebrand, M. (1989). The quadrupedal gaits of vertebrates. *BioScience*, *39*(11), 766–775.

Hinowa S.p.A. (2022). *Carro ensanchable.* Hinowa S.p.A. Descargado de https://www.hinowa.com/es/productos/carros-de-orugas/carro-ensanchable (Accessed: 2024-10-27)

Honor. (2018). *Carro ensanchable.* Honor. Descargado de https://www.honor.com/es/club/topicdetail/topicid-7413/ (Accessed: 2024-10-27)

Juan Pedro Martín, Santos Villafaina, Jorge Pérez-Gómez. (2024). Artículo de la revista jonnpr. Descargado de https://revistas.proeditio.com/jonnpr/article/view/3780/HTML3780 (Accessed: 2024-10-27)

LAFMIA, Universidad Tecnológica de Compiègne. (2016). *Ground vehicle.* LAFMIA, Universidad Tecnológica de Compiègne. Descargado de https://lafmia.hds.utc.fr/Ground_Vehicle.html (Accessed: 2024-10-27)

Manfacter. (2024). *Material pla.* Descargado de https://manfacter.com/material-pla/ (Accessed: 2025-01-31)

Noticias de la Ciencia. (2024). *Robot cuadrúpedo capaz de desplazarse sobre dos extremidades.* Noticias de la Ciencia. Descargado de https://noticiasdelaciencia.com/art/9452/robot-cuadrupedo-capaz-de-desplazarse-sobre-dos-extremidades (Accessed: 2024-10-27)

Paute, M. (2024). *Primero boceto del robot cuadrúpedo.* (Trabajo propio)

Pinta Arrobo, F. H. (2007). *Diseño y construcción de un robot de vigilancia* (Tesis de Master, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador). Descargado de https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/590/1/CD-0984.pdf (Accessed: 2024-10-27)

Roboticoss. (2024). *Actuadores para robótica.* Descargado de https://roboticoss.com/actuadores-para-robotica/ (Accessed: 2024-10-27)

Rodríguez Panes, A. (2022). *Revisión de tecnologías aditivas emergentes y estudio de la influencia de parámetros de fabricación en las propiedades mecánicas de materiales polímeros fabricados mediante fdm* (Tesis de Master, Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED)). Descargado de https://canal.uned.es/uploads/material/6374225eb9130f63ca6fdd54/03_TFM_Adri%C3%A1n%20Rodr%C3%ADguez%20Panes.pdf (Accessed: 2025-01-30)

Shutterstock. (2024). *Elephant anatomy concept for science education illustration.* Shutterstock. Descargado de https://www.shutterstock.com/es/image-vector/elephant-anatomy-concept-science-education-illustration-2272412733 (Accessed: 2024-10-27)

Sicnova. (2024). *¿qué es el pla en impresión 3d y para qué se utiliza?* Descargado de https://sicnova3d.com/blog/experiencias-3d/que-es-el-pla-en-impresion-3d-y-para-que-se-utiliza/ (Accessed: 2025-01-20)

StudySmarter. (2024a). *Control adaptativo.* Descargado de https://www.studysmarter.es/resumenes/ingenieria/ingenieria-aeroespacial/control-adaptativo/ (Accessed: 2024-11-12)

StudySmarter. (2024b). *Control predictivo modelo: Concepto & técnicas.* Descargado de https://www.studysmarter.es/resumenes/ingenieria/ingenieria-electrica/control-predictivo-modelo/ (Accessed: 2024-12-15)

T-MOTOR. (2024). *Ak80-64 6-8s legged robot power.* T-MOTOR. Descargado de https://store.tmotor.com/product/ak80-64-dynamical-modular.html (Accessed: 2024-10-27)

*Ubicación universidad politécnica salesiana.* (2022).

Wired. (2022). *This cheetah robot taught itself how to sprint in a weird way.* Wired. Descargado de https://www.wired.com/story/this-cheetah-robot-taught-itself-how-to-sprint-in-a-weird-way/ (Accessed: 2024-10-27)

zooguadalajara. (2020, 12). *Zoológico | elefante africano.* https://zooguadalajara.com.mx/animales/detalle/128. ((Accessed on 09/28/2024))

Ávila Torres, S. I., y Zambrano Abad, J. C. (2007). *Estudio, diseño y construcción de un robot cuadrúpedo omnidireccional* (Tesis de Master, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca,

Ecuador). Descargado de https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/188/12/Tesis.pdf (Accessed: 2024-10-27)

Óscar González. (2016). *Todo lo que debes saber sobre las baterías de litio (lipo).* BricoGeek Lab. Descargado de https://lab.bricogeek.com/tutorial/todo-lo-que-debes-saber-sobre-las-baterias-de-litio-lipo (Accessed: 2024-10-27)

# ANEXOS

# Anexo 1: Código generado para la cinemática directa e inversa en MATLAB

**Figura 59**

*Código de cinemática inversa*

```
clc; clear; close all;

%% 1. PARÁMETROS DEL ROBOT
L1 = 680; % Longitud del primer eslabón (mm)
L2 = 460; % Longitud del segundo eslabón (mm)
L3 = 230; % Longitud del tercer eslabón (mm)

% Posición deseada del pie (X, Y)
X_target = -582;
Y_target = -1210;

%% 2. CINEMÁTICA INVERSA: Cálculo de los ángulos

% Ajustar la posición del objetivo para que el tercer eslabón esté alineado en X
X_joint2 = X_target;
Y_joint2 = Y_target + L3;  % Se ajusta para que el eslabón 3 termine en el objetivo

% Calcular la distancia al nuevo punto objetivo
D = sqrt(X_joint2^2 + Y_joint2^2);

% Verificar si el punto está dentro del alcance del robot
if D > (L1 + L2)
    error('El punto está fuera del alcance del robot.');
end
```

*Nota: Código para la cinemcatica inversa (Paute, 2024)*

**Figura 60**

*Código para el cálculo de ángulos*

```
% Ángulo theta2 usando Ley de Cosenos
cos_theta2 = (D^2 - L1^2 - L2^2) / (2 * L1 * L2);
theta2_inv = real(acosd(cos_theta2)); % Evitar valores imaginarios por redondeo numérico

% Ángulo theta1 usando trigonometría
alpha = atan2d(Y_joint2, X_joint2);
beta = acosd((L1^2 + D^2 - L2^2) / (2 * L1 * D));
theta1_inv = real(alpha - beta);

% Fijar theta3 para que el tercer eslabón esté alineado en X
theta3_inv = - (theta1_inv + theta2_inv) + 270;
```

*Nota: Código para el cálculo de ángulos de la cinemática inversa. (Paute, 2024)*

