

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE ROBOT MÓVIL PARA
NAVEGAR EN TERRENOS IRREGULARES**

**ADELA BAYONA GÓMEZ
FERNANDO YECETD FORERO GÓMEZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECAÓNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2023

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE ROBOT MÓVIL PARA
NAVEGAR EN TERRENOS IRREGULARES**

**ADELA BAYONA GÓMEZ
FERNANDO YECETD FORERO GÓMEZ**

Trabajo de grado para optar al título de ingeniero mecánico

**Director
CARLOS BORRAS PINILLA
PhD. Ingeniería Mecánica**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA BUCARAMANGA
2023**

DEDICATORIA

Dedicado principalmente a Dios, por guiarme, fortalecerme y darme paciencia a lo largo del camino.

A mi padre, Carlos Hernando Forero; quien ha hecho su mayor esfuerzo por ser un buen hombre, un buen padre, un buen esposo y amigo, también por cada uno de sus sacrificios para sacarme adelante.

A mi madre, Carmen Gómez; por su amor incondicional, porque con una sola mirada sabes cómo me siento, por sus oraciones, que sin duda alguna me han protegido y bendecido, por esas palabras de aliento, que me han dado energía y confianza.

A mis hermanos; Andrés, Dalys, Blanyel, Keiner, por su apoyo, cariño y palabras de motivación.

A mis sobrinos, desde Daliana hasta Valentina, porque en algún momento, sus locuras, sus juegos y sus sonrisas me han llenado de felicidad.

A mis amigos; Sergio Romero, Ana Martinez y Richard Arguello, quienes me acompañaron como familia, brindándome cariño, complicidad y nunca permitieron que me rindiera todas las veces que no quería continuar más.

A todas aquellas personas que en algo me aportaron a lo largo de esta trayectoria.

Finalmente, me agradezco a mí mismo por haber tomado decisiones que me trajeron hasta aquí... Ahora, agradecer por las decisiones que voy a tomar que me convertirán en un mejor hombre, hijo, profesional, padre, novio y amigo.

FERNANDO YECETD FORERO GOMEZ

DEDICATORIA

Dedico este logro principalmente a Dios, la fuente de toda sabiduría y fortaleza. Agradezco sinceramente por guiarme a lo largo de esta travesía académica y por brindarme la fuerza necesaria para superar los desafíos. Su divina guía ha sido mi faro en cada paso, iluminando mi camino y otorgándome la perseverancia para alcanzar este logro.

Agradezco de corazón a mis padres, Eduardo Bayona Fonce y Adela Gómez Pinzón, cuyo amor y apoyo inquebrantable han sido mi mayor inspiración. Su dedicación y aliento constante han sido la base de mi éxito, guiándome con amor y sabiduría a lo largo de este camino. Me considero afortunada por contar con su respaldo incondicional, que ha sido la guía constante en mi trayectoria. Este logro no solo es mío, sino también de ellos, quienes han sido pilares fundamentales en mi vida.

A mis hermanas Viviana y Andrea; quienes siempre han sido fuente de fortaleza y aliento.

A mi sobrino; por su alegría contagiosa que ha iluminado mis días.

A mis compañeros de carrera; Ricardo Andrés Morales, Juan Manuel Arciniegas cuya amistad incondicional ha sido un regalo invaluable a lo largo de mi carrera. Su apoyo constante y su ánimo positivo han sido un faro en los momentos más desafiantes.

A todos mis compañeros, profesores, y seres queridos que compartieron este viaje conmigo, les agradezco sinceramente por su apoyo, comprensión y aliento.

ADELA BAYONA GOMEZ

AGRADECIMIENTOS

Al doctor Carlos Borrás Pinilla, director de este proyecto de grado, cuya orientación experta y apoyo constante fueron fundamentales para el éxito de esta tesis.

Al semillero de investigación DICBOT, por su compromiso con sus integrantes, brindando los recursos físicos, académicos y el ambiente cálido y acogedor, que nos permitió crecer como personas.

A la Universidad Industrial de Santander, por acogernos como suyos, por ser ese patrimonio educativo, que nos brindó la oportunidad de superarnos, disfrutando cada momento.

A todas las personas entre bambalinas que de diversas maneras participaron con amor, con esfuerzo y dedicación en el desarrollo de este proyecto. Este logro es de todos nosotros.

Finalmente, en la memoria de Martha García Pedraza, quien soñó más que cualquier otra persona con ser profesional, pero que las dificultades le impidieron cumplir ese sueño.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	14
1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	15
2. OBJETIVOS	16
2.1 OBJETIVO GENERAL.....	16
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
3. JUSTIFICACIÓN.....	17
4. MARCO TEÓRICO	19
4.1 ANTECEDENTES	19
4.1.1 Antecedentes internacionales.....	19
4.1.2 Antecedentes nacionales.	22
4.1.3 Antecedentes regionales	24
4.2 REFERENTES TEÓRICOS.....	26
4.2.1 Batería.....	26
4.2.2 Servomotores:.....	27
4.2.3 Arduino:.....	27
4.2.4 Descripción del entorno.....	28
4.2.5 Requerimientos de movilidad	28
4.2.6 Matriz de calidad (QFD).....	29
4.2.7 Diseño conceptual	32
5. METODOLOGÍA DE DISEÑO DEL HEXÁPODO.....	35
5.1 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS.....	35
5.1.1 Definición de requerimientos	35
5.1.2 Establecimiento de criterios de diseño	35
5.2 ALTERNATIVAS DE DISEÑO	36
5.2.1 Esbozos y bocetos preliminares	36
5.2.2 Modelado 3D de alternativas	37
5.3 CÁLCULOS	39
5.3.1 Cálculos de resistencia y soporte carga	39
5.3.2 Cálculos eléctricos y de autonomía de la batería.....	54
5.3.3 Cálculos de movimientos y dinámica.....	56

6. DISEÑO DEFINITIVO Y FABRICACIÓN.....	59
6.1 DISEÑO DEL HEXÁPODO.....	59
6.1.1 Especificaciones Generales	60
6.1.2 Componentes	61
6.2 PROCESO DE CONSTRUCCIÓN.....	61
6.2.1 Ensamblaje de la estructura	61
6.2.2 Instalación de actuadores y sensores.....	61
6.3 SOFTWARE Y PROGRAMACIÓN	61
6.3.1 Software de Control.....	61
6.3.2 Algoritmos de Movimiento	61
6.4 PRUEBAS Y AJUSTES.....	62
6.4.1 Pruebas de Funcionamiento.....	62
6.4.2 Ajustes	63
6.5 OBSERVACIONES SOBRE LA METODOLOGÍA EMPLEADA	63
7. PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DEL HEXÁPODO.....	64
8. ANÁLISIS DE DESEMPEÑO DEL HEXÁPODO	67
8.1. ESTADÍSTICAS BÁSICAS:	67
8.1.1 Prueba de medición de locomoción distancia 1 metro:	67
8.1.2 Prueba de rotación de 180 grados:.....	67
8.1.3 Prueba de rotación de 90 grados:	68
8.2 ANÁLISIS ANOVA:.....	69
8.3 CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS DE DESEMPEÑO.....	71
CONCLUSIONES	73
BIBLIOGRAFÍA.....	74

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Batería LiPo	26
Figura 2. Terreno irregular	28
Figura 3. Bosquejo de tibia	32
Figura 4. Bosquejo del fémur	33
Figura 5. Bosquejo de la coxa.....	33
Figura 6. Ensamble de la tibia, el fémur y la coxa	34
Figura 7. Cuerpo.....	34
Figura 8. Croquis en vista isométrica de hexápodo con 2 grados de libertad.	36
Figura 9. Croquis en vista isométrica de hexápodo con 3 grados de libertad.	37
Figura 10. Modelado 3D en CATIA para la concepción de diseño	38
Figura 11. Aspecto general del cuerpo del hexápodo	39
Figura 12. Dimensiones iniciales del hexápodo	39
Figura 13. Boceto del cuerpo del hexápodo para cálculo de la masa.....	40
Figura 14. Diseño de las patas	41
Figura 15. Diagrama de cuerpo libre hexápodo	42
Figura 16. Diagrama de cuerpo libre 2D en patas delanteras	45
Figura 17. Diagrama de cuerpo libre para estática 3D	46
Figura 18. Diagrama de cuerpo libre 3D para el cuerpo	48
Figura 19. Diagrama de cuerpo libre para el Servo 2.....	50
Figura 20. Diagrama de cuerpo libre para el servo 3.....	50
Figura 21. Servo según cálculos estática.....	51
Figura 22. Representación sección transversal.....	52
Figura 23. Representación del pandeo en barra doblemente articulada.....	53
Figura 24. Representación visual de patas activas para el movimiento trípode.....	57
Figura 25. Servomotor seleccionado.....	58
Figura 26. Prototipo inicial del sistema motriz del hexápodo	59
Figura 27. Parámetros de impresión de las piezas	60
Figura 28. Diagrama de programación.....	62
Figura 29. Prueba del hexápodo en arena	64
Figura 30. Prueba del hexápodo en pasto y en piedras	65

Figura 31. Prueba de medición de locomoción $d=1m$	70
Figura 32. Prueba de rotación de 180 grados:	70
Figura 33. Prueba de rotación de 90 grados:	71

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Matriz de calidad.....	30
Tabla 2. Criterios importantes para el diseño del robot móvil.	31
Tabla 3. Selección del tipo de robot móvil a diseñar y construir.	31
Tabla 4. Estimación del peso del hexápodo.....	42
Tabla 5. Prueba de medición de distancia 1 metro.....	64
Tabla 6. Prueba de rotación de 180 grados.....	65
Tabla 7. Prueba de rotación de 90 grados.....	65
Tabla 8. Distancia de separación al suelo.....	66

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Tabulaciones para estimar ángulo de ataque de las patas con la superficie	78
Anexo B. Tabulación de ángulos de ataque para la pata	78
Anexo C. Tabla de $\beta=45$ y $\gamma=(90,180,10)$	79
Anexo D. Tabla de $\beta=60$ y $\gamma=(90,180,10)$	79
Anexo E. Tabla de $\beta=75$ y $\gamma=(90,180,10)$	79
Anexo F. Tabla de $\beta=90$ y $\gamma=(90,180,10)$	80
Anexo G. Tabla de $\beta=105$ y $\gamma=(90,180,10)$	80
Anexo H. Tabla de $\beta=120$ y $\gamma=(90,180,10)$	80
Anexo I. Tabla de $\beta=135$ y $\gamma=(90,180,10)$	81
Anexo J. Tabla de $\beta=150$ y $\gamma=(90,180,10)$	81
Anexo K. Tabla de $\beta=165$ y $\gamma=(90,180,10)$	81
Anexo L. Tabla de $\beta=180$ y $\gamma=(90,180,10)$	82
Anexo M. Planos Isométricos del modelo CAD	82
Anexo N. Modelo CAD de las piezas	82
Anexo O. Aplicativo móvil	82

RESUMEN

TÍTULO: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE ROBOT MÓVIL PARA NAVEGAR EN TERRENOS IRREGULARES¹.

AUTORES: ADELA BAYONA GÓMEZ, FERNANDO YECETD FORERO GÓMEZ²

PALABRAS CLAVE: ROBOT MÓVIL, ARTICULADO, TERRENOS IRREGULARES, LOCOMOCIÓN.

DESCRIPCIÓN:

El proyecto se centró en el diseño, construcción y evaluación de un hexápodo robótico, con el objetivo principal de examinar su capacidad para desplazarse y rotar sobre diversas superficies. El hexápodo, fabricado principalmente de PLA, cuenta con dimensiones específicas que garantizan el alojamiento adecuado de todos sus componentes eléctricos, incluyendo un Arduino Mega y una unidad de Bluetooth que permite su control remoto desde un dispositivo móvil.

A fin de evaluar el rendimiento del hexápodo en diferentes terrenos, se llevaron a cabo pruebas en tres superficies distintas: arena, pasto y piedras. Mediante el análisis ANOVA, se buscó determinar diferencias significativas en los tiempos de locomoción y rotación del robot en dichos terrenos. Los resultados mostraron que no existen diferencias significativas en el desempeño del hexápodo entre las superficies probadas, con tiempos de locomoción consistentes y una variabilidad similar en todas las pruebas. En conclusión, el proyecto ha logrado diseñar un hexápodo que demuestra una notable capacidad adaptativa a diferentes superficies, lo que lo posiciona como una herramienta para diversas aplicaciones. Este avance representa un paso representativo para el grupo de investigación DICBOT, abriendo la puerta a futuras aplicaciones en ambientes desafiantes donde la movilidad y la adaptabilidad son esenciales.

¹Trabajo de Grado.

² Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: PhD. Carlos Borrás Pinilla.

ABSTRACT

TITLE: DESIGN AND CONSTRUCTION OF A MOBILE ROBOT PROTOTYPE TO NAVIGATE IRREGULAR TERRAINS.³

AUTHORS: ADELA BAYONA GÓMEZ, FERNANDO YECETD FORERO GÓMEZ⁴

KEYWORDS: MOBILE ROBOT, ARTICULATED, IRREGULAR TERRAINS, LOCOMOTION.

DESCRIPTION:

The project focused on the design, construction, and evaluation of a robotic hexapod, with the primary aim of assessing its ability to traverse and rotate across various surfaces. The hexapod, primarily made of PLA, possesses specific dimensions that ensure the appropriate housing of all its electrical components, including an Arduino Mega and a Bluetooth unit that facilitates remote control via a mobile device.

To gauge the hexapod's performance on different terrains, tests were conducted on three distinct surfaces: sand, grass, and stones. Through ANOVA analysis, the objective was to ascertain significant differences in the robot's locomotion and rotation times across these terrains. Results revealed no significant disparities in the hexapod's performance among the tested surfaces, with consistent locomotion times and comparable variability across all trials.

In conclusion, the project has successfully designed a hexapod that demonstrates a remarkable adaptability to diverse surfaces, positioning it as a versatile tool for various applications. This advancement marks a significant stride for the DICBOT research group, paving the way for future applications in challenging environments where mobility and adaptability are paramount.

³ Bachelor Thesis

⁴ Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: PhD. Carlos Borrás Pinilla.

INTRODUCCIÓN

La robótica ha experimentado un auge significativo en la última década, debido a la necesidad de optimizar recursos y facilitar procesos en todos los campos de la industria y del desarrollo de actividades cotidianas del ser humano. Por esta razón, el diseño y construcción de un prototipo robótico es de gran importancia debido a la creciente necesidad de robots móviles capaces de operar en terrenos de difícil acceso para el hombre.

Por esta razón surge la propuesta de desarrollar un robot móvil tipo hexápodo que pueda incursionar de forma efectiva y estable sobre topografías complejas, contribuyendo como un apoyo para explorar terrenos irregulares. En este proyecto se abordarán diferentes aspectos, desde el diseño mecánico del robot hasta la programación de los controladores y la implementación de los dispositivos necesarios para su correcto funcionamiento.

En este documento se expondrá un análisis detallado de las bases teóricas detrás del diseño y operación de robots móviles en terrenos irregulares, los antecedentes nacionales e internacionales que han sentado las bases para este proyecto, y finalmente, la metodología propuesta para llevar a cabo el desarrollo y las pruebas de este prototipo de robot. Es una invitación a explorar cómo la robótica puede dar soluciones los desafíos actuales de diferentes sectores tecnológicos.

1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

En la actualidad, el campo de la robótica está experimentando un crecimiento exponencial, no solo en términos de su aplicación práctica sino también en la comprensión y desarrollo de tecnologías innovadoras. La capacidad de diseñar y construir dispositivos robóticos eficientes y adaptables tiene implicaciones significativas en múltiples sectores, incluyendo, pero no limitándose a, la agricultura de precisión, la automatización industrial y la inteligencia artificial.

