



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO
CARRERA DE ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN**

**DESARROLLO DE UN ROBOT TRANSFORMABLE HEXA PARA EXPLORACIÓN
EN TERRENOS IRREGULARES**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de Ingeniero en Electrónica y Automatización

AUTOR: Esteban Isaac Tayo Balseca

TUTOR: Andrés Sebastián Calero Calero

Quito-Ecuador

2026

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Esteban Isaac Tayo Balseca con documento de identificación N° 1755643697, manifiesto que:

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

Quito, 26 de marzo del año 2026

Atentamente,



Esteban Isaac Tayo Balseca

1755643697

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

Yo, Esteban Isaac Tayo Balseca con documento de identificación N° 1755643697, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Proyecto Técnico: “Desarrollo de un Robot Transformable HEXA para exploración en terrenos irregulares”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero en Electrónica y Automatización, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

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

Quito, 26 de marzo del año 2026

Atentamente,



Esteban Isaac Tayo Balseca

1755643697

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Andrés Sebastián Calero Calero con documento de identificación N° 1719252346, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: DESARROLLO DE UN ROBOT TRANSFORMABLE HEXA PARA EXPLORACIÓN EN TERRENOS IRREGULARES, realizado por Esteban Isaac Tayo Balseca con documento de identificación N° 1755643697, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto Técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 26 de marzo del año 2026

Atentamente.



Ing. Andrés Sebastián Calero Calero, MsC

1719252346

AGRADECIMIENTO

Me es grato ponerme en contacto con mis distinguidos maestros quienes dieron todo su potencial y conocimiento para engrandecer mi vida profesional en especial al Ingeniero Andrés Calero, a mi director de carrera Doctor Gustavo Caiza, al personal administrativo y de servicio.

Agradezco a Dios por la vida y la sabiduría que me da, a mis Padres, abuelos y hermanos por su apoyo incondicional y sus consejos he llegado a culminar una de mis metas, la cual constituye la herencia más valiosa que pudiera recibir.

Como un testimonio de gratitud infinita a mi hijo porque su presencia ha sido y será siempre el motivo más grande que ha impulsado para lograr esta meta, a mi esposa por su comprensión y su tolerancia.

Dedicatoria

Esta tesis le dedico a mi Dios quien supo guiarme por el buen camino, darme fuerzas para seguir adelante y no desmayar en los problemas que se presentaban enseñándome a no perder mi dignidad.

A mis padres por su amor, apoyo, consejos, ayuda en los momentos difíciles y por ayudarme con los recursos necesarios para estudiar me han dado todo lo que soy como persona, mis valores, mis principios, mi carácter, mi perseverancia y mi coraje para conseguir mi objetivo.

A mi gloriosa Universidad Politécnica Salesiana donde recibí las más grandes instrucciones para el desarrollo de mi tesis.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN	1
ABSTRACT	2
INTRODUCCIÓN	3
CAPÍTULO 1	4
ANTECEDENTES	4
1.1.PROBLEMA	4
1.2.ANTECEDENTES	4
1.3.IMPORTANCIA Y ALCANCE.....	5
1.4.DELIMITACIONES	6
1.5.OBJETIVOS DEL PROYECTO.....	6
1.6.REVISIÓN DE LA LITERATURA O FUNDAMENTOS TEÓRICOS	7
1.6.1.Robótica Reconfigurable y Transformable	7
1.6.2.Dinámica de la Marcha y Estabilidad Estática	7
1.6.3.Cinemática Inversa en Robots de Patas.....	7
1.6.4.Arquitecturas de Control Basadas en ESP32	8
1.6.5.Manufactura Aditiva y Materiales Poliméricos.....	8
1.7.MARCO TEÓRICO	8
1.7.1.Robótica Transformable.....	8
1.7.2.Control en Tiempo Real.....	9
1.7.3.Gestión y Eficiencia Energética en Robots Autónomos	9
1.7.4.Coordinación de Actuadores	10
CAPÍTULO 2	12
MARCO METODOLÓGICO	12
2.1Arquitectura electrónica distribuida	12
2.2Diseño y fabricación aditiva	13
2.2.1Estructura (Chasis Interno).....	13
2.2.2Patas (Resguardo Bola)	13
2.3Gestión energética en robótica móvil.....	14
2.4Conectividad inalámbrica y control remoto	15
2.5Implementación del Sistema de Movimiento y Estabilidad.....	16
2.6Sistema de Control de Postura y Consideraciones para Estabilidad	17
CAPÍTULO 3	19
PRUEBAS Y RESULTADOS	19
3.1Prototipo impreso.....	19
3.2Prueba de funcionamiento	20
3.2.1Pruebas de Transformación en Diferentes Terrenos	20
3.2.2Pruebas de Traslado en Terrenos Irregulares	22
3.2.3Prueba del sistema de control de Movimiento en Terreno	24
3.2.4Consumo de energía tras recorrer distancia de 7m.....	26
3.2.5Consumo de energía tras la transformación hexápodo a bola	28
3.2.6Consumo de energía tras la transformación bola a hexápodo	29
3.3Cronograma	30
3.4Presupuestó.....	32
CAPITULO 4	33

<i>4.1.CONCLUSIONES</i>	33
<i>4.2.RECOMENDACIONES</i>	33
REFERENCIAS	35
ANEXOS	37

INDICE DE TABLA

TABLA 3. 1 TRASFORMACIÓN Y ESTABILIDAD POR SUPERFICIE.....	21
TABLA 3. 2 TRASFORMACIÓN Y ESTABILIDAD POR SUPERFICIE.....	21
TABLA 3. 3 EVALUACIÓN DE MANIOBRABILIDAD EN EL TERRENO CONCRETO	24
TABLA 3. 4 EVALUACIÓN DE MANIOBRABILIDAD EN EL TERRENO BALDOSA	24
TABLA 3. 5 EVALUACIÓN DE MANIOBRABILIDAD EN EL TERRENO CÉSPED.....	26

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.1 BATERÍA 18650 CON QUÍMICA INR (LITHIUM NICKEL MANGANESE COBALT OXIDE).....	10
FIGURA 2. 1 DISEÑO DE LA ARQUITECTURA ELECTRÓNICA.	12
FIGURA 2. 2 IMPRESIÓN 3D DE ESTRUCTURA DEL ROBOT TRANSFORMABLE HEXA. FUENTE: FABRICADO POR TAICED, 2025.	14
FIGURA 2. 3 SISTEMA DE ALIMENTACIÓN Y REGULACIÓN DE VOLTAJE MEDIANTE LM2596....	15
FIGURA 2. 4 ESQUEMA ELECTRÓNICA Y SISTEMA DE CONTROL	16
FIGURA 2. 5 UBICACIÓN DE SERVOMOTORES EN ARTICULACIONES	17
FIGURA 2. 6 SISTEMA DE CONTROL EN HEXÁPODO Y BOLA	18
FIGURA 3. 1 VISTA PREVIA DE PIEZAS Y COMPONENTES ELECTRÓNICOS ANTES DE ARMARLO.	19
FIGURA 3. 2 PRUEBAS DEL PROTOTIPO YA EN FUNCIONAMIENTO.....	20
FIGURA 3. 3 DESEMPEÑO EN EL TERRENO DE CÉSPED (DISTANCIA: 7M).....	22
FIGURA 3. 4 DESEMPEÑO EN EL TERRENO DE CONCRETO CONCRETO (DISTANCIA: 7M)	23
FIGURA 3. 5 DESEMPEÑO EN EL TERRENO DE BALDOSA (DISTANCIA: 7M)	23
FIGURA 3. 6 CURVAS DE DESCARGA DE VOLTAJE POR TIPO DE SUPERFICIE (CÉSPED)	27
FIGURA 3. 7 CURVAS DE DESCARGA DE VOLTAJE POR TIPO DE SUPERFICIE (BALDOSA)	27
FIGURA 3. 8 CURVAS DE DESCARGA DE VOLTAJE POR TIPO DE SUPERFICIE (CONCRETO)	28
FIGURA 3. 9 PRUEBA DEL CONSUMO ENERGÉTICO	29
FIGURA 3. 10 GRÁFICA COMPARATIVA DEL CONSUMO ENERGÉTICO ENTRE MODOS BOLA A HEXÁPODO.	30

RESUMEN

Este proyecto técnico presenta el desarrollo de un robot hexápodo transformable, denominado HEXA, diseñado para la exploración y protección en terrenos irregulares. El sistema integra un microcontrolador ESP32 y un controlador especializado UCS-32 para gestionar de forma sincronizada 18 servomotores MG90S. La estructura, fabricada mediante impresión 3D en Smartfil RePLA y PLA, permite la transición entre un modo bola de resguardo y un modo hexápodo de desplazamiento.

Las pruebas validaron que el diseño mecánico mantiene la estabilidad operativa en superficies de concreto, césped y baldosa, logrando una navegación segura sin necesidad de sensores externos complejos.

Palabras clave: Hexápodo, Robot Transformable, ESP32, Cinemática Inversa, Desplazamiento, Resguardo Esférico.

ABSTRACT

This technical project presents the development of a transformable hexapod robot, named HEXA, designed for exploration and protection in irregular terrains. The system integrates an ESP32 microcontroller and a UCS-32 servo control module to synchronously manage 18 MG90S servomotors. The structure, manufactured via 3D printing using Smartfil RePLA and PLA, enables the transition between a spherical shell mode for protection and a hexapod mode for multipodal displacement based on inverse kinematics.

Experimental tests validated that the mechanical design maintains operational stability on concrete, grass, and tile surfaces, achieving secure navigation without the need for complex external sensors. Despite practical challenges such as motor wear due to torque and battery validation on high-friction surfaces, the final prototype proves to be a robust and versatile platform for exploration missions and robotics competitions.

Keywords: Hexapod, Transformable Robot, ESP32, Inverse Kinematics, Multipodal Displacement, Spherical Shell.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la evolución tecnológica ha puesto a la robótica móvil frente a un espejo, mostrando así la realidad de sus propias limitaciones. A pesar de los logros alcanzados, sigue existiendo una brecha cuando las máquinas deben operar en escenarios que no han sido diseñados para ellas, las soluciones convencionales como el uso de ruedas, orugas o incluso patas con estructuras rígidas suelen fallar en terrenos irregulares o inapropiados.

Esta incapacidad de respuesta ha forzado un cambio de paradigma, ya que no basta con diseñar robots para entornos específicos; ahora buscamos que el robot sea capaz de reconfigurarse y "mutar" físicamente para lidiar con lo inesperado. Es precisamente en este entorno de versatilidad donde la robótica transformable se consolida como la respuesta técnica más prometedora para superar las barreras de la movilidad tradicional.