**Figura 61**

*Código de cinemática directa*

```
%% 3. CINEMÁTICA DIRECTA PARA VERIFICACIÓN

% Convertir ángulos a radianes
theta1 = deg2rad(theta1_inv);
theta2 = deg2rad(theta2_inv);
theta3 = deg2rad(theta3_inv);

% Matrices de transformación homogénea
T = @(theta, a) [cos(theta), -sin(theta), 0, a*cos(theta);
                 sin(theta),  cos(theta), 0, a*sin(theta);
                 0,           0,          1, 0;
                 0,           0,          0, 1];

T01 = T(theta1, L1);
T12 = T(theta2, L2);
T23 = T(theta3, L3);
T03 = T01 * T12 * T23;

% Posición final del pie con cinemática directa
X_calc = T03(1,4);
Y_calc = T03(2,4);
```

*Nota: Código para la cinemcatica directa. (Paute, 2024)*

**Figura 62**

*Código de verificación de errores*

```
% Ángulos obtenidos con cinemática directa
theta1_dir = rad2deg(atan2(T01(2,1), T01(1,1)));
theta2_dir = rad2deg(atan2(T12(2,1), T12(1,1)));
theta3_dir = rad2deg(atan2(T23(2,1), T23(1,1)));

% Verificación del error absoluto en mm
error_tolerance = 0.1; % Tolerancia ajustada para evitar falsos positivos
delta_X = abs(X_target - X_calc);
delta_Y = abs(Y_target - Y_calc);

if delta_X > error_tolerance || delta_Y > error_tolerance
    warning('La posición final excede la tolerancia de %.2f mm.', error_tolerance);
end
```

*Nota: Código para varificar errores entre las cinemáticas. (Paute, 2024)*

**Figura 63**

*Código para mostrar los resultados*

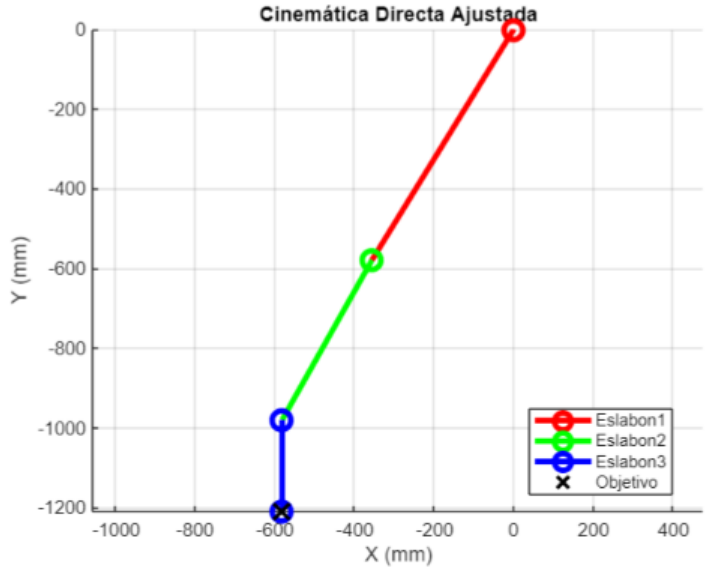
```
%% 4. MOSTRAR RESULTADOS Y COMPARAR ÁNGULOS
fprintf("===== CINEMÁTICA INVERSA =====\n");
fprintf("Posición Objetivo: X = %.2f, Y = %.2f mm\n", X_target, Y_target);
fprintf("Ángulos Calculados (Cinemática Inversa):\n");
fprintf("Theta1 (°) = %.2f\n", theta1_inv);
fprintf("Theta2 (°) = %.2f\n", theta2_inv);
fprintf("Theta3 (°) = %.2f\n", theta3_inv);

fprintf("\n===== CINEMÁTICA DIRECTA =====\n");
fprintf("Posición Calculada: X = %.2f, Y = %.2f mm\n", X_calc, Y_calc);
fprintf("Diferencia de Posición: ΔX = %.2f mm, ΔY = %.2f mm\n", delta_X, delta_Y);

fprintf("\n===== COMPARACIÓN DE ÁNGULOS =====\n");
fprintf("Theta1 Inversa (°): %.2f | Theta1 Directa (°): %.2f | Diferencia: %.2f\n", ...
    theta1_inv, theta1_dir, abs(theta1_inv - theta1_dir));
fprintf("Theta2 Inversa (°): %.2f | Theta2 Directa (°): %.2f | Diferencia: %.2f\n", ...
    theta2_inv, theta2_dir, abs(theta2_inv - theta2_dir));
fprintf("Theta3 Inversa (°): %.2f | Theta3 Directa (°): %.2f | Diferencia: %.2f\n", ...
    theta3_inv, theta3_dir, abs(theta3_inv - theta3_dir));

%% 5. GRÁFICA DE LA PATA
P0 = [0, 0]; % Origen
P1 = [L1 * cosd(theta1_inv), L1 * sind(theta1_inv)];
P2 = [P1(1) + L2 * cosd(theta1_inv + theta2_inv), P1(2) + L2 * sind(theta1_inv + theta2_inv)];
P3 = [X_target, Y_target]; % Asegurar que el eslabón 3 finaliza en el punto objetivo

figure;
hold on; grid on;
plot([P0(1) P1(1)], [P0(2) P1(2)], 'ro-', 'LineWidth', 3, 'MarkerSize', 10);
plot([P1(1) P2(1)], [P1(2) P2(2)], 'go-', 'LineWidth', 3, 'MarkerSize', 10);
plot([P2(1) P3(1)], [P2(2) P3(2)], 'bo-', 'LineWidth', 3, 'MarkerSize', 10);
plot(X_target, Y_target, 'kx', 'MarkerSize', 12, 'LineWidth', 2);
xlabel('X (mm)'); ylabel('Y (mm)');
title('Cinemática Directa Ajustada');
legend({'Eslabon1', 'Eslabon2', 'Eslabon3', 'Objetivo'}, 'Location', 'best');
axis equal;
hold off;
```

*Nota: Código para mostrar los resultados en el scrip de MATLAB. (Paute, 2024)*

**Figura 64**

*Gráfica y datos de las cinemáticas*

```
===== CINEMÁTICA INVERSA =====
Posición Objetivo: X = -582.00, Y = -1210.00 mm
Ángulos Calculados (Cinemática Inversa):
Theta1 (°) = -121.61
Theta2 (°) = 2.24
Theta3 (°) = 389.37
===== CINEMÁTICA DIRECTA =====
Posición Calculada: X = -582.00, Y = -1210.00 mm
Diferencia de Posición: ΔX = 0.00 mm, ΔY = 0.00 mm
===== COMPARACIÓN DE ÁNGULOS =====
Theta1 Inversa (°): -121.61 | Theta1 Directa (°): -121.61 | Diferencia: 0.00
Theta2 Inversa (°): 2.24 | Theta2 Directa (°): 2.24 | Diferencia: 0.00
Theta3 Inversa (°): 389.37 | Theta3 Directa (°): 29.37 | Diferencia: 360.00
```