El reto radica en desarrollar una base sólida de conocimiento y habilidades técnicas en robótica, especialmente en la construcción de robots móviles terrestres que puedan operar en una variedad de entornos y topografías. Esto no solo abre puertas para aplicaciones específicas como la agricultura de precisión, sino que también establece un precedente para la investigación y el desarrollo en otros campos técnicos y científicos.

En este contexto, el proyecto de pregrado se enfoca en el diseño y construcción de un robot móvil terrestre tipo hexápodo. Este robot no solo servirá como una herramienta práctica para superar desafíos en terrenos variables, sino que también actuará como un modelo para la educación y la investigación en robótica. La meta es fomentar la innovación y el fortalecimiento de la investigación en robótica, proporcionando una plataforma tangible para explorar y aplicar los principios de la mecánica, la electrónica y la programación en contextos reales.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar y construir un dispositivo robótico móvil terrestre tipo hexápodo que tenga la capacidad de incursionar sobre topografías y/o relieves variables, incentivando la generación de nuevas ideas de desarrollo y el fortalecimiento de la investigación en múltiples áreas que aporten soluciones a los distintos sectores técnicos y científicos.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseñar un prototipo articulado de robot móvil terrestre que pueda desplazarse de forma estable sobre topografías variables, como tierra, arena y pasto.
- Construir mediante el modelado e impresión en 3D el prototipo articulado con las siguientes especificaciones técnicas:
 - Dimensiones máximas de 50 cm x 50 cm x 50 cm.
 - Peso Máximo: 3 kg.
 - Estabilidad de movimientos en pendientes irregulares con inclinaciones de 1% hasta 30% sobre el nivel de la superficie.
- Validar el correcto funcionamiento del prototipo de robot móvil articulado mediante de pruebas en campo utilizando el análisis ANOVA, a partir de la programación de los movimientos básicos de marcha del robot con el módulo Arduino y operado mediante una aplicación móvil.

3. JUSTIFICACIÓN

El desarrollo de un robot tipo hexápodo diseñado para navegar sobre terrenos irregulares se justifica por varias razones esenciales que son fundamentales para el avance y la aplicación práctica de la robótica moderna. Primero, representa un significativo avance en el campo de la robótica, especialmente en términos de locomoción y estabilidad. A diferencia de los diseños convencionales basados en ruedas u orugas, la estructura de seis patas de un robot hexápodo ofrece una mayor maniobrabilidad y adaptabilidad, lo cual es crucial para operar en terrenos complejos y variables.

Además, este tipo de robot tiene un potencial para aplicaciones en múltiples áreas, incluyendo, pero no limitándose a la exploración espacial, operaciones de búsqueda y rescate, y la inspección de infraestructuras en entornos desafiantes. Su habilidad para maniobrar en superficies irregulares lo hace excepcionalmente adecuado para situaciones donde otros vehículos encuentran limitaciones, abriendo así nuevas posibilidades para exploraciones y operaciones en contextos antes inaccesibles.

Desde una perspectiva de diseño mecánico y dinámica de sistemas, el desarrollo de un robot hexápodo también presenta desafíos únicos y estimulantes. La necesidad de diseñar patas que soporten diversas condiciones de carga y movimiento impulsa la innovación en mecánica y diseño de sistemas. Este desafío no solo fomenta la creatividad en la ingeniería, sino que también contribuye al avance del conocimiento en estas áreas.

Por último, el proyecto tiene un valor educativo y de investigación considerable. Ofrece a estudiantes e investigadores una plataforma tangible para explorar y experimentar con conceptos avanzados en robótica y mecánica. Además, su implementación puede tener un impacto social y ambiental positivo significativo. Al utilizar robots en operaciones en terrenos peligrosos o inestables, se

minimizan los riesgos para los humanos, protegiendo así vidas y posiblemente contribuyendo a la conservación del medio ambiente.

En conjunto, estas razones subrayan la importancia y relevancia del desarrollo de un robot hexápodo para la navegación en terrenos irregulares, destacando su potencial para impulsar adelante el campo de la robótica y ofrecer soluciones prácticas y seguras en una variedad de contextos desafiantes.

4. MARCO TEÓRICO

4.1 ANTECEDENTES

4.1.1 Antecedentes internacionales.

4.1.1.1 “Navegación de un robot móvil sobre terreno irregular con contacto de su brazo con el suelo”⁵. El objetivo de este proyecto es la obtención de un pequeño robot móvil de ruedas con tracción por deslizamiento que se encuentre dotado de un brazo articulado con una rueda que le permita mantener un punto de contacto adicional compensando situaciones de inestabilidad y logrando sobrepasar obstáculos específicos presentes en entornos no estructurados.

En este proyecto se tuvieron en cuenta un conjunto de estrategias creadas para que el robot pueda superar obstáculos específicos, tales como, escalones, rampas de gran inclinación y zanjas. En cada estrategia creada, estudiaron las etapas de movimientos que debía seguir el robot móvil para llevar a cabo la maniobra correctamente. El análisis se fundamentó en índice de estabilidad, el cual permite conocer la tendencia al vuelco; un índice de direccionamiento el cual permite percibir la capacidad para direccionarse y continuar en una trayectoria dada. Finalmente, el proyecto confirmó mediante pruebas experimentales, una gran similitud entre los índices de estabilidad y direccionamiento, comprobándose la fiabilidad de los modelos teóricos y las simulaciones realizadas.

Esta tesis se relaciona con la investigación planteada, ya que describe algunas maniobras realizadas por el robot, las cuales están fundamentadas en el uso de un brazo articulado como herramienta de apoyo para sobrepasar las grandes

⁵ GARCÍA CAICEDO, Jesús Marcey. Navegación de un robot móvil sobre terreno irregular con contacto de su brazo con el suelo [en línea]. Tesis doctoral. Universidad de Málaga, 2015. [Consultado 23 noviembre 2020]. Disponible en <http://hdl.handle.net/10630/11630>

dimensiones de los obstáculos, que no podrían haber sido superados si solo se tuviesen en cuenta variables como el tamaño de sus ruedas o la tracción de sus motores.

4.1.1.2 “Diseño e implementación de un robot móvil tipo oruga para exploración en terrenos irregulares”⁶ El objetivo de este proyecto es diseñar y poner en marcha un prototipo de robot móvil tipo oruga que sea capaz de navegar en terrenos irregulares con la ayuda de un brazo robótico de cuatro grados de libertad acoplado en la parte frontal superior de la estructura del robot y que sea operado mediante control remoto por medio de radio frecuencia.

En esta tesis se analiza entre los robots de tracción tipo oruga y los de tracción por llantas para saber cuál tipo de robot móvil es el óptimo para explorar terrenos no estructurados. Seleccionando e implementando un tipo oruga, aumentando la relación peso-potencia para aprovechar de manera más eficiente el peso del robot y convertirlo en tracción. Por último, este trabajo de investigación demostró que el prototipo diseñado cumple con todas las variables de funcionamiento, teniendo una eficiencia del 98% de aceptabilidad y siendo estable en cada uno de los terrenos que se seleccionaron para los ensayos.

Este proyecto describe el diseño de un robot móvil tipo oruga donde el aporte principal radica en la selección de dos cadenas en paralelo las cuales deben estar separadas entre 10 a 15 cm para obtener una mejor distribución del peso sobre el terreno hostil, también que sus dimensiones sean construidas teniendo en cuenta estándares de normas internacionales y el sistema de tracción debe estar en función de la potencia de los motores.

⁶ BORJA URREA, Roberto Gonzalo y BRAVO RAMÍREZ, Hugo Enrique. Diseño e implementación de un robot móvil tipo oruga para exploración en terrenos irregulares [en línea]. Tesis de pregrado. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, 2016. [Consultado 28 noviembre 2020]. Disponible en <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/6125>

4.1.1.4 “Desarrollo de sistema de locomoción y odometría en un robot móvil para navegación en espacios no uniformes”⁷

El objetivo de este trabajo es el desarrollo de un prototipo de robot de exploración para ambientes no uniformes utilizando un controlador Proporcional Integral independiente en cada una de las ruedas.

En esta investigación se identificaron criterios para lograr seleccionar el sistema de locomoción junto a su modelo cinemático, se diseñaron las piezas mecánicas necesarias para la implementación, se consideraron los esfuerzos mecánicos presentes en las piezas. Finalmente, lo anterior se convirtió en un prototipo físico apto para navegar en espacios no uniformes y con capacidad de funcionar en rampas de 20° y obstáculos con una elevación de 40°.

Este trabajo de investigación describe las características y dimensiones de un prototipo manufacturado en impresión 3D y corte láser, utilizando una suspensión rocker bogie implementado en una barra diferencial consiguiendo un éxito del cien por ciento al superar obstáculos que poseen una inclinación mayor al 30%, además el robot logra desenvolverse correctamente en superficies rugosas.

⁷ BARQUERO MELÉNDEZ, Sebastián. Desarrollo de sistema de locomoción y odometria en un robot móvil para navegación en espacios no uniformes [en línea]. Tesis de pregrado. Instituto Tecnológico de Costa Rica, 2020. [Consultado 30 noviembre 2020]. Disponible en <http://hdl.handle.net/2238/11517>

4.1.2 Antecedentes nacionales.

4.1.2.1 “Diseño y construcción de un robot móvil hexápodo”⁸

Este proyecto tiene como propósito diseñar y construir un robot móvil articulado que sea económico y capaz de navegar por terrenos no estructurados, manteniendo su avance en línea recta, evadiendo obstáculos sin que sufra deslizamiento o tener que generar trayectorias particulares.

En este proyecto de investigación se abarca que el mecanismo de movimiento tendrá que elevarse una altura suficiente para sobrepasar pequeños obstáculos y que cada pata del robot debe tener dos grados de libertad; uno para la elevación y el otro para el arrastre horizontal. Por lo que se concluyó que el sistema más conveniente para que las extremidades se eleven es un mecanismo de seis barras, ya que puede transmitir la potencia generada por los motores usando una palanca que amplifique su torque. Finalmente, para el patrón de marcha escogen el trípede debido a que es el más común.

Este proyecto de grado aporta la importancia del diseño mediante software de modelamiento mecánico y especializado, ya que demuestra las ventajas de verificar las fallas comunes causadas por esfuerzos y deformaciones en las piezas y, como interferencias en el ensamblaje y de esta manera poder realizar los ajustes para que el prototipo de robot móvil pueda tener un correcto funcionamiento.

⁸ PÉREZ RUÍZ, Alexander. Diseño y construcción de un robot móvil hexápodo [en línea]. Tesis de maestría. Universidad de los Andes, 2003. [Consultado 30 noviembre 2020]. Disponible en <http://hdl.handle.net/1992/9688>

4.1.2.2 “Diseño e implementación de un robot móvil hexápodo”⁹

El objetivo de este artículo es diseñar y construir un robot móvil inspirado en el insecto *Tenebrio Molitor* para que posea destreza, adaptabilidad a terrenos irregulares y que sus seis extremidades al caminar tengan un patrón de marcha trípede consiguiendo ser estáticamente estable.

En este artículo se ejecutaron pruebas en las articulaciones y en cada pata individual para poder garantizar la sostenibilidad del cuerpo del robot. En la puesta en marcha se obtuvo una velocidad de desplazamiento de 1 cm/s aproximadamente para superficies planas e inclinaciones hasta de un 30°.

El aporte de este artículo es un prototipo capaz de controlar su inclinación en relación con la gravedad en dos ejes, también cuenta con un sistema multiprocesador que le permite desplazarse en cualquier dirección de modo que logra adaptarse a las condiciones de cada terreno.

4.1.2.3 “Diseño y simulación de un robot hexápodo de una sola junta por pierna”¹⁰

El objetivo de este trabajo de grado es diseñar y simular un robot móvil hexápodo todo terreno de una sola junta por pierna para desplazarse a través de obstáculos difíciles como rocas, arena, ramas y que pueda explorar terrenos inhóspitos e inaccesibles para el ser humano.

⁹ ARANGO SAAVEDRA, Alejandro; SATIZÁBAL MEJÍA, Héctor Fabio y LOAIZA CORREA, Humberto. Diseño e implementación de un robot móvil hexápodo. Revista Energía y Computación [en línea]. Cali (Colombia): Universidad del Valle, 13 octubre 2011, nro. 273. [Consultado 02 diciembre 2020]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10893/1416>

¹⁰ CANTOR FORERO, Juan Sebastián. Diseño y simulación de un robot hexápodo de una sola junta por pierna [en línea]. Tesis de pregrado. Universidad Militar Nueva Granada, 2015. [Consultado 05 diciembre 2020]. Disponible en <http://hdl.handle.net/10654/13846>

En este trabajo de grado se analiza entre los robots de locomoción mediante patas y los de locomoción por ruedas. Por medio de la simulación, se identifica que el robot hexápodo supera mejor los obstáculos y presenta mejor agarre en terrenos donde los de tipo rueda pierden fricción y presentan deslizamiento.

El aporte de este trabajo de grado es el uso de un software de simulación para robots móviles. Este programa brinda un acercamiento a los resultados reales de las variables desconocidas permitiéndonos ejecutar un diseño coherente que esté a la vanguardia en la exploración de terrenos agrestes e inhóspitos.

4.1.3 Antecedentes regionales

4.1.3.1 “Diseño y construcción de un prototipo de robot móvil autónomo de exploración”¹¹

El objetivo de este proyecto es la obtención de un prototipo de robot móvil explorador de ambientes externos poco agrestes y con un sistema de locomoción que permita superar ciertos obstáculos, lograr una alta maniobrabilidad y estabilidad.

Este proyecto de grado aporta el diseño de un robot que tiene en cuenta requerimientos para la manipulación, requerimientos funcionales y requerimientos técnicos, de esta manera cubren todos los parámetros para el correcto funcionamiento y utilizan SolidWorks para el diseño asistido por computadora, para el análisis estructural usan Ansys Workbench y finalmente, la manufactura fue asistida por MasterCam.

¹¹ PINEDA QUIJANO, Diego Fernando y PRADA LARGO, Fredy Alexander. Diseño y construcción de un prototipo de robot móvil autónomo de exploración [en línea]. Tesis de pregrado. Universidad Industrial de Santander, 2009. [Consultado 5 diciembre 2020]. Disponible en <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2009/130155.pdf>

4.1.3.2 “Diseño y construcción de un sistema de navegación autónoma para un vehículo de campos agrícolas de maíz”¹²

Este proyecto tiene como objetivo la implementación de un sistema de navegación autónomo con modelo de locomoción por deslizamiento a un prototipo de robot de exploración tipo rover enfocado a campos agrícolas controlados.

Este proyecto de investigación desarrolla una simulación de los modelos matemáticos de una plataforma robótica empleando el sistema de cómputo numérico MATLAB y diseñada de acuerdo con los criterios preestablecidos, dando solución a los problemas de navegación del vehículo en los campos de maíz.

4.1.3.3 “Diseño y construcción de un prototipo de robot móvil teleoperado para inspección visual”¹³

El objetivo de este proyecto es diseñar y construir un prototipo de robot móvil de 4 a 6 ruedas, suspensión independiente y teleoperado por medio de un tablero de controles que permita desplazarse en terrenos irregulares.

Este proyecto describe información del diseño de sistemas de suspensión, análisis de fuerzas y esfuerzos y, acerca de la programación de microcontroladores y las comunicaciones inalámbricas que permiten la interfaz entre el usuario y el prototipo.

