

**ROBOT MÓVIL LIMPIADOR DE CÉSPED EN EL INTERIOR DE LA
UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA**

Santiago Crespo

May-Ling Moreno

Laura Daniela Pareja

Jisel Dayan Rodriguez

Juan David Verano

Monografía

Asesor:

Jorge Aponte

Ingeniero Mecánico

Universidad Militar Nueva Granada

Facultad de Ingeniería

Programa de Ingeniería en Mecatrónica

Bogotá D.C. 2025

Nota de Aceptación

Firma del Presidente del jurado

Firma del jurado 1 - Evaluador

Firma del jurado 2 - Evaluador

Firma del jurado 3 - Director

Bogotá, 18 de mayo de 2025

CONTENIDO

	pág.
1. Glosario	11
2. Resumen	13
3. Introducción	14
4. Diseño Conceptual	15
4.1. Definición del problema	15
4.1.1. Objetivo General	15
4.1.2. Objetivos Específicos	16
4.2. Proyectos relacionados	16
4.3. Análisis de mercado	21
4.4. Encuesta	24
4.5. Casa de la calidad	30
4.6. Descomposición funcional	32
4.6.1. PROGRAMACIÓN	33
4.6.2. COMUNICACIONES	34
4.6.3. CONTROL	34
4.6.4. SISTEMA MECÁNICO	35
4.6.5. ELECTRÓNICA	35

4.7. Prototipos	36
4.7.1. Boceto del prototipo 1	36
4.7.2. Boceto del prototipo 2	38
4.7.3. Boceto del prototipo 3	39
4.7.4. Prototipo final	40
5. DISEÑO A DETALLE	42
5.1. Modelos	42
5.1.1. Modelo cinemático	42
5.1.2. Modelo dinámico	47
5.2. Mecánico	50
5.2.1. Herramienta	54
5.3. Eléctrico	56
5.4. Control	58
6. CONSTRUCCIÓN Y PRUEBAS	59
6.1. Control para motores e interfaz gráfica	64
6.1.1. Datos de sensores	65
6.1.2. Filtros de Madgwick	65
6.2. Ubicación: Modulos de orientación y GPS	67
6.3. Reconocimiento de imágenes mediante Inteligencia Artificial	67
6.4. Control	69
6.5. Trayectoria	72

7. ANÁLISIS Y RESULTADOS	74
8. CONCLUSIONES	76
9. ANEXOS	82
9.1. Resultados de encuentras	82
9.2. Descomposición Funcional	86
9.3. Planos del chasis del robot	86
9.4. Plano eléctrico	91
9.5. Montaje del robot en físico	93
9.6. Códigos	94
9.6.1. Rapberry PI	94
9.6.2. Rapberry PI	96

LISTA DE TABLAS

1.	Tabla de componentes utilizados.	17
2.	Tabla de componentes utilizados.	61
3.	Tabla de abonos.	62
4.	Tabla de abonos.	74

LISTA DE FIGURAS

1.	EcoFlow BLADE. Imagen tomada de [10]	22
2.	Segway Navimow H1500E. Imagen tomada de [11]	23
3.	Casa de la calidad. Imagen propia	31
4.	Descomposición funcional. Imagen propia	32
5.	Boceto del prototipo 1. Imagen propia	37
6.	Boceto del prototipo 2. Imagen propia	38
7.	Boceto del prototipo 3. Imagen propia	39
8.	Matriz para la selección del prototipo. Imagen propia	40
9.	Boceto del prototipo final. Imagen propia	41
10.	Planteamiento de modelo diferencial. Imagen propia	43
11.	Diagrama de las llantas	43
12.	Posición en (x,y)	44
13.	$W_d = 4, W_i = 12$. Imagen propia tomada de Matlab	46
14.	$W_d = 12, W_i = -4$. Imagen propia tomada de Matlab	46
15.	$W_d = 12, W_i = -4$. Imagen propia tomada de Matlab	47
16.	Posición del robot. Imagen propia tomada de Matlab	49
17.	Torques sin pendiente. Imagen propia tomada de Matlab	49
18.	Torques con pendiente de 10° . Imagen propia tomada de Matlab	50
19.	Montaje del chasis con los elementos incluidos. Imagen propia tomada de SolidWorks	50

20. Simulación por elementos finitos. Imagen propia tomada de SolidWorks	51
21. Simulación por elementos finitos URES, placa inferior. Imagen propia tomada de SolidWorks	52
22. Factor de seguridad de la placa inferior. Imagen propia tomada de SolidWorks	53
23. Simulación por elementos finitos de la placa superior. Imagen propia tomada de SolidWorks	53
24. Herramienta. Imagen propia tomada de SolidWorks	55
25. Cepillo. Foto propia	55
26. Esquema general de conexiones en proteus. Imagen propia tomada de Proteus	57
27. PCB que se va a implementar. Imagen propia tomada de Proteus	57
28. Montaje del chasis con los elementos incluidos. Imagen propia tomada de SolidWorks	59
29. Montaje del chasis con los motores. Imagen propia	62
30. Tapa del robot físico. Imagen propia	62
31. Montaje físico del robot en su interior. Imagen propia	63
32. Montaje físico de los controladores y sensores adicionales. Imagen propia	63
33. Montaje físico del robot en su interior. Imagen propia	64
34. Interfaz gráfica para el control de los motores. Imagen propia	64
35. Lectura de los sensores mediante el protocolo I2C. Imagen propia	65
36. Medicion del modulo GPS LC29HEA. Imagen propia	67

37.	Comportamiento de la red convolucional. Imagen propia	68
38.	a) Imagen real del piso. b) Imagen entrenada por IA para el reconocimiento de musgo. Imagen propia	68
39.	Control final del carro. Imagen propia	69
40.	Orientación deseada y corrección del error. Imagen propia	70
41.	Control de velocidad de las ruedas. Imagen propia	70
42.	Entrada y salida del control en simulación. Imagen propia	71
43.	Entrada y salida del control en simulación. Imagen propia	72
44.	Evidencia del robot en diferentes partes. Imagen propia	73
45.	Pregunta 1.	82
46.	Pregunta 2.	82
47.	Pregunta 3.	83
48.	Pregunta 4.	83
49.	Pregunta 5.	83
50.	Pregunta 6.	84
51.	Pregunta 7.	84
52.	Pregunta 8.	84
53.	Pregunta 9.	85
54.	Pregunta 10.	85
55.	Base pila. Imagen propia	86
56.	Base pila. Imagen propia	86
57.	Base. Imagen propia.	87

58.	BaseGDL. Imagen propia	87
59.	Carcasa de controles. Imagen propia.	88
60.	Carcasa central. Imagen propia	88
61.	Case camara. Imagen propia	89
62.	OIY. Imagen propia	89
63.	Soporte bateria. Imagen propia	90
64.	Soporte batería. Imagen propia	90
65.	Ensamblaje explosionado. Imagen propia	91
66.	Plano eléctrico del robot.	91
67.	PCB 1. Imagen propia	92
68.	PCB 2. Imagen propia	92
69.	Montaje final de robot en interior.	93
70.	Manual del robot.. Imagenes propia	93

1. Glosario

- **Cinemática:** La Cinemática es la parte de la Física que estudia el movimiento de los cuerpos, denominados, en sentido general, como partículas. Así, se puede definir la ‘partícula’ como todo cuerpo que posee una posición, sin considerar sus dimensiones. En otras palabras, el desplazamiento o movimiento del cuerpo tiene mucha más importancia que sus dimensiones. [1]
- **Dinámica:** La Dinámica es la parte de la Física que estudia conjuntamente el movimiento de la partícula y las causas que lo producen o lo modifican. [1]
- **Orugas:** Este tractor se basa en un conjunto de eslabones modulares que pueden hacer posible un desplazamiento estable en terrenos irregulares y escabrosos, gracias a que la fuerza ejercida por el tractor sobre la superficie es menor. Las llamadas “orugas” forman parte de un cinturón flexible con un conjunto de eslabones rígidos unidos unos a otros. Estos eslabones ayudan al vehículo a distribuir el peso en la superficie y a recorrerla sin hundirse. [2]
- **Encoder:** Los Encoders son sensores que generan señales digitales en respuesta al movimiento. Están disponibles en dos tipos, uno que responde a la rotación, y el otro al movimiento lineal. Cuando son usados en conjunto con dispositivos mecánicos tales como engranes, ruedas de medición o flechas de motores, estos pueden ser utilizados para medir movimientos lineales, velocidad y posición. [3]
- **IMU:** Una unidad de medición inercial es un sensor que mide tanto la aceleración como el movimiento de rotación. Las IMU son esenciales para los sistemas de seguimiento y control del movimiento, ya que proporcionan datos de movimiento de alta frecuencia sin infraestructura externa, lo que facilita su uso y las hace inmunes a interferencias externas. [4]

- **Navegación autónoma:** Un sistema de navegación autónoma consiste básicamente de un vehículo que no requiere de un operador para navegar y cumplir con sus diversas tareas. [5]
- **Restricción holonómica:** Una restricción holonómica proporciona una restricción geométrica inherentemente global en el movimiento en el sentido de ser especificado en todas partes, pero no en el sentido de exigir la coordinación global interna de las variables. [6]

2. Resumen

Este proyecto presenta el desarrollo de un robot móvil autónomo diseñado para identificar y remover el césped que crece entre las juntas de los ladrillos de la carpeta blanca, hasta la zona verde que queda entre el Bloque A y el restaurante específicamente en la Universidad Militar Nueva Granada, este tipo de vegetación, aunque parezca inofensiva, puede afectar tanto la estética como la durabilidad de las superficies pavimentadas. Los métodos actuales de limpieza suelen ser manuales o químicos, lo que puede resultar poco práctico o incluso perjudicial para el medio ambiente.

La propuesta consiste en crear un robot que utilice visión artificial para localizar el césped que se ubica entre en las juntas de los ladrillos a partir de una navegación autónoma para moverse con eficiencia y un sistema de corte ecológico que no daña el entorno. El diseño también tiene en cuenta el uso de sensores, motores y mecanismos pensados para realizar esta tarea, junto con algoritmos de inteligencia artificial que mejoran su rendimiento en cuanto a tiempo.