*Nota: Resultados de la cinemática directa e inversa. (Paute, 2024)*

# Anexo 2: Código generado para las trayectorias de la pata en el suelo y en el aire

**Figura 65**

*Código de trayectoria de la pata en el suelo*

```
%% 1. PARÁMETROS DEL ROBOT CUADRÚPEDO
L1 = 680; % Longitud del primer eslabón (mm)
L2 = 460; % Longitud del segundo eslabón (mm)
L3 = 230; % Longitud del tercer eslabón (mm)

% Definir límites de desplazamiento de las patas
X_min = -582;  % Límite mínimo en X (mm)
X_max = 582;   % Límite máximo en X (mm)
Y_min = -1210; % Límite mínimo en Y (mm)
Y_max = -1210;  % Límite máximo en Y (mm)

% Número de pasos por ciclo de marcha
num_pasos = 10;

%% 2. GENERAR TRAYECTORIA DE MARCHA
X_trayectoria = linspace(X_min, X_max, num_pasos);
Y_trayectoria = linspace(Y_min, Y_max, num_pasos);

%% 3. CALCULAR LOS ÁNGULOS PARA CADA PUNTO DE LA TRAYECTORIA
Theta1 = zeros(1, num_pasos);
Theta2 = zeros(1, num_pasos);
Theta3 = zeros(1, num_pasos);
```

*Nota: Definición de parámetros para la pata en el suelo. (Paute, 2024)*

**Figura 66**

*Código cálculo de ángulos para la pata en el suelo*

```
% Ángulo theta2 usando Ley de Cosenos
cos_theta2 = (D^2 - L1^2 - L2^2) / (2 * L1 * L2);
theta2_inv = real(acosd(cos_theta2));

% Ángulo theta1 usando trigonometría
alpha = atan2d(Y_joint2, X_joint2);
beta = acosd((L1^2 + D^2 - L2^2) / (2 * L1 * D));
theta1_inv = real(alpha - beta);

% Fijar theta3 para que el tercer eslabón esté alineado en X
theta3_inv = - (theta1_inv + theta2_inv) + 270;
```

*Nota: Cálculo de ángulos para la pata en el suelo. (Paute, 2024)*

**Figura 67**

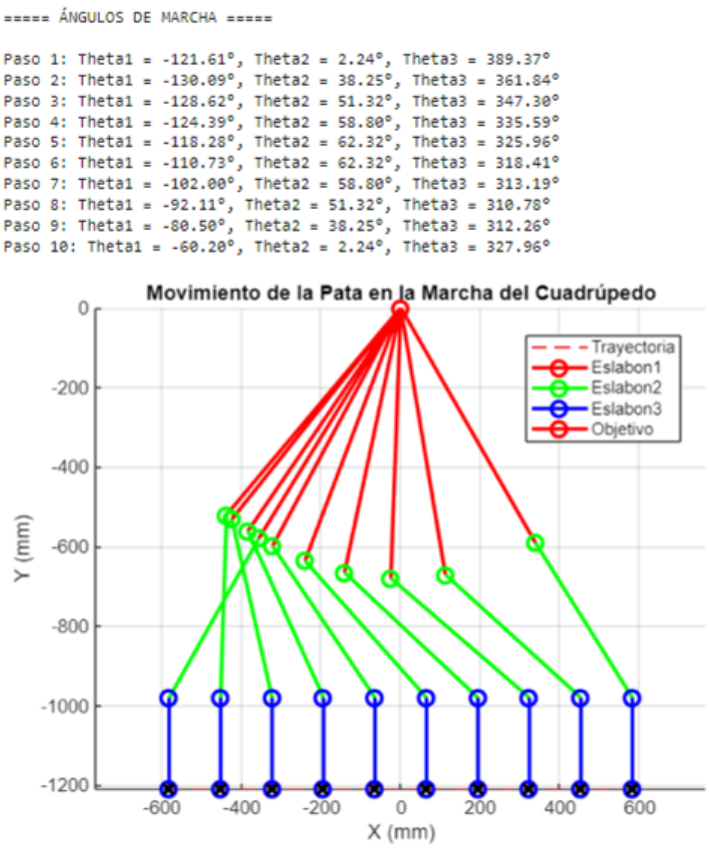
*Código para la gráfica*

```
%% 4. MOSTRAR RESULTADOS DE ÁNGULOS
fprintf("===== ÁNGULOS DE MARCHA =====\n");
for i = 1:num_pasos
    fprintf("Paso %d: Theta1 = %.2f°, Theta2 = %.2f°, Theta3 = %.2f°\n", i, Theta1(i), Theta2(i), Theta3(i));
end

%% 5. GRAFICAR TRAYECTORIA Y MOVIMIENTO DE LOS ESLABONES
figure; hold on; grid on;
xlabel('X (mm)'); ylabel('Y (mm)');
title('Movimiento de la Pata en la Marcha del Cuadrúpedo');

% Dibujar trayectoria
plot(X_trayectoria, Y_trayectoria, 'r--', 'LineWidth', 1);

% Dibujar todos los eslabones en la trayectoria
for i = 1:num_pasos
    % Calcular posiciones de cada articulación
    P0 = [0, 0];
    P1 = [L1 * cosd(Theta1(i)), L1 * sind(Theta1(i))];
    P2 = [P1(1) + L2 * cosd(Theta1(i) + Theta2(i)), P1(2) + L2 * sind(Theta1(i) + Theta2(i))];
    P3 = [X_trayectoria(i), Y_trayectoria(i)];

    % Dibujar los eslabones en cada paso
    plot([P0(1) P1(1)], [P0(2) P1(2)], 'ro-', 'LineWidth', 2, 'MarkerSize', 8);
    plot([P1(1) P2(1)], [P1(2) P2(2)], 'go-', 'LineWidth', 2, 'MarkerSize', 8);
    plot([P2(1) P3(1)], [P2(2) P3(2)], 'bo-', 'LineWidth', 2, 'MarkerSize', 8);
end

% Dibujar posiciones finales de la pata
plot(X_trayectoria, Y_trayectoria, 'kx', 'MarkerSize', 8, 'LineWidth', 2);
legend({'Trayectoria', 'Eslabon1', 'Eslabon2', 'Eslabon3', 'Objetivo'}, 'Location', 'best');
axis equal;
hold off;
```

*Nota: Código para la gráfica de la trayectoria de la pata en el suelo. (Paute, 2024)*