El presente trabajo de titulación plantea el desarrollo de un robot transformable denominado HEXA, capaz de alternar entre una configuración bola y una marcha hexápoda, lo que le permite desplazarse eficientemente tanto en terrenos planos como en superficies irregulares. Este diseño se fundamenta en principios de movilidad adaptativa, en lo cual se controla en tiempo real y se mantiene manufactura modular. Para ello, se integran tecnologías como el microcontrolador ESP32, servomotores MG90S, mecanismos de estabilidad estática, módulos de comunicación inalámbrica y estructuras impresas en 3D.

La implementación del robot HEXA no solo pretende resolver un problema técnico, sino también impulsar la participación del Club de Robótica de la UPS (Universidad Politécnica Salesiana) en competencias de alto nivel, fomentando la innovación y el desarrollo de habilidades prácticas entre los estudiantes. De esta manera, el proyecto se enmarca en los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), contribuyendo al ODS 4 (educación de calidad) y al ODS 9 (industria, innovación e infraestructura).

CAPÍTULO 1

ANTECEDENTES

Problema

Hoy por hoy, la exploración de distintos tipos de terrenos irregulares, como superficies desniveladas, zonas con vegetación o suelos inestables, representa un desafío crítico para la robótica móvil que requiere capacidades de adaptación morfológica (Hutter, M., et al, 2024). Los sistemas de movilización tradicionales, basados principalmente en ruedas o orugas, presentan limitaciones significativas cuando se enfrentan a obstáculos verticales o superficies no uniformes como césped, lisos o desniveles, donde suelen perder tracción o quedar inmovilizados debido a su geometría fija y falta de puntos de apoyo versátiles (Zhuang, Z., et al, 2023).

Por otro lado, aunque los robots con extremidades, como los hexápodos, ofrecen una mayor adaptabilidad y estabilidad en terrenos irregulares, suelen ser sistemas vulnerables durante el transporte o ante caídas debido a la exposición directa de sus articulaciones y actuadores (Ji, G., et al, 2023). Existe, por tanto, una necesidad tecnológica de desarrollar sistemas que no solo sean capaces de desplazarse en superficies complejas, sino que también posean una arquitectura reconfigurable que permita la protección integral de sus componentes críticos mediante el encapsulamiento morfológico (Wang, J., et al, 2024).

En este contexto, surge la problemática de diseñar un mecanismo que combine la eficiencia de un hexápodo con la capacidad de transformación morfológica. Como señalan (Kozlov, M., et al, 2024) y (Liu, Y., et al, 2023), la escasez de arquitecturas robóticas de bajo costo que integren un modo bola de protección con una marcha de trípede alternado limita la capacidad de respuesta en misiones de exploración donde la integridad del hardware y la agilidad de maniobra son fundamentales.

Antecedentes

La robótica transformable es una rama emergente dentro de la ingeniería robótica que busca dotar a los sistemas móviles de la capacidad de modificar su configuración estructural y funcional para adaptarse a diversos entornos. Esta adaptabilidad resulta crucial en terrenos

irregulares o entornos no estructurados, donde las soluciones tradicionales de morfología fija presentan limitaciones críticas de movilidad y eficiencia (Liang, G, 2023).

En cuanto a la robótica transformable, diversos estudios han explorado la capacidad de reconfiguración morfológica para mejorar la movilidad y la supervivencia del sistema. Un antecedente relevante es el trabajo de (Shao, X., et al, 2022), quienes experimentaron con robots hexápodos para misiones de búsqueda en terrenos irregulares, demostrando que la estabilidad estática inherente a las seis patas es fundamental para operar de forma segura en terrenos irregulares. Por su parte, (Zaman, S., et al, 2024) desarrollaron prototipos con una maniobrabilidad avanzada y arquitecturas reconfigurables, al integrar múltiples sensores y sistemas de transformación para la navegación autónoma en superficies de alta complejidad.

Finalmente, la integración de modos de desplazamiento híbridos ha sido documentada por investigadores como (Azad, M., et al, 2023), quien analizo la estabilidad de hexápodos en terrenos irregulares mediante el uso de marchas coordinadas y algoritmos de compensación de postura en tiempo real. Asimismo, (Vargas, J., et al, 2024) presento desarrollos en robots esféricos o bolas capaces de desplegar extremidades, concluyendo que la capacidad de cambiar de forma no solo facilita el transporte y la protección del hardware, sino que permite una transición eficiente entre el rodamiento de bajo consumo y la marcha hexápoda de alta tracción. Estos estudios previos validan la viabilidad técnica de implementar un robot transformable que combine las ventajas de una estructura esférica con la versatilidad de un hexápodo.

Importancia y alcance

La importancia del presente estudio consiste en la transformación de modo bola para protección integral, esto quiere decir que va a tener más durabilidad en sus patas, ya que los robots hexápodos mantienen sus articulaciones expuestas y vulnerables a daños por impactos. El diseño del robot HEXA utiliza su capacidad de transformación para retraer sus extremidades dentro de su estructura. Esto es fundamental para la supervivencia del hardware en entornos como el césped o concreto, donde una caída o contacto con estas superficies podría comprometer a los actuadores o al controlador. Así aseguramos una mayor vida útil del sistema gracias a la transformación en modo bola.

El alcance de este trabajo se centra en validar la estabilidad y la transición morfológica del robot al operar en superficies de baldosa, concreto y césped sin obstáculos, se espera demostrar que el modo hexápodo permite una marcha de trípede alternado precisa y coordinada, mientras que el modo esférico (Bola) actúa como una cabina de resguardo estática, para el transporte seguro y el almacenamiento de los componentes internos. El proyecto culminará con la verificación de que el robot puede desplegar sus extremidades desde su estado de protección hacia su configuración de marcha de forma autónoma, garantizando que la estructura no interfiera con el rango de movimiento necesario para desplazarse con agilidad en los terrenos seleccionados.

Delimitaciones

Por otro lado, se excluye del alcance de esta investigación el desarrollo de sistemas de navegación autónoma o toma de decisiones inteligente, por lo que el robot no se desplazará de forma independiente para completar misiones. Asimismo, el prototipo no está diseñado para el franqueamiento de obstáculos, la superación de desniveles pronunciados o la operación en terrenos con pendientes. El enfoque principal se mantiene en la estabilidad mecánica de la marcha y la integridad del mecanismo de protección, dejando las capacidades de exploración avanzada y navegación en entornos complejos para futuras etapas de desarrollo.

Objetivos del proyecto

Objetivo general

- Desarrollar un robot transformable HEXA para su participación en categoría todo terreno de competencias robóticas, mediante hardware y software especializados.

Objetivos específicos

- Investigar sobre robots transformables para su uso en terrenos irregulares, consultando fuentes bibliográficas, congresos internacionales y repositorios digitales.
- Diseñar un sistema estructural reconfigurable para el robot móvil, que permita su transformación de Hexa a bola, utilizando software CAD.

- Desarrollar un algoritmo robusto que facilite la metamorfosis dinámica del robot de tipo bola a hexápodo, mediante técnicas avanzadas de modelado, simulación y control de movimiento.
- Verificar el desempeño del robot transformable HEXA de acuerdo a normativa de la competencia RoboMatrix en categoría todo terreno, para su validación y como parte de flota de robots del Club de Robótica de la UPS (Universidad Politécnica Salesiana).

Revisión de la literatura o fundamentos teóricos.

1.6.1. Robótica Reconfigurable y Transformable

La robótica transformable se define en un sistema para alterar su forma física con el fin de adaptarse a diferentes entornos. Según (Liang, G, 2023), estos sistemas superan a la robótica de morfología fija al ofrecer una adaptación superior en terrenos irregulares. En el caso del proyecto HEXA, la transformación no solo busca mejorar la movilidad, sino aplicar un concepto de "protección morfológica", donde la estructura externa como un escudo para los componentes críticos durante estados de reposo.

1.6.2. Dinámica de la Marcha y Estabilidad Estática

Los robots de seis patas son ampliamente preferidos para terrenos irregulares, como césped o concreto, debido a su capacidad de mantener un polígono de sustentación constante. De acuerdo con (Shao, X., et al, 2022), la marcha de trípede alternado es la estrategia de control más eficiente para este tipo de plataformas, ya que permite que tres patas estén siempre en contacto con el suelo. Esto garantiza una estabilidad estática inherente que los sistemas bípedos o cuadrúpedos no poseen sin algoritmos de equilibrio dinámico complejos, asegurando que el robot HEXA mantenga su centro de masa dentro de la base de soporte durante el desplazamiento.

1.6.3. Cinemática Inversa en Robots de Patas

Para que el robot HEXA realice movimientos precisos, es necesario el cálculo de la cinemática inversa, la cual determina los ángulos necesarios en cada articulación para que el extremo de la pata alcance una posición específica. De acuerdo con (Shao, X., et al, 2022), la implementación de modelos matemáticos precisos en microcontroladores de baja latencia

permite una coordinación motriz fluida. Esto es esencial para que el robot se desplace en superficies con diferentes coeficientes de fricción, como la baldosa, sin perder la estabilidad.

1.6.4. Arquitecturas de Control Basadas en ESP32

El uso de sistemas embebidos de alto rendimiento es crucial para la robótica moderna. El microcontrolador ESP32 se ha consolidado como una herramienta estándar en el hardware abierto debido a su procesador de doble núcleo y conectividad integrada. (Zaman, S., et al, 2024) destaca que su capacidad para procesar señales en tiempo real lo hace ideal para robots que requieren sincronizar un gran número de actuadores. En este proyecto, el ESP32 gestiona de forma eficiente los 18 servomotores necesarios para la articulación del movimiento y la transformación.

1.6.5. Manufactura Aditiva y Materiales Poliméricos

La fabricación de la escrutará del robot Hexa mediante impresión 3D permite diseñar geometrías complejas, como la parte de protección. El uso de materiales de alta resistencia como el PLA proporciona una relación resistencia peso óptima para el robot. Según (Kozlov, M., et al, 2024), la manufactura aditiva no solo reduce los costos de producción, sino que facilita la creación de piezas personalizadas que pueden absorber impactos menores. Esto protege la integridad del sistema electrónico interno ante caídas accidentales.

Marco teórico

1.7.1. Robótica Transformable

La robótica transformable representa una actualidad en la ingeniería, orientada al diseño de sistemas capaces de modificar su arquitectura estructural en función de las condiciones del entorno. Esta capacidad de transformación, mediante la configuración de protección (bola) y hexápoda, permite una movilidad versátil que mejora la adaptabilidad en escenarios de alta exigencia, tales como la exploración en zonas irregulares. En este contexto, el robot HEXA combina dos estados operativos complementarios: el resguardo (bola) para la integridad del hardware y el desplazamiento en hexápodo para enfrentar superficies irregulares. Según (Liang, G, 2023) , la clave de los robots transformables es su capacidad para ajustar su

configuración morfológica y dinámica sin comprometer su funcionalidad, lo que los convierte en herramientas fundamentales para la navegación en entornos impredecibles.