A lo largo del documento se describe cómo se diseñó e implementó el robot, detallando la selección de componentes y los resultados obtenidos en pruebas tanto teóricas como prácticas. Además, se plantean posibles mejoras que podrían aplicarse a versiones futuras, con el fin de avanzar hacia soluciones más sostenibles y eficientes para el cuidado de espacios urbanos.

3. Introducción

El mantenimiento de las zonas pavimentadas, ya sean de propiedad pública o privada, es un desafío permanente, pues se dan casos en los que el césped crece en el interior de las fisuras del cemento o bien entre las juntas de los ladrillos, lo que no solo daña la imagen de tales espacios, sino que en ocasiones pone en riesgo la propia integridad de los mismos, incluso su seguridad.

Actualmente, la técnica más utilizada para su eliminación es la de trabajar manualmente o bien la de utilizar productos químicos, lo cual en muchas ocasiones es ineficaz, costoso o dañino para el entorno. Ante tal situación, el presente proyecto propone el diseño de un robot móvil autónomo con capacidad de detectar y eliminar el césped de forma automática. El presente informe expone el proceso y diseño del sistema y todos los aspectos necesarios para lograrlo mecánicamente, electrónicamente y el control necesario; explica los criterios de selección de componentes, ya sean sensores, motores, etc., presenta cómo se implementó un sistema inteligente para aumentar la autonomía del robot; muestra los propios resultados de las pruebas y un análisis de las mejoras a implementar en el futuro.

La intención del proyecto no es solo ofrecer una solución técnica a un problema cotidiano, sino también abrir el camino hacia tecnologías que contribuyan al mantenimiento sostenible de los espacios urbanos.

4. Diseño Conceptual

4.1. Definición del problema

En las calles pavimentadas de la Universidad Militar Nueva Granada, especialmente donde hay adoquinado o ladrillo, es habitual que crezca césped o maleza a través de las ranuras, lo que representa un problema estético y funcional, ya que puede provocar determinados daños en la estructura de las superficies y, al mismo tiempo, representar un riesgo potencial para quienes caminan por allí.

La forma mas normal de eliminar el césped consiste en hacerlo manualmente o con productos químicos, las cuales tienen varias desventajas: la primera es de ritmo de ejecución lento y un gran esfuerzo humano, y la segunda puede ser dañina para el medioambiente. Estos métodos no son tan eficientes y efectivos ni sostenible a largo plazo.

Por tanto, en este proyecto se plantea desarrollar un robot móvil autónomo para detectar y eliminar esta vegetación de una manera más eficaz, disminuir la intervención humana, mejorar los tiempos de mantenimiento y reducir el impacto medioambiental, y así dar una solución más inteligente en los espacios que se requiera la solución

4.1.1. Objetivo General

Desarrollar un robot móvil autónomo capaz de detectar y eliminar césped o maleza que crece entre las ranuras de superficies adoquinadas en la Universidad Militar Nueva Granada, con el fin de mejorar el aspecto estético y funcional de la Plaza Cervantes, reducir la intervención humana, optimizar los tiempos de mantenimiento y minimizar el impacto ambiental.

4.1.2. Objetivos Específicos

- Diseñar e implementar un sistema de detección que permita identificar con precisión la presencia de vegetación entre los adoquines mediante sensores y procesamiento de imágenes con inteligencia artificial.
- Desarrollar un mecanismo de eliminación eficiente, seguro y ecológico que remueva la maleza sin dañar la estructura del pavimento ni el medioambiente.
- Integrar un sistema de navegación autónoma que permita al robot desplazarse por las zonas asignadas mediante la ruta propuesta de forma segura, evitando obstáculos y cubriendo el área objetivo de manera óptima.
- Reducir la necesidad de intervención manual mediante la automatización del proceso de mantenimiento y limpieza de adoquines en zonas específicas del campus universitario.
- Evaluar el rendimiento del robot en condiciones reales, verificando su eficacia en la detección, remoción y cobertura del área, así como su impacto en la reducción del tiempo y esfuerzo de mantenimiento para el personal de la universidad.

4.2. Proyectos relacionados

En la búsqueda de proyectos, informes o libros relacionados con el proyecto, se tienen diferentes estudios o archivos como por ejemplo el docuemnto hecho por Álvaro Rodríguez González, que presenta el desarrollo de una aplicación móvil para la gestión remota de robots cortacésped. La app permite programar horarios de corte, ajustar parámetros de funcionamiento y recibir notificaciones sobre el estado del dispositivo. El trabajo abarca el diseño de la interfaz y la integración con los sistemas del robot, buscando mejorar la experiencia del usuario y optimizar el mantenimiento de áreas verdes.

[7], o como en el proyecto se quiere implementar algoritmos de navegacion autonoma se tiene el trabajo de grado de de Pablo Cano García, que desarrolla algoritmos para la navegación autónoma y el mapeo de un robot cortacésped, utilizando técnicas de visión por computadora. Se implementan métodos como SLAM, segmentación semántica y planificación de rutas para mejorar la eficiencia y seguridad del robot. El estudio compara enfoques basados en machine learning con técnicas tradicionales de segmentación de imágenes, evaluando su rendimiento en simulaciones con ROS 2 y Gazebo [8], posterior a este tambien se tiene la tesis de maestria de Corredor Gómez y Jennifer Paola que utiliza visión por computadora y detección de color para identificar maleza, aplicando un algoritmo de k-vecinos más cercanos. Incluye un sensor de imágenes y software de post-procesamiento, controlando válvulas para optimizar el uso de combustible y preservar el suelo. El algoritmo mejora el desempeño en costos y tiempos de procesamiento, permitiendo una eliminación eficiente de maleza sin afectar la velocidad del tractor [9], también se tiene como referencia los siguientes artículos:

Tabla 1. Tabla de componentes utilizados.

#	Nombre	URL	Autor
1	Aplicación móvil para la gestión de robot cortacésped	https://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/handle/10651/74026/TFG_AlvaroRodriguezGonzalez.pdf?sequence=5isAllowed=y	Álvaro Rodríguez González

Continúa en la siguiente página

Tabla 1 – continuación de la página anterior

#	Nombre	URL	Autor
2	Mapeado y navegación aplicada a un robot corta césped	https://drive.google.com/file/d/1V47ePj7YWPPhvEA9cTVvc_i_aq35mC2i-/view?usp=sharing	Pablo Cano García
3	Implementación de sistema de navegación autónomo en robot móvil experimental para reconstrucción y explotación de entornos desconocidos	https://repository.eia.edu.co/server/api/core/bitstreams/ce8ac042-41cf-4d0f-a8e8-2E7579de8ed1/content	Velásquez Hernández, C. A., Chávez Chávez, J. J., y Córdoba Nieto,
4	Mapeado y navegación aplicada a un robot corta césped	https://drive.google.com/file/d/1V47ePj7YWPPhvEA9cTVvc_i_aq35mC2i-/view?usp=sharing	Pablo Cano
5	Desarrollo de un sistema de control en la aplicación de técnicas selectivas de eliminación de maleza	https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/7442	Corredor Gómez, Jennifer Paola
6	Reduced weed growth with different paving constructions	https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/wre.12059	

Continúa en la siguiente página

Tabla 1 – continuación de la página anterior

#	Nombre	URL	Autor
7	Un Robot Móvil Autónomo Seguidor Delínea	https://revistas.unisimon.edu.co/index.php/innovacioning/article/view/2058	Paola Andrea Gáleano, Ingrid Durley Torres, Juan Felipe Álva
8	Los robots de campo eliminan las malas hierbas con láseres	https://www.igus.es/info/laser-robots-for-farming	
9	Control de maleza mediante la robótica	https://www.redalyc.org/journal/5862/586268743008/html/	Juan Espinoza Hernández, Carlos Juárez, González Canek Motá, Eugenio Romantchik
10	Algoritmo para planear trayectorias de robots móviles, empleando campos potenciales y enjambres de partículas activas brownianas	https://catalogo.unimilitar.edu.co/cgi-bin/koha/opac-ISBDdetail.pl?biblionumber=39256	Espitia Cuchango, Helbert Eduardo
11	Inteligencia artificial (IA)	https://www-accessscience-com.ezproxy.umng.edu.co/content/article/a053300?implicit-login=true	Steven M. Gustafson, David A. Gustafson

Continúa en la siguiente página

Tabla 1 – continuación de la página anterior

#	Nombre	URL	Autor
12	Sistemas expertos	https://www.accessscience.com.ezproxy.umng.edu.co/content/article/a248550	Frederick Hayes-Roth, William R. Murray, Leonard Adelman
13	Herbicida	https://www.accessscience.com.ezproxy.umng.edu.co/content/article/a314900	Rodney O. Radke
14	Control híbrido	https://www.accessscience.com.ezproxy.umng.edu.co/content/article/a801920	William S. Levine
15	Sistema de navegación autónoma de un vehículo usando visión robótica y control difuso en LabVIEW	https://www.scielo.org.mx/pdf/iit/v12n2/v12n2a2.pdf	Ramírez-Cortés J. M.
16	Vehículo robótico: autónomo y teleoperado con una PDA	http://scielo.org.mx/pdf/imtd/v3n2/v3n2a2.pdf	Villa-Medina Francisco

4.3. Análisis de mercado

En el desarrollo de software y hardware, es común encontrarse con una amplia gama de herramientas y soluciones diseñadas para abordar los mismos desafíos. Estas alternativas suelen diferenciarse en aspectos como funcionalidad, costo, eficiencia, escalabilidad y otros factores clave. Por ello, resulta fundamental llevar a cabo una evaluación exhaustiva que permita identificar la opción más adecuada, alineada tanto con los requerimientos del proyecto como con las expectativas del cliente.