¹² NIÑO RODRIGUEZ, Santiago y SALAZAR TRIANA, Juan David. Diseño y construcción de un sistema de navegación autónoma para un vehículo de campos agrícolas de maíz [en línea]. Tesis de pregrado. Universidad Industrial de Santander, 2018. [Consultado 8 de diciembre 2020]. Disponible en <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2018/173395.pdf>

¹³ PLATA TORRES, Fabio Andrés y SERRANO ROJAS, Raúl Fernando. Diseño y construcción de un prototipo de robot móvil teleoperado para inspección visual [en línea]. Tesis de pregrado. Universidad Autónoma de Bucaramanga, 2006. [Consultado 10 diciembre 2020]. Disponible en <http://hdl.handle.net/20.500.12749/1526>

4.2 REFERENTES TEÓRICOS

4.2.1 Batería. Batería de LiPo: Son baterías recargables, en las cuales su electrolito es una sal de litio que consigue los iones necesarios para la reacción electroquímica reversible entre el cátodo y el ánodo. Están compuestas por varias celdas de Litio las cuales mantienen un voltaje de salida estable y son un poco ligeras en comparación con sus competidoras, a su vez brindan la posibilidad de altas descargas, lo cual es necesario para robots móviles.

Figura 1. Batería LiPo



Fuente: Electronilab. (s.f.).

4.2.2 Servomotores¹⁴:

Un servomotor es un motor de corriente continua que, en vez de conseguir un giro continuo, está diseñado para conseguir que gire un determinado ángulo en respuesta a una señal de control, y que se mantenga fijo en esa posición. Para controlar el servomotor se le envían pulsos cada 20 ms, es decir 50Hz. La anchura del pulso es lo que determinará el ángulo de giro, lo que se conoce como PWM. Esta anchura varía según el servomotor, pero normalmente se encuentra entre 0.5 y 2.5 ms. Esto hace que el servomotor tenga un margen de operación, y pueda moverse entre 0° (pulso con una anchura de 0.5 ms) y un máximo, que suele ser de 180° (pulso con una anchura de 2,5ms).

4.2.3 Arduino¹⁵:

Arduino es una placa con un microcontrolador de la marca Atmel y con toda la circuitería de soporte, que incluye, reguladores de tensión, un puerto USB (En los últimos modelos, aunque el original utilizaba un puerto serie) conectado a un módulo adaptador USB-Serie que permite programar el microcontrolador desde cualquier PC de manera cómoda y también hacer pruebas de comunicación con el propio chip. Un Arduino dispone de 14 pines que pueden configurarse como entrada o salida y a los que puede conectarse cualquier dispositivo que sea capaz de transmitir o recibir señales digitales de 0 y 5 V.

¹⁴ BOTICS EDUCATIONAL ROBOTICS KITS. Proyecto No 1: Controla un servomotor. [en línea]. [consulta: 04 de diciembre de 2020]. Disponible en: <https://www.ebotics.com/es/actividad/proyecto-no-1-controla-un-servomotor/>.

¹⁵ CANTOR FORERO, Juan Sebastián. Diseño y simulación de un robot hexápodo de una sola junta por pierna [en línea]. Tesis de pregrado. Universidad Militar Nueva Granada, 2015. [Consultado 05 diciembre 2020]. Disponible en <http://hdl.handle.net/10654/13846>

4.2.4 Descripción del entorno

La definición de terreno irregular se describe como aquel terreno colinado que presenta pequeñas pendientes cóncavas y convexas en las cuales existen ganancias y pérdidas de material sólido, tales como, piedras, raíces, palos y hasta algunas semillas, que suelen estar presentes en la superficie o en el interior del suelo. También este tipo de terreno presenta algunas pendientes rectas con un porcentaje del 16 – 30 % siendo de tipo moderadamente escarpado.

Figura 2. Terreno irregular



4.2.5 Requerimientos de movilidad

A continuación, se presentan los criterios más importantes para la selección del diseño:

Estabilidad.

- Número y/o la geometría de los puntos de contacto: 3 puntos de contacto y geometría semicircular.

- El centro de gravedad: Su ubicación debe estar lo más cercano al suelo.
- Estabilidad estática/dinámica: Estabilidad postural del robot en posiciones estáticas de soporte de peso y estabilidad mientras se traslada por terrenos irregulares.
- La inclinación del terreno: Maniobrabilidad y adaptación por pendientes de hasta de hasta 30%.

Características de contacto.

- Punto de contacto/tamaño y forma de la trayectoria: Movimientos básicos, hacia adelante, hacia atrás, hacia la derecha y hacia la izquierda.
- Fricción: El prototipo debe tener un buen agarre para que sea estable y no se vuelque y a su vez no debe existir un gran gasto de energía.

4.2.6 Matriz de calidad (QFD)

Teniendo en cuenta los requerimientos y los correctos parámetros ingenieriles que ayuden a cumplir el objetivo de este proyecto se construyó en la tabla 1, una ponderación, calificando la relación existente, para poder realizar el diseño y la puesta en marcha del prototipo de robot móvil terrestre.

Tabla 1. Matriz de calidad

QFD/ PROTOTIPO ROBÓTICO MÓVIL TERRESTRE																									
Cliente/Diseñador	VALOR	Seguridad		Economía		Diseño		Materiales		Dimensiones		Velocidad de operación		Tiempo de trabajo		Manufactura		Navegación		Fácil montaje		Estabilidad		Ensamblaje	
Fácil mantenimiento	1	0	0	6	6	8	8	8	8	0	0	1	1	9	9	0	0	9	9	5	5	5	5	3	3
Tamaño	2	0	0	9	18	8	16	9	18	9	18	7	14	0	0	4	8	5	10	0	0	5	10	4	8
Velocidad	3	0	0	9	27	3	9	9	27	0	0	7	21	3	9	0	0	3	9	1	3	8	24	0	0
Bajo ruido	4	0	0	5	20	5	20	2	8	0	0	0	0	9	36	0	0	0	0	0	0	3	12	3	12
Estética	5	0	0	8	40	8	40	8	40	0	0	0	0	5	25	0	0	0	0	3	15	5	25	4	20
Duración de la batería	6	0	0	2	12	3	18	7	42	0	0	3	18	0	0	0	0	3	18	2	12	5	30	8	48
Distancia del control remoto	7	0	0	3	21	0	0	0	0	0	0	5	35	3	21	0	0	3	21	8	56	9	63	9	63
Bajo costo	8	0	0	5	40	1	8	8	64	0	0	2	16	3	24	0	0	3	24	0	0	9	72	0	0
Maniobrabilidad	9	0	0	0	0	4	36	2	18	6	54	9	81	5	45	7	63	5	45	0	0	9	81	5	45
Geometría	10	5	50	5	50	7	70	1	10	6	60	4	40	6	60	4	40	8	80	0	0	9	90	6	60
Grados de libertad	11	4	44	0	0	6	66	3	33	0	0	0	0	0	0	0	0	9	99	5	55	8	88	0	0
Movilidad	12	0	0	0	0	6	72	0	0	6	72	6	72	4	48	4	48	9	108	7	84	6	72	0	0
Adaptación al terreno	13	0	0	0	0	3	39	0	0	1	13	1	13	2	26	3	39	5	65	1	13	8	104	2	26
Evasión de obstáculos	14	2	28	0	0	5	70	0	0	6	84	9	126	2	28	3	42	5	70	2	28	9	126	0	0
Resistente	15	9	135	0	0	3	45	1	15	0	0	0	0	0	0	4	60	3	45	3	45	5	75	1	15
RESULTADO			257		234		517		283		301		437		331		300		603		316		877		300
ORDEN DE IMPORTANCIA			11		12		3		10		7		4		5		8		2		6		1		9

Tabla 2. Criterios importantes para el diseño del robot móvil.

QFD/ Prototipo Robot Móvil	VALO SEGÚN PRIORIDAD	PORCENTAJE
Estabilidad	877	28%
Navegación	603	20%
Diseño	517	17%
Velocidad de operación	437	14%
Tiempo de trabajo	331	11%
Fácil montaje	316	10%
TOTAL	3081	100%

En la tabla 2, se confirmó que las características más importantes para el diseño del prototipo son; la estabilidad, ya que se busca que su centro de gravedad esté lo más cercano al suelo, la navegación, debido a que se busca que sea capaz de moverse sin que exista volcadura.

Tabla 3. Selección del tipo de robot móvil a diseñar y construir.

QFD/ Prototipo Robot Móvil	VALOR	Robot móvil tipo patas		Robot móvil tipo oruga		Robot tipo ruedas	
Estabilidad	28%	9	2,52	7	1,96	7	1,96
Navegación	20%	8	1,6	6	1,2	4	0,8
Diseño	17%	9	1,53	7	1,19	2	0,34
Velocidad de operación	14%	8	1,12	9	1,26	8	1,12
Tiempo de trabajo	11%	7	0,77	7	0,77	7	0,77
Fácil montaje	10%	8	0,8	7	0,7	7	0,7
TOTAL			8,34		7,08		5,69
ORDEN DE SELECCIÓN		1		2		3	

Finalmente, en la tabla 3, se compararon los tres tipos de robots móviles, seleccionando el robot tipo patas, debido a una serie de contactos puntuales entre el robot y el suelo. Las principales ventajas de este tipo son: la capacidad de adaptación y la maniobrabilidad en terrenos irregulares.

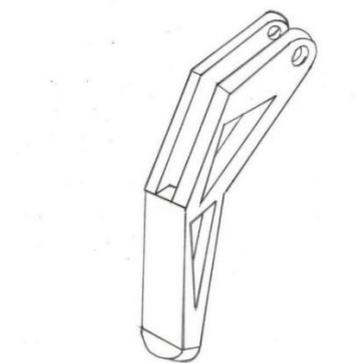
4.2.7 Diseño conceptual

Realizada la matriz QFD y obteniendo el robot tipo patas para diseñar y construir, debemos seleccionar el número de patas y debido a las condiciones del terreno donde se busca navegar este prototipo, consideramos dos alternativas para el diseño, un robot cuadrúpedo o un robot hexápodo, a continuación, presentamos unos bosquejos que nos ayudan a definir cómo será el prototipo:

4.2.7.1 Tibia

En la figura 4, presenta el bosquejo de la tibia, esta presenta algunos huecos con el propósito de mitigar su peso para que exista un equilibrio entre la estabilidad y se disminuya al máximo el consumo de potencia.

Figura 3. Bosquejo de tibia

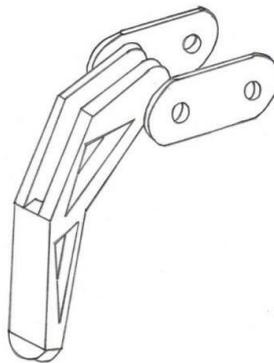


Las tibias son modulares, contando con seis unidades según el prototipo definitivo. Estas fueron diseñadas mediante el software de diseño SolidWorks y fabricadas mediante impresión 3D utilizando material PLA

4.2.7.2 Fémur

En la figura 5, se presenta un bosquejo del fémur, los fémures deben tener una cubierta curva, debido a que permite malear bien el servo-cable y de esta manera se puede añadir una guía o protector para el cable, además le da un toque estético. Los fémures también son modulares y se imprimen de la misma manera que las tibias.

Figura 4. Bosquejo del fémur.



4.2.7.3 Coxa

En la figura 6, se presenta un bosquejo de la coxa, también se puede llamar coxa- servo y este se debe a que en estos irán acoplados los servomotores. La figura 7, consiste en un bosquejo donde están ensamblados; la tibia, el fémur y la coxa. También son modulares y se manufacturan de la misma manera.

Figura 5. Bosquejo de la coxa.

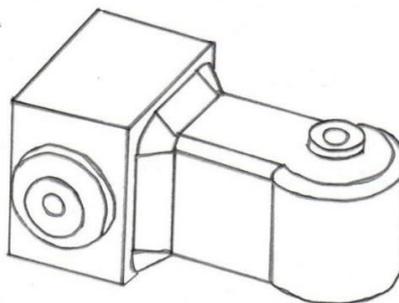
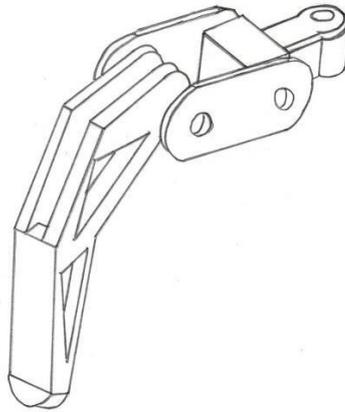


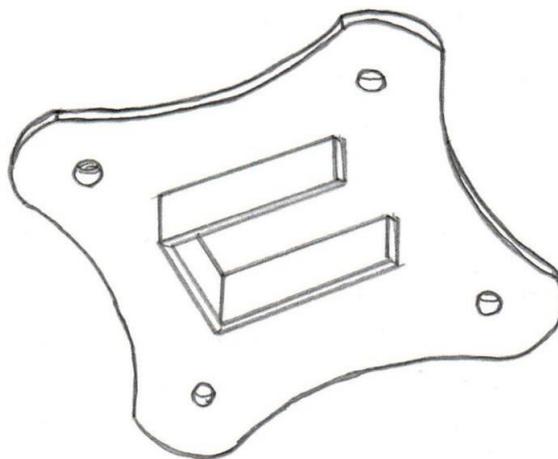
Figura 6. Ensamble de la tibia, el fémur y la coxa.



4.2.7.4 Cuerpo

En la figura 8, se presenta un bosquejo de la tapa del cuerpo, el cuerpo del hexápodo, en el cuerpo está ensamblada la batería y la placa de Arduino y se articula a las coxa-servos.

Figura 7. Cuerpo



5. METODOLOGÍA DE DISEÑO DEL HEXÁPODO

5.1 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

5.1.1 Definición de requerimientos

El objetivo primordial del proyecto es diseñar y construir un hexápodo robótico que pueda navegar sobre diferentes tipos de terreno, como arena, piedra o pasto. Los siguientes requerimientos fueron identificados para garantizar que el hexápodo pueda operar de manera efectiva en estas condiciones:

- **Capacidad de navegación en terreno irregular:** El hexápodo debe ser capaz de moverse de forma estable en terrenos con variadas inclinaciones, desde un 1% hasta un 30% sobre el nivel de la superficie.
- **Dimensiones y peso:** Las dimensiones máximas del hexápodo no deben exceder los 50 cm x 50 cm x 50 cm para garantizar su maniobrabilidad.

5.1.2 Establecimiento de criterios de diseño

Con los requerimientos identificados, se establecieron los siguientes criterios de diseño para guiar el desarrollo del hexápodo:

- **Estabilidad y movilidad:** Diseñar una estructura y un sistema de locomoción que permita al hexápodo mantener la estabilidad mientras se desplaza sobre terreno irregular.
- **Eficiencia energética:** Seleccionar y diseñar componentes eléctricos y mecánicos que operen de manera eficiente para maximizar la autonomía de la batería.
- **Facilidad de control y comunicación:** Implementar un sistema de control que permita una operación intuitiva y una comunicación confiable entre el operador y el hexápodo.

- **Modularidad y escalabilidad:** Diseñar con una perspectiva modular que permita futuras mejoras o adaptaciones del hexápodo para diferentes aplicaciones.
- **Costo-efectividad:** Seleccionar materiales y componentes que ofrezcan un equilibrio entre costo, durabilidad y rendimiento.
- **Facilidad de mantenimiento y reparación:** Diseñar el hexápodo de tal manera que permita un fácil acceso para mantenimiento y reparación de sus componentes.

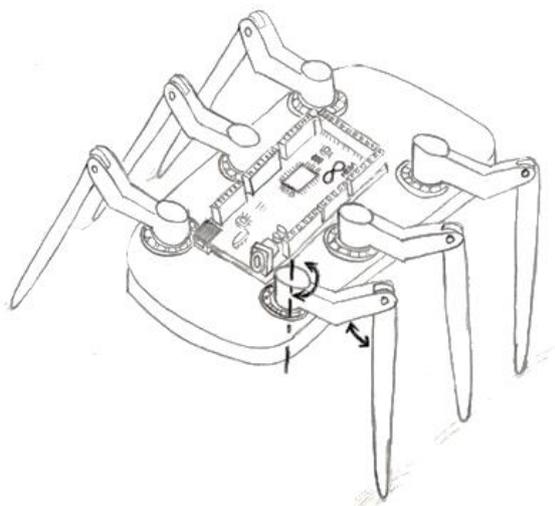
5.2 ALTERNATIVAS DE DISEÑO

5.2.1 Esbozos y bocetos preliminares

Con los requerimientos identificados, se establece los siguientes criterios de diseño para guiar el desarrollo del hexápodo.

