
Diseño, implementación y análisis cinemático de un robot cuadrúpedo de 12 grados de libertad

María Ximena Monzón Castellanos



UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería




**Diseño, implementación y análisis cinemático de un robot
cuadrúpedo de 12 grados de libertad**

Trabajo de graduación presentado por María Ximena Monzón
Castellanos para optar al grado académico de Licenciada en Ingeniería
Mecatrónica


Guatemala,

2024


Vo.Bo.:

(f) 
M. Sc. Carlos Esquit

Tribunal Examinador:

(f) 
M.Sc. Carlos Esquit

(f) 
M. Sc. Miguel Enrique Zea Arenales

(f) 
Ing. Kurt Emmanuel Kellner

Fecha de aprobación: Guatemala, 02 de diciembre de 2024.

Quiero expresar mi profundo agradecimiento a toda mi familia por el apoyo incondicional que me brindaron a lo largo de mi trayectoria académica. Este logro no habría sido posible sin su respaldo. En especial, agradezco a mis padres, Ana Karina Castellanos y Rogelio Monzón, por su confianza en mí y por darme la oportunidad de perseguir este sueño.

Dedico este trabajo de graduación a mi abuelo, Marco Antonio Castellanos Pacheco, cuyo apoyo incansable ha sido una fuente de inspiración durante este proceso. Gracias a él y a mi abuela, Lesbia Coronado, por las palabras de aliento, por las refacciones de madrugada, y por los consejos de vida. Asimismo, quiero agradecer a mi tío, Marco Antonio Castellanos, por compartir conmigo su conocimiento, abrirme las puertas de su área de trabajo y por los valiosos consejos que me ha ofrecido a lo largo de mi carrera universitaria.

Finalmente, quiero agradecer a todos mis amigos de carrera, quienes han sido una parte fundamental de mi desarrollo tanto académico como personal. A cada uno de ustedes, les agradezco por su apoyo y por los recuerdos inolvidables. También extendo las gracias a mis catedráticos, por todos los conocimientos que me brindaron. Especialmente, agradezco a mi asesor, Kurt Kellner, por el apoyo en la realización de este trabajo de graduación.

Prefacio	IV
Lista de figuras	VIII
Lista de cuadros	IX
Resumen	X
Abstract	XI
1. Introducción	1
2. Antecedentes	3
2.1. Diseño de un chasis de robot humanoide basado en el Robonova-1	3
2.2. Diseño de controlador de vuelo para cuadricóptero con capacidad de integrarse al ecosistema Robotat vía inalámbrica Wi-Fi	4
2.3. Overview of Different Techniques Utilized in Designing of a Legged Robot	5
2.4. Design and Control of an Open-Source, Low Cost, 3D "Printed Dynamic Quadruped Robot	5
2.5. Structural Design, Simulation and Experiment of Quadruped Robot	6
2.6. MIT Cheetah 3: Design and Control of a Robust, Dynamic Quadruped Robot	7
3. Justificación	8
4. Objetivos	9
4.1. Objetivo general	9
4.2. Objetivos específicos	9
5. Alcance	10

6. Marco teórico	11
6.1. Diseño mecánico	11
6.2. Diseño de mecanismos	12
6.3. Fabricación digital	13
6.4. Robots con patas	14
6.5. Análisis cinemático por Denavit-Hartenberg	16
6.6. ESP32 - Tiny S3	16
6.7. Servomotor FT90M	18
6.8. DC-DC Boost converter XL6009	19
6.9. DC-DC Buck converter XL4005	20
6.10. PCA9685: controlador PWM de 16 canales y 12 bits con bus I2C Fm+	21
6.11. Convertidor Buck ajustable DC-DC con pantalla digital	22
7. Diseño estructural y funcional del chasis	24
7.1. Introducción al diseño del chasis	24
7.1.1. Objetivos de diseño	24
7.1.2. Justificación de las decisiones iniciales	25
7.2. Resquisitos de diseño	27
7.2.1. Peso y materiales	27
7.2.2. Distribución de carga	29
7.3. Diseño conceptual y CAD	30
7.3.1. Diseño de los grados de libertad	30
7.3.2. Diseño modular del chasis	32
8. Fabricación y ensamblaje del chasis	34
8.1. Proceso de fabricación	34
8.1.1. Configuración de impresión 3D	34
8.1.2. Ensamblaje final del chasis	35
8.1.3. Ensamblaje de piezas mecánicas	35
9. Diseño e implementación del sistema de alimentación eléctrica	38
9.1. Especificaciones eléctricas del robot	38
9.1.1. Requisitos de potencia para los servomotores	39
9.2. Cálculos para el sistema de alimentación eléctrica	40
9.2.1. Opción 1: una batería + regulador Boost (XL6009)	40
9.2.2. Opción 2: dos baterías + regulador Buck (XL4005)	41
9.2.3. Configuración final utilizada	41
9.3. Diseño del circuito eléctrico	42
9.3.1. Conexiones generales del circuito	42
9.3.2. Esquemático general del circuito	44

10. Análisis cinemático del robot cuadrúpedo	47
10.1. Fundamentos del análisis cinemático	47
10.1.1. Grados de libertad en el robot	47
10.1.2. Análisis cinemático directo por método de Denavit-Hartenberg	48
10.2. Implementación del análisis cinemático en software	49
10.2.1. Programación del control cinemático en Arduino/ESP32	49
11. Conclusiones	52
12. Recomendaciones	54
13. Referencias	55
14. Anexos	57

Lista de figuras

Figura 1.	Proceso de diseño de Shigley.	11
Figura 2.	Movimiento traslacional del robot.	14
Figura 3.	Trayectoria del motor 1.	15
Figura 4.	Comparación de tamaño UM Tiny S3.	17
Figura 5.	Dimensiones servomotor Feetech FT90M.	19
Figura 6.	Módulo PCA9685.	22
Figura 7.	Módulo convertidor Buck ajustable DC-DC de 20W.	23
Figura 8.	eSun high speed PLA.	27
Figura 9.	Barras metálicas para base del chasis.	28
Figura 10.	Engrane diseñado para ajuste con hélice del servomotor.	31
Figura 11.	Sistema de engranajes para tercer grado de libertad.	32
Figura 12.	Fases de ensamblaje modular.	33
Figura 13.	Ensamblado de piezas mecánicas.	36
Figura 14.	Fijador de tornillo (resistencia media).	36
Figura 15.	Módulos de patas ensamblados en barras metálicas.	37
Figura 16.	Vistas del chasis final ensamblado.	37
Figura 17.	Batería Li-Ion 18650 de 2500 mAh.	38
Figura 18.	Servomotor digital Feetech FT90M.	39
Figura 19.	Diagrama general del sistema.	43
Figura 20.	Esquemático general del sistema.	44
Figura 21.	Diseño del circuito impreso.	45
Figura 22.	Circuito impreso implementado.	46

Lista de cuadros

Cuadro 1.	Especificaciones de peso de los componentes del robot cuadrúpedo.	28
Cuadro 2.	Configuración de impresión 3D utilizada para la fabricación del chasis.	35
Cuadro 3.	Componentes utilizados en el proyecto.	58

Los robots con patas han tenido un reciente auge en el mundo de la robótica. Por esta razón, en la Universidad del Valle de Guatemala, se está buscando implementarlos en el curso de Robótica. En este trabajo de graduación, se busca realizar el proceso de diseño, implementación y análisis cinemático de un robot cuadrúpedo de 12 grados de libertad para iniciar su implementación en el ecosistema Robotat que se encuentra en la universidad.

Para el desarrollo de la estructura del robot, se aplicaron conocimientos de diseño mecánico y modelado en CAD. Además, se aplicaron conocimientos sobre fabricación digital, específicamente la impresión 3D. La movilidad de esta estructura es la parte central de su funcionamiento, lo cual se logró por medio de actuadores en sus articulaciones. Para el control de los actuadores, se implementó un sistema electrónico compuesto por un microcontrolador Unexpected Maker TinyS3 (ESP32-S3) y motores Feetech FT90M. Para una operación inalámbrica, se integró un banco de energía conectado a dos reguladores de voltaje. Estos permiten la alimentación paralela del sistema de motores y el sistema de control.

La implementación de las fases mecánica y electrónica permitió el desarrollo del robot cuadrúpedo capaz de ejecutar una marcha estática. El desempeño se pudo validar por medio de un análisis de cinemática directa, y posteriormente se implementó en un algoritmo la cinemática inversa con lo cual se definieron las trayectorias necesarias para el desplazamiento del robot.

Palabras clave: robot cuadrúpedo, actuadores, fabricación digital, análisis cinemático.

Legged robots have seen a recent rise in popularity within the field of robotics. For this reason, Universidad del Valle de Guatemala is considering their implementation in the Robotics course in the future. This graduation project aims to carry out the design, implementation, and kinematic analysis of a 12-degree-of-freedom quadruped robot to initiate the process of its subsequent integration into the Robotat ecosystem at the university.

For the development of the robot's structure, mechanical design and CAD modeling knowledge were applied. The robot's creation utilized expertise in the field of digital manufacturing, specifically 3D printing. The mobility of this structure is the central aspect of its functionality, achieved through the implementation of actuators in its joints. For actuator control, an electronic system was implemented, consisting of an Unexpected Maker TinyS3 (ESP32-S3) microcontroller and Feetech FT90M motors.

To enable wireless operation, a power bank was directly connected to two voltage regulators. These regulators allow parallel power supply to the motor system and the control system.

The implementation of the mechanical and electronic phases enabled the development of the quadruped robot capable of performing a static gait. The performance was validated through a forward kinematics analysis, and subsequently, an inverse kinematics algorithm was implemented to define the trajectories required for the robot's locomotion.

Keywords: quadruped robot, actuators, digital fabrication, kinematic analysis.

La robótica móvil ha demostrado ser una herramienta importante en el avance tecnológico en diferentes ámbitos. Entre estos se encuentra la exploración de terrenos peligrosos, la investigación científica y la asistencia en situaciones de emergencia. En este contexto, los robots cuadrúpedos han demostrado ser de gran utilidad debido a su capacidad de desplazamiento en terrenos irregulares. Los robots con patas ofrecen soluciones que robots con ruedas o bípedos no pueden proporcionar eficientemente.

El presente trabajo de graduación se enfoca en el desarrollo de un robot cuadrúpedo con 12 grados de libertad, con el objetivo de construir una plataforma robótica que permita una futura experimentación avanzada en el control cinemático y el estudio de su movilidad.

Uno de los mayores desafíos en el diseño es la fabricación de un chasis robusto y liviano que permita la correcta distribución de los servomotores y garantice un movimiento fluido de las patas, sin comprometer la estabilidad del sistema. Además, la implementación de un sistema eléctrico eficiente es esencial para asegurar el funcionamiento continuo de los 12 servomotores necesarios para su locomoción. Para lograr esto, se diseñó un sistema de alimentación basado en baterías de alta capacidad.

Por otro lado, el análisis cinemático de las patas es un aspecto crucial para el control preciso de los movimientos del robot. El análisis cinemático directo e inverso se utilizó para modelar y calcular las posiciones de las extremidades del robot. Este análisis no solo es relevante para el desplazamiento básico, sino también para futuros desarrollos que incluyan la interacción con el entorno o la incorporación de sensores adicionales.

El presente trabajo se divide en tres fases principales. En la primera, se abordó el diseño

y fabricación del chasis, utilizando impresión 3D y acopladores metálicos para asegurar una estructura sólida y modular. En la segunda, se desarrolló el circuito eléctrico de alimentación, donde se integraron reguladores de voltaje y baterías de alta capacidad para soportar los servomotores. Finalmente, en la tercera fase, se realizó el análisis cinemático, utilizando el método de Denavit-Hartenberg para modelar el movimiento del robot.

Este proyecto tiene como objetivo no solo construir un prototipo funcional, sino también proveer una plataforma para futuras investigaciones en control de movimiento y robótica aplicada.

2.1. Diseño de un chasis de robot humanoide basado en el Robonova-1

El objetivo principal de este proyecto [1] era diseñar un chasis de robot humanoide basado en un robot existente conocido como Robonova. Como objetivos secundarios, se buscaba diseñar e implementar el chasis de un robot humanoide, el circuito de componentes electrónicos del robot y su sistema de potencia. Estos objetivos se alinean con los objetivos del proyecto actual con la diferencia en el tipo de robot que se implementará, siendo en este caso un robot cuadrúpedo.

La metodología utilizada en este proyecto consistió en el diseño de cada uno de los componentes del robot (extremidades y torso), iterando cada prototipo hasta llegar al diseño óptimo para cada una de las partes y el subsecuente ensamblaje del prototipo final. Este proceso iterativo es ideal para el diseño de cualquier robot. También se realizó la selección de componentes electrónicos, el diseño del circuito base y la implementación del circuito en protoboard. Después de dos iteraciones se implementó en una placa PCB.