Esta evaluación va más allá de la viabilidad técnica e incorpora aspectos como el costo económico, el soporte disponible, la comunidad que respalda la tecnología, su grado de madurez y su potencial de adaptación a futuro, sabiendo que el objetivo es proporcionar una visión más clara de las principales opciones tecnológicas compatibles con nuestra infraestructura y necesidades de desarrollo. Por ello, se analizarán los beneficios y desventajas de cada alternativa, así como su aplicabilidad en el contexto específico del proyecto, permitiendo una toma de decisiones informada y precisa.

Con estos criterios en mente, procederemos a investigar las diferentes opciones tecnológicas disponibles, para hacer un análisis comparativo riguroso para definir cuál es la más adecuada para nuestro proyecto.

- EcoFlow BLADE

BLADE aprovecha la tecnología más vanguardista de EcoFlow, Visión X. Con la combinación de sensores visuales, LiDAR y el posicionamiento cinematográfico en tiempo real (RTK), BLADE reconoce y evita de forma inteligente los obstáculos grandes y pequeños, desde el mobiliario del jardín hasta las galardonadas begonias del vecino. Se encuentra con residuos más rebeldes, vuelve a trazar la ruta con precisión a 2 cm, tiene ruedas delanteras omnidireccionales de 20 cm. BLADE atraviesa el terreno irregular sin esfuerzo, evitando piedras de hasta 4 cm y

subiendo pendientes del 50. El ancho adicional de BLADE ofrece una distancia de corte de más de 25 cm, por lo que corta más en menos tiempo, tiene un amplio rango de corte de césped entre los 2 y los 7,6 cm, que se puede ajustar en segundos con la aplicación, con 4G, GPS y una eSim integrada, puede rastrear la ubicación de BLADE donde quiera que vaya, su sensor de lluvia integrado detecta chubascos o mal tiempo y envia automáticamente BLADE de vuelta a su cargador, manteniendo el césped libre de lodo y surcos, con una clasificación de resistencia al agua IPX5, rocíe la HOJA con un chorro de agua a baja presión para desalojar los desechos o la tierra de las ruedas, extensa garantía de hasta 4 años, equipo de servicio técnico personal especializado, piezas de repuesto en lugar de reparaciones. [10]



Figura 1. EcoFlow BLADE. Imagen tomada de [10]

- Segway Navimow H1500E

El dispositivo tiene un peso de casi 16 kilogramos, en la parte trasera cuenta con una aleta que permite levantarla. Posee certificación IPX6, lo que lo hace resistente al agua. Cuenta con una aplicación, en la cual es posible configurar la ubicación inicial del robot es decir la ubicación de la base.

En la parte superior cuenta con un GPS, el cual, se encuentra rodeado con luces

LED. Si la luz parpadea, quiere decir que algo anda mal. Si se prende en verde o azul, está todo bien con el GPS y la conexión con la base. Si se pone roja, es porque alguien presionó el botón de ‘STOP’ o porque se topó con algo como una piedra grande. Cuando eso pasa, el aparato se detiene solo. También tiene una pantallita que muestra unos códigos si hay errores. Además, ahí se puede ver cuánta batería tiene, si está conectado bien, si está trabado y cuánto terreno alcanzó a cortar la última vez. Debajo de la pantalla están los botones para prenderlo o apagarlo, y otro para hacerlo volver a la base de forma manual.

En la parte de abajo están las cuchillas, que miden como 21 cm, y tiene un sistema para protegerlo de piedras grandes, una guía de metal para el pasto, y las ruedas de adelante. Atrás está la salida por donde bota el pasto cortado, porque no guarda lo que corta. Las ruedas de atrás son grandes y cambian según el modelo: algunas son de plástico duro y otras, en los modelos más potentes, son de goma, lo que ayuda a que pase por terrenos con baches. Puede subir inclinaciones de hasta 45 grados, aunque eso no se nota mucho si el piso es plano. También viene con una base de carga de plástico y una antena para el GPS. [11]



Figura 2. Segway Navimow H1500E. Imagen tomada de [11]

4.4. Encuesta

Para el desarrollo de este proyecto, se realizó a cabo una encuesta con el objetivo de adquirir información relevante sobre las necesidades y percepciones de los usuarios en relación con la presencia de césped y maleza en las ranuras de las áreas pavimentadas. Esta herramienta permitió obtener datos sobre la frecuencia con la que se presenta esta problemática, las dificultades asociadas a su remoción y la efectividad de los métodos actuales utilizados para su eliminación.

Además, la encuesta ayudó a comprender las expectativas de los usuarios respecto a una solución automatizada, como el robot móvil propuesto, evaluando factores clave como la eficiencia en la eliminación, impacto ambiental, autonomía y facilidad de uso. Con esta información, se pudieron establecer criterios más precisos para el diseño y funcionalidad del robot, asegurando que responda adecuadamente a las necesidades del entorno en el que será implementado. Proporciendo así 10 preguntas, estas son 9 preguntas con diferentes opciones o preguntas cerradas y una pregunta abierta, las cuales son las siguientes preguntas: (los resultados de las encuestas se encuentran en los anexos, al final del documento)

1. ¿Cuál de los siguientes métodos para la eliminación del césped considera usted que es el más adecuado?

- Vapor de agua a presión
- Vinagre blanco a presión
- Herramienta mecánica
- Aplicación de herbicidas
- Quemadores a gas
- No tengo conocimiento

- Otro

Al revisar las respuestas que dieron los encuestados, se nota que la mayoría recibió algún tipo de asesoría técnica y, en general, se sugiere usar una herramienta mecánica para hacer el trabajo. Esto deja dos ideas posibles: una es poner un brazo robótico que haga la tarea, y la otra es instalar una espátula que esté pegada al piso y que vaya raspando el musgo mientras el carrito avanza.

La mayoría de las personas encuestadas prefiere cualquiera de estas dos opciones, más que nada porque creen que son formas eficientes de hacer el trabajo y aseguran que se logre el objetivo.

Nadie votó por la opción de usar fuego, o sea, la quemadora de gas, y la segunda opción con más votos fue la del vapor de agua a presión. Pero este método también necesita algo que le dé fuerza al agua, o sea, se requiere una máquina con potencia para que el agua salga con presión. Eso significa que además del gasto en el equipo, hay que considerar un gasto extra de energía, o sea, hay más costos, tanto en dinero como en energía.

2. ¿Qué factores considera más importantes al elegir un método para eliminar la maleza en espacios públicos? Asigne una calificación del 1 al 4 a cada factor, donde 1 representa la menor importancia y 4 la mayor, asegurándose de no repetir ninguna calificación.

- Costo
- Impacto ambiental
- Eficiencia
- Tiempo de ejecución
- Herramienta mecánica

Con esta pregunta se observa que la prioridad para los encuestados es el impacto ambiental el costo económico y la eficiencia, manifestando las características que busca el mercado actual para nuestro proyecto. De aquí se ve necesario que este proyecto tenga una fuente de alimentación limpia como el panel solar, ahorrando energía y una batería eléctrica que no tiene residuos nocivos.

3. ¿Cuál cree que sería el método más adecuado para monitorear la posición del móvil, considerando las características del camino (este móvil se desplazará desde el laboratorio de automatización hasta la plaza de Cervantes, atravesando un camino que incluye rampas de cemento y ladrillo) que debe recorrer?

- GPS
- IMU y Encoders en las Ruedas
- Visión Artificial
- Marcadores de Referencia
- Otro

En esta pregunta se evdencia que aunque sea la opción mas compleja se prefiere el uso de visión artificial, ya que una de las características que tiene este método es la excelente adaptación que tiene este método como a entornos dinámicos (como lo es la de la universidad) además de que el móvil podrá tener más información de sus alrededores. Esto sin mencionar que la segunda opción es visión artificial+gps, en donde el móvil obtendrá aun mas información pero se incrementa la dificultad técnica de enlazar de buena manera la información recibida de ambos casos. Las demás opciones no tienen tanta relevancia.

4. ¿Cree usted que el desarrollo de un móvil que elimina las plantas que se ubican en las juntas de los ladrillos del suelo de forma autónoma es necesario para facilitar

la labor de limpieza en la universidad Militar en el espacio de la plaza Cervantes?

- Si
- No

En esta pregunta se observa que la mayoría piensa que si es necesario la implementación de este proyecto en la universidad, lo cual habla de la satisfacción que puede llegar a tener el cliente objetivo (Dep de servicios generales), solucionando una necesidad y un problema existente.

5. ¿Cuál considera usted que es el nivel de impacto ambiental que puede provocar la implementación del proyecto?

- Bajo impacto
- Medio impacto
- Alto impacto

En esta pregunta se observa que es bueno que se piense de forma general que el proyecto tendrá un impacto ambiental bajo, lo cual como se vio anteriormente era el tema de preocupación principal de los encuestados. Es un proyecto ingenieril, viable desde la vista ambiental.

6. ¿Cuál considera usted que es el nivel de impacto ambiental que puede provocar la implementación del proyecto?

- Resistencia al agua y polvo
- Estructura con materiales resistentes a la corrosión
- Sistema modular y de fácil mantenimiento
- Baterías de larga duración y carga rápida

- Sensores redundantes para detección de fallos

En esta pregunta se observa que la mayor importancia es conferida a que el proyecto sea modular y se fácil acceso, ya que esta es una característica de un proyecto que piensa ser empleado durante mucho tiempo, por lo que esto se convierte en un parámetro de diseño principal. Curioso que los sistemas de seguridad redundantes tengan una importancia relativamente media al igual que la resistencia al polvo y el agua. Así también estas características se vuelven parámetros claros de diseño.

7. ¿Qué fuente de poder considera más adecuado para el funcionamiento del carro autónomo?

- Baterías de ionlitio.
- Celdas de combustible de hidrógeno.
- Sistema híbrido.
- Otro

Se opina que las baterías de iones de litio son mas adecuadas, teniendo en cuenta su relación de utilidad y precio, por lo que se optará por esta opción para el diseño de todos los circuitos de potencia.