**Figura 68**

*Gráfica de la pata en el suelo*




*Nota: Gráfica de la trayectoria de la pata en el suelo (Paute, 2024)*

**Figura 69**

*Código para la generación de la trayectoria*

```
%% 1. PARÁMETROS DEL ROBOT CUADRÚPEDO
L1 = 680; % Longitud del primer eslabón (mm)
L2 = 460; % Longitud del segundo eslabón (mm)
L3 = 230; % Longitud del tercer eslabón (mm)

% Definir límites de desplazamiento de las patas
X_min = -582;  % Límite mínimo en X (mm)
X_max = 582;   % Límite máximo en X (mm)
Y_min = -1210; % Límite mínimo en Y (mm)
Y_max = -1210; % Límite máximo en Y (mm)

% Número de pasos por ciclo de marcha
num_pasos = 10;

%% 2. GENERACIÓN DE TRAYECTORIAS
% Pata en el suelo
X_trayectoria_suelo = linspace(X_min, X_max, num_pasos);
Y_trayectoria_suelo = repmat(Y_min, 1, num_pasos);

% Pata en el aire siguiendo la trayectoria curva
P1 = [582, -1210];
P2 = [0, -1010];
P3 = [-582, -1210];
```

*Nota: Código para la generación de la trayectoria de la pata en el aire. (Paute, 2024)*

**Figura 70**

*Código cálculo de ángulos de la pata en el aire*

```
%% 3. CÁLCULO DE LOS ESLABONES SIGUIENDO LA TRAYECTORIA CURVA
Theta1 = zeros(1, num_pasos);
Theta2 = zeros(1, num_pasos);
Theta3 = zeros(1, num_pasos);


for i = 1:num_pasos
    X_target = x_curve(i);
    Y_target = y_curve(i);

    % Ajustar la posición del objetivo
    X_joint2 = X_target;
    Y_joint2 = Y_target + L3;

    % Calcular la distancia al nuevo punto objetivo
    D = sqrt(X_joint2^2 + Y_joint2^2);

    % Ángulo theta2 usando Ley de Cosenos
    cos_theta2 = (D^2 - L1^2 - L2^2) / (2 * L1 * L2);
    theta2_inv = real(acosd(cos_theta2));

    % Ángulo theta1 usando trigonometría
    alpha = atan2d(Y_joint2, X_joint2);
    beta = acosd((L1^2 + D^2 - L2^2) / (2 * L1 * D));
    theta1_inv = real(alpha - beta);

    % Fijar theta3 para que el tercer eslabón esté alineado en X
    theta3_inv = - (theta1_inv + theta2_inv) + 270;

    % Guardar valores
    Theta1(i) = theta1_inv;
    Theta2(i) = theta2_inv;
    Theta3(i) = theta3_inv;
end
```

*Nota: Código para el cálculo de los ángulos cuando la pata esta en el aire (Paute, 2024)*

**Figura 71**

*Código como la gráfica de la trayectoria de la pata en el aire*

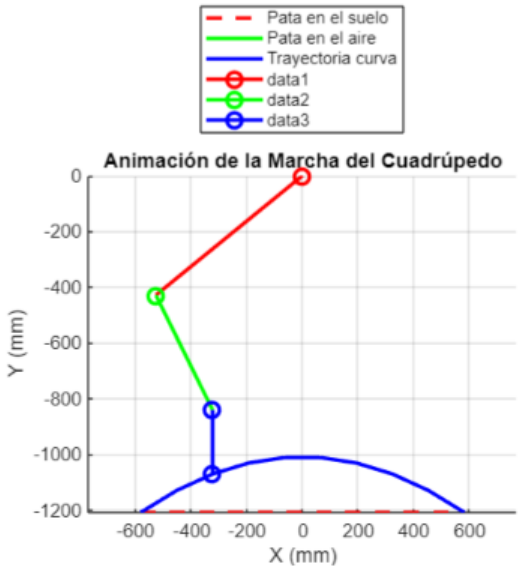
```
%% 5. ANIMACIÓN EN BUCLE INFINITO
figure;
hold on; grid on;
xlabel('X (mm)'); ylabel('Y (mm)');
title('Animación de la Marcha del Cuadrúpedo');
axis equal;

% Graficar las trayectorias de referencia
plot(X_trayectoria_suelo, Y_trayectoria_suelo, 'r--', 'LineWidth', 2); % Pata en el suelo
plot(x_curve, y_curve, 'g-', 'LineWidth', 2); % Pata en el aire
plot(x_curve, y_curve, 'b-', 'LineWidth', 2); % Trayectoria curva

legend({'Pata en el suelo', 'Pata en el aire', 'Trayectoria curva'}, 'Location', 'northoutside');

% Bucle infinito para la animación
h_L1 = plot([0, 0], [0, 0], 'ro-', 'LineWidth', 2, 'MarkerSize', 8);
h_L2 = plot([0, 0], [0, 0], 'go-', 'LineWidth', 2, 'MarkerSize', 8);
h_L3 = plot([0, 0], [0, 0], 'bo-', 'LineWidth', 2, 'MarkerSize', 8);

while true
    for i = 1:num_pasos
        P1 = [L1 * cosd(Theta1(i)), L1 * sind(Theta1(i))];
        P2 = [P1(1) + L2 * cosd(Theta1(i) + Theta2(i)), P1(2) + L2 * sind(Theta1(i) + Theta2(i))];
        P3 = [x_curve(i), y_curve(i)];

        set(h_L1, 'XData', [0 P1(1)], 'YData', [0 P1(2)]);
        set(h_L2, 'XData', [P1(1) P2(1)], 'YData', [P1(2) P2(2)]);
        set(h_L3, 'XData', [P2(1) P3(1)], 'YData', [P2(2) P3(2)]);

        pause(1);
    end
end
hold off;
```

*Nota: Código para trayectoria cuando la pata esta en el aire. (Paute, 2024)*

**Figura 72**

*Gráfica trayectoria de la pata en el aire*

| Paso | Theta1_deg | Theta2_deg | Theta3_deg |
|---|---|---|---|
| 1 | -60.197 | 2.2352 | 327.96 |
| 2 | -85.762 | 56.786 | 298.98 |
| 3 | -98.814 | 77.158 | 291.66 |
| 4 | -110.27 | 89.341 | 290.93 |
| 5 | -120.97 | 95.279 | 295.69 |
| 6 | -130.41 | 95.279 | 305.14 |
| 7 | -137.46 | 89.341 | 318.12 |
| 8 | -140.84 | 77.158 | 333.68 |
| 9 | -139.11 | 56.786 | 352.33 |
| 10 | -121.61 | 2.2352 | 389.37 |