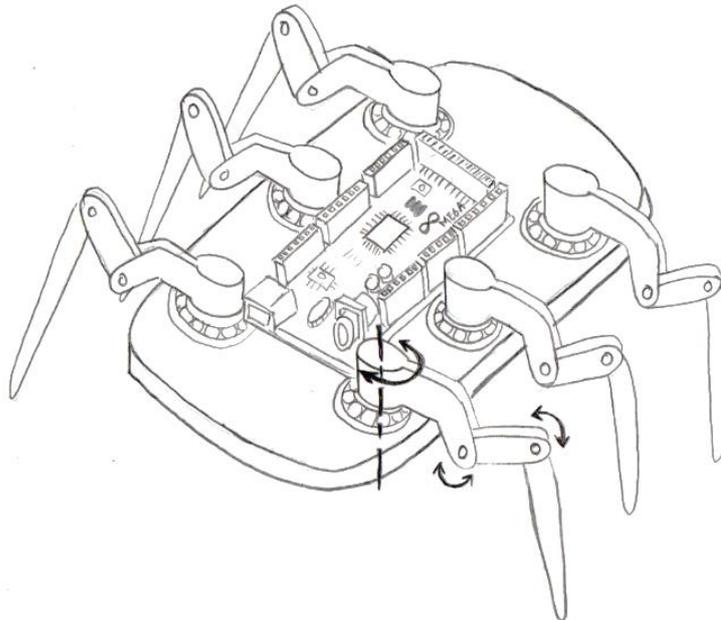
5.2.1.1 Croquis hexápodo dos grados de libertad:

Figura 8. Croquis en vista isométrica de hexápodo con 2 grados de libertad.



5.2.1.2 Croquis en vista isométrica de hexápodo tres grados de libertad:

Figura 9. Croquis en vista isométrica de hexápodo con 3 grados de libertad.



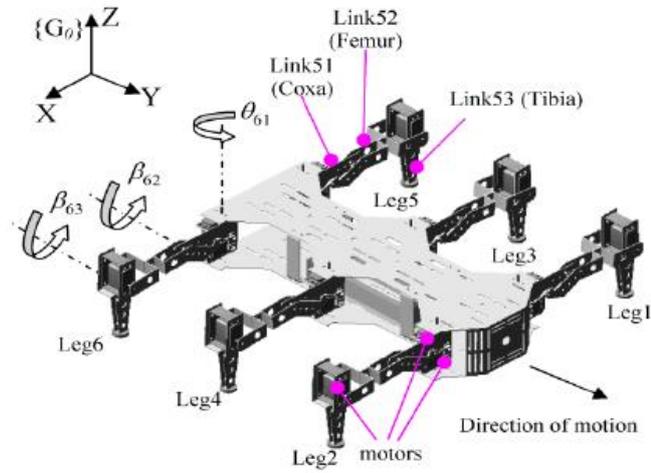
5.2.2 Modelado 3D de alternativas

El modelado 3D es una herramienta valiosa para visualizar y analizar las alternativas de diseño antes de proceder a la construcción física del hexápodo. Permite una evaluación detallada de las propuestas y facilita la construcción del diseño.

5.2.2.1 Uso de software CAD y CAE:

Para el modelado 3D, se utiliza software SolidWorks para la construcción de un modelo CAD del robot hexápodo, lo cual, permite dimensionar adecuadamente cada componente y visualizar la disposición general del robot como se muestra en la siguiente imagen.

Figura 10. Modelado 3D en CATIA para la concepción de diseño



Fuente: Mahapatra, A., Roy, SS., & Pratihari, D. (2013).

5.3 CÁLCULOS

5.3.1 Cálculos de resistencia y soporte carga

Una vez se definieron las características de la propuesta de diseño del hexápodo se realiza una estimación de su soporte de carga y resistencia. Se inicia realizando un esquema del aspecto general del cuerpo:

Figura 11. Aspecto general del cuerpo del hexápodo

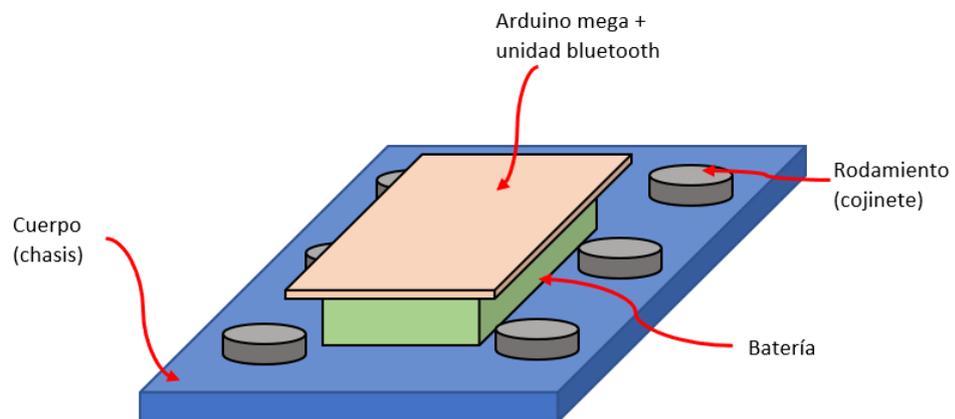
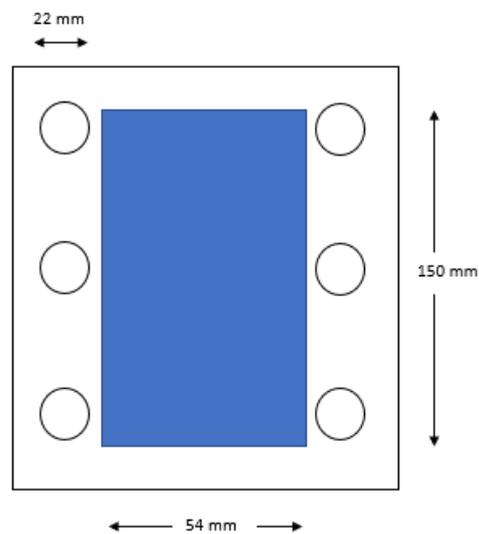
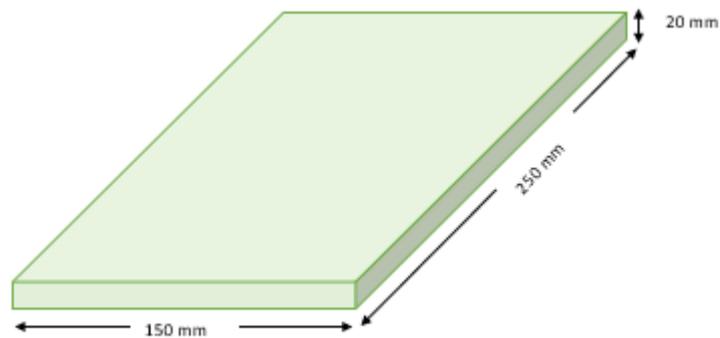


Figura 12. Dimensiones iniciales del hexápodo



Se le realiza una primera aproximación al cuerpo del hexápodo de tal manera que la batería, el Arduino mega, la unidad de bluetooth y demás componentes queden dentro del cuerpo, y se calcula su peso.

Figura 13. Boceto del cuerpo del hexápodo para cálculo de la masa



$$\rho = 1,24 \frac{g}{cm^3} \text{ densidad PLA}$$

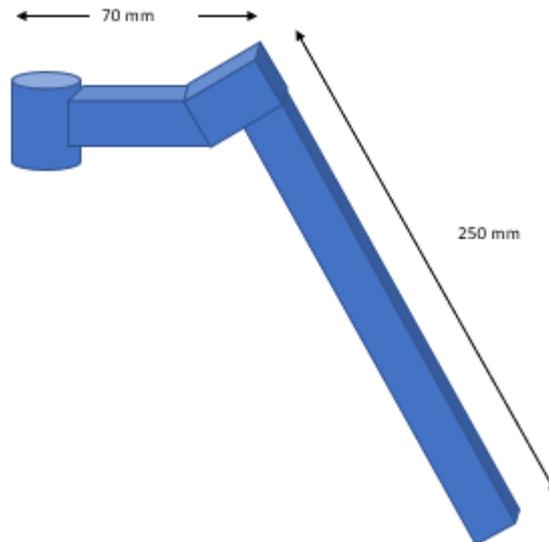
$$m = \rho * V [1]$$

$$m = 1,24 \frac{g}{cm^3} * 15cm * 25cm * 2 cm$$

$$m = 930 g$$

De acuerdo con el tipo de diseño seleccionado, se seleccionan patas con 3 grados de libertad, así:

Figura 14. Diseño de las patas



Como interesa solo tener una aproximación inicial del peso del hexápodo, se puede considerar a que cada pata es una barra de 320 mm de largo y sección transversal de 1cm^2 , y se obtiene:

$$m = \rho * V [1]$$

$$m = 1,24 \frac{g}{\text{cm}^3} * 32 \text{ cm} * 1\text{cm}^2$$

$$m = 39,68 \text{ g}$$

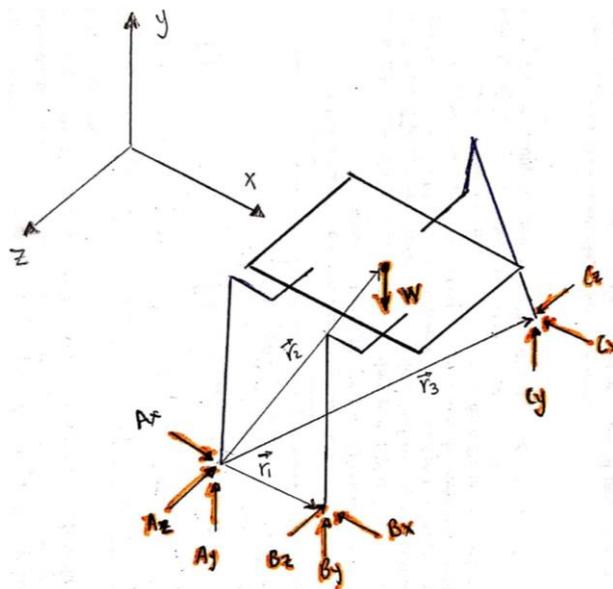
De esta forma se realiza una estimación del peso de la estructura:

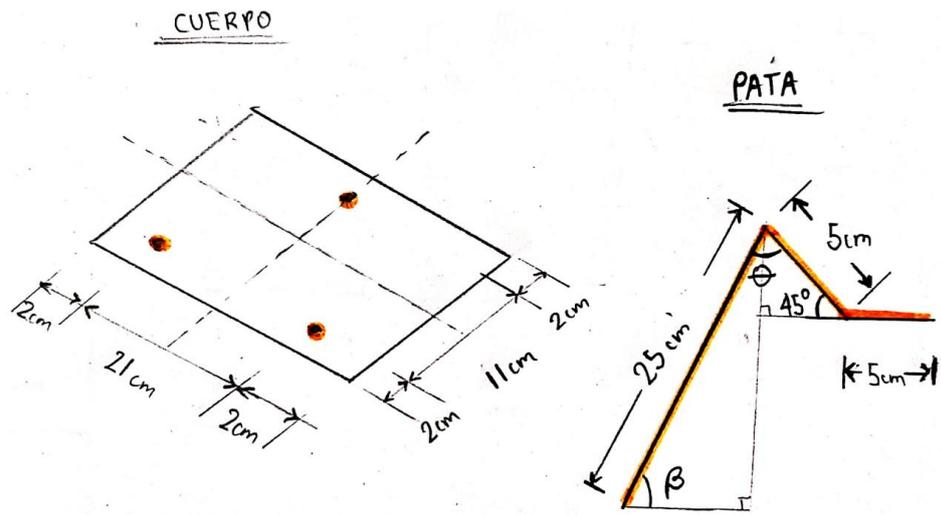
Tabla 4. Estimación del peso del hexápodo

Elemento	Peso unitario	Número de piezas	Peso total
Arduino	37 g	1	37 g
Unidad bluetooth	276 g	1	276 g
Batería	276 g	1	276 g
Rodamientos	13 g	6	78 g
Chasis	930 g	1	930 g
Patas	40 g	6	240 g
Total			1837 g

5.3.1.1 Estatica para 2 grados de libertad del cuerpo.

Figura 15. Diagrama de cuerpo libre hexápodo





Ángulos

$$\theta = 45 + 90 - \beta \quad [2]$$

$$\theta = 135 - \beta$$

Equilibrio

$$\sum F_x = 0$$

$$A_x - B_x - C_x = 0 \quad [3]$$

$$A_x = B_x = C_x = 0$$

$$\sum F_y = 0$$

$$A_y + B_y + C_y - W = 0 \quad [4]$$

$$\sum F_z = 0$$

$$C_z - B_z - A_z = 0 \quad [5]$$

$$B_z = A_z$$

Momentos en el punto A

$$\sum M_A = 0$$

$$M_1 + M_2 + M_3 = 0 \quad [6]$$

$$\vec{R}_1 = [0,21i + 0j + 0k]$$

$$\vec{R}_1 = [0,105i + (0,25 \sin \beta - 0,05 \sin 45)j - (0,25 \cos \beta + 0,05 \cos 45 + 0,05)k]$$

$$\vec{R}_3 = [0,105i + 0j - (2(0,25 \cos \beta + 0,05 \cos 45 + 0,05) + 0,11)k]$$

$$M_1 = \begin{bmatrix} i & j & k \\ 0,21 & 0 & 0 \\ -B_x & B_y & -B_z \end{bmatrix} = [0i - (-0,21B_z - 0)j + (0,21B_y - 0)k]$$

$$M_1 = [0i + 0,21B_zj + 0,21B_y]$$

$$M_2 = \begin{bmatrix} i & j & k \\ 0,105 & 0,25 \sin \beta - 0,05 \sin 45 & -(0,25 \cos \beta + 0,05 \cos 45 + 0,05) \\ 0 & -W & 0 \end{bmatrix}$$

$$M_2 = [(0 - (0,25 \cos \beta + 0,05 \cos 45 + 0,05)W)i - 0j + (-0,105W - 0)k]$$

$$M_2 = [-(0,25 \cos \beta + 0,05 \cos 45 + 0,05)W i - 0j - 0,105W k]$$

$$M_3 = \begin{bmatrix} i & j & k \\ 0,105 & 0 & -(2(0,25 \cos \beta + 0,05 \cos 45 + 0,05) + 0,11) \\ -C_x & C_y & C_z \end{bmatrix}$$

$$M_3 = [(0 - (-2(0,25 \cos \beta + 0,05 \cos 45 + 0,05) + 0,11))C_y]i$$

$$- (0,105C_z - ((2(0,25 \cos \beta + 0,05 \cos 45 + 0,05) + 0,11)C_x))j$$

$$+ (0,105C_y - 0)k]$$

$$M_3 = [((2(0,25 \cos \beta + 0,05 \cos 45 + 0,05) + 0,11))C_yi - (0,105C_z)j$$

$$+ (0,105C_y)k]$$

Componente i:

$$-(0,25 \cos \beta + 0,05 \cos 45 + 0,05)W + ((2(0,25 \cos \beta + 0,05 \cos 45 + 0,05) + 0,11))C_y = 0 \quad [7]$$

Componente j:

$$0,21B_z - 0,105C_z = 0 \quad [8]$$

Componente k:

$$0,21B_y - 0,105W + 0,105C_y = 0 \quad [9]$$

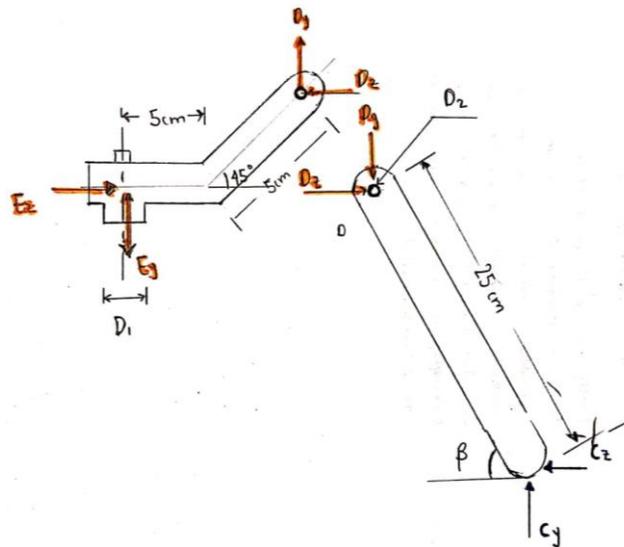
Para realizar una estimación del ángulo beta β inspeccione el Anexo 1, en la tabla se muestran valores de las reacciones en las patas en función de distintos

valores de beta desde 0° a 90°: no es posible encontrar una única solución porque el ángulo beta β es una variable independiente y según el valor que tome, se obtienen distintos valores en las reacciones de beta.