Dentro de los resultados más importantes se tuvo el diseño e implementación exitosa de un chasis de robot humanoide junto con su sistema electrónico y sistema de potencia. Se logró controlar cada una de las articulaciones del robot por medio del controlador ESP32 como se busca lograrlo en el proyecto actual.

La limitación que cabe resaltar del proyecto es que el robot humanoide únicamente tenía movimiento en la parte inferior, es decir, en la piernas. Limitando el número de motores ac-

tivos utilizados. Sin embargo, se habilitó comunicación I2C para poder controlar 16 motores adicionales que podría ser beneficioso para el proyecto actual que necesita 12 actuadores. Además de eso, se utilizó el controlador ideal para poder conectar el robot al ecosistema Robotat pero no se implementó en este proyecto.

2.2. Diseño de controlador de vuelo para cuadricóptero con capacidad de integrarse al ecosistema Robotat vía inalámbrica Wi-Fi

El objetivo principal del proyecto [2] era el diseño y manufactura de un controlador de vuelo que fuera capaz de integrarse inalámbricamente al sistema de captura de movimiento del ecosistema Robotat. Dentro de los objetivos específicos del proyecto se encuentra la integración del sistema al entorno de captura de movimiento a través de comunicación inalámbrica Wifi establecida por el microcontrolador ESP32.

Se realizó la integración del cuadricóptero en el ecosistema Robotat instalado en el laboratorio CIT 116, utilizando como sistema de captura de movimiento OptiTrack. Apoyándose de trabajos de graduación paralelos, Hans Burmester pudo adecuar como agente externo al cuadricóptero implementando únicamente una librería para la red de comunicación. La red utilizada para la comunicación Wi-Fi fue en un router NETGEAR MBR624GU con una banda de frecuencia 2.4 GHz, topología de bus. Para poder garantizar que cada agente recibiera únicamente su información se utilizaron identificadores únicos. Además, se utilizó Python y una librería del ESP32 para el desarrollo de la red. El objetivo principal de la aplicación de Python era recibir los datos del OptiTrack y enviarlos a cada agente por medio del protocolo MQTT.

El primer resultado que se debe destacar de este proyecto es que se pudo obtener una lectura y comunicación correcta de registros entre los módulos ESP32 y MPU-9250 gracias a la correcta medición de los ángulos roll, pitch y yaw. Siempre realizando ajustes a los cálculos de los ángulos para tener un comportamiento óptimo. También es importante resaltar que la implementación de la librería robotat.h fue la herramienta principal para la integración exitosa del cuadricóptero al ecosistema.

El cuadricóptero buscaba que pudiera ser integrado al entorno de captura de movimiento OptiTrack por medio de Wi-Fi a través del protocolo de comunicación MQTT. Este objetivo se logró. Sin embargo, el robot tiene como limitación no ser autónomo fuera del entorno Robotat. Además de eso, debido a la crisis sanitaria SARS-CoV-2 las posibles pruebas realizadas dentro del entorno se vieron limitadas.

2.3. Overview of Different Techniques Utilized in Designing of a Legged Robot

El propósito principal de cualquier robot con patas es que tenga la capacidad de moverse en superficies donde robots con ruedas son incapaces de hacerlo. También se busca que sean capaces de superar obstáculos sin tener que esquivarlos o rodearlos como lo haría un robot con ruedas.

En el artículo [3], se discuten diferentes métodos para obtener y estimar los parámetros de un robot con patas. Para obtener el perfil de pata deseado se plantean tres métodos distintos: Método de dos engranes (Curvas de Bermester), el método iterativo y el método de cinemática directa e inversa. También se discuten dos métodos para calcular dimensiones de un mecanismo vinculado: por medio de razones geométricas y por método iterativo. Por último se discuten métodos para obtener distintos tipos de marchas. Se menciona que para la aplicación de los diferentes métodos iterativos se pueden utilizar softwares CAD y prototipos. Además se utilizan técnicas de análisis como el análisis de fuerzas, análisis dimensional de centro de rotación instantáneo y análisis de vibraciones.

Este artículo concluye que hay diferentes maneras de abordar el cálculo, diseño e implementación de robots con patas. Estudia las diferencias entre los métodos y las técnicas posibles que se pueden implementar. El resultado es una comparación objetiva de los diferentes métodos siendo todos claves para el desarrollo de este tipo de robots.

Este artículo únicamente brinda conocimientos bases acerca del diseño de robots con patas sin adentrarse en un tipo de robot específico, como el robot cuadrupedo que se realiza en este trabajo de graduación. Siendo su alcance principalmente la comparación de diferentes metodologías y técnicas para crear robots simples.

2.4. Design and Control of an Open-Source, Low Cost, 3D "Printed Dynamic Quadruped Robot

Este artículo trata sobre un robot cuadrúpedo cuyas partes están impresas en 3D [4]. El objetivo de desarrollar este robot es presentar un robot dinámico con 12 torques controlados por medio de una placa montada. Además, construirlo enteramente por medio de partes impresas en plástico en impresora 3D. Como objetivo final, se busca crear una alternativa no costosa y fácilmente modificable de un robot cuadrúpedo.

Los ingenieros de este proyecto primero se enfocaron en el diseño de una estructura capaz de soportar el peso de los actuadores como de la placa de control. Esto se logró por medio

de un análisis de densidad, de resistencia a la tracción, a la flexión, de módulo de elasticidad y resistencia al impacto, todo en softwares CAD. Además se realizó el diseño del torso y la subsecuente impresión de las piezas 3D.

Para el control del robot se implementaron diferentes controladores como: Step controller, que controla el movimiento del robot. Esto lo logra por medio de un proceso de generación de pasos para generalizar los diferentes patrones de marcha. Se calcula la postura intermedia del torso a partir de la postura actual y la velocidad de comando, y las posiciones objetivo de los pies de movimiento se calculan en función de la postura intermedia del torso. Luego de calcular todas las posiciones objetivo de los cuatro pies, la postura objetivo del torso se establece como el centro de gravedad. Se controla la trayectoria con Trajectory controller, luego de calcular las posiciones se calculan las trayectorias de los pies y el torso por cada paso del tiempo.

El robot del artículo PADWQ demostró ser capaz de caminar de manera estable a un ritmo constante de trote con un controlador PD. Además, fue capaz de realizar una locomoción continua durante 50 minutos con un consumo de energía típico de 45W. Es importante resaltar que logró mantener sus capacidades en diferentes terrenos como se espera de un robot con patas, siendo capaz de caminar 30 minutos al aire libre.

El proyecto buscaba diseñar e implementar un robot de bajo costo. A comparación de los robots cuadrupedos académicos este logro reducir costos considerablemente. Sin embargo, debido a su tamaño, actuadores y sistema de alimentación utilizados los costos siguen siendo significativos (alrededor de 7700 USD). Por lo que deja espacio para mejora en la implementación de cuadrupedos de bajo costo para aplicaciones académicas.

2.5. Structural Design, Simulation and Experiment of Quadruped Robot

En este artículo [5] se llevaron a cabo una serie de diseños, simulaciones e implementaciones a partir de un mecanismo de robot cuadrúpedo. Se creó una estructura biónica capaz de movimientos omnidireccionales y movimientos suaves. Se construyó un prototipo físico que demostró ser capaz de mantener el equilibrio durante el movimiento de trote. El objetivo principal es crear una plataforma accesible para investigadores o estudiantes que estudien el campo de la dinámica, el modelado de contacto y el control de robots cuadrúpedos.

En este proyecto también se realizó el diseño estructural del robot parte por parte. Es decir, se diseñaron las patas, el torso y las uniones de estos. Se realizó un análisis de elementos finitos en SOLIDWORKS para analizar las fuerzas aplicadas a las patas del robot. Luego se realizó una selección de actuadores, en este caso se eligió el modelo de servo SPT-5425.

Para resolver la cinemática del robot se utilizó el método de Forward and Inverse Kinematic Solving. También se realizó planeamiento de marcha y análisis de movimiento.

Con el microcontrolador STM32 se pudo diseñar e implementar un controlador con sistema FreeRTOS como marco de control. El cuadrupedo fue capaz de controlar los ángulos de cabeceo y balanceo de su torso. Un resultado no favorable fue la limitada velocidad locomotora debida a cierta cantidad de deslizamiento entre la pata del robot y el suelo.

Se identificaron que en se podían hacer mejoras en relación al modelado y control de contacto pie-suelo. Además, se recomienda una nueva selección de actuadores. Este cuadrupedo igualmente utilizaba actuadores un poco más costosos haciéndolo inaccesible para aplicaciones académicas con presupuesto limitado.

2.6. MIT Cheetah 3: Design and Control of a Robust, Dynamic Quadruped Robot

El MIT Cheetah 3 [6] es una de las últimas versiones del cuadrúpedo desarrollado por Massachusetts Institute of Technology. El objetivo principal de este modelo en específico es mejorar el rango de movimiento, la producción de fuerza y el control tridimensional de las fuerzas. Además de utilizar una nueva arquitectura de control para sacar el máximo provecho de sus capacidades.

Para el control del cuadrupedo se desarrolló una arquitectura de control con diferentes bloques. Entre ellos, el control de fuerza, control de pierna en oscilación, detección de contactos, CoM STATE KF, programador de marcha y el bloque de estado deseado. Todos estos bloques luego convergen a un control PD de las uniones del robot.

Algunos resultados importantes son un control mejorado de la marcha dinámica, capacidades de diseño mejoradas, mejor rango de movimiento y la capacidad de subir gradas sin tener información previa sobre el terreno externo.

Se planea para el futuro que el robot sea completamente autónomo sin necesidad de información dada por el usuario con respecto a la velocidad por medio de un planeador de rutas de alto nivel.

Justificación

La importancia de este trabajo de graduación consiste en la producción de un robot cuádrupedo. La creación del cuádrupedo responde a la demanda existente de soluciones de robótica económicas. Con el objetivo de volver más accesible la implementación y comprensión de robots móviles con patas a instituciones académicas o entusiastas de la robótica.

Actualmente la Universidad del Valle de Guatemala, cuenta con robots móviles con ruedas y brazos robóticos para el laboratorio del curso de robótica. Este chasis permite que en los próximos años haya más opciones de robots para el curso; ampliando específicamente la selección de robots móviles. Esto con el fin de complementar los conocimientos teóricos de este tipo de robots con aplicaciones físicas.

De manera adicional, el chasis puede ser utilizado para exposiciones realizadas por la universidad. Consecuentemente, interesar a futuros estudiantes a explorar carreras relacionadas con la ciencia y tecnología; demostrando aplicaciones atractivas pero asequibles que los aspirantes podrían innovar en el futuro.

4.1. Objetivo general

Implementar un robot cuadrúpedo de 12 grados de libertad con conectividad inalámbrica.

4.2. Objetivos específicos

- Diseñar el chasis de un robot cuadrúpedo.
- Fabricar el chasis de un robot cuadrúpedo.
- Implementar los circuitos electrónicos de potencia y control para el robot cuadrúpedo.
- Realizar un análisis cinemático del robot cuadrúpedo.

Este trabajo se enfoca en el diseño, fabricación e implementación de un robot cuadrúpedo de 12 grados de libertad controlado de manera inalámbrica. El chasis del robot fue diseñado y fabricado utilizando piezas impresas en 3D e incorporando engranajes para mejorar el movimiento. Además, se emplearon piezas prefabricadas como cojinetes y componentes de sujeción.

El movimiento del chasis es impulsado por 12 servomotores digitales Feetech FT90M, controlados por el microcontrolador TinyS3(ESP32-S3). El sistema de alimentación se implementó por medio de un circuito eléctrico que utiliza reguladores de voltaje boost XL6009.

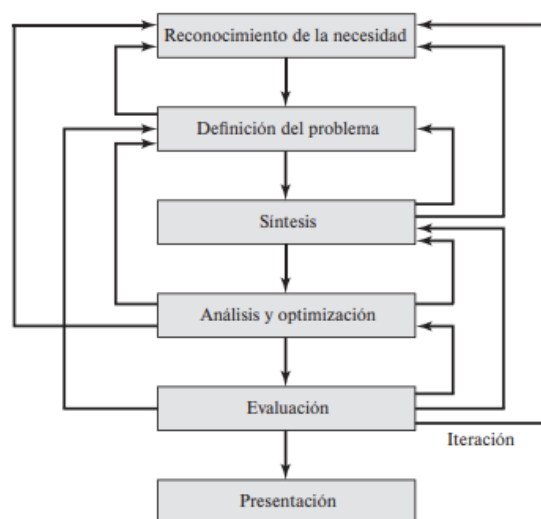
Se realizó un análisis cinemático del robot para evaluar su capacidad de movimiento.

Este proyecto se centró en la optimización del robot para movimiento estático. Se pueden realizar futuras mejoras su dinámica de movimientos, integración al ecosistema Robotat de la universidad y un análisis cinemático más profundo.

6.1. Diseño mecánico

Según Shigley, el diseño mecánico es formular un plan para satisfacer una necesidad específica o resolver un problema particular [7]. El diseño mecánico es un proceso altamente iterativo cuyo objetivo es innovar el objeto que se está trabajando. Consiste en un proceso donde se deben tomar decisiones todo el tiempo, muchas veces con poca información o información contradictoria.