1.7.2. Control en Tiempo Real

El control en tiempo real permite que el sistema robótico se adapte de forma inmediata a las variaciones del entorno mediante la interpretación y procesamiento continuo de datos, el robot HEXA, este tipo de control es esencial para realizar la reconfiguración estructural entre modos sin comprometer la estabilidad dinámica. Gracias al microcontrolador ESP32, su velocidad de procesamiento, es posible gestionar las transiciones y respuestas operativas con baja latencia. Este dispositivo no solo permite procesar datos de los actuadores. Según (Zaman, S., et al, 2024) la utilización de arquitecturas integradas basadas en microcontroladores de alto rendimiento es vital para garantizar que las respuestas del robot sean efectivas en diferentes terrenos, permitiendo un desplazamiento cinemático preciso y una transformación fluida hacia el modo de resguardo (bola).

1.7.3. Gestión y Eficiencia Energética en Robots Autónomos

La selección de la fuente de alimentación en robots autónomos constituye un factor determinante para garantizar un funcionamiento seguro, especialmente en sistemas con múltiples actuadores eléctricos. Más allá del voltaje nominal, la capacidad de descarga de corriente es un parámetro crítico, ya que los actuadores demandan picos de corriente elevados durante el arranque y los cambios de carga.

La batería tipo 18650 con química INR (Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide) se caracterizan por su alta capacidad de descarga continua, manteniendo un voltaje nominal aproximado de 3.6–3.7 V y capacidades cercanas a 3.5 Ah, lo que las hace adecuadas para aplicaciones robóticas exigentes. A diferencia de otras baterías disponibles en el mercado, la capacidad real de corriente no coincide con la información indicada en la etiqueta, las baterías INR ofrecen un desempeño más confiable y estable bajo cargas elevadas.



Figura 1.1 Batería 18650 con Química INR (Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide)

Fuente: Estaban Tayo, 2025.

El uso de baterías de alta descarga permite evitar caídas de voltaje durante la operación simultánea de múltiples servomotores, reduciendo el riesgo de reinicios del sistema de control y mejorando la eficiencia global del robot.

1.7.4. Coordinación de Actuadores

La estabilidad en sistemas robótico transformable no depende exclusivamente de la integración de sensores de equilibrio, sino de estrategias de control fundamentadas en la coordinación de los actuadores y la arquitectura, en plataformas de configuración hexápoda, la estabilidad se garantiza mediante el control sincronizado de las extremidades y el diseño. De acuerdo con (Shao, X., et al, 2022), la implementación de algoritmos de cinemática inversa permite que los sistemas mantengan el equilibrio operativo mediante la gestión de las posiciones angulares de las patas, asegurando que el centro permanezca siempre dentro de la base de soporte.

Investigaciones recientes indican que, en aplicaciones donde se busca robustez mecánica y optimización de recursos, es viable prescindir de sensores inerciales como giroscopios o acelerómetros. En su lugar, se emplean modelos cinemáticos predefinidos. Según (Zhuang, Z., et al, 2023), este enfoque de control por secuencias es altamente efectivo en robots con múltiples grados de libertad, donde la estabilidad se alcanza a través de un desplazamiento cinemático que asegura que al menos tres puntos de apoyo estén en contacto con el suelo en todo momento.

En consecuencia, la estabilidad del sistema HEXA reside en la precisión de los 18 servomotores y en las trayectorias programadas en el microcontrolador. Como señalan (Wang, S., Zhang, L.,&Liu, J, 2024) y (Ji, G., et al, 2023), este tipo de estrategia simplificada resulta prioritaria en robots de exploración y resguardo, donde la robustez del diseño físico y

la exactitud del software de control compensan la ausencia de retroalimentación sensorial externa, permitiendo una navegación segura basada exclusivamente en la geometría del prototipo.

CAPÍTULO 2

MARCO METODOLÓGICO

2.1 Arquitectura electrónica distribuida

El diseño del HEXA está basado en un control distribuido, un enfoque en el que diversas tareas se asignan a módulos interconectados que actúan de forma colaborativa (Becerra, A., Trujillo, M., Gómez Gutiérrez, L., & Ruiz León, P, 2021). Este modelo facilita la escalabilidad, reduce la carga de procesamiento del nodo principal y mejora la eficiencia del sistema.

En este caso, el microcontrolador ESP32 DevKit V1 cumple el rol central de procesamiento, gestionando la comunicación con el controlador UCS-32 de 32 canales mediante el protocolo UART2. Esta estructura permite el control simultáneo y preciso de los 18 servomotores MG90S que conforman las extremidades del robot. A diferencia de sistemas que dependen de sensores externos, este diseño prioriza una arquitectura de control de lazo abierto basada en cinemática preprogramada, lo cual garantiza la estabilidad durante los procesos de locomoción y transformación mediante la sincronización rigurosa de los actuadores (Zhang, X., Li, H., Wang, Y., & Chen, J, 2020).

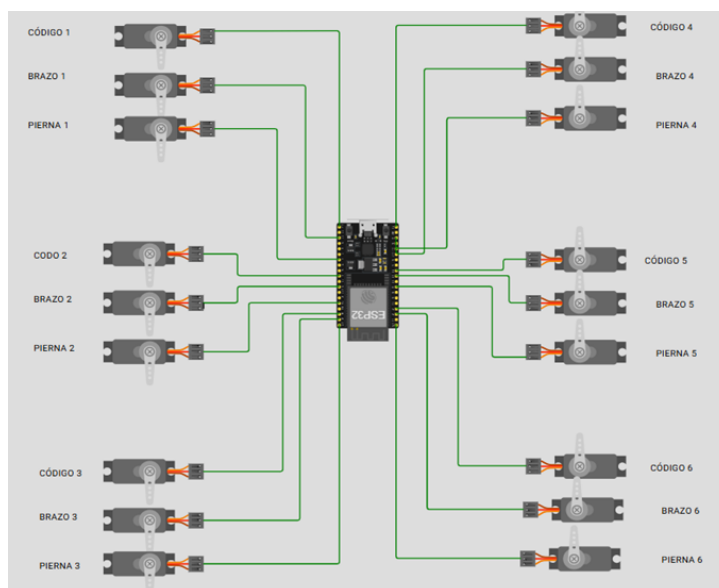


Figura 2. 1 Diseño de la Arquitectura Electrónica.

Fuente: Se realizo el esquema WOKWI página web utilizada en los semestres anteriores, 2025.

2.2 Diseño y fabricación adictiva

La construcción física del robot HEXA se realizó mediante la tecnología de FDM (Modelado por Deposición Fundida), utilizando una impresora Prusa Original MK4S. Este proceso permitió materializar la geometría esférica de protección y los componentes de las extremidades con una alta precisión dimensional. La fabricación total del sistema requirió un tiempo de 39 horas de impresión y un consumo de 855 gr de filamento, optimizando la relación entre peso y resistencia estructural.

Para la selección de materiales, se optó por una combinación de polímeros que equilibran la sostenibilidad y el desempeño mecánico:

2.2.1 Estructura (Chasis Interno)

Se fabricó con PLA Perlado Azul. Al ser el soporte central de la electrónica y los actuadores, se configuró con 2 perímetros y un relleno del 15%. Esta configuración busca minimizar la masa suspendida, permitiendo que el centro de gravedad sea más fácil de gestionar por los algoritmos de control sin sacrificar la rigidez necesaria para mantener alineados los 18 servomotores.

2.2.2 Patas (Resguardo Bola)

Al ser las piezas que cumplen la función de protección integral y contacto con el suelo, se fabricaron en Smartfil RePLA Negro. Estas piezas se reforzaron con 3 perímetros y un relleno de hasta el 20%. Según (Kozlov, M., et al, 2024), este incremento en la densidad estructural en los componentes periféricos es fundamental para absorber impactos y proteger la electrónica interna cuando el robot se encuentra en su configuración de resguardo, además de soportar las cargas dinámicas durante el desplazamiento.

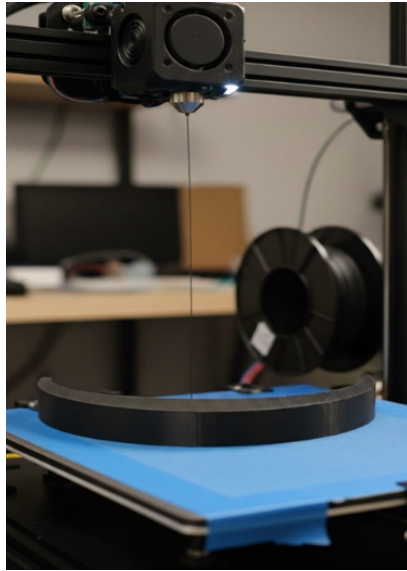


Figura 2. 2 Impresión 3D de estructura del robot transformable HEXA.

Fuente: Fabricado por TAICED, 2025.

El uso de una definición de 0.3 mm aseguró una excelente unión entre capas, factor crítico para que las patas no se laminen ante esfuerzos de torsión. Esta estrategia de fabricación garantiza que el HEXA posea una estructura interna ligera y unas extremidades robustas que actúan como una coraza protectora, optimizando la durabilidad del sistema en condiciones de operación.

2.3 Gestión energética en robótica móvil

Debido al número de actuadores y sensores en funcionamiento, la gestión energética del HEXA es fundamental para garantizar su autonomía. Se ha optado por el uso de baterías Li de una celda, combinadas con módulos reguladores de voltaje LM2596, que estabilizan la energía entregada a cada componente (Patel, R.,&Joshi, S, 2020).

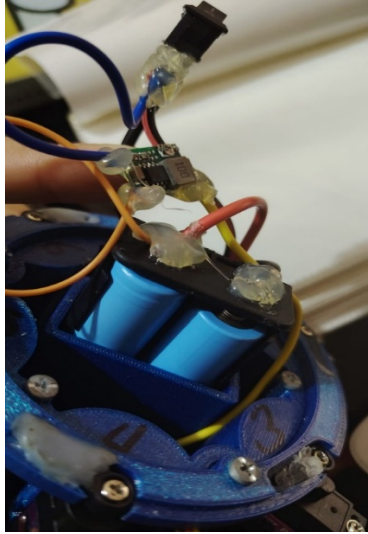


Figura 2. 3 Sistema de Alimentación y Regulación de Voltaje Mediante LM2596

Fuente: Estaban Tayo, 2025.