*Nota: Gráfica de la trayectoria cuando la pata esta en el aire con sus ángulos. (Paute, 2024)*

# Anexo 3: Código generado para el control PID en MATLAB

**Figura 73**

*Código de cálculos de momentos de inercia*

```
%% Parámetros del Motor CubeMars AK80-64*
Kt = 0.136;   % Constante de torque (Nm/A)
Ke = 0.8;     % Constante de fuerza contraelectromotriz (V·s/rad)
R = 0.22;     % Resistencia del bobinado (Ohmios)
L_motor = 133.5e-6; % Inductancia del bobinado (Henrios)
J_motor = 5.645e-5; % Momento de inercia del motor (kg·m²)
b_motor = 0.001;    % Coeficiente de fricción viscosa (Nm·s/rad)

%% Parámetros del Eslabón*
m_eslabon = 0.94;    % Masa del eslabón (kg)
L_eslabon = 0.64;    % Longitud del eslabón (m)
g = 9.81;            % Aceleración gravitacional (m/s²)

% *Momento de inercia del eslabón con gravedad incluida*
J_eslabon = (1/3) * m_eslabon * L_eslabon^2;

% *Momento de inercia total del sistema*
J_total = J_motor + J_eslabon;

%% Torque Aplicado y Gravedad*
T0 = 77;  % Torque máximo del motor (Nm)
theta_values = [-121.61, -127.78, -114.6, -94.7, -60.2];  % Ángulos en grados

% *Tiempo de simulación*
t = linspace(0, 10, 5000);

% *Interpolación de los ángulos*
theta_interp = mod(interp1(linspace(0,10,length(theta_values)), theta_values, t, 'pchip'), 360);

% *Torque dependiente del ángulo*
T_gravity = m_eslabon * g * (L_eslabon / 2) .* cosd(theta_interp); % Torque gravitacional
T_variable = T0 * cosd(theta_interp) + T_gravity;  % Torque total
```

*Nota: Código para el calculo de momento de inercia del motor y del eslabón con sus angulos y torques. (Paute, 2024)*

**Figura 74**

*Código de cinemática inversa*

```
%% Modelo de la Función de Transferencia del Motor*
s = tf('s');
G_motor = Kt / (J_total * L_motor * s^2 + (J_total * R + b_motor * L_motor) * s + (b_motor * R + Kt * Ke));

%% Diseño del Controlador PID*
Kp = 1.10;
Ki = 7;
Kd = 0.01;

%% *Sintonización automática con pidtune*
C_pid_auto = pidtune(G_motor, 'PID');

% Extraer los valores de Kp, Ki y Kd del PID automático
Kp_auto = C_pid_auto.Kp;
Ki_auto = C_pid_auto.Ki;
Kd_auto = C_pid_auto.Kd;

fprintf('\n=== Valores del Controlador PID Automático ===\n');
fprintf('Kp = %.4f\n', Kp_auto);
fprintf('Ki = %.4f\n', Ki_auto);
fprintf('Kd = %.4f\n', Kd_auto);

% *Comparación entre PID manual y automático*
C_pid_manual = pid(Kp, Ki, Kd);

% *Sistema en lazo cerrado con PID*
G_cerrado_manual = feedback(C_pid_manual * G_motor, 1);
G_cerrado_auto = feedback(C_pid_auto * G_motor, 1);
```

*Nota: Código para la cinematica inversa. (Paute, 2024)*

**Figura 75**

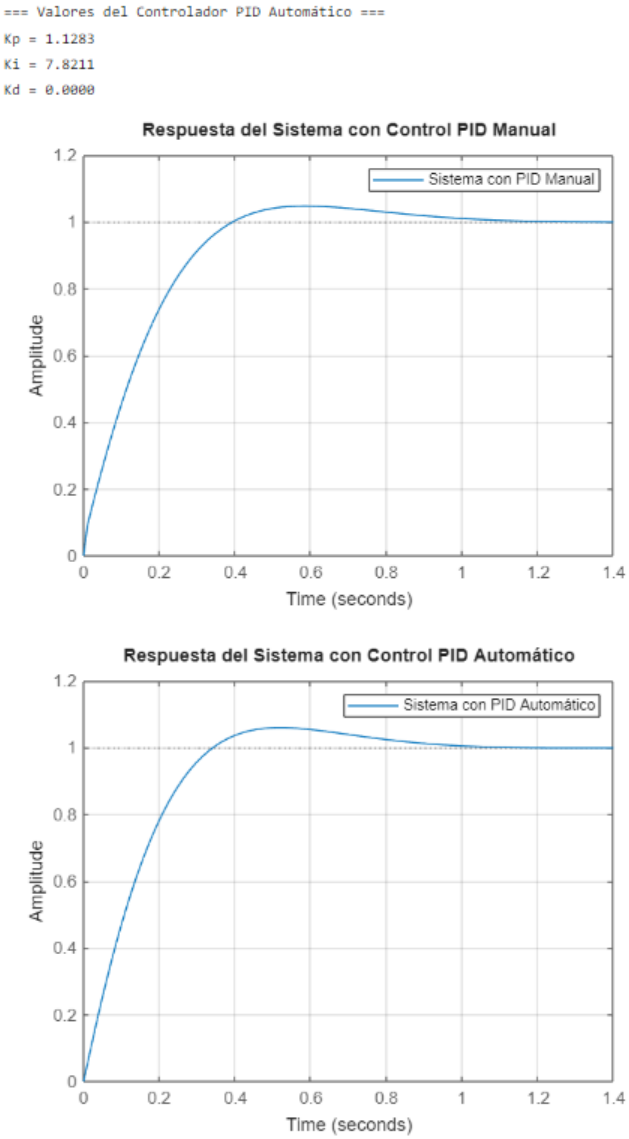
*Código para valores manuales de PID*

```
%%  Simulación y Comparación*
figure;
step(G_cerrado_manual);
title('Respuesta del Sistema con Control PID Manual');
grid on;
legend('Sistema con PID Manual');

figure;
step(G_cerrado_auto);
title('Respuesta del Sistema con Control PID Automático');
grid on;
legend('Sistema con PID Automático');

%% Comparación de Respuesta con y sin PID*
[y_sinPID, t_out] = lsim(G_motor, T_variable, t);
[y_conPID, t_out] = lsim(G_cerrado_manual, T_variable, t);

figure;
plot(t_out, y_sinPID, 'r', 'LineWidth', 2); hold on;
plot(t_out, y_conPID, 'b', 'LineWidth', 2);
title('Comparación: Sin Control vs Con PID Manual');
grid on;
legend('Sin PID', 'Con PID Manual');
```