Figura 1. *Proceso de diseño de Shigley.*



Nota. Adaptada de [7]. Las flechas muestran la secuencia de etapas del proceso.

Como se puede observar en la Figura 1, se debe empezar con el reconocimiento de la necesidad. Este trabajo de graduación, se trata de elaborar un chasis de un robot cuadrúpedo. El problema inicial para el desarrollo consiste en diseñar un prototipo capaz de realizar una marcha estática manteniendo la configuración de las juntas seriales. La síntesis de este proyecto consiste en el desarrollo de un bosquejo inicial hasta el último prototipo físico.

La síntesis, el análisis y la optimización son pasos que se encuentran relacionados de una manera iterativa. Para poder avanzar en el proceso de diseño, es necesario presentar diferentes resultados y poder trabajar en los fallos. En el caso de este proyecto, tomar en cuenta que el diseño de las patas podría afectar la marcha estática del robot completo, que el mecanismo desarrollado no sea lo suficientemente robusto como para soportar el peso de los motores, entre otros escenarios.

Cuando se logra simular muy bien el sistema físico real, ya es posible realizar una evaluación final del diseño total. Esta prueba final implica que ya tenemos un prototipo confiable que se puede presentar.

6.2. Diseño de mecanismos

Se define la cinemática de mecanismos como el estudio del movimiento sin considerar las fuerzas. Su objetivo fundamental es diseñar los movimientos deseados de las partes mecánicas y consecuentemente puedes calcular sus posiciones, velocidades y aceleraciones. La cinética, por el otro lado, se define como el estudio de las fuerzas sobre sistemas de movimiento. Ambos conceptos no deben ser separados porque en la práctica de diseño de ingeniería es válido considerar tanto los movimientos cinemáticos deseados como las fuerzas cinéticas asociadas a estos movimientos.

Un mecanismo es definido por Norton como “un sistema de elementos acomodados para transmitir movimiento de una forma predeterminada” [8]. Para este proyecto, es importante poder conocer los conceptos básicos relacionados con el concepto de mecanismo. La movilidad de un sistema mecánico está relacionado con los grados de libertad que este posee. Los grados de libertad son importantes para definir la posición del mecanismo en el espacio en cualquier instante del tiempo.

Es importante definir qué tipo de movimiento tendrá el cuerpo rígido. La rotación pura se define como cuando el cuerpo posee un punto que no tiene movimiento respecto a un marco de referencia “estacionario”. Todos los demás puntos del cuerpo describen arcos alrededor de ese centro. La traslación pura describe los puntos del cuerpo con trayectorias paralelas. La combinación de ambos movimientos se conoce como movimiento complejo. Cualquier línea de referencia trazada en el cuerpo cambiará tanto su posición lineal como su orientación

angular.

El diseño de eslabonamientos también es importante en el desarrollo de la cinemática de mecanismos. Los eslabones y sus nodos son las partes más básicas del diseño de mecanismos. A partir de estos obtenemos las juntas, que son las conexiones entre dos o más eslabones, lo que es lo que permite el movimiento de los sistemas.

6.3. Fabricación digital

Los métodos de fabricación digital disponibles son la impresión 3D, el mecanizado CNC y el corte láser. La diferencia principal entre estos métodos es que la impresión 3D utiliza una fabricación aditiva. Es decir, construye capa por capa el objeto que se quiere obtener. Por el otro lado, el mecanizado CNC y el corte láser son mecanizados sustractivos. Esto significa que funcionan por medio de la eliminación de material ya existente.

La impresión 3D, también llamada manufactura por adición (inglés), es un conjunto de procesos que producen objetos a través de la adición de material en capas que corresponden a las sucesivas secciones transversales de un modelo 3D [9]. Este proceso se puede realizar por medio de distintos materiales, plásticos y metales de diferentes variaciones. Además de esto, existen diversas tecnologías de impresión 3D. La impresión SLA puede llegar a tener una tolerancia de -0.5mm a 0.5mm . Esta tolerancia puede variar y depende del material, la impresora y el diseño utilizado. La impresión FDM, que es la más utilizada actualmente, tiene una tolerancia igual de -0.5mm a 0.5mm [10].

Estos métodos de impresión difieren en la calidad que pueden otorgar. La impresión SLA funciona por medio de un láser de alta precisión cura la resina líquida para formar cada capa, un proceso por el que se pueden obtener detalles mucho más precisos. Por otro lado, las impresoras 3D FDM forman las capas depositando líneas de material fundido. En este proceso, la resolución de la pieza se define mediante el tamaño de la boquilla extrusora y se forman vacíos entre las líneas redondeadas a medida que la boquilla las deposita [11].

Hay diferentes factores que tomar en cuenta con respecto a los resultados que se pueden obtener con cualquier impresora 3d. Para empezar la tolerancia de la máquina, como se mencionó anteriormente, las impresoras tienen distintas tolerancias. Es importante fijarse en las tolerancias brindadas por los fabricantes de las máquinas y mantenerlas siempre bien calibradas.

La contracción del material es otro factor importante en el proceso de impresión. Los polímeros impresos se contraen a medida que se enfrían. Esto puede causar tensiones internas que pueden afectar la precisión dimensional de la pieza. Por lo tanto se debe tener cuidado

al momento de configurar las temperaturas de la impresora, las velocidades de enfriamiento y la orientación de la pieza.

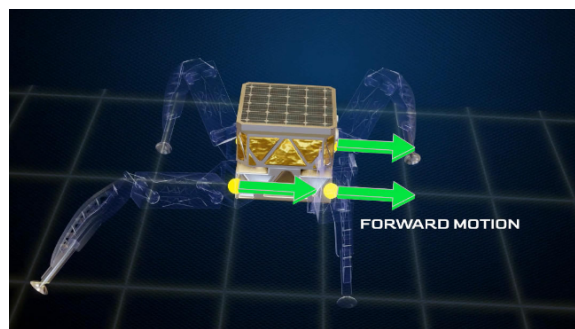
Por último, se tiene que tomar en cuenta el post procesamiento de la pieza. La limpieza de superficies en la pieza, eliminar material de soportes o cualquier otra actividad de acabado puede alterar las dimensiones finales de la pieza. Un diseño optimizado toma en cuenta este tipo de actividades de post procesamiento para minimizar el impacto en la precisión de la pieza final.

6.4. Robots con patas

Los robots se pueden clasificar de diferentes maneras. Entre estos se encuentran los manipuladores seriales, los robots móviles con ruedas y los que se describen a continuación, los robots móviles con patas. El objetivo principal de los robots móviles con patas es poder atravesar diferentes tipos de terrenos. Un robot con patas logra esto por medio de la producción de fuerzas de reacción entre sus patas y el terreno sobre el cual se está desplazando.

Un robot con patas, específicamente, un robot cuadrupedo funciona por medio de dos actuadores en cada una de sus patas. La rotación dada por el primer motor causa que la extremidad inferior se mueva en sentido contrario a las manecillas del reloj. La rotación dada por el segundo motor rota la extremidad superior en contra de las manecillas del reloj. Esto produce el movimiento necesario para realizar una traslación del robot completo. En las siguientes imágenes, se puede observar cómo ocurren estos movimientos [12].

Figura 2. *Movimiento traslacional del robot.*

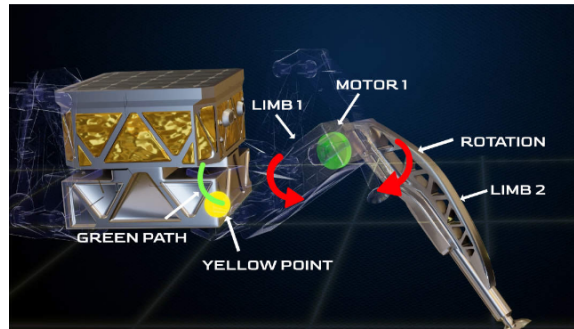


Nota. Adaptada de [13]. Las flechas verdes muestran la dirección de avance del robot.

En el punto amarillo, se da un movimiento con ángulo, no lineal. Es por eso que se tiene la necesidad de introducir el segundo motor. Este motor es capaz de mantener el cuerpo del robot rígido en el eje vertical.

El movimiento y la estructura de estos robots es bioinspirada, como de muchos otros tipos

Figura 3. Trayectoria del motor 1.



Nota. Adaptada de [13]. Las flechas rojas indican la rotación del motor, mientras que la trayectoria verde y el punto amarillo representan la ruta seguida por la extremidad.

de robots. Dependiendo del robot que se observe, el mamífero que lo inspiró puede cambiar pero siempre usan el mismo principio de movimiento. Spot Mini de Boston Dynamics es un robot cuadrúpedo que fue desarrollado en base al comportamiento y la biomecánica de los perros. Esto es relevante porque se busca tener el mismo comportamiento en el proyecto que se está desarrollando en este trabajo de graduación.

Existen diversas aplicaciones y ventajas para la implementación de robots cuadrúpedos. La principal aplicación o ventaja que tienen este tipo de robots es su habilidad para transportar materiales a través de superficies o ambientes complejos. Gracias a la naturaleza de su movimiento pueden ajustarse al terreno en que se encuentran. Además de eso, también se utilizan en aplicaciones de seguridad. Estos se han utilizado como robots guardianes, utilizando cámaras y sensores para el patrullaje de diferentes áreas. Esto les ha abierto paso en la industria militar y policiaca. Siendo partícipes de esfuerzos antiterroristas, realizando tareas como activar rifles o desactivar bombas.

La adaptabilidad de robots cuadrúpedos también los ha vuelto partícipes de misiones de búsqueda y rescate. Debido al incremento de desastres naturales, los esfuerzos de búsqueda y rescate se han visto en la necesidad de implementar este tipo de robots. Los cuales han probado ser efectivos gracias a su adaptabilidad.

Los robots con patas tienen ciertas desventajas. Se debe tener un sistema de control para su estabilidad bastante desarrollado por el hecho de que son robots de base flotante. Además, la cantidad de actuadores que utilizan puede significar que requieren de bastante energía para generar sus movimientos.

6.5. Análisis cinemático por Denavit-Hartenberg

El análisis cinemático mediante el método de Denavit-Hartenberg es una técnica ampliamente utilizada para describir la cinemática de manipuladores robóticos. Este método permite representar de manera sistemática la geometría y las relaciones de transformación entre los eslabones del sistema mecánico analizado.

Para aplicar el método de Denavit-Hartenberg, es necesario seguir tres reglas básicas. Primero, se asigna un sistema de coordenadas a cada eslabón del manipulador. Esta asignación simplifica la descripción de las transformaciones entre eslabones al trabajar en un marco de referencia definido.

En segundo lugar, se definen cuatro parámetros principales: el ángulo de rotación alrededor del eje z_{i-1} , la distancia a lo largo del eje z_{i-1} , la longitud a lo largo del eje x_i , y el ángulo de rotación alrededor del eje x_i . Estos parámetros describen completamente las relaciones geométricas entre los eslabones consecutivos.

Finalmente, se construyen las matrices de transformación homogéneas, que permiten representar las transformaciones entre los sistemas de coordenadas asociados a cada eslabón. Estas matrices describen tanto las rotaciones como las traslaciones necesarias para pasar de un sistema de coordenadas al siguiente, facilitando el análisis del sistema completo [14].

6.6. ESP32 - Tiny S3

El ESP32 - Tiny S3 es una variación compacta del popular microcontrolador ESP32, diseñado para aplicaciones que requieren alto rendimiento en un formato reducido. Este modelo está equipado con un procesador de doble núcleo de 32 bits basado en arquitectura Xtensa LX7, que opera a una frecuencia de 240 MHz, lo que lo hace ideal para tareas de computación intensiva y procesamiento en tiempo real. También cuenta con una memoria RAM interna de 512 KB, junto con 8 MB de PSRAM y 8 MB de almacenamiento flash QSPI externo, permitiendo la ejecución de aplicaciones complejas que demandan un alto uso de memoria.

En cuanto a conectividad, el ESP32 - Tiny S3 es compatible con redes Wi-Fi de 2.4 GHz y soporta Bluetooth 5.0, incluyendo funcionalidades de Bluetooth Low Energy (BLE), lo que lo convierte en una excelente opción para aplicaciones IoT (Internet of Things). Dispone de 17 pines GPIO multifunción que pueden configurarse para diversas tareas, como PWM, ADC, DAC, e interrupciones externas, lo que amplía sus posibilidades de interacción con sensores y actuadores.

Este modelo también incorpora un regulador de voltaje integrado de 3.3 V, un botón de reinicio, y un conector para baterías LiPo, lo que facilita su uso en aplicaciones portátiles o alimentadas por baterías. Adicionalmente, incluye pines de alimentación específicos como VBAT y 5V, así como interfaces de comunicación SPI, I2C, I2S y UART, lo que permite una integración eficiente con dispositivos periféricos.