2.4 Conectividad inalámbrica y control remoto

La gestión inalámbrica del HEXA se realiza a través de protocolos de comunicación de baja latencia, permitiendo el control del robot mediante dispositivos como mandos de PlayStation 3. Esta funcionalidad para la validación de prototipos, facilitando la activación de secuencias de transformación hacia el modo bola y la transformación hexápoda.

La integración de esta tecnología se apoya en la arquitectura de software del microcontrolador ESP32, el cual gestiona de forma simultánea la arquitectura de comunicación Bluetooth y el procesamiento de las señales para los 18 servomotores. Según (Zaman, S., et al, 2024), la utilización de sistemas de control inalámbrico robustos es crítica en robots reconfigurables para asegurar una respuesta inmediata. Esto garantiza que las órdenes de desplazamiento cinemático se ejecuten con una latencia mínima, permitiendo que activar el modo de protección ante cualquier riesgo en el entorno.

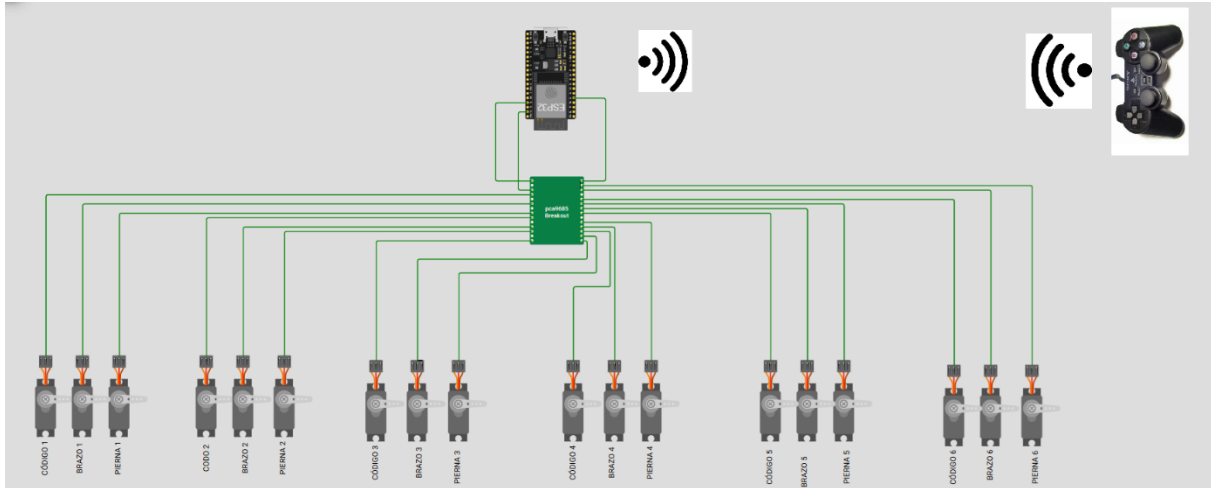


Figura 2. 4 Esquema Electrónica y Sistema de Control

Fuente: Se realizo el esquema WOKWI página web utilizado en los semestres anteriores, 2025.

2.5 Implementación del Sistema de Movimiento y Estabilidad

El sistema de locomoción hexápoda es ampliamente reconocido por su capacidad de mantener múltiples puntos de apoyo durante el movimiento, lo cual garantiza estabilidad incluso en suelos irregulares (Kim, K., & Chong, N. Y, 2021). HEXA emplea un patrón de marcha tipo trípode alternado, donde tres patas permanecen en apoyo mientras las otras tres se mueven, emulando la locomoción de insectos. La implementación de esta marcha coordinada requiere el control sincronizado de 18 servomotores MG90S, organizados en conjuntos de tres articulaciones por extremidad (Codo, Brazo y Pierna). La gestión de estos actuadores se realiza mediante el microcontrolador ESP32 en integración con un controlador especializado UCS-32, encargado de la distribución de señales PWM. Este esquema está soportado por rutinas de cinemática inversa que calculan con precisión los ángulos necesarios para alcanzar posiciones específicas del extremo de cada pata. Según (Shao, X., et al, 2022), la sincronización de múltiples grados de libertad mediante arquitecturas de control digital es esencial para asegurar la estabilidad, permitiendo que el sistema ejecute trayectorias precisas y transiciones fluidas hacia el modo de resguardo sin comprometer la integridad de la estructura.

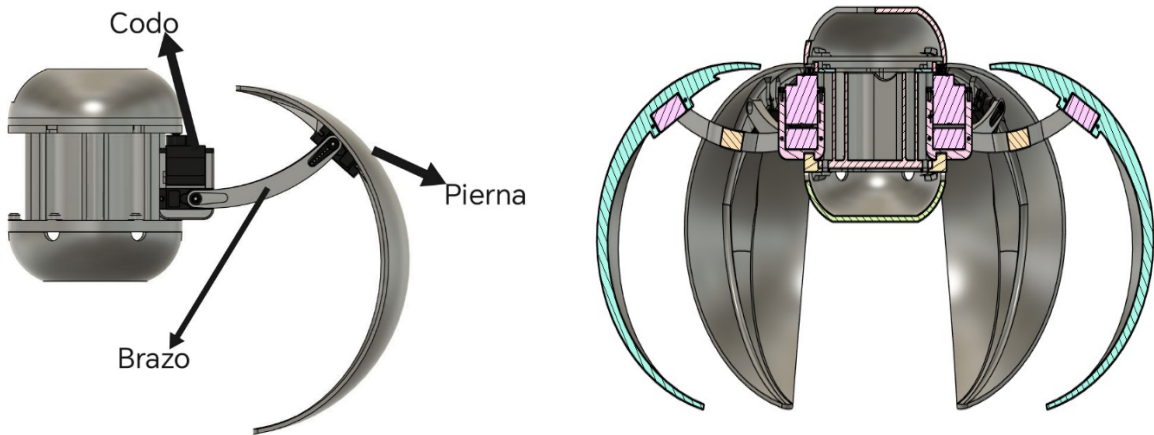


Figura 2. 5 Ubicación de servomotores en articulaciones

Fuente: previa vista de ubicación de servomotores en el robot HEXA. Elaborado por Esteban Tayo Junto a TAICED.2025

2.6 Sistema de Control de Postura y Consideraciones para Estabilidad

En la transformación del robot HEXA, la estabilidad no depende de sensores inerciales externos, sino de una arquitectura de control basada en secuencias preprogramadas y una lógica de los estados del sistema. El control de la postura se administra mediante una variable de estado denominada equilibrio, la cual regula la disposición mecánica del robot. Cuando esta variable se activa (equilibrio = 1), se ejecuta la función `equilibriog()`, encargada de mantener la posición de los 18 servomotores para conservar la estructura rígida. Por el contrario, cuando la variable es nula (equilibrio = 0), el sistema habilita la modo bola.



Figura 2. 6 Sistema de control en hexápodo y bola

Se muestra ya el desempeño de transformación en terreno irregular. Elaborado por Esteban Tayo.

Este comportamiento se coordina mediante el mando de PS3, donde las órdenes de despliegue y marcha activan automáticamente la variable de estabilidad. La ejecución de los movimientos se realiza a través de las funciones `mov1()` y `mov2()`, las cuales gestionan las posiciones y los tiempos de transición. Según (Wang, J., et al, 2024), este enfoque de control de lazo abierto es altamente efectivo en entornos controlados, ya que la estabilidad intrínseca se logra mediante una marcha coordinada que asegura el soporte del chasis en todo momento, eliminando la necesidad de procesamiento sensorial adicional que podría elevar el consumo energético.

CAPÍTULO 3

PRUEBAS Y RESULTADOS

3.1 Prototipo impreso

Tras la finalización de las fases de impresión aditiva (3D), se procedió al armado del prototipo HEXA. En esta etapa, se integraron los componentes mecánicos de PLA con la electrónica de control, consolidando una estructura capaz de transformarse en el hexápodo y modo bola.



Figura 3. 1 Vista Previa de Piezas y Componentes Electrónicos Antes de Armarlo.

Se puso en ubicación de como va a ir armado y la ubicación de los servomotores para las articulaciones del robot HEXA. Elaborado por Esteban Tayo.



Figura 3. 2 Pruebas del Prototipo ya en Funcionamiento.

Comprobación del funcionamiento del código ya final en el prototipo HEXA. Elaborado por Esteban Tayo.

3.2 Prueba de funcionamiento

3.2.1 Pruebas de Transformación en Diferentes Terrenos

En esta sección se evalúa la fiabilidad mecánica como también la resistencia del material PLA durante la transformación entre sus dos estados físicos: Modo Compacto (Bola) y Modo Operativo (Hexápodo). Es importante notar que el modo bola se utiliza exclusivamente para protección de las extremidades y ahorro de espacio, no siendo una configuración de movimiento.

La transformación se realiza con el robot en reposo. El mayor reto técnico es la gestión del movimiento inicial necesario para que los 18 servomotores venzan la inercia de la estructura y el roce con la superficie de apoyo.

Tabla 3. 1 Transformación y Estabilidad por Superficie

Bola -
hexapodo

Nº Test	Césped	Concreto	Baldosa
1	✓	✓	✓
2	✓	✓	✓
3	✓	✓	X
4	✓	✓	✓
5	X	✓	✓

Tabla 3. 2 Transformación y Estabilidad por Superficie

Hexapodo -
Bola

Nº Test	Césped	Concreto	Baldosa
1	✓	✓	✓
2	✓	✓	✓
3	X	✓	X
4	✓	X	✓
5	X	✓	X

Se tomaron 5 pruebas en los diferentes tipos de terrenos, así observando las dificultades que llegó a tener para culminar su transformación. Elaborado por Esteban Tayo.

3.2.2 Pruebas de Traslado en Terrenos Irregulares

Las pruebas de traslado se realizaron sobre superficies con distintos niveles de dificultad, incluyendo césped, baldosas y concreto. En cada entorno, se ejecutó una trayectoria de 7 metros en modo hexápodo, evaluando la capacidad del robot para mantener estabilidad y control de trayectoria.