8. ¿Qué factores deben considerarse para minimizar el impacto ambiental del carro autónomo? Asigne una calificación del 1 al 4 a cada factor, donde 1 representa la menor importancia y 4 la mayor, asegurándose de no repetir ninguna calificación.

- Uso de materiales reciclables en su construcción
- Métodos de eliminación de maleza sin químicos
- Bajo consumo energético

- Minimización del ruido

En esta pregunta se observa que a percepción general, los métodos de eliminación de musgo químicos son los más dañinos para el medio ambiente, por lo que se puede descartar esta opción para cortar el musgo.

9. ¿Cuáles serían sus principales preocupaciones o dudas sobre el uso de un móvil autónomo para esta tarea?

En esta pregunta se observó que a la mayoría lo que más les preocupa es la capacidad de este robot de llevar a cabo su tarea sin que ninguna de las personas que esté cerca del robot salga herida. De aquí se identifica la necesidad que tiene el carrito de poder identificar personas a los alrededores en cada espacio en el que esté. Se debe añadir sensorica y sistemas de seguridad redundantes para asegurar que nada salga mal, a parte que se debe de tener en cuenta los cambios climáticos a los que esté se enfrentara.

10. ¿Considera usted que es posible escalar el proyecto a áreas como la agronomía, la jardinería u otras?

- Si
- No

En esta pregunta se observó que el 72.7 de la población dijo que si y esta respuesta es muy oportuna ya que se ve el potencial que tiene nuestro proyecto para ser fabricado en masa y comercializarlo en otras áreas, para aportar a la automatización de tareas sencillas en este país.

4.5. Casa de la calidad

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos de la encuesta anterior, se realizó una matriz de selección, o tambien llamada la casa de la calidad, la cual esta estructurada de la siguiente forma.

Columnas Principales:

- Requerimientos del Cliente: Lista de criterios clave que el robot debe cumplir, como eficiencia en la eliminación de maleza, autonomía de funcionamiento, resistencia a condiciones climáticas, facilidad de mantenimiento, etc.
- Características Técnicas Evaluadas: Incluye variables como potencia del motor, dimensiones, consumo de energía, capacidad de batería, torque, velocidad, resistencia a temperaturas extremas, y facilidad de intervención o mantenimiento.
- Ponderaciones y Evaluación: Cada criterio tiene una puntuación asignada según su importancia en la selección del componente.

Filas de Evaluación:

- Cada fila representa un criterio del cliente y su respectiva puntuación para cada característica técnica.
- Se suman los valores en la columna final, lo que da una puntuación total que permite identificar qué opción es la mejor. Cómo se Interpreta

Ya con estos valores obtenidos se procede a obtener:

- Puntuación por RC (Requerimientos del Cliente): La puntuación total acumulada en cada columna representa qué tan bien una opción cumple con los requisitos del cliente.

- Peso Relativo en Porcentaje: Indica la importancia relativa de cada característica técnica dentro del proceso de selección.
- Orden de Importancia: Se establece un ranking de las características más críticas para la selección final.

Teniendo así la siguiente matriz:

CARACTERISTICAS		Función de peso - importancia	W HP N·m/s	mm °	mAh Ah V Wh	m cm Hz °	RPM Nm mm cm	IPX °C °F	n/a
			Potencia del Motor	Precisión de Sensores	Capacidad de batería	Navegación (GPS)	Eficiencia mecanismo de eliminación	Resistencia a los diferentes climas	Facilitamiento de mantenimiento
Eficiencia en la eliminación de maleza		5	9	9	5	7	9	5	3
Precisión en la identificación de maleza		4	3	9	3	9	7	3	3
Autonomía de funcionamiento		5	7	5	9	7	5	7	3
Resistencia a condiciones climáticas		3	5	5	5	3	3	9	5
Facilidad de mantenimiento		4	3	3	3	3	3	5	9
Costo de producción		4	7	5	3	3	3	3	7
Seguridad operativa		4	5	7	5	9	5	5	9
Impacto ambiental		5	3	3	5	3	5	3	5
Puntuación por RC		182	196	166	190	176	166	182	1258
Peso relativo en porcentaje		14,5	15,58	13,2	15,1	14,0	13,1955	14,46741	
Orden de importancia		3	1	6	2	7	5	4	

Figura 3. Casa de la calidad. Imagen propia

Ya teniendo la matriz resuelta, de acuerdo con los valores observados, las características con mayor peso en la selección incluyen la resistencia a condiciones climáticas (mayor peso), la autonomía de funcionamiento (segundo factor más relevante), la precisión en la identificación de maleza (también con un peso significativo) y las características como fácil intervención y capacidad de batería tienen menor peso en la decisión final.

4.6. Descomposición funcional

Esta descomposición realiza para analizar y estructurar el funcionamiento del robot en términos de sus componentes y las tareas que debe realizar. Este proceso permite dividir el sistema en funciones específicas y entender cómo interactúan entre sí para cumplir con el objetivo general del robot. En específico, ayuda con la claridad en el diseño permitiendo visualizar cómo se divide el trabajo del robot en diferentes subsistemas, como detección, navegación, eliminación de maleza y comunicación, ayuda también con la selección de componentes adecuados, o sea que ayuda a determinar qué sensores, actuadores y procesadores son necesarios en cada parte del sistema para cumplir con cada función específica por otra parte ayuda con la optimización del control y la programación porque facilita la implementación de software dividiendo las tareas en módulos, lo que hace que la programación sea más estructurada y eficiente, también facilita el mantenimiento y la mejora del diseño con una estructura funcional bien definida, es más fácil detectar fallos, hacer mejoras en el sistema o reemplazar componentes sin afectar todo el robot y por ultimo da un mejor ideal de la integración de sistemas al dividir el robot en funciones, se puede trabajar en paralelo en diferentes módulos (como visión artificial, movilidad y corte) e integrarlos después de forma eficiente.

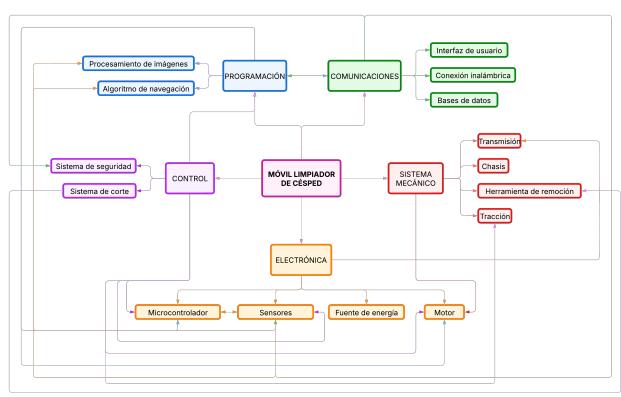


Figura 4. Descomposición funcional. Imagen propia

Describiendo un poco mas a detalle la descomposición funcional las cinco áreas principales son:

- Programación
- Comunicaciones
- Control
- Sistema Mecánico
- Electrónica

Cada una de estas áreas contiene elementos clave que contribuyen al funcionamiento del robot, explicando cada area, se tiene:

4.6.1. PROGRAMACIÓN

Encargada del software que controla el dispositivo. Esta tiene relaciones con Electrónica (sensores y microcontrolador) y Control, ya que la navegación y el procesamiento de imágenes deben influir en la toma de decisiones del sistema, esta se realiza en Phyton mediante el microprocesador de Raspberry Pi 5 y el microcontrolador STM, en esta se programa una red neuronal para la identificación del muzgo o maleza para la respectiva eliminación. Se divide en:

- Procesamiento de imágenes: Se usa para analizar el entorno, probablemente con visión artificial para detectar césped o superficies a limpiar.
- Algoritmo de navegación: Define la ruta del robot, evitando obstáculos y asegurando una cobertura eficiente del área de limpieza.

4.6.2. COMUNICACIONES

Se encarga de la conectividad del sistema y se relaciona con Programación (procesamiento de imágenes y navegación), Electrónica (sensores y microcontrolador), y Control (para recibir y enviar información en tiempo real). Sus elementos incluyen:

- Interfaz de usuario: Posible aplicación web o móvil para monitorear y controlar el robot.
- Conexión inalámbrica: Puede ser WiFi, Bluetooth o cualquier protocolo de comunicación remota.
- Bases de datos: Para almacenar registros de funcionamiento, mantenimiento o mapas del área.

4.6.3. CONTROL

Regula el comportamiento del robot y se relaciona directamente con Electrónica (microcontrolador y sensores), Programación (algoritmos de navegación) y Sistema Mecánico (actuadores y herramienta de remoción), este se realiza mediante un modulo que tiene implementado el control de la velocidad de los motores, y a este se le agrega un filtro de Kalman extendido para compactar toda la información de los sensores y estimar de la mejor manera la posición global del robot. Este tiene los siguientes sistemas:

- Sistema de seguridad: Probablemente sensores para evitar accidentes o colisiones.
- Sistema de corte: Relacionado con la herramienta de remoción en el sistema mecánico.

4.6.4. SISTEMA MECÁNICO

Este tiene relación con Electrónica (motor y fuente de energía), Control (para activar la herramienta de remoción) y Programación (para definir la navegación y activación del sistema) y la parte física del robot. Contiene:

- Transmisión: Encargada de la transferencia de potencia hacia las ruedas o herramientas.
- Chasis: Estructura que soporta todos los componentes.
- Herramienta de remoción: Dispositivo que elimina la maleza o limpia la superficie.
- Tracción: Ruedas o mecanismos de locomoción del robot.

4.6.5. ELECTRÓNICA

Asegura la integración y funcionamiento de los componentes eléctricos y electrónicos y tiene relación directa con todas las demás áreas, ya que es el núcleo que permite el funcionamiento del sistema:

- Microcontrolador: Procesa la información y ejecuta órdenes según los sensores y programación.
- Sensores: Detectan obstáculos, monitorean el entorno y optimizan la navegación.
- Fuente de energía: Baterías o sistema de alimentación del robot.
- Motor: Controla el movimiento del robot y la herramienta de remoción.