En términos de tamaño, el ESP32 - Tiny S3 destaca por su formato ultracompacto, con dimensiones de tan solo 35 x 18 mm, lo que lo hace ideal para proyectos con restricciones de espacio. Además, incluye un LED RGB direccionable integrado, que puede usarse como indicador visual en las aplicaciones.

Figura 4. Comparación de tamaño UM Tiny S3.



Nota. Adaptada de [15].

Gracias a su tamaño reducido, bajo consumo energético y alta capacidad de procesamiento, el ESP32 - Tiny S3 es ampliamente utilizado en aplicaciones como:

- **Proyectos de IoT:** monitoreo de sensores remotos, sistemas de automatización en el hogar, dispositivos portátiles y rastreadores.
- **Control de actuadores:** manejo de motores, servos y sistemas mecánicos pequeños.
- **Procesamiento multimedia:** transmisión y procesamiento de datos de audio mediante la interfaz I2S.
- **Aplicaciones educativas:** ideal para proyectos de aprendizaje y prototipado rápido debido a su flexibilidad y amplia comunidad de soporte.

Con sus potentes características y versatilidad, el ESP32 - Tiny S3 se posiciona como una solución robusta para desarrolladores que buscan un microcontrolador confiable para aplicaciones avanzadas en espacios limitados [15].

6.7. Servomotor FT90M

Un servomotor es un motor eléctrico diseñado para rotar partes de una máquina con alta precisión. Está compuesto por varias partes clave:

- Circuito de control.
- Motor de corriente directa (DC).
- Eje de salida.
- Potenciómetro.
- Engranajes de transmisión.
- Amplificador.
- Codificador o resolver.

El eje de salida de un servomotor puede moverse a un ángulo, posición y velocidad específicos, los cuales se pueden controlar de diversas maneras.

El servomotor FT90M es un servomotor digital con engranajes metálicos desarrollado por la empresa FEETECH. Sus características principales son:

- **Alimentación:**

- Con una alimentación de 4.8 V:
 - Corriente máxima de funcionamiento: 800 mA.
 - Torque máximo: 1.89 kg·cm.
- Con una alimentación de 6 V:
 - Corriente máxima de funcionamiento: 1 A.
 - Torque máximo: 2.3 kg·cm.

- **Dimensiones:**

- Longitud total: 23.3 mm.
- Altura: 25.5 mm.
- Ancho: 12.1 mm.

- **Diseño compacto:** es más pequeño que su contraparte MG90, lo que lo hace ideal para aplicaciones con restricciones de espacio.

Figura 5. Dimensiones servomotor Feetech FT90M.



Nota. Adaptada de [16].

El FT90M es un servomotor confiable y versátil, adecuado para proyectos que requieren precisión y eficiencia [16].

6.8. DC-DC Boost converter XL6009

El XL6009 es un regulador de voltaje de conmutación DC-DC desarrollado por Haoyu Electronics. Este dispositivo es un convertidor boost (elevador) diseñado para aumentar el voltaje de entrada a un nivel de salida más alto. Sus principales características son:

- **Rango de operación:**
 - Voltaje de entrada: 5V a 32V.
 - Voltaje de salida ajustable: 5V a 60V.
 - Corriente de salida máxima: 4A (con disipación de calor adecuada).
- **Eficiencia:** hasta un 94 %, dependiendo de las condiciones de carga.
- **Tecnología:**
 - Tecnología PWM (modulación por ancho de pulso) para regular eficientemente la salida de voltaje.
 - Frecuencia de conmutación: 400 kHz.

- **Protecciones integradas:**
 - Protección contra sobrecorriente.
 - Protección contra sobrecalentamiento.
- **Compatibilidad:** compatible con reguladores más antiguos, como el LM2577, ofreciendo un rendimiento mejorado.
- **Aplicaciones:**
 - Sistemas alimentados por baterías de bajo voltaje.
 - Fuentes de energía solar.
 - Control de motores.
 - Fuentes de alimentación y sistemas de iluminación LED.
- **Diseño compacto:** ideal para proyectos donde el espacio es limitado.

6.9. DC-DC Buck converter XL4005

El XL4005 es un regulador de voltaje buck (reductor) desarrollado por LaskaKit, diseñado para reducir el voltaje de entrada a un nivel de salida más bajo y estable. Sus características principales incluyen:

- **Rango de operación:**
 - Voltaje de entrada: 5V a 32V.
 - Voltaje de salida ajustable: tan bajo como 0.8V.
 - Corriente de salida máxima: 5A (con disipación de calor adecuada).
- **Eficiencia:** hasta un 96 % bajo ciertas condiciones de carga.
- **Tecnología:**
 - Frecuencia de conmutación: 300 kHz, reduciendo el tamaño de los componentes externos.
- **Protecciones integradas:**
 - Protección contra sobrecorriente.
 - Protección contra sobrevoltaje.
 - Protección contra sobrecalentamiento.

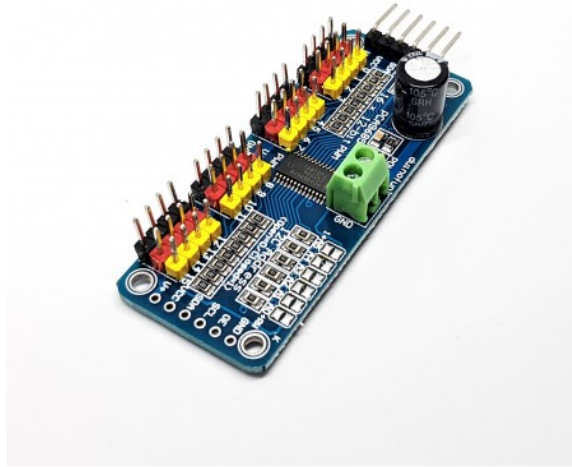
- **Aplicaciones:**
 - Alimentación de microcontroladores.
 - Sistemas embebidos.
 - Circuitos de carga para baterías.
- **Solución eficiente:** de bajo costo y alta eficiencia, adecuada para aplicaciones domésticas e industriales.

6.10. PCA9685: controlador PWM de 16 canales y 12 bits con bus I2C Fm+

El módulo PCA9685 es un controlador versátil diseñado para el manejo de LEDs y servomotores mediante PWM. Sus principales características incluyen:

- **Capacidades de control:**
 - Control individual de hasta 16 salidas PWM.
 - Resolución de 12 bits por canal.
 - Frecuencia máxima de operación: 1600 Hz.
- **Comunicación:**
 - Utiliza el protocolo I2C para comunicarse con microcontroladores.
 - Pines para comunicación: SDA (datos) y SCL (reloj).
- **Pines adicionales:**
 - **GND:** tierra.
 - **VCC:** alimentación para la lógica del módulo.
 - **V+:** alimentación para los dispositivos conectados (por ejemplo, servomotores).
 - **OE (Output Enable):** permite el control asíncrono de las salidas cuando se lleva a estado LOW.
- **Aplicaciones comunes:**
 - Control de servomotores.
 - Manejo de LEDs.
 - Otros sistemas que requieren múltiples canales PWM.

Figura 6. *Módulo PCA9685.*



Nota. Adaptada de [17].

El PCA9685 es una opción confiable y ampliamente utilizada en proyectos donde se requiere un control preciso y eficiente de dispositivos PWM [17].

6.11. Convertidor Buck ajustable DC-DC con pantalla digital

Este módulo es un regulador de voltaje DC-DC Buck Converter desarrollado por DFRobot, basado en el convertidor LM2596, con la inclusión de un display digital para mostrar los voltajes de entrada y salida. Sus principales características son las siguientes:

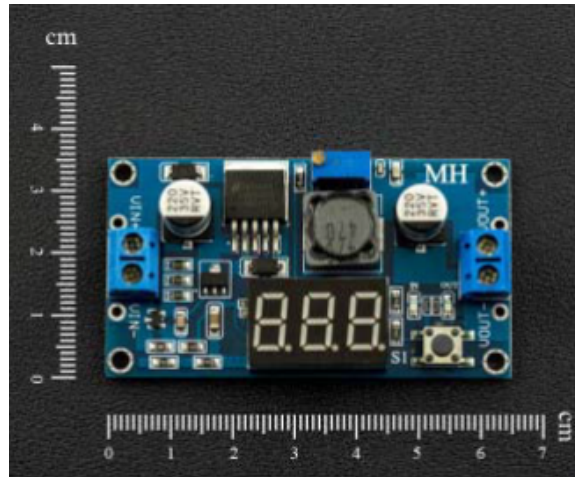
- **Rango de operación:**
 - Voltaje de entrada: 0V a 40V (tolerancia de $\pm 0.05V$).
 - Voltaje de salida ajustable: 1.25V a 37V.
- **Capacidades de salida:**
 - Potencia máxima: 20W.
 - Corriente máxima: 3A.
 - Eficiencia promedio: 88 %.
- **Funciones adicionales:**

- Auto-calibración mediante un botón integrado en la placa.

■ **Protecciones integradas:**

- Protección contra cortocircuitos.
- Protección contra sobrecalentamiento.

Figura 7. *Módulo convertidor Buck ajustable DC-DC de 20W.*



Nota. Adaptada de [18].

Este módulo es ideal para aplicaciones que requieren regulación de voltaje precisa y monitoreo visual, siendo una solución eficiente y fácil de integrar en proyectos electrónicos [18].

7.1. Introducción al diseño del chasis

En esta sección se presentan los objetivos y consideraciones iniciales que se tomaron en cuenta para el diseño del chasis del robot cuadrúpedo. El chasis debe cumplir con diversas funciones, como soportar los componentes mecánicos y electrónicos y permitir movimiento. Debido a las capacidades de los actuadores, se tuvo que optimizar el uso del espacio y peso para garantizar un rendimiento eficiente.

El diseño del chasis se realizó utilizando Autodesk Inventor, herramienta que permitió realizar un diseño paramétrico y validar la funcionalidad del chasis antes de la fabricación.

La metodología de diseño fue altamente iterativa, iniciando con bocetos conceptuales, seguido de refinamientos basados en pruebas de ensamblaje virtual. Estas iteraciones permitieron optimizar el diseño final para cumplir con las especificaciones establecidas.

7.1.1. Objetivos de diseño

Se definieron requisitos importantes para garantizar la funcionalidad del robot. Los cuales son:

- **Estabilidad estructural:** diseñar un chasis que soporte de manera efectiva el peso del

sistema completo. Esto incluye: servomotores, componentes electrónicos, componentes mecánicos prefabricados y baterías, sin comprometer su integridad estructural durante el movimiento.

- **Flexibilidad de movimiento:** diseñar un sistema de articulaciones y paras que permitan al cuadrúpedo realizar movimientos básicos como caminar y mantenerse estable en terrenos planos.
- **Optimización del peso:** seleccionar materiales y diseños que minimicen el peso del chasis, asegurando al mismo tiempo rigidez y durabilidad.
- **Facilidad de fabricación:** crear un diseño modular y simple que sea fácilmente fabricable mediante impresión 3D y que permita realizar ajustes o reemplazos de piezas de manera sencilla.

7.1.2. Justificación de las decisiones iniciales

Estabilidad estructural

El robot cuadrúpedo necesita soportar de manera confiable el peso combinado de todos sus componentes, sin que esto comprometa significativamente su funcionamiento durante el movimiento. Una estructura estable es esencial para:

- Reducir deformaciones que afecten el rendimiento mecánico.
- Permitir que el robot pueda corregir su postura y equilibrio al momento de realizar movimientos.
- Permitir que las patas y articulaciones transmitan la fuerza necesaria para el movimiento sin generar tensiones elevadas en el chasis.

Por estas razones, se seleccionaron materiales con propiedades mecánicas adecuadas y se diseñaron piezas capaces de distribuir el peso uniformemente para reforzar áreas críticas.

Flexibilidad de movimiento

La capacidad del robot para realizar movimientos básicos depende de la libertad de movimiento de sus articulaciones y patas. Esto requiere un diseño de chasis que:

- No interfiera con los grados de libertad de las articulaciones, sino que los facilite.

- Permita un rango completo de movimiento para los actuadores.
- Mantenga la estabilidad al realizar movimientos, reduciendo lo más posible el riesgo de inclinación o caída.

Para cumplir este objetivo de diseño, se implementaron puntos de anclaje precisos para las articulaciones, asegurando que las patas puedan moverse sin restricciones y manteniendo el centro de gravedad del robot dentro de los límites necesarios para el equilibrio del sistema.

Optimización de peso

Un peso elevado en el chasis incrementa la demanda energética de los servomotores, lo cual puede disminuir la eficiencia del sistema. Por ello:

- Se seleccionaron materiales livianos como el PLA y elementos mecánicos de bajo peso.
- Se optimizó el diseño eliminando material de áreas no críticas sin comprometer integridad estructural.
- Se priorizó un diseño compacto y funcional que reduzca el tamaño del robot sin afectar mucho el rendimiento.

Esta optimización contribuye a un menor consumo energético y prolonga la vida útil de las baterías.