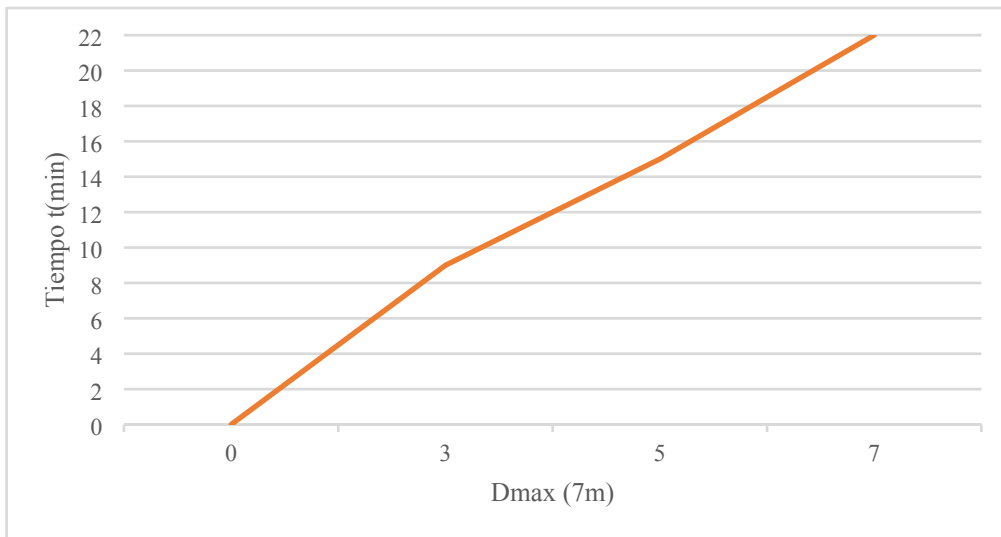


Figura 3. 3 Desempeño en el Terreno de Césped (Distancia: 7m)

La Figura 3.3 nos muestra una progresión proporcional entre el tiempo y la distancia recorrida, lo que indica una velocidad de avance constante durante la marcha de traslación.

Elaborado por Esteban Tayo.

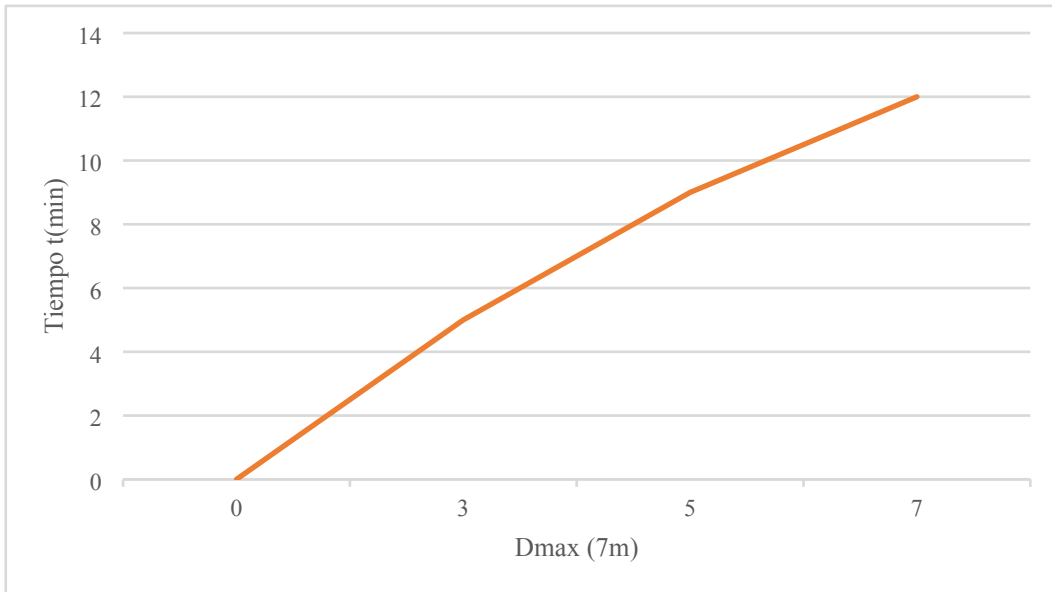


Figura 3. 4 Desempeño en el Terreno de Concreto Concreto (Distancia: 7m)

En esta Figura 3.4 captamos que fue corto de tiempo con la anterior Figura 3.3 gracias a su rugosidad se pudo adherirse mejor el robot HEXA. Elaborado por Esteban Tayo.

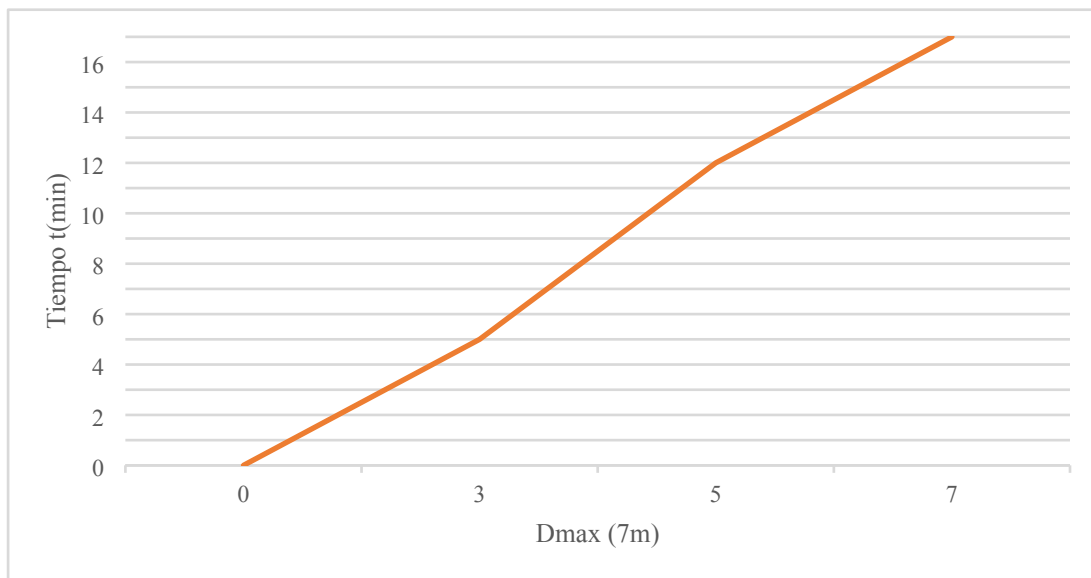


Figura 3. 5 Desempeño en el Terreno de Baldosa (Distancia: 7m)

Se capta en la última prueba de distancia que la baldosa al ser liza y las pequeñas uniones se llegó a demorar al destino y tuvo unas pequeñas desviaciones. Elaborado por Esteban Tayo

3.2.3 Prueba del sistema de control de Movimiento en Terreno

Se evaluó el tiempo de ejecución de las rutinas de movimiento programadas en el microcontrolador ESP32. Las 5 pruebas en distintos terrenos y tres partes (adelante, atrás y el movimiento al lateral izquierdo).

Tabla 3. 3 Evaluación de maniobrabilidad en el terreno Concreto

Concreto

Nº Test	Adelante	Atrás	Izquierda
1	✓	✓	✓
2	✓	✓	✓
3	✓	✓	X
4	✓	X	✓
5	X	✓	X

Tabla 3. 4 Evaluación de maniobrabilidad en el terreno Baldosa

Baldosa

Nº Test	Adelante	Atrás	Izquierda
1	✓	✓	✓
2	✓	X	✓
3	X	✓	X
4	✓	X	✓
5	X	✓	X

Tabla 3. 5 Evaluación de maniobrabilidad en el terreno Césped

Césped

Nº Test	Adelante	Atrás	Izquierda
1	✓	✓	✓
2	✓	✓	✓
3	✓	✓	X
4	✓	X	✓
5	X	X	X

El responde exitoso se denota con “✓” y cuando no responde se denota con “X” estos casos se rectifica la posición en la que se quedó. Elaborado por Esteban Tayo.

3.2.4 Consumo de energía tras recorrer distancia de 7m.

Se midió el voltaje de las baterías 18650 antes de las pruebas de movimiento que se encuentra en el capítulo 3 el punto 3.2.2, se midió el voltaje antes de la prueba y después de la prueba, ya que pone a prueba todos los servomotores puesto que tienen que soportar y mover el centro de masa.

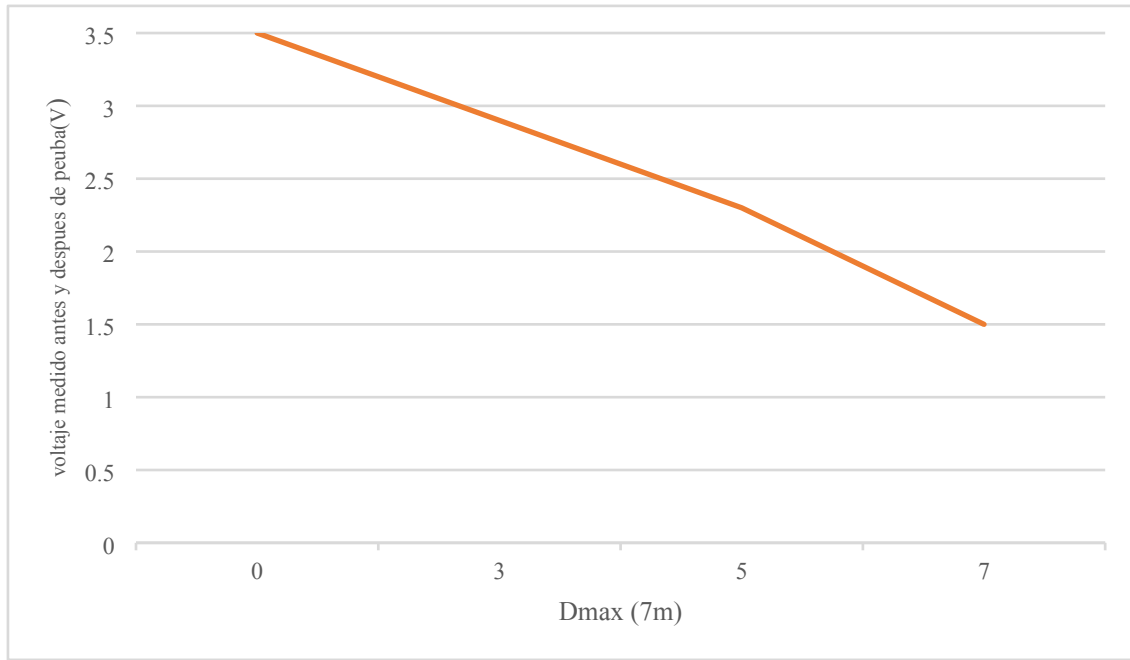


Figura 3. 6 Curvas de descarga de voltaje por tipo de superficie (Césped)

Las gráficas muestran una caída de voltaje más pronunciada en el terreno de césped, descendiendo de 3.5V a aproximadamente 1.5V al finalizar los 7 metros.