*Nota: Código para valores manuales del PID (Paute, 2024)*

**Figura 76**

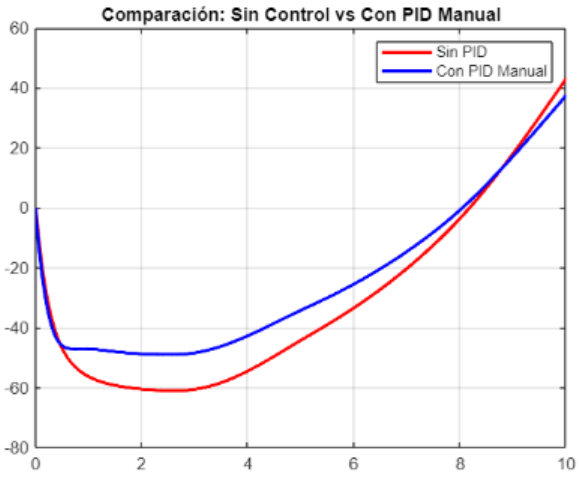
*Gráfica PID manual y automático*




*Nota: Comparación entre el PID manual y automático. (Paute, 2024)*

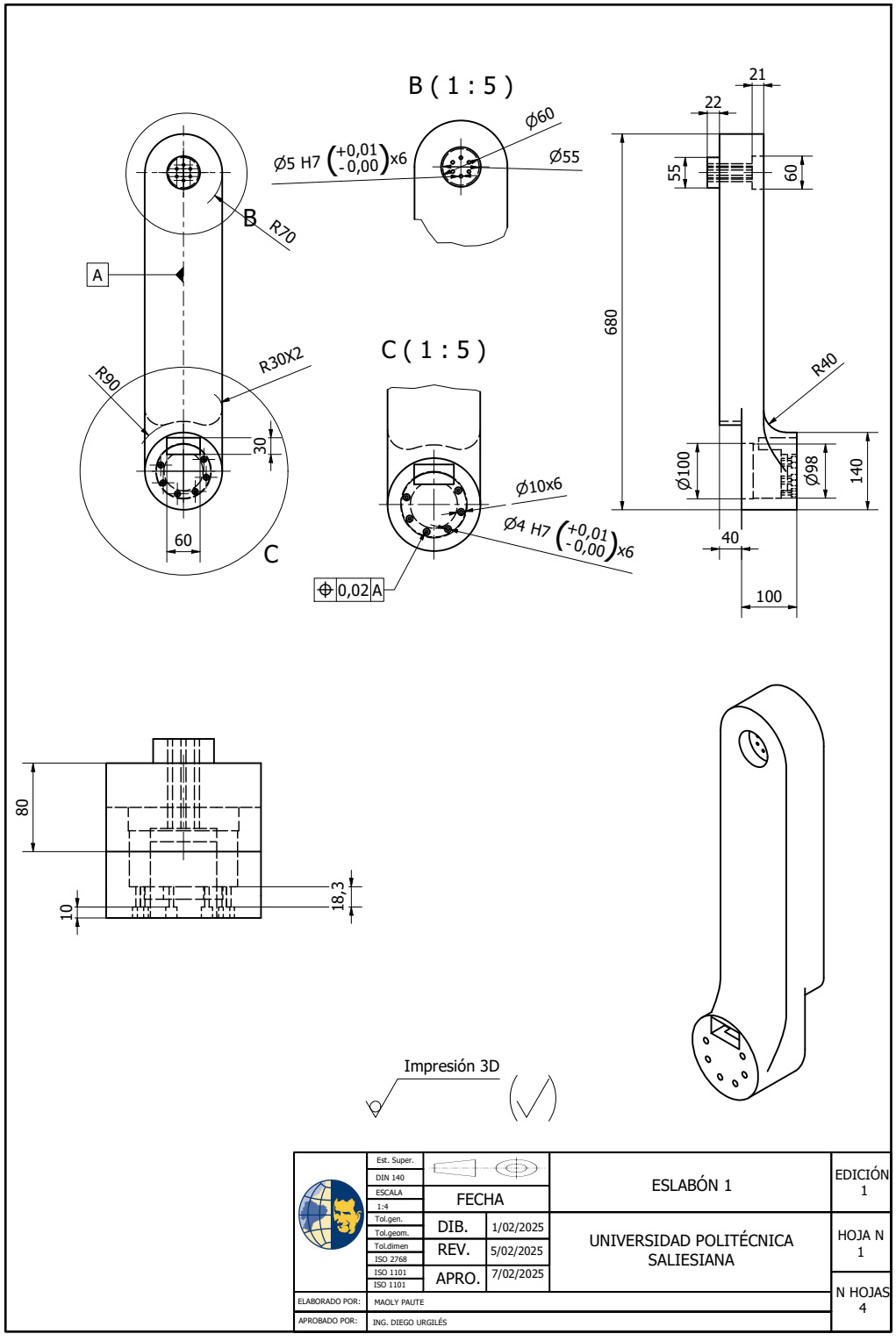
**Figura 77**

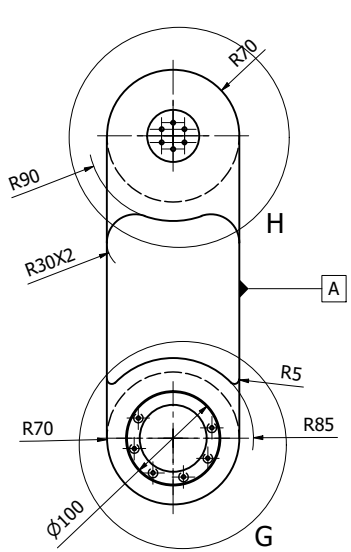
*Gráfica de comparación*

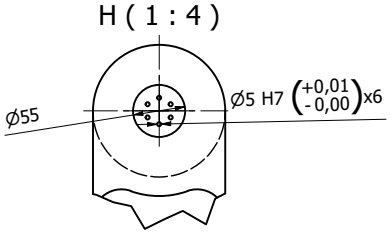


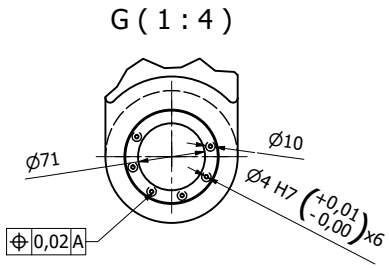

*Nota: Comparación entre una respuesta sin control y controlada. (Paute, 2024)*

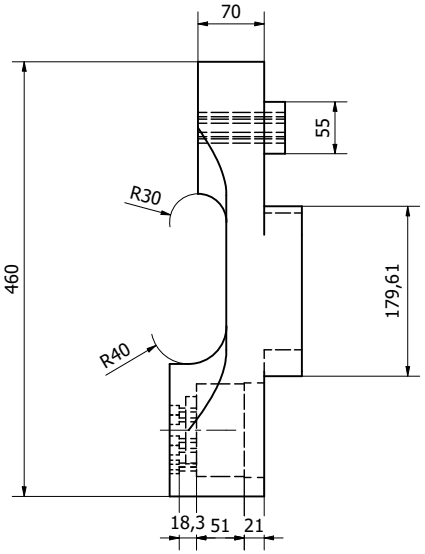
# Anexo 4: Planos para el diseño mecánico