Facilidad de fabricación

La simplicidad y modularidad del diseño permiten un proceso de fabricación rápido y aseguran que las piezas puedan ser ensambladas, ajustadas o reemplazadas rápidamente. Esto especialmente debido a:

- Las restricciones de tiempo y recursos disponibles para el desarrollo del robot.
- La necesidad de realizar iteraciones rápidas en el diseño durante las pruebas iniciales.
- La flexibilidad que proporciona la impresión 3D, permitiendo fabricar piezas con alta precisión y reproducirlas en caso de fallas o modificaciones.

Por estas razones, el diseño final del chasis se dividió en módulos, facilitando tanto su impresión como el ensamblaje posterior.

7.2. Requisitos de diseño

En la siguiente sección del capítulo, se presentan los requisitos de diseño que se tuvieron que cumplir para lograr el funcionamiento óptimo del robot. Estos requisitos incluyen la selección adecuada de materiales, la distribución de componentes electrónicos y mecánicos, así como la implementación de un sistema de alimentación. Esto con el objetivo de mantener un equilibrio adecuado a lo largo del chasis y que el robot pueda operar de manera eficiente.

7.2.1. Peso y materiales

El diseño y construcción del chasis del robot requirió de una selección de materiales que permitieran un equilibrio entre resistencia y ligereza.

El material de fabricación principal para el chasis fue PLA (Polylactic Acid), debido a su bajo peso y buena rigidez. Durante las pruebas de fabricación del chasis del robot cuadrúpedo, se evaluaron dos tipos de materiales: PLA normal y *High Speed PLA* (Figura 8). El PLA normal es un material de bajo costo, lo que lo hace adecuado para prototipos iniciales. Sin embargo, mostró una resistencia moderada, siendo propenso a fracturarse bajo tensión. Por otro lado, el *High Speed PLA* demostró ser una opción más robusta, con una mayor resistencia, capaz de soportar mayores cargas y tensiones sin comprometer la integridad del chasis. Además, el *High Speed PLA* permitió una reducción significativa en los tiempos de impresión, lo que facilitó iteraciones rápidas del diseño.

Figura 8. *eSun high speed PLA.*



Nota. Adaptada de [19]. El material mostrado corresponde al filamento utilizado en la impresión 3D de los componentes del robot.

Para brindar mayor robustez estructural, se utilizaron piezas prefabricadas de acero inoxidable. Se utilizó un eje roscado, tuercas y cojinetes como materiales principales de la estructura. Además de estos componentes, se utilizaron dos barras metálicas para unir todo el chasis (Figura 9).

Figura 9. *Barras metálicas para base del chasis.*



Nota. Elaboración propia. Las barras fueron utilizadas para unir los módulos del chasis.

El peso total del sistema fue uno de los principales factores a considerar en el proceso de diseño. En el Cuadro 1 se detallan los componentes principales y el peso total de la estructura, siendo este 656 gramos.

Cuadro 1. *Especificaciones de peso de los componentes del robot cuadrúpedo.*

Componente	Cantidad	Peso por Unidad (g)	Peso Total (g)
Chasis	1	300	300
Servomotores Feetech FT90M	12	13.5	162
TinyS3	1	4	4
Batería Li-ion 18650	2	45	90
DC-DC Buck Converter	2	22	44
PCA9685	1	6	6
Tornillos M4 de 65 mm	4	5	20
Cojinetes M4	12	2	24
Peso Total (g)	-	-	656

Nota. El cuadro muestra la distribución del peso estimado de cada componente del robot, considerando la cantidad utilizada y el peso individual.

Gracias a la determinación del peso de cada componente individual, se pudo calcular el peso total del sistema, asegurando que este se mantuviera dentro de los límites necesarios.

7.2.2. Distribución de carga

Con el fin de asegurar una distribución uniforme del peso a lo largo del robot, se realizaron cálculos de distribución de carga. A continuación, se presenta el cálculo detallado que asegura la movilidad fluida del robot.

Se utilizó la siguiente ecuación para calcular el peso que soporta cada pata y se dividió el peso total dentro de 4. El peso total del robot es:

$$W_{\text{total}} = 656 \text{ g} = 0.656 \text{ kg} \quad (1)$$

$$C_{\text{pata}} = \frac{W_{\text{total}}}{4} \quad (2)$$

$$C_{\text{pata}} = \frac{0.656 \text{ kg}}{4} = 0.164 \text{ kg} \quad (3)$$

Para encontrar la fuerza que cada pata soporta debido a la gravedad se utilizó la siguiente ecuación:

$$F_{\text{pata}} = C_{\text{pata}} \times g \quad (4)$$

Donde $g = 9.81 \text{ m/s}^2$.

$$F_{\text{pata}} = 0.164 \text{ kg} \times 9.81 \text{ m/s}^2 = 1.609 \text{ N} \quad (5)$$

Se debía determinar el torque necesario para levantar cada pata, ya que se tiene una restricción de $\tau_{\text{máximo}} = 2.43 \text{ kg/cm}$ por cada actuador. Para esto se utilizó la siguiente ecuación:

$$\tau_{\text{necesario}} = F_{\text{pata}} \times L_{\text{pata}} \quad (6)$$

Con la longitud de la pata siendo aproximadamente $L_{\text{pata}} = 14 \text{ cm}$. Se encontró que:

$$\tau_{\text{necesario}} = 1.609 \text{ N} \times 14 \text{ cm} = 22.526 \text{ N/cm} = 2.30 \text{ kg/cm} \quad (7)$$

Con este valor se pudo realizar una comparación entre el torque máximo y el torque necesario. Dado que el torque necesario $\tau_{\text{necesario}} = 2.30 \text{ kg/cm}$ es menor que el torque máximo disponible $\tau_{\text{máximo}} = 2.43 \text{ kg/cm}$, los motores pueden operar eficientemente sin sobrecargarse:

$$\tau_{\text{necesario}} < \tau_{\text{máximo}}$$

Cumplir con el torque necesario es un aspecto clave en el diseño del robot, ya que garantiza que los servomotores puedan operar dentro de sus límites de capacidad. Este resultado asegura que cada motor tiene el torque suficiente para levantar y mover las patas sin sobrecargarse, cumpliendo así con los requisitos de diseño establecidos.

Gracias al análisis de distribución de carga y torque, se confirmó que el diseño del chasis cumple con los requisitos fundamentales establecidos. La estructura diseñada soporta de manera eficiente el peso total del sistema, distribuyéndolo de manera uniforme entre las patas. Estos resultados validan que las decisiones tomadas en la selección de materiales, dimensiones y componentes electrónicos están alineadas con los objetivos iniciales, garantizando un diseño eficiente, funcional y sostenible.

7.3. Diseño conceptual y CAD

En esta sección, se observa el proceso de modelado del robot cuadrúpedo. El objetivo principal del diseño era lograr un equilibrio entre movilidad, estabilidad y modularidad.

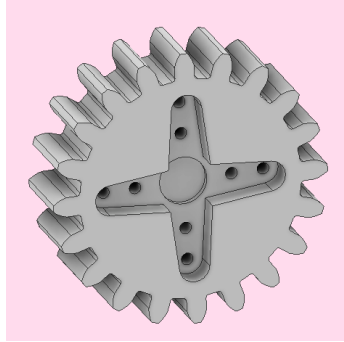
En la fase conceptual, se explica detalladamente el modelo final utilizado. En el cual las cuatro patas están dispuestas equidistantemente alrededor del cuerpo principal.

Para llevar a cabo el diseño, se utilizó Autodesk Inventor como la herramienta principal de modelado CAD. El robot fue modelado en módulos individuales: el chasis, las patas y los soportes para servomotores.

7.3.1. Diseño de los grados de libertad

Cada extremidad del robot fue diseñada para proporcionar tres grados de libertad, necesarios para garantizar la movilidad del robot. El primer grado de libertad, utiliza un sistema de engranajes diseñado específicamente para transmitir potencia. Los engranajes se diseñaron en base a un ajuste con la hélice del motor (Figura 10) para garantizar una mejor sujeción.

Figura 10. *Engrane diseñado para ajuste con hélice del servomotor.*

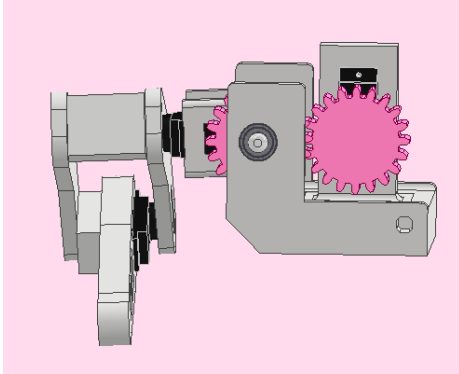


Nota. Elaboración propia. El engrane fue modelado para acoplar la hélice al servomotor.

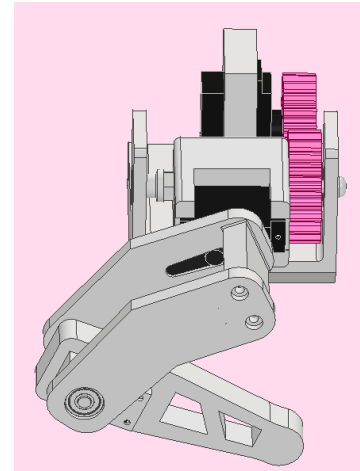
La combinación de estos tres grados de libertad (Figura 11)permite que el robot cuadrúpedo ejecute una marcha estática. Cada uno de los grados tiene un movimiento específico que ejecutar:

- **Primer grado de libertad (rotación de la cadera):** permite la rotación en el plano horizontal, proporcionando mayor fluidez al movimiento coordinado del fémur y la tibia. Este movimiento es fundamental para que el robot pueda avanzar o retroceder con estabilidad.
- **Segundo grado de libertad (rotación del fémur):** habilita la rotación del fémur en el plano vertical, permitiendo que la pata se eleve y descienda. Este movimiento es esencial para generar los pasos del robot y garantizar un patrón de marcha estable. Se implementó mediante un servomotor acoplado directamente al eje del fémur, asegurando precisión y control.
- **Tercer grado de libertad (movimiento de la tibia):** proporciona el contacto directo del robot con la superficie de apoyo, actuando como el efector final de la extremidad. Este grado de libertad permite el avance y la interacción directa con el terreno, siendo clave para transmitir las fuerzas necesarias para el desplazamiento.

Figura 11. Sistema de engranajes para tercer grado de libertad.



(a) Sistema de engrane (vista frontal); muestra el modelado del sistema de engranajes.



(b) Engrane con encaje para hélice de servomotor (rotada); muestra el modelado del sistema.

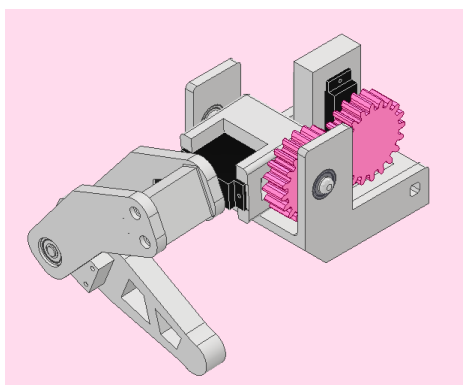
Nota. Elaboración propia. Se presentan dos vistas del modelado CAD del sistema de engranajes.

7.3.2. Diseño modular del chasis

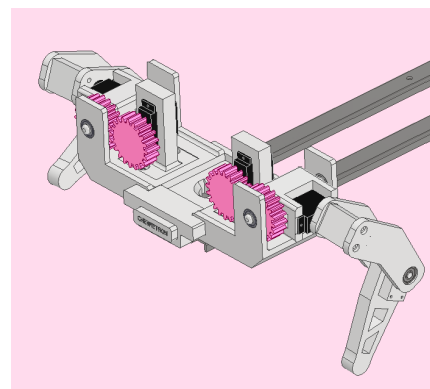
Una de las principales decisiones de diseño fue la implementación de un chasis modular. Esto para permitir un ensamblaje sencillo, mejoras fáciles de implementar y reemplazar piezas de manera rápida.

Este diseño también presenta como beneficio iteraciones rápidas en el diseño y la fabricación, ya que solo es necesario modificar el módulo deseado en lugar de un rediseño de chasis completo. En las siguientes figuras se pueden observar los diferentes módulos diseñados.

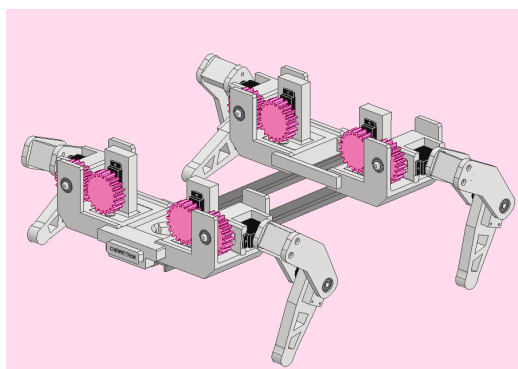
Figura 12. *Fases de ensamblaje modular.*



(a) *Primer módulo (3 DOF, vista isométrica).*



(b) *Segundo módulo (6 DOF y base, vista isométrica).*



(c) *Último módulo (12 DOF, vista isométrica).*

Nota. Elaboración propia. Se muestran las etapas de ensamblaje desde el primer módulo hasta el robot completo.