Para las interconexión del sistema se observa que las flechas de colores representan la relación entre los módulos, con esto se refleja que la programación y la electrónica están

altamente conectadas con todos los subsistemas y el control y la mecánica trabajan en conjunto para la ejecución de tareas físicas, haciendo que las comunicaciones facilitan la interacción con el usuario y el almacenamiento de datos.

Con esto se observa que el robot opera mediante el siguiente flujo:

1. Los sensores y el procesamiento de imágenes detectan el entorno.
2. El algoritmo de navegación toma decisiones basadas en estos datos.
3. El sistema de control activa los motores y la herramienta de remoción según sea necesario.
4. El sistema mecánico ejecuta las acciones, como moverse y limpiar.
5. El usuario puede monitorizar y ajustar el funcionamiento a través de la interfaz y conexión inalámbrica.

4.7. Prototipos

Para la realización del prototipo final primero se desarrollaron 3 posibles prototipos, los cuales tienen en cuenta las características que se requerían para el prototipo final, como lo son: la claridad en el diseño, la selección de componentes adecuados, la optimización del control y la programación, lo que facilita el mantenimiento y la mejora del diseño y la integración de sistemas, estos son los posibles prototipos.

4.7.1. Boceto del prototipo 1

Este consta de cuatro ruedas, lo que indica que es un vehículo con tracción en al menos un eje, posee un compartimento central donde están ubicados los sistemas electrónicos,

sensores y la batería. En la parte inferior hay un cepillo rotatorio que es el encargado de remover el pasto o musgo de entre los ladrillos, este cepillo está conectado a un sistema de transmisión que probablemente lo haga girar de manera eficiente, posteriormente se observa un sistema de transmisión de engranajes y cadena, donde el motor impulsa una rueda para que el robot pueda moverse de manera autónoma en el entorno.

Cuenta con sensores que pueden ser usados para navegación autónoma, detección de obstáculos o identificación de las líneas entre los ladrillos, posee GPS e IMU's (Inertial Measurement Units), lo que hace que pueda utilizar navegación basada en coordenadas o corrección de trayectoria mediante giroscopios y acelerómetros. En la parte trasera hay dos luces, para indicar el estado del robot o para mejorar su visibilidad en diferentes condiciones.

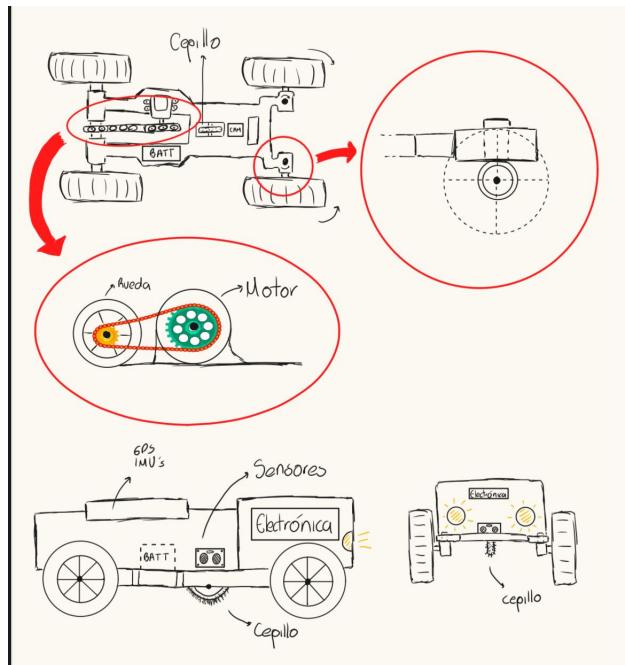


Figura 5. Boceto del prototipo 1. Imagen propia

4.7.2. Boceto del prototipo 2

Este tiene una estructura en forma de caja con ruedas, lo que le permite moverse sobre el terreno, este tiene un panel en la parte superior, que podría ser un panel solar para alimentación energética o una cubierta para la electrónica, tiene sensores en los laterales, para detectar obstáculos y para complementar la función de protección del robot, también se muestra un brazo o mecanismo al frente, el cual es un sistema de corte adicional, este tiene un diseño compacto y estable, con un centro de gravedad bajo. Se observa una placa con diferentes componentes etiquetados como PH y SY, lo que representa que robot tiene varios módulos electrónicos conectados, este tiene controladores de motor, sensores y un microcontrolador para gestionar las funciones del robot. En la mitad abajo tiene otro mecanismo de eliminación que una ciera, el motor cuenta con encoders, lo que permite medir la velocidad y posición de las ruedas con precisión, esto es útil para la navegación autónoma y la corrección de trayectoria.

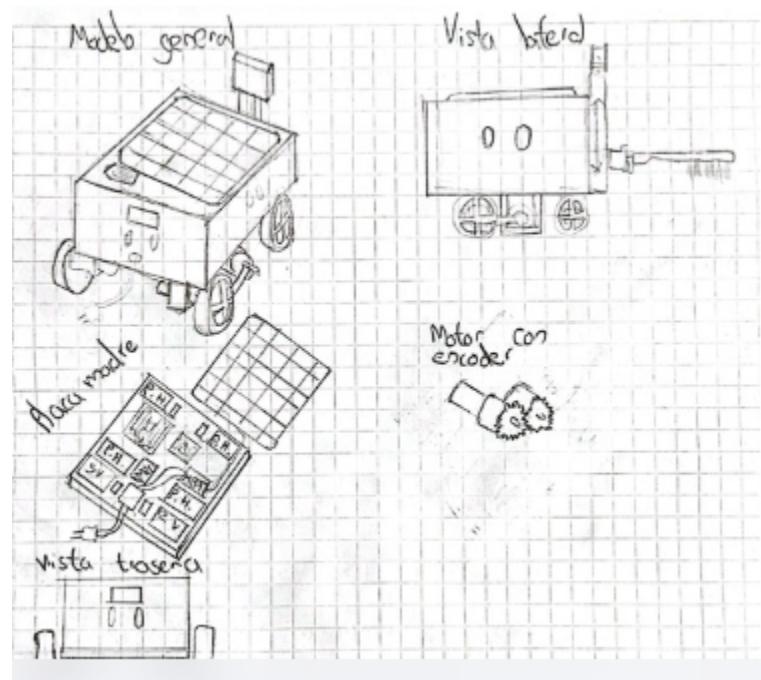


Figura 6. Boceto del prototipo 2. Imagen propia

4.7.3. Boceto del prototipo 3

A diferencia de los prototipos anteriores con ruedas, este robot usa orugas, lo que le proporciona mejor tracción y estabilidad en terrenos irregulares. Tiene una estructura robusta que permite distribuir el peso de manera uniforme. Este tiene una guadaña en la parte inferior, encargada de cortar la maleza entre los ladrillos. Cuenta con una cámara y sensores en la parte frontal, lo que le permite detectar obstáculos y mapear el entorno, incluye un sistema de seguridad, para evitar colisiones o accidentes durante su operación y también tiene GPS y una antena para usar navegación basada en coordenadas para cubrir un área específica. En la parte superior tiene un panel solar, lo que le permite recargar su batería mientras opera, aumentando su autonomía, también posee un espacio para baterías.

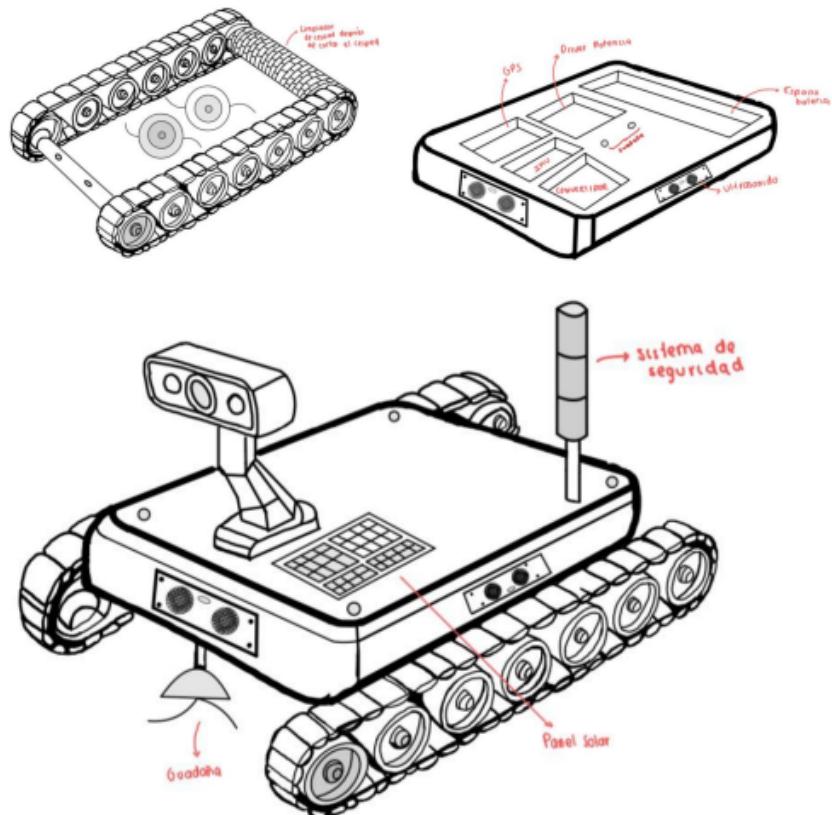


Figura 7. Boceto del prototipo 3. Imagen propia

4.7.4. Prototipo final

Teniendo los 3 prototipos y las respuestas de la matriz de calidad, se implementó la matriz de selección del prototipo final:

CARACTERISTICAS	PROTOTIPOS	Función de peso relativo	Prototipo 1			Prototipo 2			Prototipo 3		
			Prototipo 1	Prototipo 2	Prototipo 3	Prototipo 1	Prototipo 2	Prototipo 3	Prototipo 1	Prototipo 2	Prototipo 3
Potencia del Motor		14,5	9	9	5						
Precision de Sensores		15,58	7	6	6						
Capacidad de bateria		13,2	9	5	7						
Navegacion (GPS)		15,1	5	5	5						
Mecanismo de eliminacion		14	7	7	7						
Resistencia a los diferentes climas		13	3	3	3						
Facil mantenimiento		14	5	3	7						
Puntuación por RC			643,7835	546,47	572,7383	1763					
Peso relativo en porcentaje			36,5	30,997	32,5						
Orden de importancia			1	3	2						

Figura 8. Matriz para la selección del prototipo. Imagen propia

Con esto se diseña el prototipo final el cual consta de un sistema de movilidad de orugas con un diseño más estructurado y robusto porque esto permite mejor tracción en terrenos irregulares y estabilidad al operar, posteriormente la imagen superior izquierda muestra la estructura de las orugas, la imagen superior central muestra la carcasa superior con inclinaciones en los lados para evitar acumulación de residuos y mejorar la aerodinámica, tiene ranuras en la parte superior para acceso a mantenimiento y para la disipación de calor, luego para la imagen superior derecha muestra un motor con encoder que mueve las orugas, lo que permite mayor precisión en el control de velocidad

y posición, y posibilidad de implementar navegación autónoma con retroalimentación de movimiento. La imagen inferior izquierda muestra la vista superior con la batería que es la fuente de energía principal, el Stop (Parada de emergencia) que es para la seguridad del sistema, la electrónica, que es el controlador principal que gestiona sensores, motores y comunicación y la cámara para visión artificial o detección de obstáculos. Y en la imagen inferior derecha se observa un sistema de seguridad que tiene sensores para evitar colisiones, como ultrasónicos y LiDAR. y la ubicación de la cámara indica que el robot integra procesamiento de imágenes para mejorar su navegación. Este prototipo es la consecuencia de los mejores resultados de la matriz de calidad.

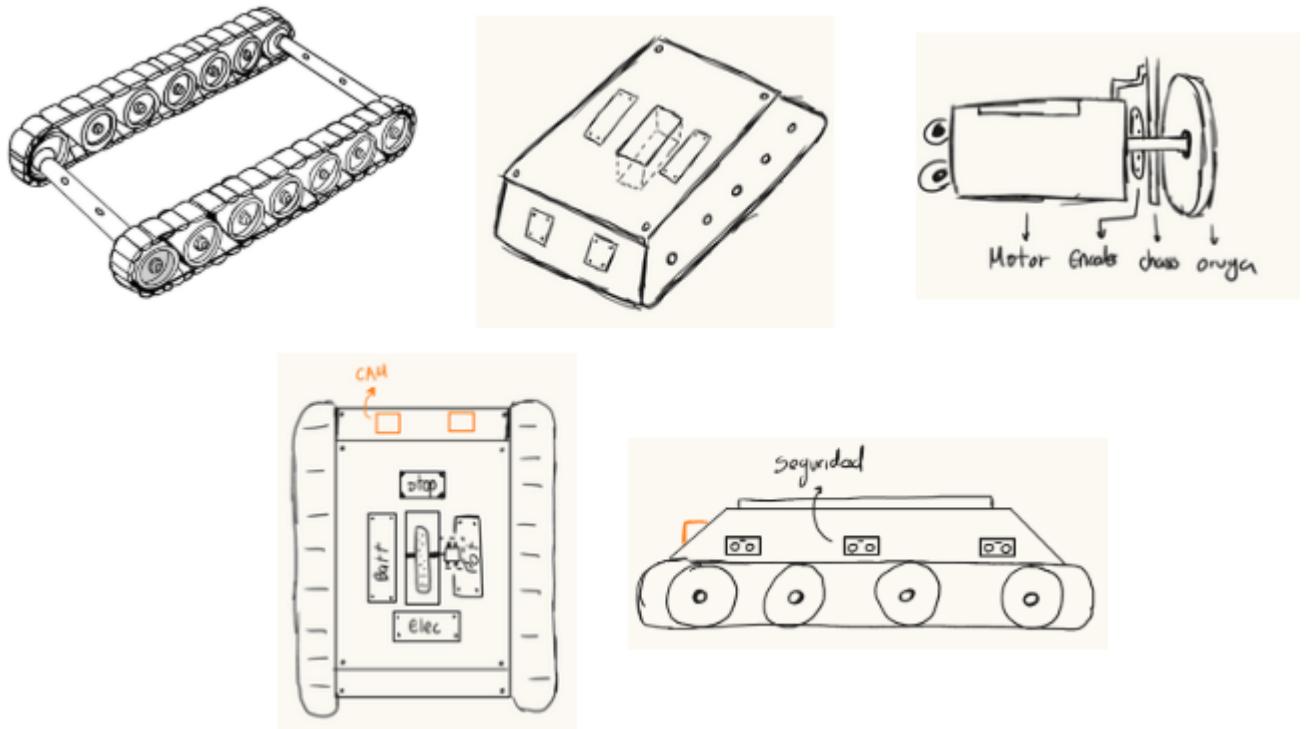


Figura 9. Boceto del prototipo final. Imagen propia

5. DISEÑO A DETALLE

5.1. Modelos

En ingeniería, un modelo es una representación simplificada de un sistema o realidad compleja que se utiliza para comprender, predecir y controlar el comportamiento del sistema.

5.1.1. Modelo cinemático

En este modelo se describe como se mueve el robot sin considerar las fuerzas involucradas. Es útil para planificar trayectorias y controlar su desplazamiento, porque define la relación entre las velocidades de las orugas y el movimiento del robot, a parte que permite saber cómo girar, avanzar en línea recta o moverse en curvas y se usa para diseñar algoritmos de navegación autónoma y evitar obstáculos. Para este modelo se utiliza la referencia de uno tipo diferencial como se evidencia en la figura 10 donde se encuentras las siguientes características:

- Plano de movimiento (X,Y)
- Eje del móvil (x,y).
- Ángulo de rotación sobre propio eje mu.
- Velocidad de rotación W.
- Velocidad de giro de llantas W_i , w_d .
- Longitud entre ruedas $2L$.
- Velocidad de avance V .

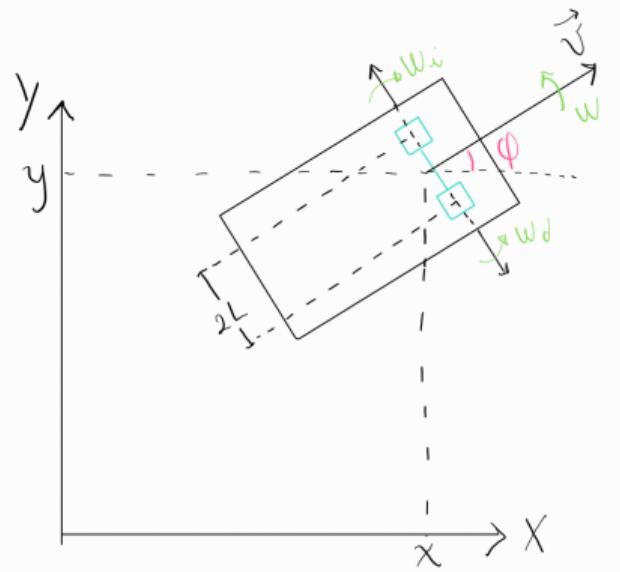


Figura 10. Planteamiento de modelo diferencial. Imagen propia

Como el radio de las llantas es r , entonces:

$$S = r\theta \quad (1)$$

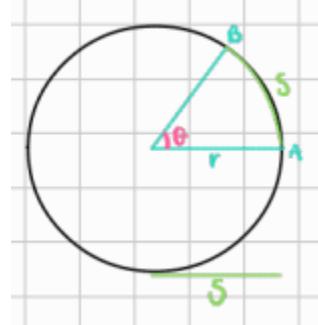


Figura 11. Diagrama de las llantas

Para las velocidades lineales de las llantas, tanto derecha como izquierda

$$V_d = r \cdot \omega_d \quad (2)$$

$$V_i = r \cdot \omega_i \quad (3)$$

Luego para la velocidad total instantánea de avance v:

$$V = \frac{V_d + V_i}{2} = \frac{r(\omega_d + \omega_i)}{2} \quad (4)$$

Para la posición en (x,y), se tiene:

• Posición (x,y)

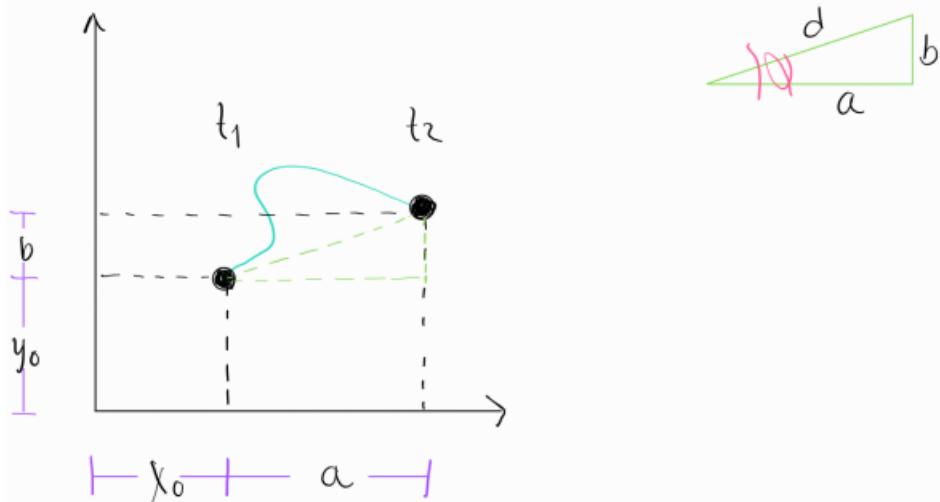


Figura 12. Posición en (x,y)

$$\alpha = d \cdot \cos(\theta) \quad (5)$$

$$\beta = d \cdot \sin(\theta) \quad (6)$$

$$V = \frac{d}{t} \rightarrow d = V \cdot t \quad (7)$$

$$V = \frac{V_d + V_i}{2} \rightarrow d = \frac{V_d \cdot V_i}{2} \cdot t \quad (8)$$

$$\alpha = \frac{V_d \cdot V_i}{2} \cdot t \cdot \cos(\theta) \quad (9)$$

$$\beta = \frac{V_d \cdot V_i}{2} \cdot t \cdot \sin(\theta) \quad (10)$$

Para la posición en x

$$x_0 + \alpha = x_0 + \frac{V_b + V_i}{2} + t + \cos(\theta)x_0 + \frac{r \cdot (\omega_b + \omega_i)}{2} \cdot t \cdot \cos(\theta) \quad (11)$$