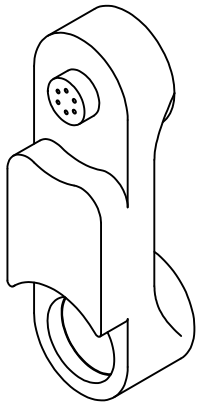


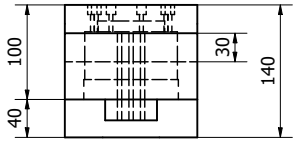


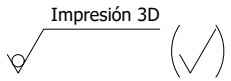



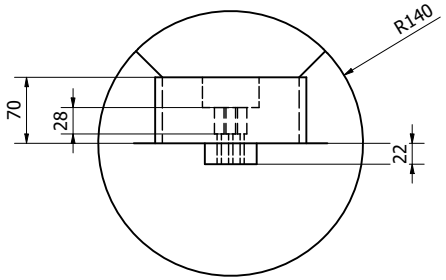



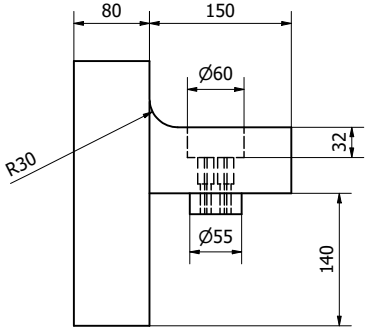



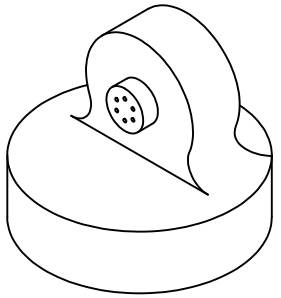


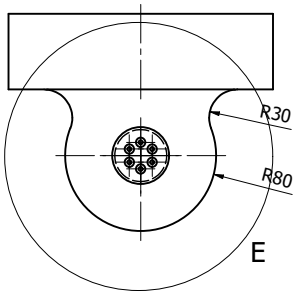




| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Est. Super. | | ESLABÓN 2 | | EDICIÓN 1 |
| DIN 140 | | | | |
| ESCALA | FECHA | | | |
| 1:4 | | | | |
| Tol.gen. | DIB. | 1/02/2025 | UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA | HOJA N 2 |
| Tol.geom. | REV. | 5/02/2025 | | |
| Tol.dimen | | | | |
| ISO 2768 | APRO. | 7/02/2025 | | |
| ISO 1101 | | | | |
| ISO 1101 | | | | N HOJAS 4 |
| ELABORADO POR: | MAOLY PAUTE | | | |
| APROBADO POR: | ING. DIEGO URGILÉS | | | |

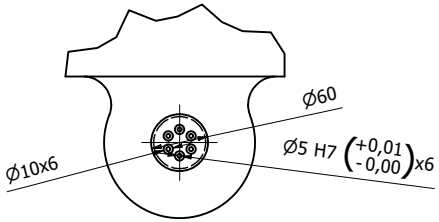


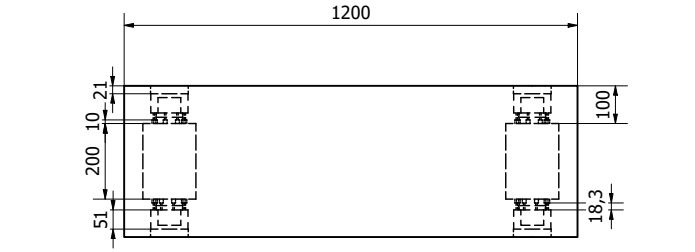


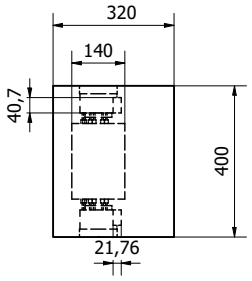

E ( 1:4 )

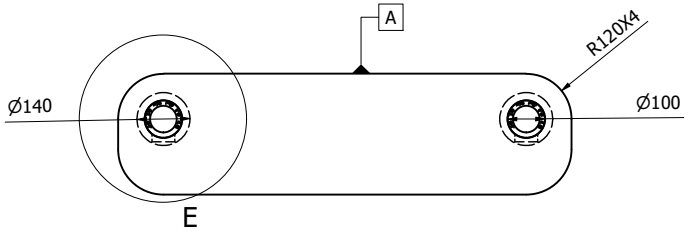


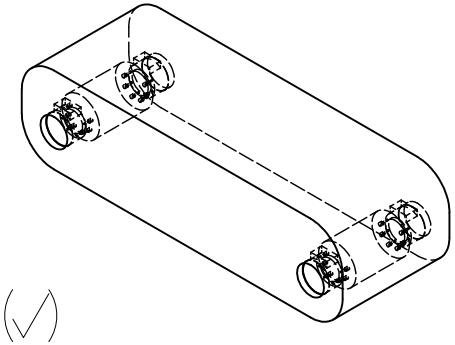

Impresión 3D

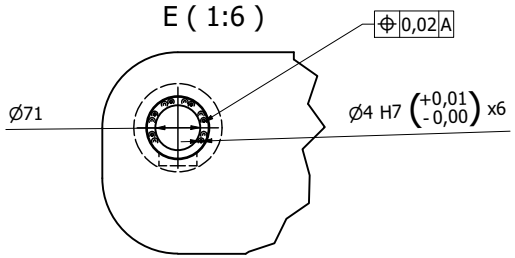
| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Est. Super. | | | ESLABÓN 3 | EDICIÓN 1 |
| | DIN 140 | | | | |
| | ESCALA | FECHA | | | |
| | 1:1 | | | UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA | HOJA N 3 |
| | Tol.gen. | DIB. | 1/02/2025 | | |
| | Tol.geom. | REV. | 5/02/2025 | | |
| | Tol.dimen | | | | |
| | ISO 2768 | APRO. | 7/02/2025 | | |
| | ISO 1101 | | | | N HOJAS 4 |
| | ISO 1101 | | | | |
| ELABORADO POR: | MAOLY PAUTE | | | | |
| APROBADO POR: | ING. DIEGO URGILÉS | | | | |