El diseño modular del chasis no solo facilitó el proceso de ensamblaje y fabricación, sino que también permitió iteraciones rápidas durante el desarrollo, reduciendo significativamente el tiempo y los recursos necesarios para implementar mejoras o corregir problemas. Además, esta modularidad asegura un mantenimiento más eficiente, ya que las piezas pueden ser reemplazadas individualmente sin afectar el resto de la estructura. Este enfoque modular es fundamental para garantizar la escalabilidad del diseño, permitiendo adaptaciones futuras, como la integración de nuevos componentes o la optimización de sistemas existentes.

Fabricación y ensamblaje del chasis

8.1. Proceso de fabricación

En esta sección se presenta a detalle el proceso de fabricación para el chasis del robot cuadrúpedo. Detalles de implementación importantes al momento de unir piezas metálicas y de plástico. También se cubren ajustes y modificaciones importantes para asegurar un funcionamiento óptimo.

8.1.1. Configuración de impresión 3D

Para la fabricación del chasis y otros componentes del robot cuadrúpedo, se utilizó una impresora FlashForge Adventurer 5M Pro, optimizando los parámetros de impresión para obtener piezas ligeras, funcionales y fabricadas en el menor tiempo posible. En el Cuadro 2, se presentan las especificaciones utilizadas durante el proceso de impresión:

- **Relleno (10-15 %):** seleccionado para mantener un equilibrio entre el peso del chasis y su resistencia estructural. Este porcentaje fue suficiente para soportar las fuerzas involucradas durante la operación del robot.
- **Altura de capa (0.2 mm):** elegida para optimizar el tiempo de impresión sin comprometer la funcionalidad de las piezas, ya que no se requería un acabado superficial fino debido a la geometría de las piezas.

Cuadro 2. Configuración de impresión 3D utilizada para la fabricación del chasis.

Parámetro	Valor Utilizado
Relleno (%)	10-15
Altura de capa (mm)	0.2
Velocidad de impresión (mm/s)	500
Tipo de relleno	Hexagonal

Nota. La tabla presenta los parámetros principales empleados en la impresión 3D del chasis, destacando las condiciones que optimizaron tiempo y resistencia.

- **Velocidad de impresión (500 mm/s):** configurada para aprovechar la capacidad de alta velocidad de la impresora FlashForge Adventurer 5M Pro, permitiendo fabricar las piezas en menor tiempo.
- **Tipo de relleno (hexagonal):** este patrón ofrece un balance entre resistencia y consumo de material, ideal para soportar las cargas aplicadas al chasis sin incrementar el peso innecesariamente.

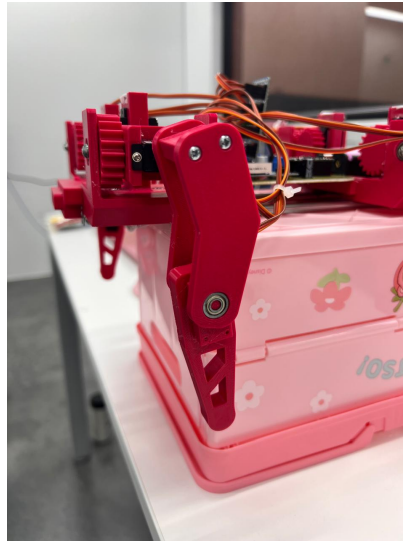
8.1.2. Ensamblaje final del chasis

El ensamblaje del chasis se llevó a cabo siguiendo el diseño modular establecido, lo que permitió integrar de manera eficiente tanto las piezas mecánicas como las plásticas. Este enfoque facilitó la construcción del robot. A continuación, se describen los principales pasos y técnicas utilizadas durante el proceso.

8.1.3. Ensamblaje de piezas mecánicas

Las partes mecánicas, como los ejes roscados, cojinetes y tuercas, se concentraron principalmente en el ensamblaje del hombro del robot, proporcionando la rigidez estructural necesaria para soportar los grados de libertad y las fuerzas generadas durante el movimiento (Figura 13). Para evitar que el eje de los cojinetes se aflojara durante el funcionamiento, se implementó una contrarosca, lo que aumentó la estabilidad y redujo el riesgo de desajustes.

Figura 13. *Ensamblado de piezas mecánicas.*



Nota. Elaboración propia. Ensamblaje de las piezas que conforman la pierna del robot, resaltando la integración de los componentes mecánicos.

Dado que las piezas plásticas podrían dañarse por la fuerza directa de la contrarosca, se utilizó fijador de rosca Permatex de resistencia media (Figura 14). Este fijador aseguró que los componentes mecánicos permanecieran firmemente sujetos sin comprometer las piezas impresas en PLA, permitiendo un ensamblaje duradero y confiable.

Figura 14. *Fijador de tornillo (resistencia media).*



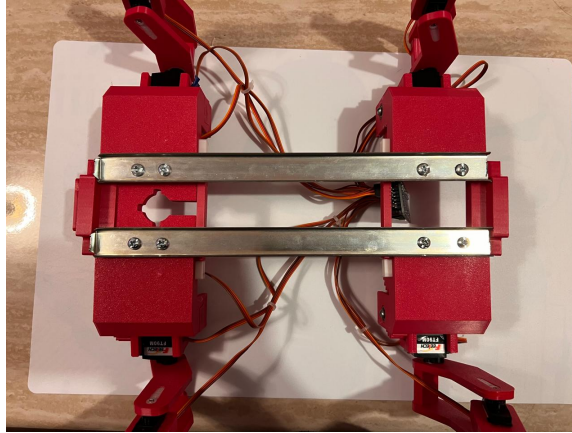
Nota. Adaptada de [20].

Las piezas metálicas fueron ensambladas con especial cuidado para garantizar una alineación precisa con los componentes plásticos.

Las piezas fabricadas en Highspeed PLA se integraron sobre la estructura metálica. Para

fijar de manera segura las piezas de plástico, se utilizó un sistema de ensamblaje a presión, complementado con tornillos en las zonas donde era necesario asegurar una mayor sujeción.

Figura 15. Módulos de patas ensamblados en barras metálicas.



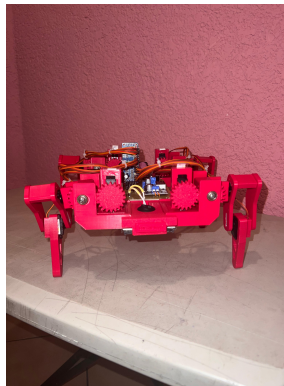
Nota. Elaboración propia. La imagen muestra la fijación de los módulos de patas al chasis (parte inferior) mediante barras metálicas.

El chasis final combina modularidad, ligereza y resistencia, permitiendo al robot cuadrúpedo cumplir con los objetivos de diseño. Además, el enfoque modular asegura que el chasis pueda adaptarse a futuras modificaciones o mejoras, como la integración de sensores adicionales o cambios en los componentes electrónicos.

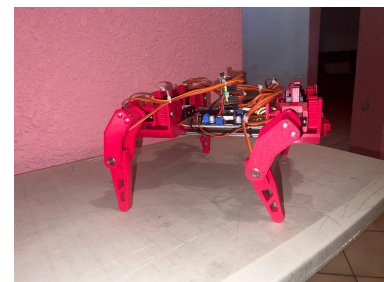
Figura 16. Vistas del chasis final ensamblado.



(a) Vista isométrica.



(b) Vista frontal.



(c) Vista lateral izquierda.

Nota. Elaboración propia. Se presentan distintas vistas (isométrica, frontal y lateral izquierda) del chasis final del robot cuadrúpedo.

Diseño e implementación del sistema de alimentación eléctrica

9.1. Especificaciones eléctricas del robot

El sistema eléctrico del robot cuadrúpedo está diseñado en base a los 12 actuadores que se utilizaron. Se eligieron baterías Li-ion 18650 de 2,500 mAh (Figura 17) [21] para suministrar el sistema de control y el sistema de potencia. Los 12 servomotores Feetech FT90M (Figura 18), que impulsan el movimiento de las patas del robot, requieren un voltaje nominal de 6V para su funcionamiento óptimo.

Figura 17. *Batería Li-Ion 18650 de 2500 mAh.*



Nota. Adaptado de [21]

Figura 18. Servomotor digital Feetech FT90M.



Nota. Adaptado de [16]

La corriente máxima consumida por cada servomotor es de 1A bajo condiciones de carga completa, lo que significa que el sistema, en total, puede llegar a consumir hasta 12A cuando todos los servomotores están en operación simultánea.

9.1.1. Requisitos de potencia para los servomotores

Los servomotores Feetech FT90M utilizados en este proyecto requieren una potencia nominal de 6W cada uno bajo condiciones de carga completa. Esta potencia se calculó usando la relación:

$$P = V \times I \quad (8)$$

Donde:

- P es la potencia en vatios (W),
- V es el voltaje de operación (6V),
- I es la corriente que consume cada servomotor, que puede llegar hasta 1A en su máxima capacidad.

Por lo tanto, la potencia de cada servomotor es:

$$P = 6 \text{ V} \times 1 \text{ A} = 6 \text{ W} \quad (9)$$

Si los 12 servomotores funcionan simultáneamente, la potencia total requerida por el sistema es:

$$P_{\text{total}} = 12 \times 6 \text{ W} = 72 \text{ W} \quad (10)$$

9.2. Cálculos para el sistema de alimentación eléctrica

9.2.1. Opción 1: una batería + regulador Boost (XL6009)

Para la opción de una batería Li-ion 18650 con un regulador Boost (XL6009), tenemos:

$$P_{\text{salida}} = 72 \text{ W}, \quad V_{\text{salida}} = 6 \text{ V}, \quad I_{\text{salida}} = 12 \text{ A}$$

$$\text{Eficiencia del regulador Boost} = 85 \%$$

La potencia de entrada necesaria es:

$$P_{\text{entrada}} = \frac{P_{\text{salida}}}{\text{Eficiencia}} = \frac{72 \text{ W}}{0.85} = 84.71 \text{ W} \quad (11)$$

El voltaje de entrada de la batería es:

$$V_{\text{entrada}} = 3.7 \text{ V}$$

La corriente de entrada requerida es:

$$I_{\text{entrada}} = \frac{P_{\text{entrada}}}{V_{\text{entrada}}} = \frac{84.71 \text{ W}}{3.7 \text{ V}} = 22.89 \text{ A} \quad (12)$$

Se ajustó este valor teniendo en cuenta la eficiencia práctica, resultando en:

$$I_{\text{entrada}} \approx 19.61 \text{ A} \quad (13)$$

La duración de la batería es:

$$\text{Duración} = \frac{\text{Capacidad de la batería}}{I_{\text{entrada}}} = \frac{2.5 \text{ Ah}}{19.61 \text{ A}} = 0.127 \text{ horas} = 7.65 \text{ minutos} \quad (14)$$

9.2.2. Opción 2: dos baterías + regulador Buck (XL4005)

Para la opción de dos baterías Li-ion 18650 en serie con un regulador Buck (XL4005), tenemos:

$$P_{\text{salida}} = 72 \text{ W}, \quad V_{\text{salida}} = 6 \text{ V}, \quad I_{\text{salida}} = 12 \text{ A}$$

$$\text{Eficiencia del regulador Buck} = 90 \%$$

La potencia de entrada necesaria es:

$$P_{\text{entrada}} = \frac{P_{\text{salida}}}{\text{Eficiencia}} = \frac{72 \text{ W}}{0.90} = 80 \text{ W} \quad (15)$$

El voltaje de entrada de las baterías en serie es:

$$V_{\text{entrada}} = 7.4 \text{ V}$$

La corriente de entrada requerida es:

$$I_{\text{entrada}} = \frac{P_{\text{entrada}}}{V_{\text{entrada}}} = \frac{80 \text{ W}}{7.4 \text{ V}} = 10.81 \text{ A} \quad (16)$$

Se ajustó este valor, resultando en:

$$I_{\text{entrada}} \approx 8.89 \text{ A} \quad (17)$$

La duración de las baterías es:

$$\text{Duración} = \frac{\text{Capacidad total de las baterías}}{I_{\text{entrada}}} = \frac{5 \text{ Ah}}{8.89 \text{ A}} = 0.42 \text{ horas} = 25.2 \text{ minutos} \quad (18)$$

9.2.3. Configuración final utilizada

En el sistema final, se implementaron los siguientes componentes:

- **Dos baterías Li-ion 18650:** Cada una con una capacidad nominal de **2500 mAh (2.5Ah)**, proporcionando suficiente energía para alimentar los sistemas electrónicos del robot.
- **Dos reguladores Buck DC-DC de DFRobot con display digital:**

- Un regulador fue utilizado para alimentar el **TinyS3** y los componentes lógicos del sistema.
- El segundo regulador fue dedicado exclusivamente al **PCA9685** y los servomotores, proporcionando el voltaje estable de **6V** requerido para su funcionamiento.