Para la posición en y

$$y_0 + \beta = y_0 + \frac{V_b + V_i}{2} + t + \sin(\theta)y_0 + \frac{r \cdot (\omega_b + \omega_i)}{2} \cdot t \cdot \sin(\theta) \quad (12)$$

Luego se deriva con respecto al tiempo y se obtienen las ecuaciones de estado para x, y:

$$\dot{x} = \frac{r \cdot (\omega_b + \omega_i)}{2} \cdot \cos(\theta) \quad (13)$$

$$\dot{y} = \frac{r \cdot (\omega_b + \omega_i)}{2} \cdot \sin(\theta) \quad (14)$$

Para la orientacion φ se sabe que: Velocidad angular

$$\omega = \frac{V_r + V_i}{2L} = \frac{r(\omega_d + \omega_i)}{2L} \quad (15)$$

Posición angular

$$\varphi = \varphi_0 + \omega t = \varphi_0 + \frac{r(\omega_d + \omega_i)}{2L} t \quad (16)$$

Derivando:

$$\dot{\varphi} = \frac{r \cdot (\omega_d + \omega_i)}{2L} \quad (17)$$

[12]

Teniendo el modelo cinemático se realizó una simulación para simular el comportamiento del diferencial. A continuación se muestra la simulación desarrollada en Matlab.

- Cuando $W_d=4$ y $W_i=12$

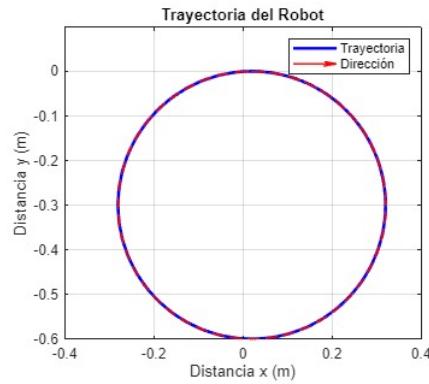


Figura 13. $W_d = 4$, $W_i = 12$. Imagen propia tomada de Matlab

- Cuando $W_d=12$ y $W_i=12$

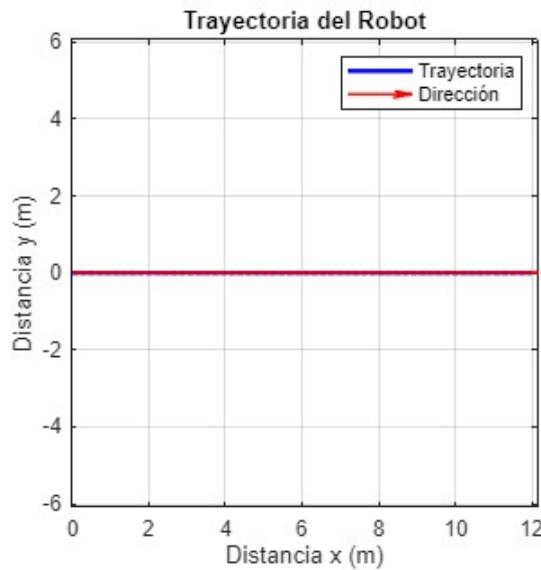


Figura 14. $W_d = 12$, $W_i = -4$. Imagen propia tomada de Matlab

- Cuando $W_d=12$ y $W_i=-4$

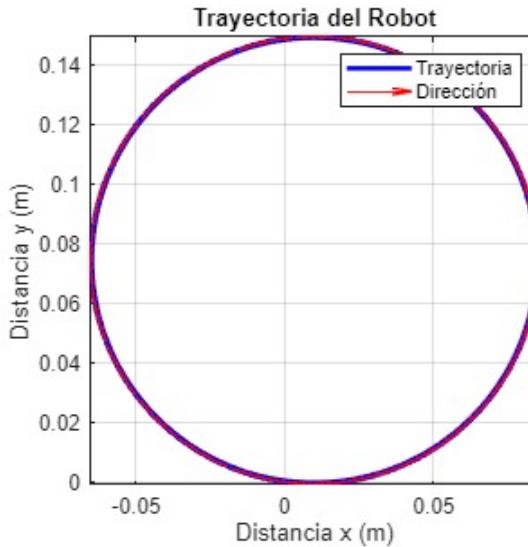


Figura 15. $W_d = 12$, $W_i = -4$. Imagen propia tomada de Matlab

5.1.2. Modelo dinámico

El modelo dinámico considera las fuerzas, fricción y torque necesario para mover el robot, esto determina la potencia que deben suministrar los motores para moverse y cortar la maleza, tambien se evalúa el efecto de la resistencia del terreno (por ejemplo, fricción con el suelo o resistencia de la hierba) y permite calcular el consumo energético para mejorar la eficiencia de la batería. Este modelo, nace desde las restricciones cinemáticas que tiene el robot móvil. La restricción cinemática esta descrita como:

$$\dot{x} \sin(\theta) - \dot{y} \cos(\theta) = 0 \quad (18)$$

Esta es una restricción no holonómica que restringe la posibilidad del robot de moverse de lado sin girar. En otras palabras, la única forma que tiene el robot de moverse es hacia la dirección a la que esta orientado. Con esto el modelo dinámico del prototipo es:

$$\begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 \\ \sin\theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sin\theta \\ -\cos\theta \\ 0 \end{bmatrix} \lambda \quad (19)$$

Donde m=masa, x=coordenada x global, y=coordenada y global, I=inercia eje z, Theta=inclinación entre marco local de robot y marco global. tau1=torque motor 1 y tau2=motor 2. El factor landa es un termino que completa las restricciones cinemáticas que debe tener el robot, pero en este caso en específico no existe ningún termino adicional para que el modelo cumpla con la restricción cinemática antes propuesta. Ahora, para tener en cuenta las fricciones inherentes al movimiento del móvil, se añade termino adicional:

$$D = \begin{bmatrix} d & 0 & 0 \\ 0 & d & 0 \\ 0 & 0 & d_r \end{bmatrix} \quad (20)$$

Esta matriz comprende los coeficientes de fricción en cada uno de los ejes y dimensiones del robot. De esta forma, el modelo completo es:

$$\begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d & 0 & 0 \\ 0 & d & 0 \\ 0 & 0 & d_r \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 \\ \sin\theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} \quad (21)$$

[13]

Teniendo el modelo dinámico se realizó una simulación para comprobar que el modelo si estaba bien y seguía los requerimientos que se pedían, a continuación se muestra