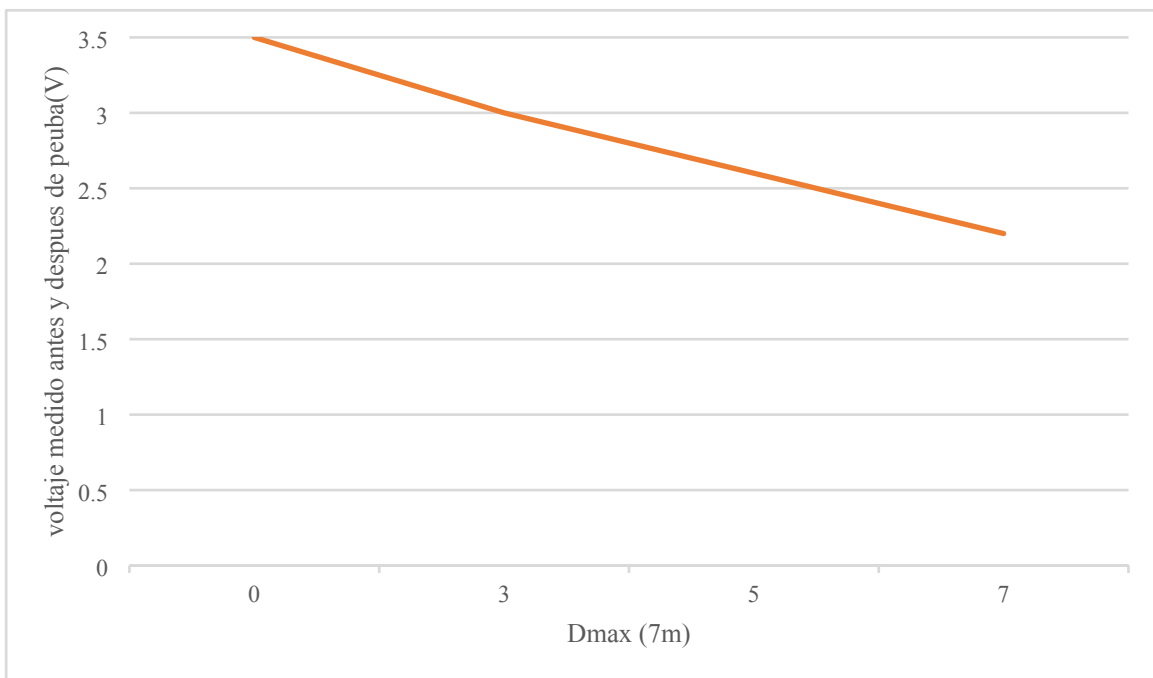


Figura 3. 7 Curvas de descarga de voltaje por tipo de superficie (Baldosa)

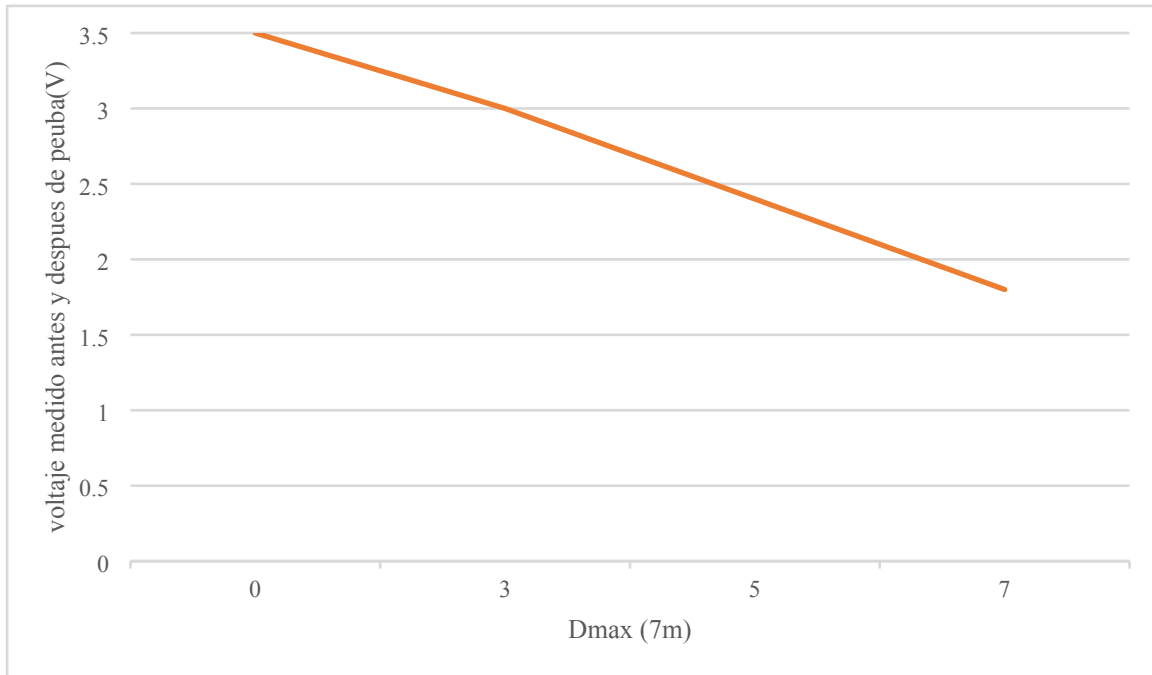


Figura 3. 8 Curvas de descarga de voltaje por tipo de superficie (concreto)

3.2.5 Consumo de energía tras la transformación hexápodo a bola.

Esta prueba evaluó el consumo energético de la transformación morfológica desde el estado de marcha hacia el modo de resguardo bola. A diferencia del traslado lineal, esta maniobra requiere que los 12 servomotores vencen la inercia de la estructura y la fricción del suelo para retraer las patas hacia el chasis central.

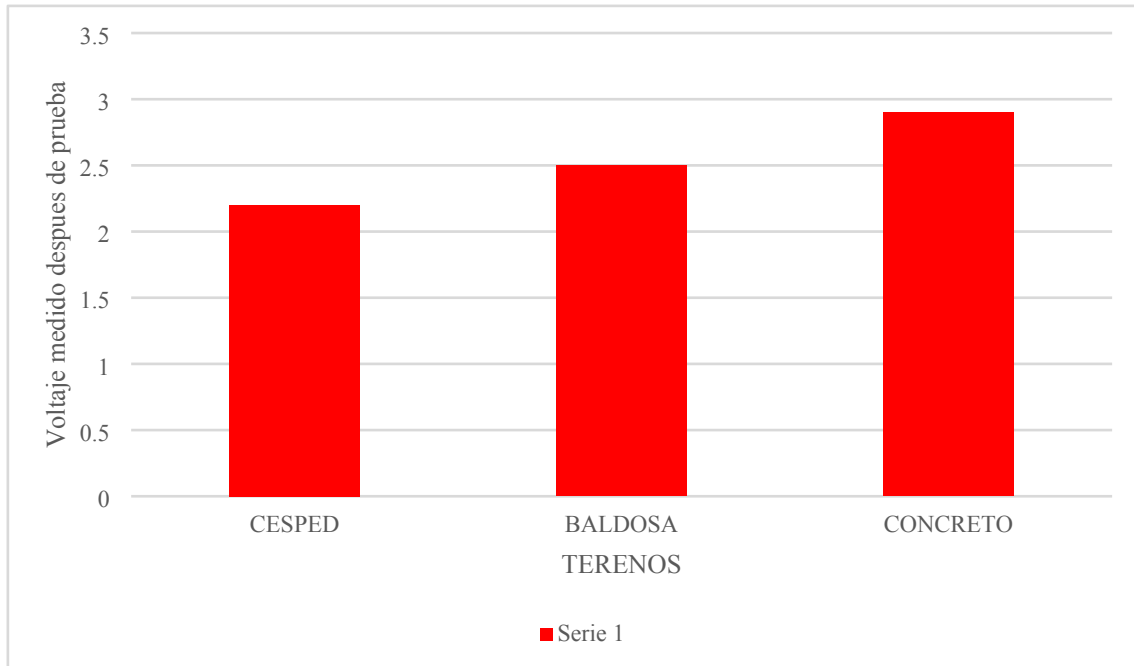


Figura 3. 9 Prueba del Consumo Energético

3.2.6 Consumo de energía tras la transformación bola a hexápodo.

La transición de apertura (modo bola a hexápodo) representa el despliegue del sistema para recuperar su capacidad de movimiento. En esta parte, los actuadores deben ejercer torque para elevar el centro de masa del robot desde el nivel del suelo hasta su altura corespondiente, soportando el peso total de la estructura.

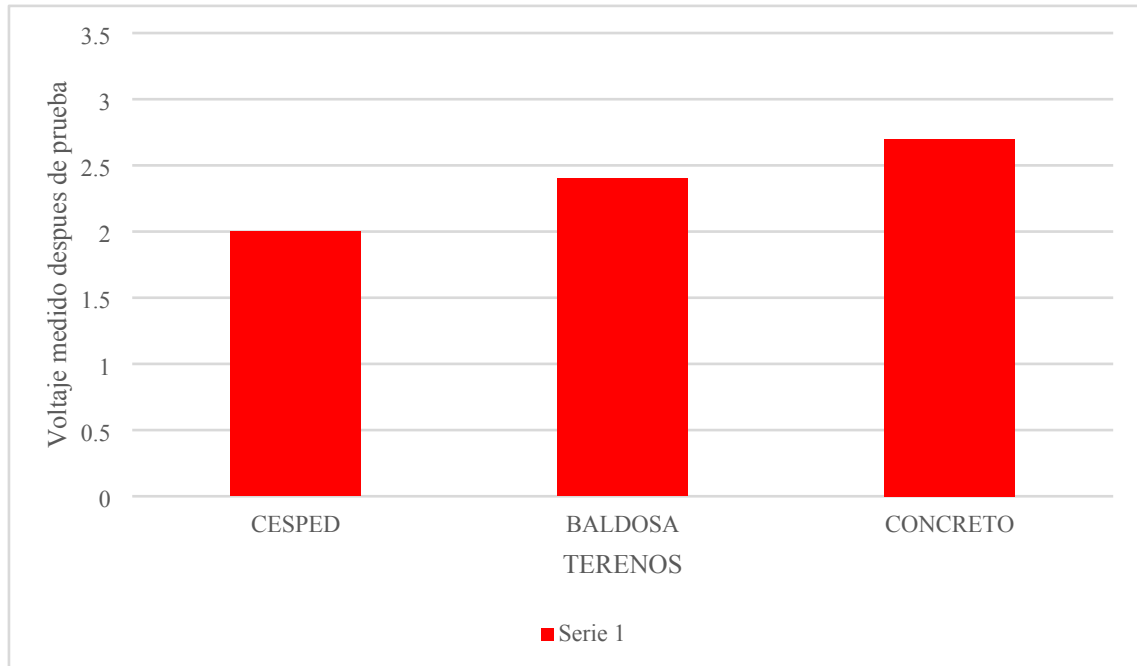


Figura 3. 10 Gráfica comparativa del consumo energético entre modos bola a hexápodo.