Impresión 3D

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Est. Super. | | | CHASIS | EDICIÓN 1 |
| DIN 140 | | | | |
| ESCALA | FECHA | | | |
| 1:1 | | | | |
| Tol.gen. | DIB. | 1/02/2025 | UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA | HOJA N 4 |
| Tol.geom. | REV. | 5/02/2025 | | |
| Tol.dimen | | | | |
| ISO 2768 | APRO. | 7/02/2025 | | |
| ISO 1101 | | | | N HOJAS 4 |
| ISO 1101 | | | | |
| ELABORADO POR: | MAOLY PAUTE | | | |
| APROBADO POR: | ING. DIEGO URGILÉS | | | |

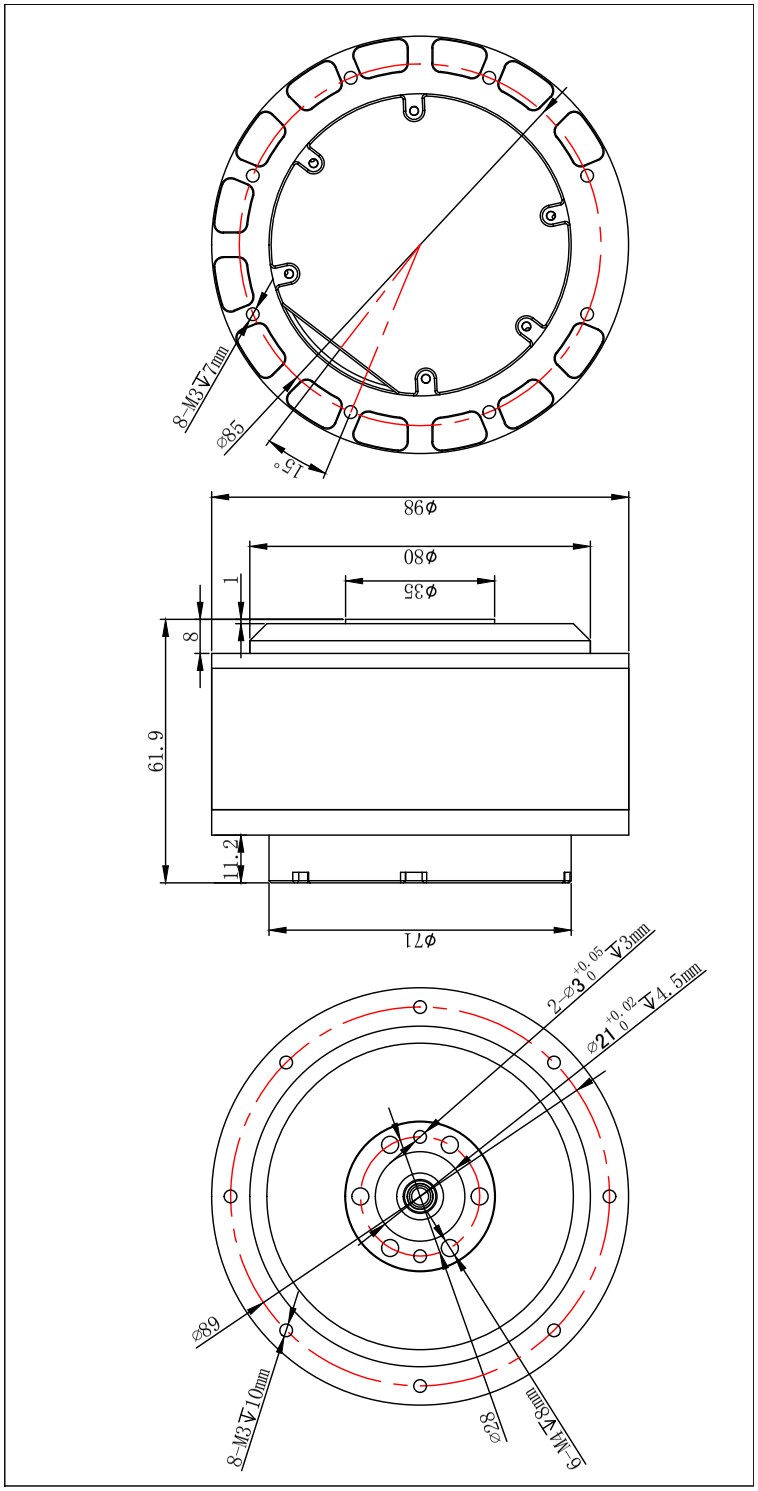
# Anexo 5: Especificaciones del motor

## Figura 78

*Especificaciones del motor*

| Specification | | | |
|---|---|---|---|
| Application | Legged Robot,Exoskeleton,AGV | Peak torque (Nm) | 120 |
| Driving way | FOC | Peak current (ADC) | 19 |
| Operation ambient temperature | -20℃~50℃ | Kv (rpm/V) | 80 |
| Winding type | Delta | Kt (Nm/A) | 0.136 |
| Insulation class | H | Ke (V/krpm) | 13.7 |
| Insulation High-voltage | 1000V 5mA/2s | Phase to Phase resistance (mΩ) | 220 |
| Insulation resistance | 1000V10MΩ | Phase to Phase inductance (μH) | 133.5 |
| Phase | Three Phase | Inertia (gcm²) | 564.5 |
| Pole pairs | 21 | Km (Nm/√W) | 0.29 |
| Reduction ratio | 64:1 | Mechanical time constant (ms) | 0.67 |
| Back drive(Nm) | 4.7 | Electrical time constant (ms) | 0.61 |
| Backlash (°) | 0.18 | Weight (g) | 850 |
| Temperature sensor | NTC MF51B 103F3950 | Maximum torque weight ratio (Nm/kg) | 141.2 |
| Noise dB 65CM away the motor | 60 | CAN connector | A1257WR-S-4P |
| Basic load ratings (dyn. C ) N | 2000 | UART connector | A1257WR-S-3P |
| Basic load ratings (stat.C0) N | 2520 | Power connector | XT30PW-M |
| Rated voltage (V) | 24/48 | Inner loop encoder type | Magnetic encoder |
| Rated torque (Nm) | 48 | Inner ring encoder resolution | 14bit |
| Rated speed (rpm) | 23/48 | Outer ring encoder type | - |
| Rated current (ADC) | 7 | Outer ring encoder resolution | - |
| Number of encoder | 1 | | |

*Nota: Espeficicaciones electrónicas del motor. (T-MOTOR, 2024)*


8-M3↧7mm
⌀85
15°
⌀98
⌀80
⌀35
1
8
61.9
11.2
⌀71
2-⌀3 +0.05 0 ↧3mm
⌀21 +0.02 0 ↧4.5mm
⌀89
8-M3↧10mm
⌀28
6-M↧3mm