Análisis experimental del consumo

A pesar de que cada servomotor tiene la capacidad de consumir hasta **1A** bajo condiciones de carga máxima, las pruebas experimentales demostraron que el circuito completo nunca superó los **2A de consumo total** durante las operaciones normales del robot. Este comportamiento puede explicarse por los siguientes factores:

1. **Distribución de carga:** los servomotores no operan simultáneamente a su capacidad máxima. En la marcha estática, las fuerzas se distribuyen entre las patas, reduciendo el esfuerzo requerido por cada motor individual.
2. **Eficiencia del sistema:** el módulo PCA9685 regula el control PWM de los servomotores, optimizando el consumo energético al enviar señales precisas en lugar de mantener una carga constante.
3. **Margen de diseño:** aunque los servomotores tienen una capacidad máxima de **1A**, este valor se alcanza solo bajo condiciones extremas, como cargas excesivas o bloqueos. En aplicaciones normales, el consumo real es considerablemente menor.
4. **Velocidad y configuración del movimiento:** la configuración del robot y los patrones de movimiento controlados también reducen los picos de corriente, asegurando un funcionamiento más eficiente.

Esta configuración final no solo permitió alimentar eficientemente todos los componentes del robot, sino que también garantizó una operación estable y segura, cumpliendo con los requisitos del diseño.

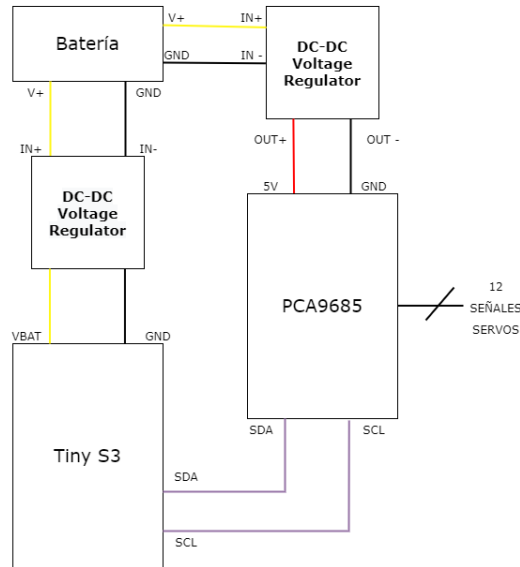
9.3. Diseño del circuito eléctrico

9.3.1. Conexiones generales del circuito

En esta sección se presenta el diagrama de conexiones generales del sistema eléctrico del robot cuadrúpedo (Figura 19). Este diagrama resume la relación entre los componentes

principales, destacando la forma en que los reguladores de voltaje, las baterías y los módulos electrónicos interactúan para garantizar un suministro estable de energía.

Figura 19. Diagrama general del sistema.



Nota. Elaboración propia. La batería alimenta los reguladores DC-DC; uno entrega energía al PCA9685 para controlar 12 servomotores, mientras que el Tiny S3 se comunica con el PCA9685 mediante I2C.

El diseño incluye dos reguladores DC-DC Buck, cada uno cumpliendo una función específica:

- **Primer regulador:** alimenta al microcontrolador TinyS3, proporcionando un voltaje estable de 3.7V.
- **Segundo regulador:** alimenta el módulo PCA9685, asegurando los 6V necesarios para el correcto funcionamiento de los servomotores.

Ambos reguladores reciben energía directamente de dos baterías Li-ion 18650 conectadas en paralelo, lo que permite dividir la carga y extender su duración. Además, las líneas de datos I2C (SDA y SCL) conectan el TinyS3 con el PCA9685, facilitando el control preciso de los servomotores.

Este diseño modular asegura una distribución de la energía entre el módulo de control y el módulo de potencia, manteniendo separados los dos voltajes utilizados.

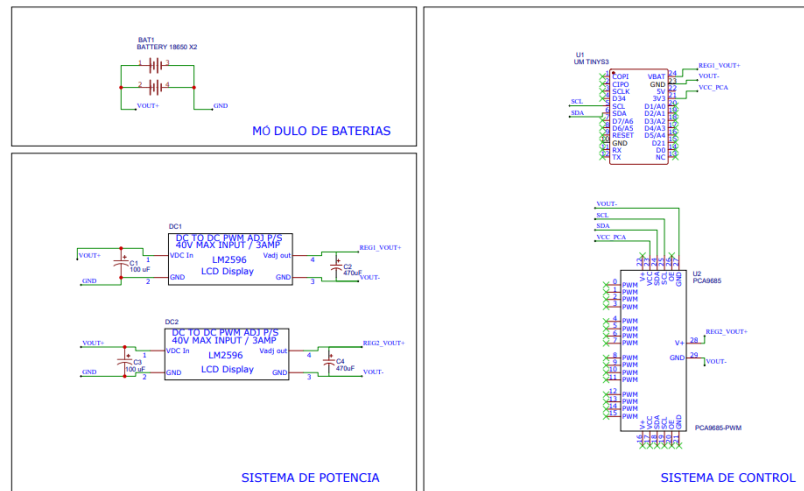
9.3.2. Esquemático general del circuito

En la Figura 20 se presenta el esquemático detallado del circuito eléctrico. Este incluye las conexiones específicas entre todos los componentes del sistema:

- **Baterías:** representadas como la fuente principal de energía.
- **Reguladores DC-DC:** pines de entrada y salida, con detalles de los valores de capacitores y resistencias utilizados para estabilizar el voltaje.
- **PCA9685 y TinyS3:** conexiones de alimentación y comunicación I2C.

El esquemático se diseñó utilizando el software EasyEDA, el cual permitió el posterior diseño del circuito impreso.

Figura 20. Esquemático general del sistema.



Nota. Elaboración propia. Representa la conexión eléctrica detallada entre la batería, los reguladores de voltaje, el módulo PCA9685 y el microcontrolador Tiny S3.

Diseño e implementación del circuito impreso

Con base en el esquemático presentado en la Figura 20, se diseñó el circuito impreso utilizado en el robot cuadrúpedo. Durante el diseño de la placa, se priorizó la compactación y la optimización del tamaño, dado que debía integrarse dentro del chasis sin interferir con otros componentes mecánicos o electrónicos. Este enfoque maximizó el uso del espacio disponible, manteniendo la funcionalidad y estabilidad del sistema eléctrico.

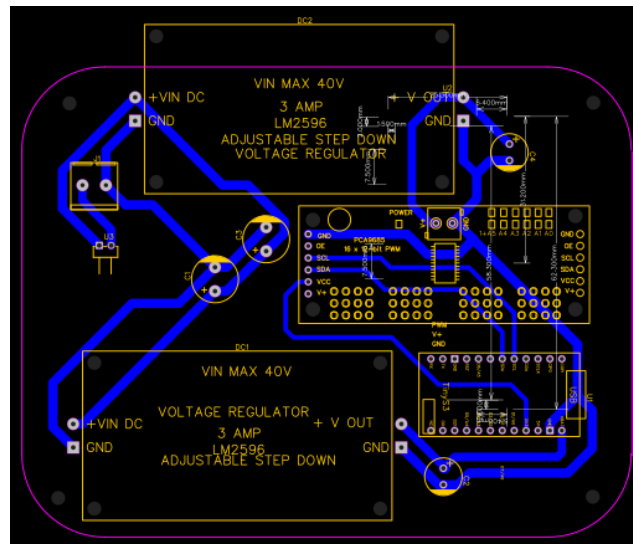
Durante el diseño del circuito impreso, se optó por utilizar una **placa de una sola cara (bottom layer)**, siguiendo las normativas del MakerLab de la universidad, donde se llevó a

cabo la fabricación. Para las pistas que manejan corrientes elevadas, como las destinadas a alimentar los servomotores, se utilizó un ancho de pista de **2 mm**, asegurando la capacidad para soportar el flujo de corriente sin sobrecalentarse. Por otro lado, para las pistas dedicadas a datos o comunicación, se seleccionó un ancho de pista de **1 mm**, suficiente para garantizar la integridad de las señales.

El proceso de diseño presentó varios desafíos:

1. **Headers pre-soldados:** algunos componentes ya contaban con headers preinstalados, lo que limitó las opciones de disposición en la placa y requirió ajustes en la colocación de los elementos.
2. **Limitaciones en el equipo de fabricación:** el interruptor de encendido y apagado tuvo que ser conectado mediante cables, ya que la máquina utilizada en el MakerLab no contaba con herramientas para perforar los hoyos específicos que este componente requería.
3. **Reducción de ancho de la placa:** para optimizar el tamaño del PCB y asegurar que pudiera integrarse en el chasis del robot, se decidió posicionar uno de los reguladores de voltaje ligeramente fuera de la placa principal, sin comprometer la funcionalidad del sistema.

Figura 21. *Diseño del circuito impreso.*



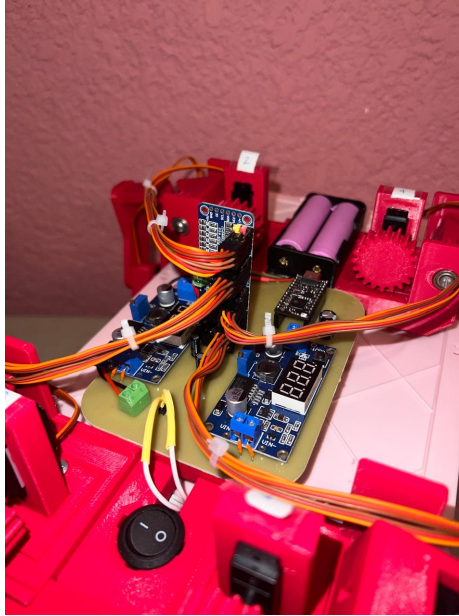
Nota. Elaboración propia. Representa la disposición de pistas y componentes en la PCB para integrar los reguladores de voltaje, el módulo PCA9685 y el microcontrolador Tiny S3.

Estas decisiones y adaptaciones permitieron la fabricación de un PCB funcional y optimizado para las necesidades del robot cuadrúpedo.

Una vez finalizado el diseño del circuito impreso, mostrado en la Figura 21, se procedió a su fabricación e implementación.

En la Figura 22, se puede observar como se implementó el circuito impreso dentro del chasis.

Figura 22. *Circuito impreso implementado.*



Nota. Elaboración propia. Se muestra la PCB ensamblada con los reguladores de voltaje, el módulo PCA9685 y el microcontrolador Tiny S3.

El diseño e implementación del circuito impreso representaron una etapa clave en el desarrollo del sistema eléctrico del robot cuadrúpedo. Desde la planificación inicial, basada en el esquemático (Figura 20), hasta su integración dentro del chasis (Figura 22), cada decisión tomada se centró en garantizar la funcionalidad y optimización del espacio disponible.

Con el circuito impreso implementado, el sistema eléctrico del robot cumplió con los requisitos de diseño iniciales, dando un suministro de energía para todos los módulos y servomotores del robot cuadrúpedo.

Análisis cinemático del robot cuadrúpedo

10.1. Fundamentos del análisis cinemático

10.1.1. Grados de libertad en el robot

El robot implementado en este trabajo cuenta con cuatro patas, cada una de ellas con 3 grados de libertad (DOF). Cada uno de estos grados corresponde a las siguientes articulaciones y eslabones:

- **Cadera del manipulador serial:** permite el movimiento en el plano horizontal y facilita el ajuste de la posición lateral de la pata. Es esencial para proporcionar flexibilidad y rotación en la base de la pata, permitiendo al robot adaptarse a diferentes terrenos y movimientos.
- **Fémur del manipulador serial:** permite el movimiento de la pata hacia arriba y hacia abajo. Este eslabón es crucial para controlar la elevación y el descenso de la pata durante la marcha estática y dinámica del robot, influenciando directamente la estabilidad.
- **Tibia del manipulador serial:** permite los movimientos de flexión y extensión en la parte inferior de la pata. Esta articulación define la posición final del efector (la punta de la pata) y es clave para alcanzar posiciones específicas en el espacio.

10.1.2. Análisis cinemático directo por método de Denavit-Hartenberg

Para la pata del robot cuadrúpedo, se utilizó el método de Denavit-Hartenberg (DH) para describir la relación entre las articulaciones y el efector final. Las articulaciones iniciales tienen los siguientes ángulos:

$$\theta_1 = 30^\circ, \quad \theta_2 = 45^\circ, \quad \theta_3 = 90^\circ$$

Y los eslabones tienen las siguientes longitudes:

$$L_{hip} = 31.15 \text{ mm}, \quad a_1 = 77.80 \text{ mm}, \quad a_2 = 84.86 \text{ mm}$$

Estos valores se utilizaron para determinar la pose final de cada una de las patas en un espacio tridimensional.