3.3 Cronograma

Según el cronograma el proyecto HEXA estaría listo en seis meses, termine demorándome un 15% más de tiempo por varios problemas que aparecieron al probar el robot. Cuando lo puse a caminar en terrenos difíciles, la fuerza que hacían los motores fue demasiada y se terminaron quemando varios servomotores MG90S; además, por el mismo esfuerzo, se rompieron varias piezas de las patas, así que me tocó rediseñar y volver a imprimir en 3D junto a TAICED fue la empresa que me prestó la máquina Prusa Original MK4S de impresión 3D. Otra demora que tuve fue las baterías, las que compré primero en el mercado local no tenían la potencia que decía la etiqueta y eran de mala calidad, lo que me obligó a aplazarme más tiempo buscando y probando baterías nuevas para que el robot funcione adecuadamente. Al final, todos estos arreglos en los motores, las piezas y las baterías hicieron que el cronograma se moviera.

Actividad	Duración (meses) - Fecha de inicio																							
	1				2				3				4				5				6			
	15	31	15	31	15	31	15	31	15	31	15	31	15	31	15	31	15	31	15	31	15	31	15	31
Estudio de antecedentes teóricos y trabajos previos.	■	■																						
Búsqueda de información técnica y científica relevante.			■	■																				
Creación del modelo estructural inicial del robot.			■	■	■	■																		
Verificación virtual del comportamiento del					■	■	■	■																
Prueba de adquisición de datos del sistema									■	■	■	■												
Ajustes del sistema													■	■	■	■								
Optimización del modelo según los resultados de simulación.													■	■	■	■	■	■						
Análisis y comparación de datos																	■	■	■	■				
Verificación del sistema																	■	■	■	■	■			
Establecimiento de conclusiones y recomendaciones																					■	■		
Elaboración de informe	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■		
Revisión Páctica y escrita desde el tutor																						■	■	
Escritura del proyecto técnico																							■	■

3.4 Presupuestó

El desarrollo del robot HEXA inicio con una inversión base para la adquisición de hardware y materiales de impresión 3D. Sin embargo, durante la fase de integración y pruebas de esfuerzo, el presupuesto final experimentó un incremento aproximado del 25% sobre el valor planificado. Esta variación se atribuye a tres factores críticos detectados en el proceso de fabricación (fiabilidad de los actuadores, Fuente de alimentación y el mecanismo).

N.º	CANTIDAD	MATERIAL	COSTO UNITARIO	COSTO TOTAL
1	2	Esp 32	\$ 12,00	\$ 24,00
2	18	Servo mg90	\$ 7,95	\$ 143,1
3	2	lm2596	\$ 4,50	\$ 9,00
4	1	Mando PS3	\$ 45,00	\$ 45,00
5	15	Cable de TIMBRE POR METRO para proto	\$ 0,53	\$ 7,88
6	2	LIPO 18650 + ENVIO	\$ 10,00	\$ 25,00
7	6	Bateria Lipo 3SIP	\$ 7,50	\$ 45,00
8	1	Otros elementos	\$ 45,00	\$ 45,00
9	1	Impresión 3D en PLA	\$ 300,00	\$ 300,00
			COSTO TOTAL MATERIALES	\$ 643,98

RUBRO	HORAS	DOLARES POR HORA	TOTAL
HORAS DE INGENIRÍA	120	\$ 5,00	600

CAPITULO 4

4.1. CONCLUSIONES

Se logró completar una investigación profunda sobre robots transformables, consultando repositorios y congresos internacionales. Esto permitió entender que, para terrenos difíciles la mejor opción no son las ruedas, sino un sistema de patas que pueda protegerse cambiando su forma. Gracias a esto, se decidió que el HEXA debía tener una estructura tipo "bola" para resguardar sus partes más delicadas cuando no esté caminando.

Mediante el uso de software CAD, se diseñó con éxito la estructura del robot, logrando que las piezas impresas encajaran perfectamente para permitir la transformación. Aunque en las pruebas reales se tuvieron ligeras fallas por el esfuerzo que se hacía, el diseño actualizado demostró ser más resistente para alojar los 18 servomotores y toda la electrónica en un espacio compacto, cumpliendo con el objetivo de crear un chasis articulado y funcional.

Una de las mayores ventajas de este diseño que se logró un robot estable. Al establecer un código en marcha coordinada y una variable de equilibrio bien programada. El microcontrolador ESP32 trabaja adecuadamente para los 18 servomotores, dando así su estructura física y la fuerza de los servos permitiéndole terminar misiones como una trayectoria de 7 metros de forma constante. Esto nos permite concluir que, para tareas de exploración y competencias como RoboMatrix, la simplicidad mecánica y una buena programación de tiempos son más confiables.

La experiencia real nos enseñó que los servomotores pueden quemarse si se les exige demasiado torque en terrenos pesados y que las baterías genéricas no rinden lo que prometen. Sustituir estos elementos por componentes de mejor calidad fue lo que finalmente permitió que el robot operara con éxito, demostrando que las pruebas y errores son parte esencial del proceso de ingeniería.

4.2. RECOMENDACIONES

A partir de la experiencia con el quemado de varios servomotores MG90S y la rotura de piezas durante las pruebas, se recomienda que para futuros prototipos se utilicen piezas con un relleno (infill) más alto o materiales más resistentes en las articulaciones de las patas. Además, es fundamental no escatimar en la calidad de los motores, ya que el esfuerzo que

hacen para levantar el cuerpo del robot es muy alto y los motores baratos no aguantan el torque necesario en terrenos pesados como el césped o baldosa.

Se sugiere tener mucho cuidado al comprar las baterías, ya que muchas veces no cumplen con la potencia que prometen en la etiqueta. Para próximas versiones, lo ideal sería usar baterías de marca reconocida y alta descarga con la terminación IRN,

Dado que la electrónica interna está muy apretada dentro del chasis, se recomienda mejorar el orden del cableado para evitar que algún cable se muerda o se suelte durante la transformación a modo bola.

REFERENCIAS

- Azad, M., et al. (2023). Adaptive Gait Planning for Hexapod Robots in Unstructured Terrains. *revista científica*.
- Becerra, A., Trujillo, M., Gómez Gutiérrez, L., & Ruiz León, P. (2021). *Control distribuido en sistemas robóticos: Fundamentos y aplicaciones*. Editorial Técnica Robótica.
- Hutter, M., et al. (2024). Legged Robots in Challenging Terrains: From Theory to Practice. *revista científica*.
- Ji, G., et al. (2023). Design and Reliability Analysis of Legged Robots in Harsh Environments. *revista científica*.
- Kim, K., & Chong, N. Y. (2021). Robot navigation and locomotion in unstructured environments: A review. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 17(3), 2037–2047.
- Kozlov, M., et al. (2024). Hybrid Morphological Robots: Bridging the Gap Between Protection and Mobility. *revista científica*.
- Liang, G. (2023). Decoding Modular Reconfigurable Robots: A Survey on Mechanisms and Design. *preprint en repositorio científico*.
- Liu, Y., et al. (2023). Cost-effective Design of Reconfigurable Legged Robots for Disaster Response. *revista científica*.
- Patel, R., & Joshi, S. (2020). Gestión energética en sistemas robóticos: diseño y aplicaciones. *Editorial Ingeniería Avanzada*.
- Shao, X., et al. (2022). Robust Gait Control for Hexapod Robots in Unstructured Disaster Environments. *revista científica*.
- Vargas, J., et al. (2024). From Sphere to Hexapod: Morphological Computation in Hybrid Exploration Robots. *revista científica*.
- Wang, J., et al. (2024). Morphological Protection in Reconfigurable Robots: A Review of Encapsulation Strategies. *revista científica*.
- Wang, S., Zhang, L., & Liu, J. (2024). Design and Stability Analysis of Multipedal Walking Robots without Inertial Feedback. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 110(2), 45–58.
- Zaman, S., et al. (2024). Design and Multimodal Locomotion of Reconfigurable Robots for Complex Terrains. *revista científica*.
- Zhang, X., Li, H., Wang, Y., & Chen, J. (2020). Kinematic modeling and gait planning of a hexapod robot based on open-loop control. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 34(5), 2101–2112.

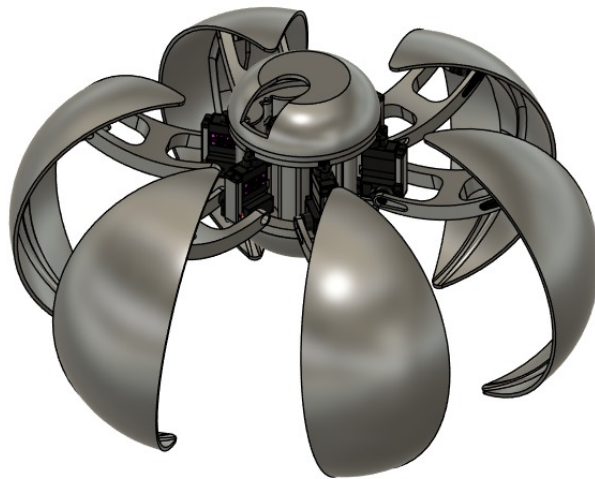
Zhuang, Z., et al. (2023). Surmounting Obstacles: Comparative Analysis of Legged vs. Wheeled Locomotion. *revista cientifica*.