5.3.1.2 Estática para 2 grados de libertad de la pata.

A continuación se realiza la estática en un plano bi-dimensional las patas:

Figura 16. Diagrama de cuerpo libre 2D en patas delanteras



Se realiza torque en el punto D de la barra CD:

$$C_y = 7,179 \text{ N}$$

$$C_z = 0,012 \text{ N}$$

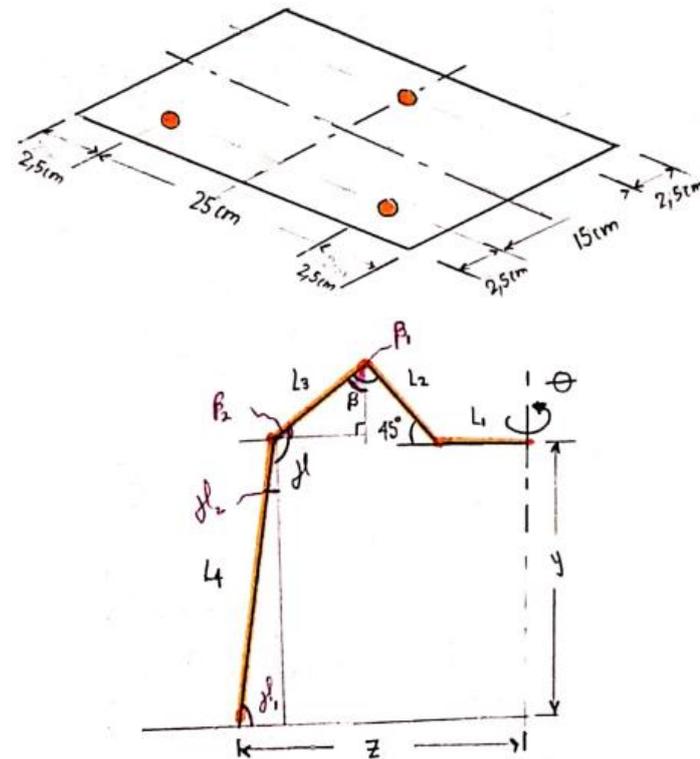
A continuación, se tabula más finamente en términos de beta β hasta encontrar el valor de beta que iguala o se aproxima más finamente a los valores de las reacciones C_y e C_z . Para esto, inspeccione el anexo 2.

En este punto, se observa por inspección y ensayo error que el ángulo de $\beta = 75^\circ$ se aproxima a los resultados de las reacciones C_y e C_z que se hallaron en la estática anterior.

5.3.1.2 Estática para 3 grados de libertad

Se continua con la estática del hexápodo de 3 grados de libertad:

Figura 17. Diagrama de cuerpo libre para estática 3D



Para nuestro modelo las dimensiones que caracterizan la pata, según el gráfico, son:

$$L_1 = 5\text{cm}, L_2 = 5\text{cm}, L_3 = 7\text{cm}, L_4 = 15\text{cm}$$

Ahora bien, de la geometría se obtiene:

De L_2 y L_3 :

$$\begin{aligned}\beta_1 &= \beta - 45 \\ \beta_2 &= 90 - \beta_1 \therefore \beta_2 = 90 - \beta + 45 \\ \beta_2 &= 135 - \beta \quad [10]\end{aligned}$$

De L_3 y L_4 :

$$\begin{aligned}\gamma &= 90 + \beta_2 + \gamma_2 \\ \gamma_2 &= \gamma - 90 - \beta_2 \quad [11]\end{aligned}$$

Al sustituir la primera en la segunda:

$$\begin{aligned}\gamma_2 &= \gamma - 90 - 135 - \beta \\ \gamma_2 &= \gamma - 225 + \beta \quad [12]\end{aligned}$$

De L_4 :

$$\gamma_1 = 90 - \gamma_2 \quad [13]$$

De la ecuación anterior sustituimos en esta:

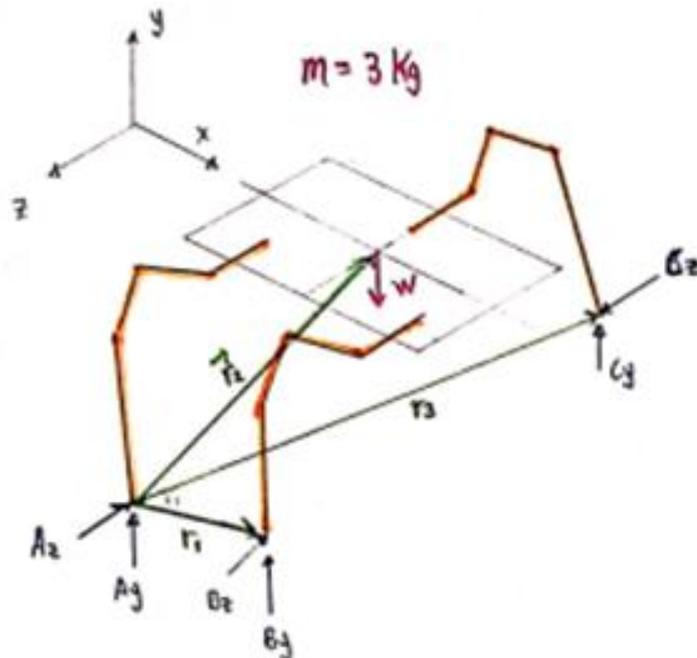
$$\begin{aligned}\gamma_1 &= 90 - \gamma + 225 - \beta \\ \gamma_1 &= 315 - \gamma - \beta \quad [14]\end{aligned}$$

Por lo tanto, al escribir las longitudes de z e y en términos de las semilongitudes de la pata nos queda:

$$\begin{aligned}z &= L_1 + L_2 \cos 45 + L_3 \cos \beta_2 + L_4 \cos \gamma_1 \quad [15] \\ y &= -L_2 \sin 45 + L_3 \sin \beta_2 + L_4 \sin \gamma_1 \quad [16]\end{aligned}$$

Para realizar la estática en 3D tenemos:

Figura 18. Diagrama de cuerpo libre 3D para el cuerpo



Iniciamos por la formulación de los vectores:

$$\vec{r}_1 = [25i + 0j + 0k]$$

$$\vec{r}_2 = [12,5i + yj - (z + 7,5)k]$$

$$\vec{r}_3 = [12,5i + 0j - (z + 15)k]$$

$$\vec{A} = [0i + A_yj - A_zk]$$

$$\vec{B} = [0i + B_yj - B_zk]$$

$$\vec{C} = [0i + C_yj + C_zk]$$

$$\vec{W} = [0i + mj + C_zk]$$

Aplicamos sumatorias de fuerzas dado que el objeto debe estar en equilibrio:

$$\sum F_y = 0$$

$$A_y + B_y + C_y - m = 0 \quad [17]$$

$$\sum F_z = 0$$

$$C_z - A_z - B_z = 0 \quad [18]$$

Aplicamos momentos para la primera pata (lado derecho):

$$\vec{r}_1 \times \vec{B} = \begin{bmatrix} i & j & k \\ 25 & 0 & 0 \\ 0 & -m & 0 \end{bmatrix}$$

$$\vec{r}_1 \times \vec{B} = [0i - (-25B_z - 0)j - (25B_y)k]$$

$$\vec{r}_1 \times \vec{B} = 0i + 25B_zj + 25B_yk \quad [19]$$

Para el peso:

$$\vec{r}_1 \times \vec{W} = \begin{bmatrix} i & j & k \\ 12,5 & y & -(z + 7,5) \\ 0 & -m & 0 \end{bmatrix}$$

$$\vec{r}_1 \times \vec{W} = -(z + 7,5)(m)i - 0j - (12,5)(m)k$$

$$\vec{r}_1 \times \vec{W} = -(z + 7,5)mi - 0j - 12,5mk \quad [20]$$

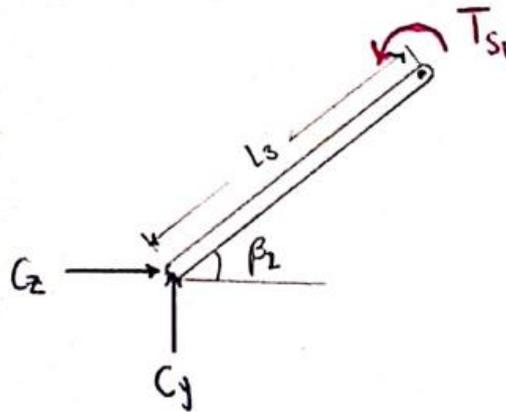
Para la pata del lado izquierdo:

$$\vec{r}_1 \times \vec{C} = \begin{bmatrix} i & j & k \\ 12,5 & 0 & -(2z + 15) \\ 0 & C_y & C_z \end{bmatrix}$$

$$\vec{r}_1 \times \vec{C} = (2z + 15)C_y i - 12,5C_zj + 12,5C_yk \quad [21]$$

Para el servo 2:

Figura 19. Diagrama de cuerpo libre para el Servo 2

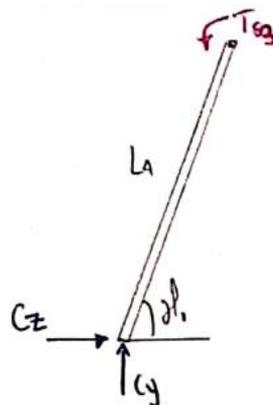


Estática para el servo 2:

$$T_{s1} = C_z L_3 \sin \beta_2 - C_y L_3 \cos \beta_2 \quad [22]$$

Para el servo 3:

Figura 20. Diagrama de cuerpo libre para el servo 3



$$T_{s3} = C_z L_4 \sin \gamma_1 - C_y L_4 \cos \gamma_1 \quad [23]$$

Tras inspeccionar, la pata crítica es la pata “C”, los cálculos lo demuestran, entonces se trabaja con ella para ver los torques que soportan los servos variando los ángulos β y γ de los servos 2 y 3 respectivamente y así poder determinar una posición adecuada. Estas tabulaciones se realizaron en los Anexos desde el 3 hasta el 12, puede consultarlos al final de este documento.

Para los angulos de $\beta = 75$ y $\gamma = 140$ los servos tiene un torque muy parecido, entre 5 y 6 Kg*cm, además de que el cuerpo del hexapodo va a estar mas de 20 cm por encima del suelo. Con este rango de torques se selecciona el servomotor adecuado:

Figura 21. Servo según cálculos estática



Características

- Modelo: MG996R
- Torque: 9.4kg/cm (4.8V), 11kg/cm (6V)
- Voltaje de operación: 4.8 – 7.2V
- Velocidad de Operación (4.8V sin carga): 0.2 seg / 60 grados
- Velocidad de Operación (6V sin carga): 0.16 seg / 60 grados
- Tamaño: 40,6 x 19,8 x 42,9 mm
- Peso: 55g
- Plug: JR, FUTABA general
- Ángulo de Rotación: 180° máximo
- Material engranajes: Metal
- Pulso ciclo: 20mS
- Ancho del pulso: entre 600uS y 2400uS
- Rango de Temperatura: -30 a +60 °C

Con este valor de torque conocido se calcula entonces el diametro de los pasadores de las juntas sometidas a este valor de torque.

Para el calculo de el diametro D1 se considera un factor de seguridad de 3:

$$FS = \frac{\tau_u}{\tau_{perm}}$$

$$\tau_{perm} = \frac{\tau_u}{FS} = \frac{27 MPa}{3} = 9 Mpa$$

$$\tau_{perm} = \frac{F}{A} = \frac{C_z}{\frac{\pi}{4} D_1^2} [24]$$

$$\therefore 9 * 10^6 Pa = \frac{0,02 N}{\frac{\pi}{4} D_1^2}$$

$$D_1 = 5,3 * 10^{-5} m$$

Para el calculo de el diametro D2:

$$C = \sqrt{7,179^2 + 0,012^2} = 7,18 N$$

$$\tau_{perm} = \frac{F}{A} = \frac{C}{\frac{\pi}{4} D_2^2}$$

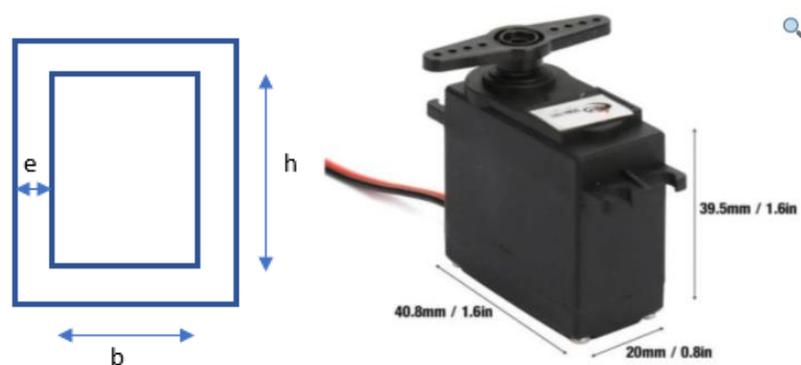
$$\therefore 9 * 10^6 Pa = \frac{7,2 N}{\frac{\pi}{4} D_1^2}$$

$$D_2 = 1 * 10^{-3} m$$

5.3.1.3 Cálculo de la sección transversal de las patas

Se necesita que el servomotor quede adentro de la barra

Figura 22. Representación sección transversal



$$b = 20 mm ; h = 39mm$$

Para un factor de seguridad de 3, se tiene:

$$F_s = \frac{\sigma_u}{\sigma_{perm}} [25]$$

$$\sigma_{perm} = \frac{\sigma_u}{F_s} = \frac{27 \text{ MPa}}{3} = 9 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{perm} = \frac{F}{A} = \frac{C}{(b + 2e)(h + 2e) - (bh)}$$

$$9 * 10^6 \text{ Pa} = \frac{7,18 \text{ N}}{(0,02 \text{ m} + 2e)(0,039 \text{ m} + 2e) - (0,02 \text{ m} * 0,039 \text{ m})}$$

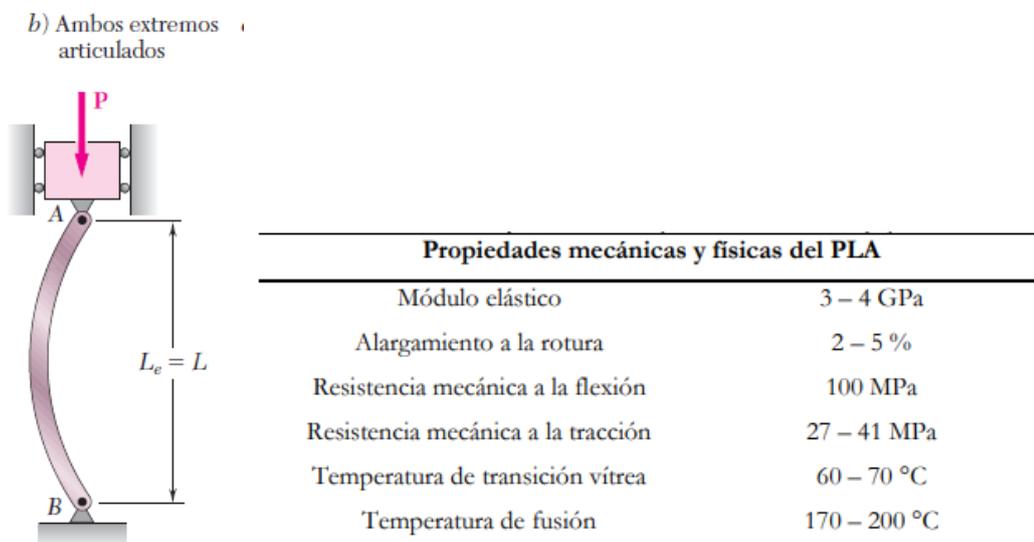
$$\therefore e = 7 * 10^{-6} \text{ m}$$

Por lo tanto, las medidas que seleccionamos de 1cm x 1cm están muy por encima de un factor de seguridad de 3, y se puede considerar muy seguro el espesor del perfil transversal.