Cada eslabón tiene una matriz de transformación homogénea definida como:

$$T_i^{i+1} = \begin{pmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Para simplificar el análisis, se consideró $d_i = 0$ y $\alpha_i = 0$, con lo que se obtuvo una matriz simplificada:

$$T_i^{i+1} = \begin{pmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i & 0 & a_i \sin \theta_i \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Para obtener la transformación total de la pata, se multiplicaron las matrices de los tres eslabones:

$$T_{\text{final}} = T_1^2 \cdot T_2^3 \cdot T_3^4$$

Con los valores específicos para $\theta_1 = 30^\circ$, $\theta_2 = 45^\circ$, $\theta_3 = 90^\circ$, $L_{hip} = 31.15$ mm, $a_1 = 77.80$ mm, $a_2 = 84.86$ mm, se obtuvo:

$$T_{\text{final}} = \begin{pmatrix} \sqrt{3}/2 & -1/2 & 0 & 0 \\ 1/2 & \sqrt{3}/2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 31.15 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \sqrt{2}/2 & -\sqrt{2}/2 & 0 & 55.00 \\ \sqrt{2}/2 & \sqrt{2}/2 & 0 & 55.00 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 84.86 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

10.2. Implementación del análisis cinemático en software

10.2.1. Programación del control cinemático en Arduino/ESP32

Para la programación del control cinemático del robot cuadrúpedo, se utilizó el microcontrolador TinyS3 (ESP32-S3) junto con un controlador PWM (PCA9685) para controlar los servomotores de manera precisa. La lógica del movimiento está basada en ecuaciones de cinemática inversa para calcular los ángulos de las articulaciones a partir de posiciones deseadas (x, y, z) en el espacio tridimensional, y en la generación de trayectorias suaves que permiten un movimiento fluido.

A continuación, se detallan los principales aspectos de la implementación.

Cinemática inversa

La cinemática inversa se utilizó para calcular los ángulos de las tres articulaciones de cada pata $(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$. Las ecuaciones implementadas fueron las siguientes:

- θ_1 (Cadera):

$$\theta_1 = \arctan\left(\frac{y}{x}\right)$$

Este ángulo determina la rotación lateral de la pata en el plano horizontal.

- θ_2 (Fémur):

$$\theta_2 = \arctan\left(\frac{z}{r}\right) + \arccos\left(\frac{a_1^2 + d^2 - a_2^2}{2a_1d}\right)$$

Donde:

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} - L_{hip}, \quad d = \sqrt{r^2 + z^2}$$

Este ángulo controla el movimiento hacia arriba y hacia abajo del fémur.

- θ_3 (Tibia):

$$\theta_3 = 180^\circ - \arccos\left(\frac{a_1^2 + a_2^2 - d^2}{2a_1a_2}\right)$$

Este ángulo controla la flexión y extensión de la tibia.

Estas ecuaciones se implementaron en una función denominada `inverseKinematics`, que toma como entrada las coordenadas (x, y, z) y devuelve los ángulos de las articulaciones.

Generación de trayectorias

Para generar trayectorias, se utilizó una interpolación sinusoidal que asegura que el efector final de la pata sigue un camino específico. La trayectoria tiene una forma de semicírculo, diseñada para elevar la pata durante la fase de transferencia y permitir un contacto firme con el suelo durante la fase de soporte.

Las ecuaciones utilizadas para las trayectorias son:

- **Posición en x :**

$$x(t) = x_{\text{centro}} + r \cos(t_{\text{norm}} \cdot \pi)$$

Donde t_{norm} es el tiempo normalizado entre 0 y 1.

- **Posición en z :**

$$z(t) = z_{\text{centro}} - r \sin(t_{\text{norm}} \cdot \pi)$$

- **Posición en y :**

$$y(t) = r \cos(t_{\text{norm}} \cdot \pi) \sin(\theta_1)$$

Implementación del movimiento coordinado

El robot utiliza un patrón de marcha basado en la alternancia entre patas opuestas. Por ejemplo:

- Durante la primera fase, las patas frontal derecha y lateral izquierda ejecutan la trayectoria calculada, mientras que las patas opuestas permanecen fijas para mantener la estabilidad.
- Durante la segunda fase, las patas frontal izquierda y lateral derecha ejecutan la trayectoria, alternando el soporte.

El siguiente fragmento de código ilustra este proceso:

```
// Movimiento de ida de las patas frontal derecha y lateral izquierda
for (int i = 0; i <= pasos; i++) {
    float t_norm = (float)i / pasos; // Normalizar t entre 0 y 1
    float x = x_centro + radio * cos(t_norm * PI);
    float z = z_centro - radio * sin(t_norm * PI);
    float y = radio * cos(t_norm * PI) * sin(theta1_rad);

    moveLeg(x, y, z, 8, 9, 10); // Frontal derecha
    moveLeg(x, y, z, 4, 5, 6); // Lateral izquierda
    delay(10);
}
```

Se logró implementar un robot cuadrúpedo con 12 grados de libertad, capaz de realizar movimientos sencillos. A través de la experimentación, se validó que el sistema de control es capaz de ejecutar trayectorias predefinidas para los movimientos de las patas, asegurando que el efector final siga un camino específico.

El diseño modular del robot permite realizar iteraciones rápidas y sencillas tanto en la estructura mecánica como en los sistemas electrónicos, facilitando futuras mejoras y ajustes. Se verificó que el torque requerido para el movimiento de cada pata es de 2.30 kg·cm, dentro del límite del torque máximo de los servomotores que es 2.43 kg·cm, asegurando que el sistema pueda operar sin sobrecargarse. Este torque fue validado a través de pruebas de movimiento experimentales del chasis, donde se observó la fluidez del movimiento.

Se implementó un sistema electrónico modular que garantiza un suministro de energía confiable a los servomotores, asegurando su funcionamiento durante la operación del robot. Se verificó que el consumo de corriente general no superará los 2A bajo carga estándar por medio de observaciones experimentales.

La implementación del análisis cinemático directo e inverso permitió validar el control del movimiento. Se verificó que los ángulos, calculados mediante la cinemática inversa dentro del código, cumplen con el comportamiento esperado en condiciones de marcha estable, permitiendo un control de la trayectoria de las patas. Se realizaron pruebas de movimiento en diferentes configuraciones para observar la respuesta del sistema y su estabilidad durante la locomoción.

El sistema mecánico, eléctrico y de control del robot cuadrúpedo cumple con los requisitos de diseño establecidos. Los resultados experimentales validan su capacidad de ejecución de trayectorias, proporcionando una base sólida para futuras mejoras en la optimización del sistema de locomoción y control de estabilidad en terrenos más complejos.

Incorporar tuercas embebidas en las áreas críticas del chasis donde se realizan conexiones mecánicas frecuentes. Esto evitará que el plástico utilizado en la fabricación, como el PLA, se desgaste o deforme con el tiempo, mejorando la durabilidad y la resistencia estructural del robot.

Rediseñar la disposición de los componentes electrónicos en la PCB para reducir el espacio ocupado y mejorar la organización general del sistema.

Diseñar e implementar un sistema que permita cargar las baterías dentro del robot, sin necesidad de extraerlas del banco de baterías. Esto simplificaría significativamente el proceso de recarga y reduciría el desgaste en las conexiones físicas de las baterías.

Realizar la integración de una IMU en el sistema de control. Esto permitiría realizar análisis más avanzados de la orientación y posición del robot, facilitando movimientos más complejos y mejorando la estabilidad en tiempo real. Esto sería especialmente útil para caminar en terrenos inclinados o con perturbaciones externas.

Considerar el uso de algoritmos de aprendizaje automático. Esto podría permitirle al robot ajustar sus movimientos en tiempo real para adaptarse a condiciones cambiantes del entorno, lo que mejoraría su eficiencia y funcionalidad.

En futuros desarrollos, llevar un registro más detallado de las iteraciones de diseño realizadas permitirá evaluar qué cambios generaron las mejoras más significativas, lo cual facilitaría la optimización continua del sistema.

-
-
- [1] F. J. Caceros Morales, «Diseño de un chasis de robot humanoide basado en el Robonova-1,» Universidad del Valle de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2024.
 - [2] H. A. Burmester Campos, «Diseño de controlador de vuelo para cuadricóptero con capacidad de integrarse al ecosistema Robotat vía inalámbrica Wi-Fi,» Universidad del Valle de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2022.
 - [3] R. Kolhe, K. Gadhavi, N. Koli, S. Gurav y P. Raut, «Overview of Different Techniques Utilized in Designing of a Legged Robot,» *Global Journal of Enterprise Information System*, 2017.
 - [4] J. Kim, T. Kang, D. Song y S.-J. Yi, «Design and Control of a Open-Source, Low Cost, 3D Printed Dynamic Quadruped Robot,» *Applied Sciences*, 2021.
 - [5] Y. Shi, S. Li, M. Guo, Y. Yang, D. Xia y X. Luo, «Structural Design, Simulation and Experiment of Quadruped Robot,» *Applied Sciences*, 2021.
 - [6] G. Bledt, M. J. Powell, B. Katz, J. Di Carlo, P. M. Wensing y S. Kim, «MIT Cheetah 3: Design and Control of a Robust, Dynamic Quadruped Robot,» *IEEE*, 2018.
 - [7] Shigley, *Diseño en Ingeniería Mecánica*. McGraw Hill, 2018.
 - [8] R. Norton, *Diseño de Maquinaria: Síntesis y Análisis*. McGraw Hill, 2013.
 - [9] Autodesk, *3D Printing Solutions*. dirección: <https://latinoamerica.autodesk.com/solutions/3d-printing>.
 - [10] Xometry, *3D Printing Design Rules*, 2023. dirección: <https://xometry.pro/en-eu/articles/3d-printing-design-rules/>.
 - [11] Formlabs, *FDM vs. SLA: Comparación de Tipos de Impresoras 3D*. dirección: <https://formlabs.com/latam/blog/fdm-sla-comparacion-tipos-impresoras-3d/>.

- [12] E. Zurich, *Legged Locomotion Research*. dirección: <https://rsl.ethz.ch/research/researchtopics/legged-locomotion.html>.
- [13] LESICS, *Four-Legged Robot Working*, 2022. dirección: <https://www.lesics.com/four-legged-robot-working.html>.
- [14] K. M. Lynch y F. C. Park, *Modern Robotics: Mechanics, Planning, and Control*. Cambridge, 2017.
- [15] *ESP32-S3 Datasheet*. dirección: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-s3_datasheet_en.pdf.
- [16] *FT90M Datasheet*. dirección: <https://cdn.shopify.com/s/files/1/0695/1347/8453/files/FT90M.pdf>.
- [17] *PCA 9685 Datasheet*. dirección: <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/PCA9685.pdf>.
- [18] *DC-Dc Adjustable Buck Converter Datasheet*. dirección: https://mm.digikey.com/Volume0/opasdata/d220001/medias/docus/2308/DFR0379_Web.pdf.
- [19] eSun, *eSun PLA Pro*, 2024. dirección: <https://esun3dstore.com/products/pla-pro>.
- [20] Permatex, *Medium Strength Threadlocker Blue, 36 ml*. dirección: <https://www.permatex.com/products/thread-compounds/blue-threadlockers/permatex-medium-strength-threadlocker-blue-36-ml/>.
- [21] L. Electrónica, *Batería Li-ion 18650 BAK N18650CNP de 2500mAh 12C*, 2024. dirección: https://laelectronica.com.gt/bateria-li-ion-18650-bak-n18650cnp-de-2500-mah-12c?srsId=AfmBOopA52x9sHtn6_01ylCBOlpyDxCiLTJhkyDQVaZpZNNgm86pWgBV.

Repositorio del proyecto

El código fuente, diseños y documentación del proyecto están disponibles en el repositorio de GitHub, que puede consultarse en el siguiente enlace:

Repositorio del proyecto en GitHub

Componentes utilizados

En la siguiente tabla se presenta el listado de componentes utilizados para la implementación del robot cuadrúpedo:

Cuadro 3. *Componentes utilizados en el proyecto.*

Componente	Descripción
Microcontrolador	Unexpected Maker TinyS3 (ESP32-S3): control principal del sistema.
Actuadores	12 servomotores Feetech FT90M: movimiento de las articulaciones.
Controlador PWM	PCA9685: generación de señales PWM para los servomotores.
Sistema de alimentación	<ul style="list-style-type: none"> – 2 baterías 18650 y caja de baterías – 2 reguladores de voltaje: 20W adjustable DC-DC Buck converter with digital display
Componentes mecánicos	<ul style="list-style-type: none"> – Estructura impresa en 3D (material PLA): cuerpo y patas del robot. – Tornillería: ensamblaje de las partes mecánicas.
Software y herramientas	<ul style="list-style-type: none"> – Autodesk Inventor: diseño CAD de las partes mecánicas. – Arduino IDE: programación del microcontrolador. – Impresora 3D: fabricación de las piezas mecánicas.

Nota. La tabla resume los componentes electrónicos, mecánicos y de software empleados en el desarrollo del robot cuadrúpedo, incluyendo los recursos de diseño y fabricación utilizados.