ANEXOS

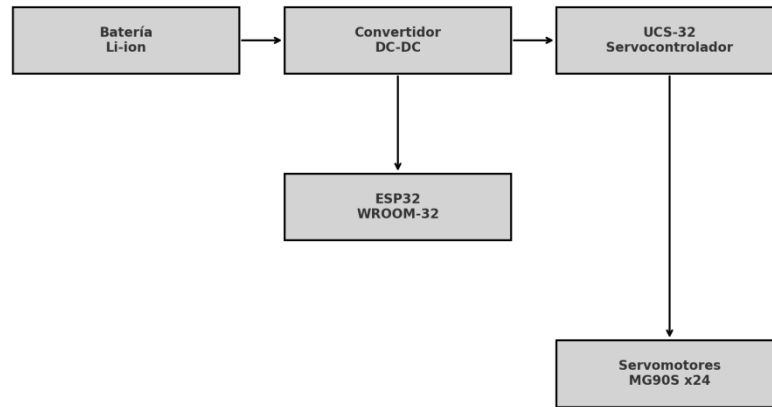
ANEXO 1: Montaje de servomotores MG90S en carcasa esférica



ANEXO 2: Modelo CAD completo del HEXA en modo caminante



ANEXO 3: Diagrama del sistema de alimentación y control electrónico del robot HEXA



ANEXO 4: código en RC

```

//pruebas con 16 // PCA: 6 patas // ----- DOS
motores (0..15) SERVO DIRECTOS --
controlados por #define SER0 0 ----- Serial.printf("F
modulo i2c #define SER1 1 Servo sg901; irirmware: %s\n",
//y 2 motores #define SER2 2 Servo sg902; BP32.firmwareVersi
directos al esp32 #define SER3 3 on());
//con control de #define SER4 4 // Guardamos la const uint8_t*
bola y despliegue #define SER5 5 posición actual de addr =
con mando xbox #define SER6 6 esos 2 para poder BP32.localBdAddres
//con boton #define SER7 7 interpolar s());
circulo y equis #define SER8 8 int currentPos1 = Serial.printf("B
//inicia secuencia #define SER9 9 90; D Addr:
hacia adelante #define SER10 10 int currentPos2 = %2X:%2X:%2X:%2X:%2
#define SER11 11 90; X:%2X\n", addr[0],
#define SER12 12 #define SER13 13 int equilibrio=0; addr[1], addr[2],
#define SER14 14 #define SER15 15 addr[3], addr[4],
#include #define SER16 16 void setup() { // Setup the
<Bluepad32.h> #define SER17 17 Serial.begin(115 Bluepad32
ControllerPtr myControllers[BP32 _MAX_GAMEPADS]; // Servos DIRECTOS al ESP32 (pines) Serial.println(" BP32.setup(&onCon
#include <Wire.h> #include <ESP32Servo.h> PCA9685 + ESP32 nectedController,
#include <Adafruit_PWMServoDriver.h> // Variables PCA servos &onDisconnectedCon
int pwm0, pwm1, pwm2; // PCA // Olvidar
int pwm3, pwm4, pca9685.begin(); claves Bluetooth
int pwm5, pca9685.setPWMPFr (ejemplo)
Adafruit_PWMServoDriver pca9685 = int pwm6, pwm7, eq(50); BP32.forgetBluet
Adafruit_PWMServoDriver(0x40); int pwm8, // SG90 en ESP32 oothKeys();
int pwm9, pwm10, // Desactivar
int pwm11, sg901.setPeriodH dispositivos
int pwm12, pwm13, ertz(50); virtuales
int pwm14, sg901.attach(SER BP32.enableVirtu
int pwm15, pwm16, 16, 500, 2400); alDevice(false);
int pwm17; sg901.write(curr }//void setup
#define SERVOMIN1 280 int pausa = void loop() {
#define SERVOMAX1 480 5;//para bola y bool dataUpdated
#define SERVOMIN2 200 void pau(){ = BP32.update();
#define SERVOMAX2 480 delay(pausa); } sg902.setPeriodH if (dataUpdated)
sg902.attach(SER processControl
17, 500, 2400); lers();
sg902.write(curr
entPos2);

```

```

delay(150);          sg902.write(ne  SERVOMIN2,          pca9685.setPWM
                    wPos2);          SERVOMAX2);          (SER7, 0,
                    pwm7 =          pwm7); pau();
                    map(posDegrees,          pca9685.setPWM
                    320; pca9685.setP          70, 120,          (SER8, 0,
                    WM(SER0, 0,          SERVOMIN1,          pwm8); pau();
                    pwm0); pau();          SERVOMAX1);          pca9685.setPWM
                    pwm3 =          pwm8 =          (SER10, 0, pwm10);
                    320; pca9685.setP          map(posDegrees,          pau();
                    WM(SER3, 0,          70, 120,          pca9685.setPWM
                    pwm3); pau();          SERVOMIN2,          (SER11, 0, pwm11);
                    pwm6 =          SERVOMAX2);          pau();
                    320; pca9685.setP          pwm10 =          pca9685.setPWM
                    WM(SER6, 0,          map(posDegrees,          (SER13, 0, pwm13);
                    pwm6); pau();          70, 120,          pau();
                    pwm9 =          SERVOMIN1,          pca9685.setPWM
                    320; pca9685.setP          SERVOMAX1);          (SER14, 0, pwm14);
                    WM(SER9, 0,          pwm11 =          pau();
                    pwm9); pau();          map(posDegrees,          Serial.print("
                    pwm12 = 320;          70, 120,          Paso cerrar = ");
                    pca9685.setPWM(SER          SERVOMIN2,          Serial.println(pos
                    12, 0, pwm12);          SERVOMAX2);          Degrees);
                    pau();          pwm13 =          }
                    pwm15 = 320;          map(posDegrees,          currentPos1 =
                    pca9685.setPWM(SER          70, 120,          targetPos1;
                    15, 0, pwm15);          SERVOMIN1,          currentPos2 =
                    pau();          SERVOMAX1);          targetPos2;
                    pwm1 =          pwm14 =          }
                    map(posDegrees,          map(posDegrees,          // ----- ABRIR
                    70, 120,          70, 120,          (70 ->120) -----
                    SERVOMIN1,          SERVOMIN2,          --
                    SERVOMAX1);          SERVOMAX2);          void mov2(){
                    pwm2 =          pca9685.setPWM          const int
                    map(posDegrees,          (SER1, 0,          targetPos1 = 170;
                    70, 120,          pwm1); pau();          const int
                    SERVOMIN2,          pca9685.setPWM          targetPos2 = 100;
                    SERVOMAX2);          (SER2, 0,          int startPos1 =
                    pwm4 =          pwm2); pau();          currentPos1;
                    map(posDegrees,          pca9685.setPWM          int startPos2 =
                    70, 120,          (SER4, 0,          currentPos2;
                    SERVOMIN1,          pwm4); pau();
                    SERVOMAX1);          pca9685.setPWM
                    pwm5 =          (SER5, 0,
                    map(posDegrees,          pwm5); pau());
                    70, 120,
                    sg901.write(ne  70, 120,
                    wPos1);

```

```

    const int          pwm15 = 320;    70, 120,          currentPos1 =
stepsTotal = 120 -   pca9685.setPWM(SER    SERVOMIN1,      targetPos1;
70; // 50           15, 0, pwm15);    SERVOMAX1);    currentPos2 =
                    pau();          pwm14 =        targetPos2;
                    map(posDegrees, }
                    70, 120,        70, 120,
                    SERVOMIN1,      SERVOMIN2,
                    SERVOMAX1);    SERVOMAX2);
                    pwm1 =          map(posDegrees,
                    map(posDegrees, 70, 120,
                    70, 120,        SERVOMIN1,
                    SERVOMIN1,      SERVOMAX1);
                    SERVOMAX1);    pwm2 =
                    pwm2 =          map(posDegrees,
                    map(posDegrees, 70, 120,
                    70, 120,        SERVOMIN2,
                    SERVOMAX2);    SERVOMAX2);
                    pwm4 =          pca9685.setPWM
                    map(posDegrees, (SER1, 0,
                    70, 120,        pwm1); pau();
                    SERVOMIN1,      pca9685.setPWM
                    SERVOMAX1);    (SER2, 0,
                    pwm5 =          pca9685.setPWM
                    map(posDegrees, (SER4, 0,
                    70, 120,        pwm4); pau();
                    SERVOMIN1,      pca9685.setPWM
                    SERVOMAX1);    (SER5, 0,
                    pwm7 =          pca9685.setPWM
                    map(posDegrees, (SER7, 0,
                    70, 120,        pwm7); pau();
                    SERVOMIN2,      pca9685.setPWM
                    SERVOMAX2);    (SER8, 0,
                    pwm8 =          pca9685.setPWM
                    map(posDegrees, (SER10, 0, pwm10);
                    70, 120,        pau();
                    SERVOMIN1,      pca9685.setPWM
                    SERVOMAX1);    (SER11, 0, pwm11);
                    pwm8 =          pau();
                    map(posDegrees,   pca9685.setPWM
                    70, 120,        (SER13, 0, pwm13);
                    SERVOMIN2,      pau();
                    SERVOMAX2);    pca9685.setPWM
                    SERVOMAX2);    (SER14, 0, pwm14);
                    pwm10 =         pau();
                    map(posDegrees,   Serial.print("
                    70, 120,        Paso abrir = ");
                    SERVOMIN1,      Serial.println(pos
                    SERVOMAX1);    Degrees);
                    pwm11 =         }
                    map(posDegrees,
                    70, 120,
                    SERVOMIN2,
                    SERVOMAX2);
                    pwm13 =
                    map(posDegrees,
                    70, 120,
                    SERVOMIN2,
                    SERVOMAX2);
                    pwm13 =
                    map(posDegrees,
                    70, 120,
                    SERVOMIN2,
                    SERVOMAX2);
                    currentPos1 =
targetPos1;
                    currentPos2 =
targetPos2;
                    }
                    void bola(){
                    mov1();
                    }
                    void patas(){
                    mov2();
                    }
                    // Callback cuando
se conecta un
                    controlador
                    void
                    onConnectedControl
                    ler(ControllerPtr
                    ctl) {
                    bool
                    foundEmptySlot =
                    false;
                    for (int i = 0;
i<BP32_MAX_GAMEPAD
                    S; i++) {
                    if
                    (myControllers[i]
                    == nullptr) {
                    Serial.print
                    f("CALLBACK:
                    Controller
                    conectado,
                    índice=%d\n", i);
                    ControllerPr
                    oproperties
                    properties = ctl-
                    >getProperties();
                    Serial.print
                    f("Modelo: %s,
                    VID=0x%04x,
                    PID=0x%04x\n",
                    ctl-
                    >getModelName().c_
                    str(),
                    properties.vendor_

```


ANEXO 5: Código prueba UCS32 cada

canal

```
import processing.serial.*;

Serial puerto;

int canal = 1;

int angulo = 90;

String puertoCOM = "COM4"; // CAMBIA AQUÍ tu
puerto COM

void setup() {
  size(400, 300);

  puerto = new Serial(this, puertoCOM, 9600);
}

void draw() {
  background(255);
  fill(0);
  textSize(16);
  text("UCS-32 CONTROL MANUAL", 100, 30);

  text("Canal: " + canal, 50, 80);
  text("Ángulo: " + angulo, 50, 120);
  text("Presiona ESPACIO para enviar", 50, 160);
  text("Usa ↑ ↓ para cambiar canal", 50, 200);
  text("Usa → ← para cambiar ángulo", 50, 230);
}

void keyPressed() {
  if (keyCode == UP) {
    if (canal < 32) canal++;
  } else if (keyCode == DOWN) {
    if (canal > 1) canal--;
  } else if (keyCode == RIGHT) {
    if (angulo < 180) angulo += 5;
  } else if (keyCode == LEFT) {
    if (angulo > 0) angulo -= 5;
  } else if (key == ' ') {
    int pulso = (int) map(angulo, 0, 180, 500, 2500);

    String comando = "#" + canal + " P" + pulso + "
T500\r\n";

    println("Enviando: " + comando);
    puerto.write(comando);
  }
}
```