Para que no se pandee la barra de la pata que mide 25 cm, se emplea la fórmula de esfuerzo crítico que relacione el pandeo de una barra con ambos extremos articulados:

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{L_e}{r}\right)^2}; P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_e^2} [26]$$

Figura 23. Representación del pandeo en barra doblemente articulada



Se emplean las fórmulas para verificar si ocurre pandeo o no:

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{L_e}{r}\right)^2} [27]$$

$$E = 3 * 10^9 Pa$$

$$L_e = 0,25m$$

$$I = A * r^2 [28]$$

$$\therefore r = \sqrt{\frac{I}{A}} = \sqrt{\frac{\frac{1}{12}(0,021)(0,040)^3 - \frac{1}{12}(0,020)(0,039)^3}{(0,021)(0,040) - (0,020)(0,039)}}$$

$$r = 0,0148$$

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2(3 * 10^9)}{\left(\frac{0,175}{0,0148}\right)^2} = 103,8 * 10^6 Pa$$

$$\sigma_{cr} = \frac{P_{cr}}{A}$$

$$P_{cr} = 211,8 * 10^6 Pa * (0,021)(0,040) - (0,020)(0,039)$$

$$P_{cr} = 6226 N$$

$$P_{cr} \gg C$$

Por lo tanto, se observa que la carga para que ocurra pandeo está muy alejada de la carga y no existe riesgo cercano de que ocurra pandeo en las patas. Esto se debe al buen perfil transversal de las patas seleccionadas.

5.3.2 Cálculos eléctricos y de autonomía de la batería

En esta sección, se llevarán a cabo cálculos críticos para asegurar que el sistema eléctrico del hexápodo esté bien diseñado y que la batería seleccionada pueda proporcionar la energía necesaria para una operación prolongada.

5.3.2.1 Consumo de los componentes

- **Servomotores (MG996R):**
 - Se tiene un total de 18 servomotores, tres por cada una de las seis patas del hexápodo.
 - Cada servomotor MG996R puede consumir hasta un máximo de 900 mA durante su operación.
 - Consumo total de los servomotores = $18 \times 900 \text{ mA} = 16200 \text{ mA}$
 $18 \times 900 \text{ mA} = 16200 \text{ mA} = 16.2 \text{ A}$.
- **Microcontrolador (Arduino MEGA 2560):**
 - El Arduino MEGA 2560 tiene un consumo típico de alrededor de 70 mA.
- **Módulo Bluetooth (HC-05):**
 - El módulo Bluetooth HC-05 tiene un consumo típico de alrededor de 30-40 mA durante la transmisión de datos.
- **Convertor DC-DC Tipo Buck Ajustable:**
 - Estos convertidores tienen una eficiencia típica del 85-90%. Suponiendo una eficiencia del 85%, el consumo de energía adicional debido a la conversión sería una consideración importante

5.3.2.2 Cálculos de consumo de energía total

- Sumando todos los consumos, obtenemos un consumo total en amperios:

$$\text{Consumo total} = 16.2 \text{ A} + 0.07 \text{ A} + 0.04 \text{ A} = 16.31 \text{ A}$$

- Además, se debe considerar la eficiencia del convertidor DC-DC:

$$\text{Consumo total ajustado} = 16.31 A \cdot 0.85 = 19.19 A$$

5.3.2.3 Cálculos de Autonomía de la Batería

- La batería seleccionada es una LIPO GOLDBAT 6200mAh (o 6.2 Ah) y 7.4V.
- Para calcular la autonomía de la batería, se utiliza la fórmula:

$$\text{Autonomía (horas)} = \frac{\text{Capacidad de la batería(Ah)}}{\text{Consumo total ajustado(A)}}$$

Al sustituir los valores:

$$\text{Autonomía (horas)} = \frac{6.2Ah}{19.9A} \approx 0.32horas$$

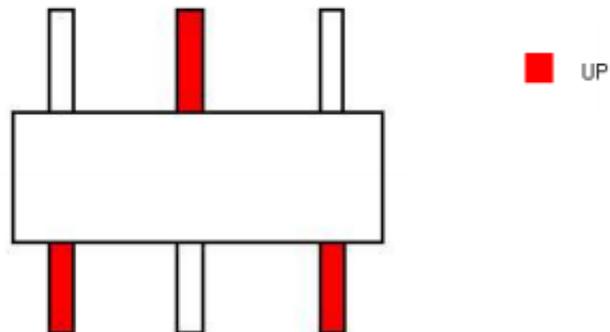
Esta autonomía proporciona una estimación del tiempo que el hexápodo puede operar continuamente con una carga completa de la batería. Los cálculos indican que, con la configuración actual, el hexápodo tendría una autonomía de aproximadamente 19 minutos.

5.3.3 Cálculos de movimientos y dinámica

El robot mantiene constantemente tres de sus patas en contacto con la superficie del suelo, a través del movimiento trípede, estas se mueven hacia atrás para impulsar el robot hacia adelante, mientras que las que están en el aire buscan la posición adecuada hacia adelante para después poder impulsar el robot¹⁶.

¹⁶ Sorli Martínez de Oraa, N., & Fernández Gómez, P. (2003). Robot Hexápodo. Trabajo de grado. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/185132/40180-3452.pdf>

Figura 24. Representación visual de patas activas para el movimiento trípode



Fuente: SORLI MARTINEZ DE ORAA, Nestor y FERNÁNDEZ GÓMEZ, Pedro., 2003.

El hexápodo pasa de cero a una velocidad de medio metro por segundo en un tiempo de 1 seg y el peso del cuerpo del hexápodo va a ser de 3 Kg

5.3.3.1 Selección de los servomotores:

Tras emplear como insumos los datos de potencia requeridos y las dimensiones permitidas para el hexápodo, se selecciona el servomotor: (ref: MG996R).

Sus características son:

- Voltaje de entrada: 4.8 a 7.2 VDC
- Corriente de consumo: 900 mA
- Tipo de piñonera: Metálica
- Rango de rotación: 180°
- Ancho de banda muerta: 5 μ s
- Velocidad de operación: 0.17 s /60° (4.8V) 0.14 s /60° (6.0V)
- Torque: 9.4 Kg/cm (4.8V) 11 Kg/cm (6.0V)
- Temperatura de trabajo: -30° C a 60°C

Figura 25. Servomotor seleccionado



Fuente: Didácticas electrónicas. (s.f.).

6. DISEÑO DEFINITIVO Y FABRICACIÓN

Este capítulo describe los métodos y materiales empleados en el diseño y construcción del hexápodo, detallando los componentes, software y procesos de ensamblaje.

6.1 DISEÑO DEL HEXÁPODO

Para la construcción final del hexápodo, se procede inicialmente con la construcción de un prototipo funcional basado en el aseguramiento de los movimientos a partir de la electrónica final definida en el diseño y sus partes articuladas en material de balsa, esto con el objetivo de validar su electrónica, dinámica y programación, el prototipo descrito se puede observar en la figura 30. Posterior a la validación de estas funcionalidades se procedió con la impresión de las partes estructurales y articulaciones móviles con su respectivo ensamblaje mediante la técnica de deposición fundida en una impresora 3D, con los parámetros descritos en la figura 31. Para consultar los isométricos de los modelos CAD, impresos en 3D diríjase al anexo 13. Las especificaciones finales del diseño, tanto en electrónica, programación, dinámica y tamaño se resumen a continuación.

Figura 26. Prototipo inicial del sistema motriz del hexápodo



Figura 27. Parámetros de impresión de las piezas

Profile Standard Quality - 0.2mm ★ ▼

🔍 Search settings ☰

Quality ▼

Layer Height 🔗 ↺ mm

Walls ▼

Wall Thickness mm

Wall Line Count

Horizontal Expansion ↺ mm

Top/Bottom ▼

Top/Bottom Thickness mm

Top Thickness mm

Top Layers

Bottom Thickness mm

Bottom Layers

Infill ▼

Infill Density ↺ %

Infill Pattern ▼

Material ▼

Printing Temperature °C

Build Plate Temperature 🔗 °C

Speed ⓘ ▼

Print Speed ↺ mm/s

Travel <

6.1.1 Especificaciones Generales

- Dimensiones del cuerpo: 15cm x 25cm x 2cm
- Peso total: 1837 g
- Material: PLA con una densidad de 1,24 g/cm³

6.1.2 Componentes

- Sistema eléctrico (cerebro):
 - Arduino Mega
 - Batería de litio polímero 6000mAh 7,4 V (148mm x 48mm x 25mm, 276 g)
 - Unidad de Bluetooth para control remoto vía móvil
 - Cables para conexiones
- Sistema mecánico:
 - Servomotores: MG996R
 - Estructura: cuerpo principal donde se aloja el sistema eléctrico y las patas.
 - Rodamientos: 6 unidades (13g cada uno)

6.2 PROCESO DE CONSTRUCCIÓN

6.2.1 Ensamblaje de la estructura

El cuerpo del hexápodo se diseña para alojar todos los componentes eléctricos, incluyendo la batería, el Arduino Mega y la unidad de Bluetooth. Las dimensiones se establecen para garantizar un ajuste adecuado de todos estos componentes.

6.2.2 Instalación de actuadores y sensores

Se instalan servomotores en las articulaciones de las patas para proporcionar movimiento. Estos servomotores se seleccionan basándose en cálculos estáticos y se recomienda el modelo MG996R. Además, se incorporan rodamientos para reducir la fricción y evitar sobrecargar los servomotores.

6.3 SOFTWARE Y PROGRAMACIÓN

6.3.1 Software de Control

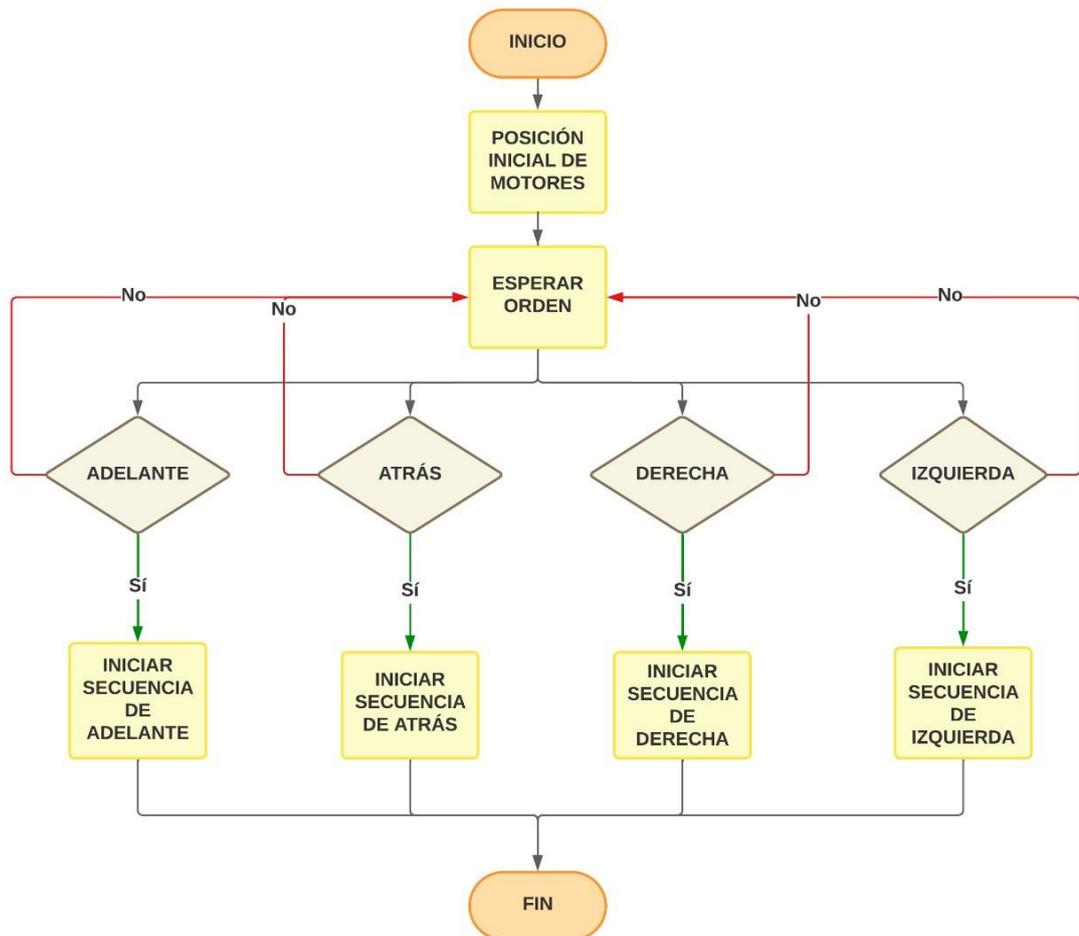
El control del hexápodo se realiza a través de un Arduino Mega, utilizando una unidad de Bluetooth para permitir el control remoto desde un dispositivo móvil.

6.3.2 Algoritmos de Movimiento

El hexápodo utiliza un movimiento de trípede, donde siempre mantiene tres patas en el suelo. Las patas en el suelo se mueven hacia atrás para impulsar el robot hacia adelante, mientras que las patas en el aire buscan la posición adecuada

hacia adelante para luego impulsar el robot. La figura 32 esquematiza el diagrama de lógica y programación.

Figura 28. Diagrama de programación



6.4 Pruebas y Ajustes

6.4.1 Pruebas de Funcionamiento

Se realizan pruebas para verificar el correcto funcionamiento del hexápodo, evaluando su capacidad para moverse de manera efectiva y responder a los comandos enviados desde el dispositivo móvil.

6.4.2 Ajustes

Basándose en los resultados de las pruebas de funcionamiento, se realizan ajustes. Es importante determinar la posición inicial del hexápodo, ya sea con las patas cerradas levantándose desde el suelo o en una posición sugerida con los ángulos de los servos.

6.5 OBSERVACIONES SOBRE LA METODOLOGÍA EMPLEADA

El diseño y construcción del hexápodo implicó la selección cuidadosa de materiales y componentes, así como la implementación de algoritmos de movimiento específicos. El proceso de ensamblaje garantiza que todos los componentes se integren de manera efectiva, y las pruebas determinan cualquier ajuste necesario para garantizar su funcionamiento.

7. PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DEL HEXÁPODO

La primera prueba realizada se refiere a la velocidad promedio que tiene el hexápodo, evaluada en diferentes terrenos con el objetivo de determinar su valor promedio y si es estadísticamente significativo o no su valor en cada terreno, es decir, si la velocidad promedio de marcha esta influenciada por el terreno por donde se traslada. Para la estimación de esta medida se abre marcha al robot sobre arena, pasto y una superficie con piedras (pequeños obstáculos), camina en línea recta por 1 metro y se registra el tiempo, en segundos, que tarda en realizar ese recorrido, con sus respectivas repeticiones en cada superficie que nos permitan determinar desviaciones estándar y promedios, los resultados de esta prueba se presentan en la tabla 5.

Tabla 5. Prueba de medición de distancia 1 metro.

<i>Arena</i>	<i>Pasto</i>	<i>Piedras</i>
22.34s	21.82s	22.97s
21.46s	22.78s	22.10s
22.15s	21.97s	22.53s
23.00s	21.63s	22.24s
21.72s	22.39s	22.82s

Figura 2930. Prueba del hexápodo en arena



Figura 3132. Prueba del hexápodo en pasto y en piedras



Las siguientes pruebas se realizaron en los mismos tres terrenos y buscaron evaluar el desempeño de giro del hexápodo, con giros de 90° y 180° respectivamente, los resultados de estas pruebas se presentan en las tablas 6 y 7.

Tabla 6. Prueba de rotación de 180 grados

<i>Arena</i>	<i>Pasto</i>	<i>Piedra</i>
14.22s	13.54s	14.87s
13.71s	14.92s	13.29s
14.05s	13.68s	14.43s
14.96s	13.35s	14.16s
13.77s	14.09s	14.68s

Tabla 7. Prueba de rotación de 90 grados

<i>Arena</i>	<i>Pasto</i>	<i>Piedra</i>
9.12s	10.25s	8.63s
8.57s	10.84s	9.34s
10.01s	9.68s	8.91s
9.79s	8.94s	10.50s
8.33s	10.12s	9.22s

Por último, y sobre los mismos terrenos, se evalúa la linealidad del robot, es decir, que le resulta a caminar sobre una línea recta, para ello se dispone de una guía horizontal sobre el suelo, con un tamaño definido de 1 m, se pone en marcha el hexápodo y se verifica la desviación sobre la línea de marcha tomando como referencia una de las 6 extremidades, los resultados de esta fase se presentan en la tabla 8.

Tabla 8. Distancia de separación al suelo

<i>Arena</i>	<i>Pasto</i>	<i>Piedra</i>
12cm	13cm	11cm
14cm	10cm	15cm
11cm	12cm	13cm
15cm	10cm	12cm
13cm	11cm	14cm

Una vez recolectados se realiza un análisis de datos y un ANOVA para determinar los valores de desempeño e influencia de estos.

8. ANÁLISIS DE DESEMPEÑO DEL HEXÁPODO

8.1. ESTADÍSTICAS BÁSICAS:

8.1.1 Prueba de medición de locomoción distancia 1 metro:

- **Arena:**
 - Media: 22.134s
 - Mediana: 22.15s
 - Desviación estándar: 0.533s
 - Mínimo: 21.46s
 - Máximo: 23.00s
- **Pasto:**
 - Media: 22.118s
 - Mediana: 21.97s
 - Desviación estándar: 0.415s
 - Mínimo: 21.63s
 - Máximo: 22.78s
- **Piedras:**
 - Media: 22.532s
 - Mediana: 22.53s
 - Desviación estándar: 0.331s
 - Mínimo: 22.10s
 - Máximo: 22.97s

8.1.2 Prueba de rotación de 180 grados:

- **Arena:**
 - Media: 14.142s
 - Mediana: 14.05s
 - Desviación estándar: 0.449s
 - Mínimo: 13.71s
 - Máximo: 14.96s

- **Pasto:**
 - Media: 13.916s
 - Mediana: 13.68s
 - Desviación estándar: 0.558s
 - Mínimo: 13.35s
 - Máximo: 14.92s
- **Piedras:**
 - Media: 14.286s
 - Mediana: 14.43s
 - Desviación estándar: 0.552s
 - Mínimo: 13.29s
 - Máximo: 14.87s

8.1.3 Prueba de rotación de 90 grados:

- **Arena:**
 - Media: 9.164s
 - Mediana: 9.12s
 - Desviación estándar: 0.657s
 - Mínimo: 8.33s
 - Máximo: 10.01s
- **Pasto:**
 - Media: 9.966s
 - Mediana: 10.12s
 - Desviación estándar: 0.633s
 - Mínimo: 8.94s
 - Máximo: 10.84s
- **Piedras:**
 - Media: 9.32s
 - Mediana: 9.22s
 - Desviación estándar: 0.640s
 - Mínimo: 8.63s
 - Máximo: 10.50s

8.2 ANÁLISIS ANOVA:

El análisis de varianza (ANOVA) es una técnica estadística que se utiliza para examinar las diferencias entre las medias de tres o más grupos. En este caso, queremos determinar si hay diferencias significativas en los tiempos de locomoción y rotación en las tres superficies (arena, pasto y piedras).

Se realizó un ANOVA para cada una de las pruebas:

1. Locomoción a 1 metro
2. Rotación de 180 grados
3. Rotación de 90 grados

Si el resultado del ANOVA (valor p) es menor que un nivel de significancia típico (como 0.05), entonces podemos concluir que hay diferencias significativas en las medias de los grupos.

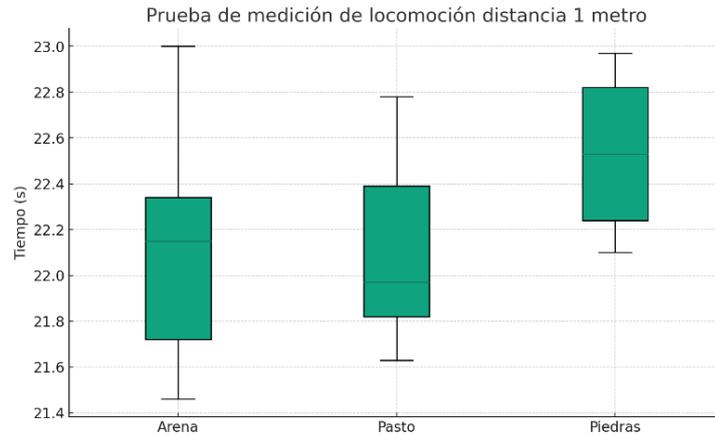
- **Prueba de medición de locomoción distancia 1 metro:**

Valor F : 1.1679

Valor p : 0.3440

Dado que el valor p es mayor que 0.05, no hay evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula. Esto significa que no hay diferencias significativas en los tiempos de locomoción entre las tres superficies.

Figura 3133. Prueba de medición de locomoción d=1m



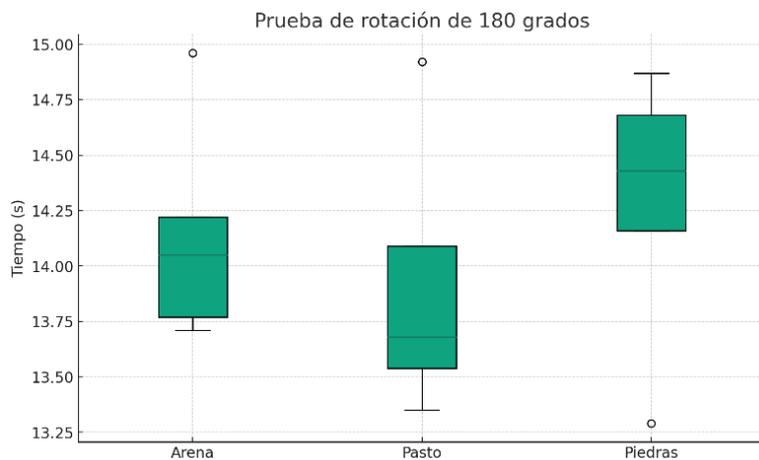
- **Prueba de rotación de 180 grados:**

Valor F : 0.5104

Valor p : 0.6127

De nuevo, dado que el valor p es mayor que 0.05, no hay evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula. Esto indica que no hay diferencias significativas en los tiempos de rotación de 180 grados entre las tres superficies.

Figura 3234. Prueba de rotación de 180 grados:



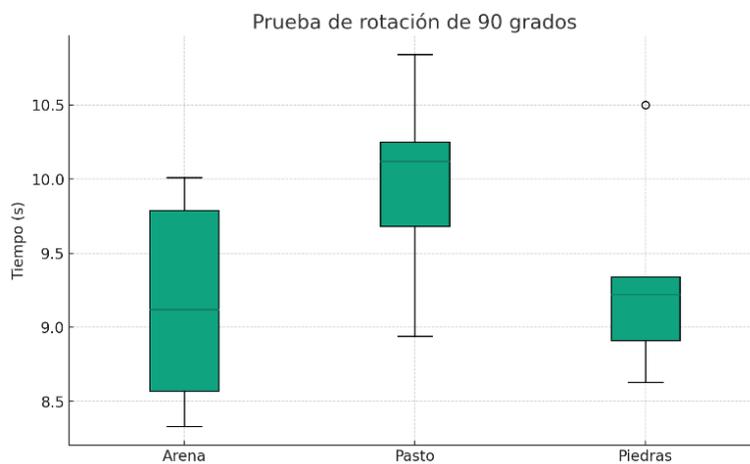
- **Prueba de rotación de 90 grados:**

Valor F : 1.7476

Valor p : 0.2157

Nuevamente, dado que el valor p es mayor que 0.05, no hay evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula. Esto indica que no hay diferencias significativas en los tiempos de rotación de 90 grados entre las tres superficies.

Figura 3335. Prueba de rotación de 90 grados:



8.3 CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS DE DESEMPEÑO

- Los tiempos de locomoción son bastante consistentes en las tres superficies, con una media alrededor de 22 segundos, lo que implica una velocidad media de 4.55 cm/s.
- La superficie de piedras presenta un tiempo medio ligeramente mayor que las otras dos superficies.

- La variabilidad (desviación estándar) es similar en las tres superficies, lo que indica que el hexápodo se desempeña de manera similar en las diferentes superficies en cuanto a locomoción.
- El hexápodo tiene un desempeño bastante consistente en las tres superficies en términos de locomoción y rotación. Sin embargo, hay ligeras diferencias en el desempeño según la superficie, lo que podría ser el resultado de las características de tracción y resistencia de cada superficie.
- En todas las pruebas ANOVA, el valor p fue mayor que 0.05, lo que indica que no hay diferencias significativas en los tiempos de las pruebas entre las tres superficies.
- Los gráficos de caja ofrecen una representación visual clara de la distribución de los tiempos en cada superficie y evidencian la similitud en el desempeño del hexápodo en las diferentes superficies.

CONCLUSIONES

Se ha contribuido significativamente al campo de la robótica con el desarrollo de un robot móvil terrestre tipo hexápodo, cuya capacidad para maniobrar en diferentes topografías simboliza un avance en la exploración de soluciones técnicas y científicas. Este proyecto no solo ha cumplido con su propósito inicial, sino que también ha servido como un catalizador para la innovación y la investigación en diversas áreas relacionadas.

La implementación del diseño articulado ha demostrado la viabilidad de crear dispositivos robóticos capaces de adaptarse a variadas condiciones de terreno. Este logro subraya el potencial de los diseños articulados en la mejora de la movilidad y estabilidad de los robots terrestres, especialmente en entornos desafiantes.

La aplicación de tecnologías de modelado y fabricación digital en el desarrollo del prototipo ha validado su efectividad para la creación de dispositivos robóticos complejos. El cumplimiento de las especificaciones técnicas resalta la precisión y eficiencia que estas herramientas aportan al proceso de diseño y fabricación en la ingeniería robótica.

Las pruebas realizadas han proporcionado una validación empírica crucial del funcionamiento del prototipo, evidenciando la importancia de un enfoque metodológico riguroso en la evaluación del rendimiento de dispositivos robóticos. Este proceso de validación enfatiza el rol de la experimentación y análisis estadístico en la confirmación de la eficacia de los diseños robóticos en entornos prácticos.

BIBLIOGRAFÍA

A. Roennau, G. Heppner, M. Nowicki and R. Dillmann, "LAURON V: A versatile six- legged walking robot with advanced maneuverability," 2014 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, Besacon, 2014, pp. 82-87, doi: 10.1109/AIM.2014.6878051.

ARDILA, Pedro; MENDOZA, Cristian; MENDOZA, Yeisson y DULCEY, Diana. Seminario de investigación en robótica industrial. Bucaramanga, 2012, 617p. Trabajo de grado (Ingeniería mecánica). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica.

Burkus, E., Odry, Á., Awrejcewicz, J., Kecskés, I., & Odry, P. (2022). Mechanical Design and a Novel Structural Optimization Approach for Hexapod Walking Robots. *Machines*, 10, 466. <https://doi.org/10.3390/machines10060466>

Burkus, E., Odry, Á., Awrejcewicz, J., Kecskés, I., & Odry, P. (2022). Mechanical Design and a Novel Structural Optimization Approach for Hexapod Walking Robots. *Machines*, 10, 466. <https://doi.org/10.3390/machines10060466>

Ma, J., Qiu, G., Guo, W., Li, P., & Ma, G. (2022). Design, Analysis and Experiments of Hexapod Robot with Six-Link Legs for High Dynamic Locomotion. *Micromachines (Basel)*, 13(9), 1404. <https://doi.org/10.3390/mi13091404>

CARRILLO, Daniel; NIÑO, Jonathan y SÁNCHEZ, Gary. Seminario de investigación en robótica móvil autónoma. Bucaramanga, 2013, 655p. Trabajo de grado (Ingeniería mecánica). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica.

COLOMBIAMANIA. Información general con ciudades y municipios del departamento. [en línea]. Departamento de Santander. (2017). [consultado: 01

de diciembre de 2020]. Disponible en:
<http://www.colombiamania.com/departamentos/santander.html>.

D. Belter, P. Labecki and P. Skrzypczyński, "An exploration-based approach to terrain traversability assessment for a walking robot," 2013 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR), Linkoping, 2013, pp. 1-6, doi: 10.1109/SSRR.2013.6719331.

D. Delgado Esteban, M. Luneckas, T. Luneckas, J. Kriaučiūnas and D. Udris, "Statically stable hexapod robot body construction," 2016 IEEE 4th Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering (AIEEE), Vilnius, 2016, pp. 1-4, doi: 10.1109/AIEEE.2016.7821819.

Didácticas electrónicas. (s.f.). Batería recargable litio-polímero 6000mAh 7.4V: Baterías, pilas de litio-polímero (LiPo) de 7.4V 2S recargables LiPo. Página web. Recuperado de: <https://www.didacticaselectronicas.com/index.php/baterias-cargadores/recargables-1/tipo-lipo-1/7-4v/bater%C3%ADa-recargable-litio-pol%C3%ADmero-6000mah-7-4v-baterias-pilas-de-litio-polimero-lipo-de-7-4v-2s-recargables-lipo-detail>

Electronilab. (s.f.). Arduino Mega 2560 – R3 Compatible CH340G. Imagen. Recuperado de: <https://electronilab.co/tienda/arduino-mega-2560-r3/>

Electronilab. (s.f.). Batería LiPo de 2200 mAh 11.1 V. Página web. Recuperado de: <https://electronilab.co/tienda/bateria-lipo-de-2200-mah-11-1-v/>

FAIGL, Jan y ČÍŽEK, Petr. Adaptive locomotion control of hexapod walking robot for traversing rough terrains with position feedback only. [en línea]. ScienceDirect. (2019). [consultado: 2 de diciembre de 2020]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.robot.2019.03.008>.

HALVORSEN, Kåre. The MX-Phoenix hexapod robot Project. [en línea]. Zenta Robotic Creation. (29 de noviembre de 2016). [consultado: 12 de diciembre de 2020]. Disponible en: <http://zentasrobots.com/>.

ICA. Una radiografía de la problemática del cultivo de cacao en Santander. [en línea]. ICACOMUNICA. (2013). [consultado: 30 de noviembre de 2020]. Disponible en: [https://www.ica.gov.co/periodico-virtual/prensa/2013-\(1\)/una-radiografia-del-la-problematICA-del-cultivo-de](https://www.ica.gov.co/periodico-virtual/prensa/2013-(1)/una-radiografia-del-la-problematICA-del-cultivo-de).

Ma, J., Qiu, G., Guo, W., Li, P., & Ma, G. (2022). Design, Analysis and Experiments of Hexapod Robot with Six-Link Legs for High Dynamic Locomotion. *Micromachines* (Basel), 13(9), 1404. <https://doi.org/10.3390/mi13091404>

Mahapatra, A., Roy, SS., & Pratihar, D. (2013). Modeling and Simulation of Wave Gait of a Hexapod Walking Robot: A CAD/CAE Approach. *IAES International Journal of Robotics and Automation (IJRA)*, 2. <https://doi.org/10.11591/ijra.v2i3.2016>

N. Kottege, C. Parkinson, P. Moghadam, A. Elfes and S. P. N. Singh, "Energetics-informed hexapod gait transitions across terrains," 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Seattle, WA, 2015, pp. 5140-5147, doi: 10.1109/ICRA.2015.7139915.

NACIONES UNIDAS. Población. [en línea]. 2019. [consulta: 02 de diciembre de 2020]. Disponible en: <https://www.un.org/es/sections/issues-depth/population/index.html>.

Sorli Martínez de Oraa, N., & Fernández Gómez, P. (2003). Robot Hexápodo. Trabajo de grado. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/185132/40180-3452.pdf>

SORLI MARTINEZ DE ORAA, Nestor y FERNÁNDEZ GÓMEZ, Pedro. (2003). ROBOT HEXAPODO. Trabajo de grado universitario. Universidad Politécnica de Catalunya. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/185132/40180-3452.pdf>

Steopan, M., Mocan, B., Florin, P., Bucur, M., & Ispas, V. (2021). Design and Development of a Robotic Hexapod Platform for Educational Purposes. En: Lovasz, EC., Maniu, I., Doroftei, I., Ivanescu, M., & Gruescu, CM. (eds) New Advances in Mechanisms, Mechanical Transmissions and Robotics. MTM&Robotics 2020. Mechanisms and Machine Science, vol 88. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-60076-1_9

Todacolombia.com. (s.f.). Relieve Departamento de Santander. Página web. Recuperado de: <https://www.todacolombia.com/departamentos-de-colombia/santander/relieve.html>

ANEXOS

Anexo A. Tabulaciones para estimar ángulo de ataque de las patas con la superficie

1.10	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	β	Ay	Az	By	Bz	Cy	Cz	θ	
Run 1	0	5,596	0,2908	5,596	0,2908	8,428	0,5815	135	
Run 2	10	5,603	0,2908	5,603	0,2908	8,414	0,5815	125	
Run 3	20	5,624	0,1704	5,624	0,1704	8,372	0,3407	115	
Run 4	30	5,661	0,01983	5,661	0,01983	8,298	0,03966	105	
Run 5	40	5,718	0,01983	5,718	0,01983	8,184	0,03966	95	
Run 6	50	5,801	0,002552	5,801	0,002552	8,018	0,005104	85	
Run 7	60	5,922	0,002552	5,922	0,002552	7,777	0,005105	75	
Run 8	70	6,099	0,0009434	6,099	0,0009434	7,421	0,001887	65	
Run 9	80	6,373	0,0009434	6,373	0,0009434	6,874	0,001887	55	
Run 10	90	6,827	0,0009434	6,827	0,0009434	5,966	0,001887	45	

Anexo B. Tabulación de ángulos de ataque para la pata

1.10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	β	Ay	Az	By	Bz	Cy	Cz	θ	r	T_m
Run 1	70	6,099	-0,156	6,099	-0,156	7,421	-0,3119	65	0,1709	7,215
Run 2	71	6,122	-0,156	6,122	-0,156	7,377	-0,3119	64	0,1667	6,872
Run 3	72	6,145	0,1191	6,145	0,1191	7,331	0,2382	63	0,1626	5,196
Run 4	73	6,169	0,03922	6,169	0,03922	7,282	0,07843	62	0,1584	5,235
Run 5	74	6,194	0,01943	6,194	0,01943	7,232	0,03887	61	0,1543	4,985
Run 6	75	6,221	0,00608	6,221	0,00608	7,179	0,01216	60	0,1501	4,705
Run 7	76	6,248	0,00608	6,248	0,00608	7,123	0,01216	59	0,1458	4,362
Run 8	77	6,277	0,00608	6,277	0,00608	7,065	0,01216	58	0,1416	4,02
Run 9	78	6,308	0,00608	6,308	0,00608	7,005	0,01216	57	0,1373	3,681
Run 10	79	6,34	0,00608	6,34	0,00608	6,941	0,01216	56	0,1331	3,345

Anexo C. Tabla de $\beta=45$ y $\gamma=(90,180,10)$

1..10	γ	β	Cy	Cz	Ts2	Ts3	y	z
Run 1	90	45	1,5	0,9027	6,319	30	3,464	-11,46
Run 2	100	45	1,5	0,3409	2,386	30,73	6,937	-11,16
Run 3	110	45	1,5	0,2306	1,614	29,77	10,3	-10,26
Run 4	120	45	1,5	0,1393	0,975	27,37	13,46	-8,785
Run 5	130	45	1,5	0,2071	1,449	25,64	16,32	-6,785
Run 6	140	45	1,5	0,08059	0,5641	20,52	18,79	-4,32
Run 7	150	45	1,5	0,02362	0,1654	15,41	20,78	-1,464
Run 8	160	45	1,5	0,006219	0,04353	10,38	22,26	1,695
Run 9	170	45	1,5	0,001844	0,01291	5,246	23,16	5,063
Run 10	180	45	1,5	0,002083	0,01458	0,04167	23,46	8,536

Anexo D. Tabla de $\beta=60$ y $\gamma=(90,180,10)$

1..10	γ	β	Cy	Cz	Ts2	Ts3	y	z
Run 1	90	60	1,5	0,8666	3,142	33,46	8,402	-8,971
Run 2	100	60	1,5	0,1993	-1,37	28,87	11,68	-7,779
Run 3	110	60	1,5	0,104	-2,014	25,77	14,7	-6,036
Run 4	120	60	1,5	0,04771	-2,395	21,89	17,37	-3,795
Run 5	130	60	1,5	0,0154	-2,613	17,46	19,61	-1,124
Run 6	140	60	1,5	0,0154	-2,613	12,96	21,35	1,895
Run 7	150	60	1,5	0,01105	-2,643	7,978	22,54	5,171
Run 8	160	60	1,5	0,007007	-2,67	2,754	23,15	8,604
Run 9	170	60	1,5	0,005524	-2,68	-2,505	23,15	12,09
Run 10	180	60	1,5	0,005524	-2,68	-7,658	22,54	15,52

Anexo E. Tabla de $\beta=75$ y $\gamma=(90,180,10)$

1..10	γ	β	Cy	Cz	Ts2	Ts3	y	z
Run 1	90	75	1,5	-0,3198	-7,189	22,78	12,53	-5,285
Run 2	100	75	1,5	0,1155	6,182	21,11	15,38	3,885
Run 3	110	75	1,5	0,1194	-4,526	21,11	17,85	-0,8202
Run 4	120	75	1,5	0,1194	-4,526	17,07	19,85	2,036
Run 5	130	75	1,5	0,05125	-4,822	11,92	21,22	5,195
Run 6	140	75	1,5	0,03064	-5,064	5,813	22,22	8,563
Run 7	150	75	1,5	0,02656	-5,089	0,5313	22,53	12,04
Run 8	160	75	1,5	0,000766	-5,245	-5,194	22,22	15,51
Run 9	170	75	1,5	0,000766	-5,245	-10,25	21,32	18,88
Run 10	180	75	1,5	0,0003096	-5,248	-14,99	19,85	22,04

Anexo F. Tabla de $\beta=90$ y $\gamma=(90,180,10)$

1..10	γ	β	Cy	Cz	Ts2	Ts3	y	z
Run 1	90	90	1,5	-1,11	-12,92	5,519	15,56	-0,6569
Run 2	100	90	1,5	-0,2951	-8,885	12,37	17,8	2,014
Run 3	110	90	1,5	-0,2951	-8,885	7,329	19,54	5,033
Run 4	120	90	1,5	-0,2951	-8,885	2,064	20,73	8,309
Run 5	130	90	1,5	-0,2951	-8,885	-3,265	21,34	11,74
Run 6	140	90	1,5	-0,2951	-8,885	-8,494	21,34	15,23
Run 7	150	90	1,5	-0,2951	-8,885	-13,47	20,73	18,66
Run 8	160	90	1,5	-0,2951	-8,885	-18,03	19,54	21,94
Run 9	170	90	1,5	-0,2951	-8,885	-22,04	17,8	24,96
Run 10	180	90	1,5	-0,2951	-8,885	-25,39	15,56	27,63

Anexo G. Tabla de $\beta=105$ y $\gamma=(90,180,10)$

1..10	γ	β	Cy	Cz	Ts2	Ts3	y	z
Run 1	90	105	1,5	0,6338	-6,875	25,98	17,28	4,598
Run 2	100	105	1,5	0,4341	-7,574	18,42	18,76	7,757
Run 3	110	105	1,5	0,05271	-8,909	6,248	19,66	11,12
Run 4	120	105	1,5	0,05271	-8,909	1,054	19,96	14,6
Run 5	130	105	1,5	0,02775	-8,996	-4,663	19,66	18,07
Run 6	140	105	1,5	0,01468	-9,042	-9,985	18,76	21,44
Run 7	150	105	1,5	0,00236	-9,085	-14,96	17,28	24,6
Run 8	160	105	1,5	0,00236	-9,085	-19,25	15,29	27,45
Run 9	170	105	1,5	0,001354	-9,089	-22,96	12,82	29,92
Run 10	180	105	1,5	0,0004498	-9,092	-25,98	9,964	31,92

Anexo H. Tabla de $\beta=120$ y $\gamma=(90,180,10)$

1..10	γ	β	Cy	Cz	Ts2	Ts3	y	z
Run 1	90	120	1,5	-1,084	-12,11	-13,18	17,59	10,12
Run 2	100	120	1,5	-0,3154	-10,71	-3,67	18,2	13,55
Run 3	110	120	1,5	-0,3154	-10,71	-8,899	18,2	17,04
Run 4	120	120	1,5	-0,1115	-10,34	-9,918	17,59	20,47
Run 5	130	120	1,5	-0,03876	-10,21	-13,38	16,4	23,75
Run 6	140	120	1,5	-0,01094	-10,16	-17,39	14,66	26,77
Run 7	150	120	1,5	-0,01094	-10,16	-21,37	12,42	29,44
Run 8	160	120	1,5	-0,007279	-10,16	-24,66	9,748	31,68
Run 9	170	120	1,5	-0,009779	-10,16	-27,27	6,729	33,42
Run 10	180	120	1,5	-0,007415	-10,16	-29,02	3,453	34,62

Anexo I. Tabla de $\beta=135$ y $\gamma=(90,180,10)$

1..10	1 γ	2 β	3 C_y	4 C_z	5 T_{s2}	6 T_{s3}	7 y	8 z
Run 1	90	135	1,5	0,7092	-10,5	14,18	16,46	15,54
Run 2	100	135	1,5	0,5905	-10,5	6,421	16,16	19,01
Run 3	110	135	1,5	0,3208	-10,5	-4,232	15,26	22,38
Run 4	120	135	1,5	0,1985	-10,5	-11,56	13,78	25,54
Run 5	130	135	1,5	0,09593	-10,5	-17,81	11,79	28,39
Run 6	140	135	1,5	0,02855	-10,5	-22,61	9,32	30,86
Run 7	150	135	1,5	0,01786	-10,5	-25,8	6,464	32,86
Run 8	160	135	1,5	0,005302	-10,5	-28,15	3,305	34,33
Run 9	170	135	1,5	0,005302	-10,5	-29,53	-0,06257	35,23
Run 10	180	135	1,5	0,00294	-10,5	-30	-3,536	35,54

Anexo J. Tabla de $\beta=150$ y $\gamma=(90,180,10)$

1..10	1 γ	2 β	3 C_y	4 C_z	5 T_{s2}	6 T_{s3}	7 y	8 z
Run 1	90	150	1,5	0,7088	-11,43	5,929	13,97	20,47
Run 2	100	150	1,5	0,6664	-11,35	-0,6	12,78	23,75
Run 3	110	150	1,5	0,3261	-10,73	-11,87	11,04	26,77
Run 4	120	150	1,5	0,1781	-10,46	-18,69	8,795	29,44
Run 5	130	150	1,5	0,06872	-10,27	-23,79	6,124	31,68
Run 6	140	150	1,5	0,06872	-10,27	-26,61	3,105	33,42
Run 7	150	150	1,5	0,02068	-10,18	-28,87	-0,1709	34,62
Run 8	160	150	1,5	0,01037	-10,16	-29,87	-3,604	35,22
Run 9	170	150	1,5	-0,01152	-10,12	-29,87	-7,09	35,22
Run 10	180	150	1,5	-0,01152	-10,12	-28,92	-10,52	34,62

Anexo K. Tabla de $\beta=165$ y $\gamma=(90,180,10)$

1..10	1 γ	2 β	3 C_y	4 C_z	5 T_{s2}	6 T_{s3}	7 y	8 z
Run 1	90	165	1,5	0,8604	-12,1	-0,09799	10,28	24,6
Run 2	100	165	1,5	0,5945	-11,17	-10,18	8,285	27,45
Run 3	110	165	1,5	0,2369	-9,922	-19,94	5,82	29,92
Run 4	120	165	1,5	0,2369	-9,922	-23,61	2,964	31,92
Run 5	130	165	1,5	0,2369	-9,922	-26,57	-0,1951	33,39
Run 6	140	165	1,5	0,2369	-9,922	-28,72	-3,563	34,29
Run 7	150	165	1,5	0,2369	-9,922	-30	-7,036	34,6
Run 8	160	165	1,5	0,2369	-9,922	-30,37	-10,51	34,29
Run 9	170	165	1,5	0,2369	-9,922	-29,81	-13,88	33,39
Run 10	180	165	1,5	0,2369	-9,922	-28,35	-17,04	31,92

Anexo L. Tabla de $\beta=180$ y $\gamma=(90,180,10)$

1..10	1 γ	2 β	3 Cy	4 Cz	5 Ts2	6 Ts3	7 y	8 z
Run 1	90	180	1,5	0,9087	-11,92	-8,362	5,657	27,63
Run 2	100	180	1,5	0,3719	-9,265	-20,31	2,986	29,87
Run 3	110	180	1,5	0,1497	-8,166	-25,92	-0,03292	31,61
Run 4	120	180	1,5	0,07956	-7,818	-28,57	-3,309	32,8
Run 5	130	180	1,5	0,02801	-7,563	-29,84	-6,742	33,41
Run 6	140	180	1,5	0,01916	-7,519	-29,92	-10,23	33,41
Run 7	150	180	1,5	0,00603	-7,454	-29,01	-13,66	32,8
Run 8	160	180	1,5	0,003934	-7,444	-27,22	-16,94	31,61
Run 9	170	180	1,5	0,01693	-7,508	-24,77	-19,96	29,87
Run 10	180	180	1,5	-0,01995	-7,326	-20,93	-22,63	27,63

Anexo M. Planos Isométricos del modelo CAD

El anexo esta adjunto y puede visualizarse en la base de datos de la biblioteca UIS.

Anexo N. Modelo CAD de las piezas

El anexo puede visualizarse en la base de datos de la biblioteca UIS.

Anexo O. Aplicativo movil

El anexo puede visualizarse en la base de datos de la biblioteca UIS.