- La trayectoria del móvil en el plano local

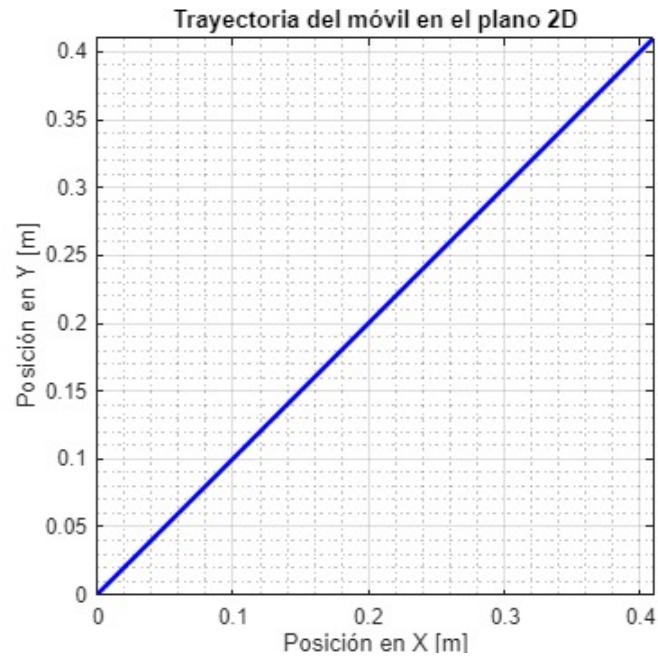


Figura 16. Posición del robot. Imagen propia tomada de Matlab

- El torque cuando no tiene pendiente y $ddy=0.05$ y $ddx=0.05$

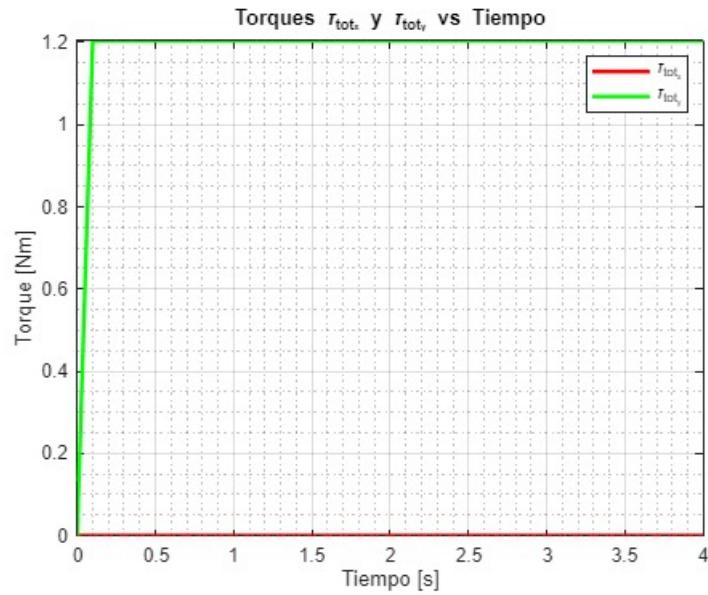


Figura 17. Torques sin pendiente. Imagen propia tomada de Matlab

- El torque cuando tiene una pendiente de 10° y $ddy=0.05$ y $ddx=0.05$

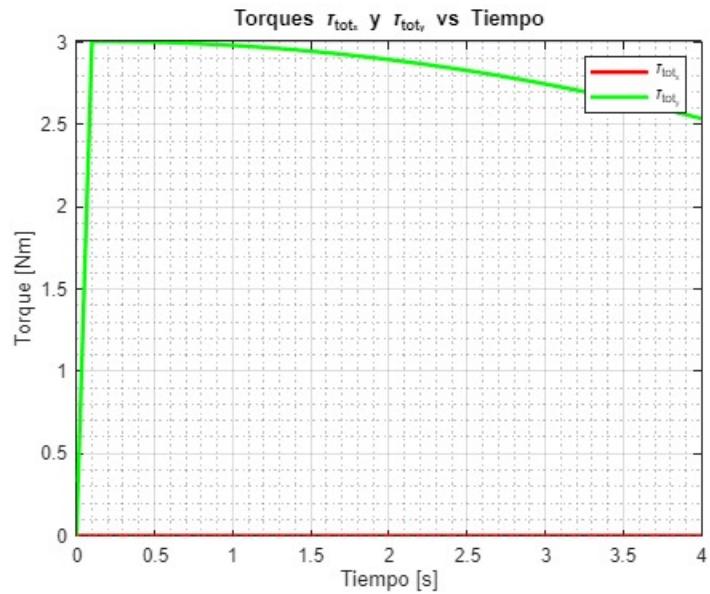


Figura 18. Torques con pendiente de 10° . Imagen propia tomada de Matlab

5.2. Mecánico

Teniendo el modelo teórico se diseña en SolidWorks con todos los componentes propuestos, obteniendo el siguiente resultado:

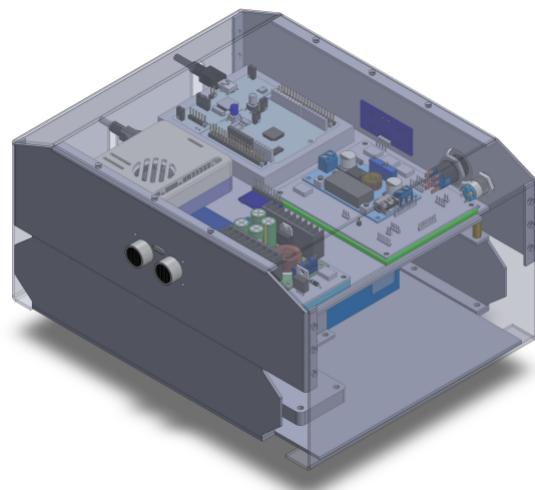


Figura 19. Montaje del chasis con los elementos incluidos. Imagen propia tomada de SolidWorks

Teniendo esta simulación con todos los componentes integrados, se realizó un análisis de fuerza que es el estudio por elementos finitos, para este análisis en la parte de abajo se tuvo en cuenta el peso de la batería y la herramienta de la eliminación del pasto no deseado, esto es una simulación de esfuerzos von Mises en una placa inferior, que es la base para una herramienta cortadora de maleza, hecha de aluminio 6061, a este se le aplico una carga distribuida de 22,17 N.

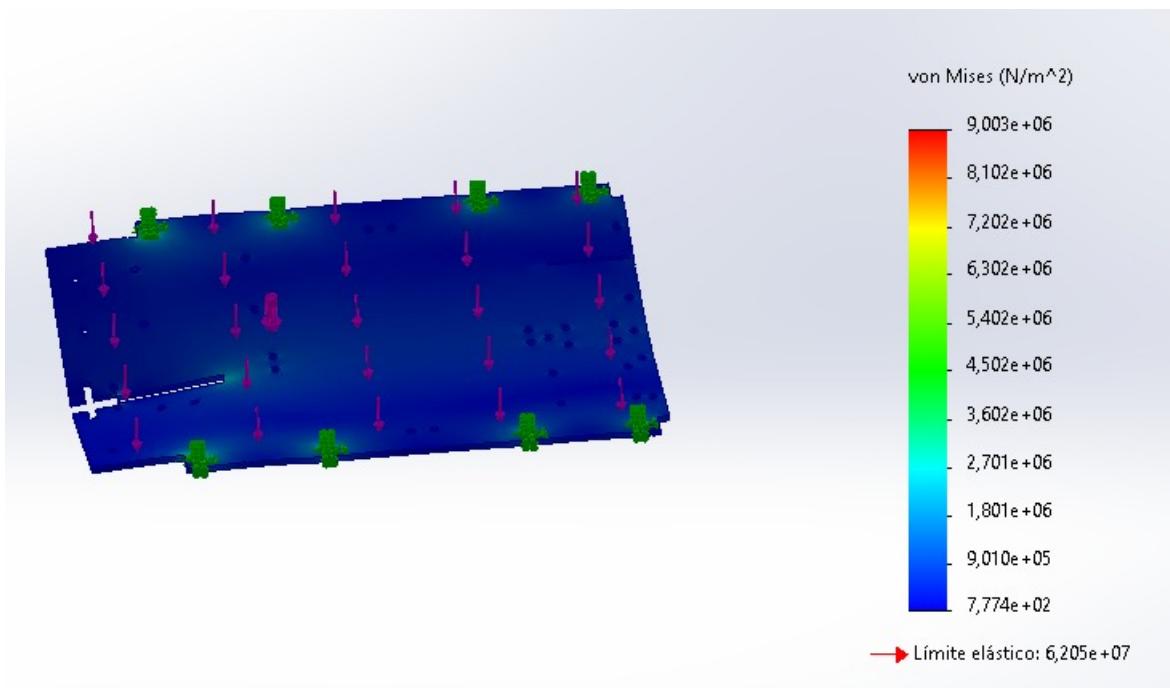


Figura 20. Simulación por elementos finitos. Imagen propia tomada de SolidWorks

Como el límite elástico es de 62.05 MPa significa que si algún punto supera ese valor, el material comenzaría a deformarse permanentemente, pero como los valores máximos de von Mises están en el orden de 9.00e+06 Pa (9 MPa), mucho menores que los 62.05 MPa → no hay riesgo de falla plástica. En la imagen los apoyos y fijaciones se muestran en verde y las flechas rosas indican las cargas hacia abajo que son la suma del peso del sistema más la carga distribuida.

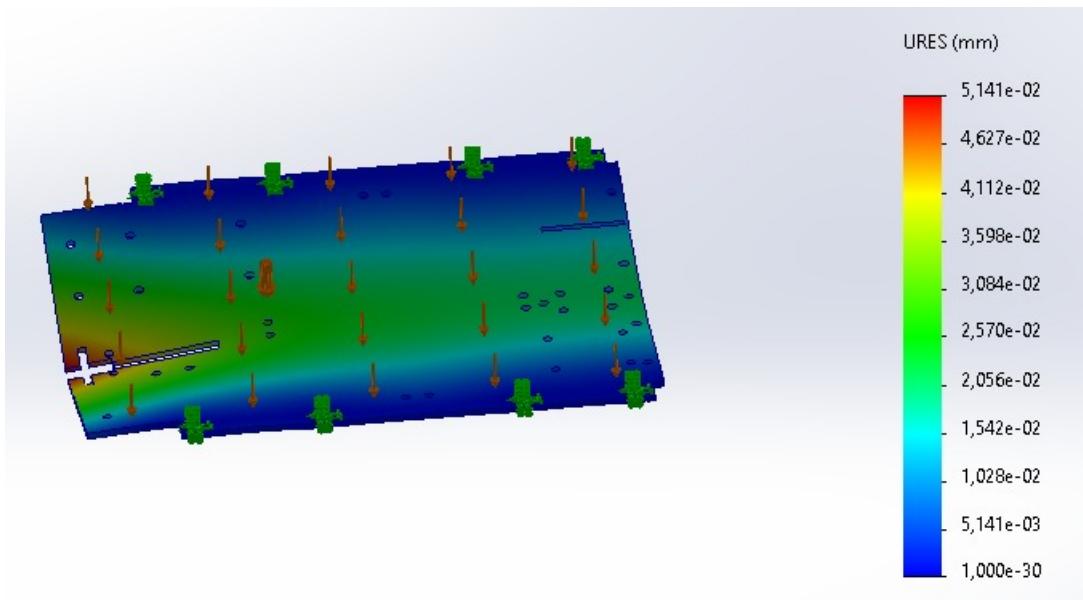


Figura 21. Simulación por elementos finitos URES, placa inferior. Imagen propia tomada de SolidWorks

Examinando el URES se observa que el desplazamiento máximo es de 0.051 mm, o sea 51.4 micrómetros, esto es extremadamente pequeño y aceptable, especialmente si no necesitas tolerancias críticas en esa zona, los mayores desplazamientos (zona roja/naranja) ocurren cerca del extremo izquierdo de la placa, lejos de los puntos de fijación. Esto tiene sentido porque ahí hay menos sujeción y mayor libertad para deformarse, las zonas azules (cerca de los puntos verdes de fijación) casi no se mueven.

Para el factor de seguridad de la placa inferior se tiene que la simulación arrojó una distribución de FDS en una escala de 6.9 color rojo que corresponde al valor mínimo y 33,750 color azul, que corresponde al valor máximo, lo cual deja que se pueda identificar visualmente las zonas con mayor o menor margen de seguridad estructural. Con esto se dice que la estructura se encuentra dentro del rango seguro, dado que el FDS mínimo registrado es de 6.9. Esto implica que, incluso en la región más crítica del modelo, la resistencia del material es 6.9 veces superior al esfuerzo inducido por la carga aplicada, superando ampliamente los factores de seguridad recomendados, teniendo la siguiente

simulación.

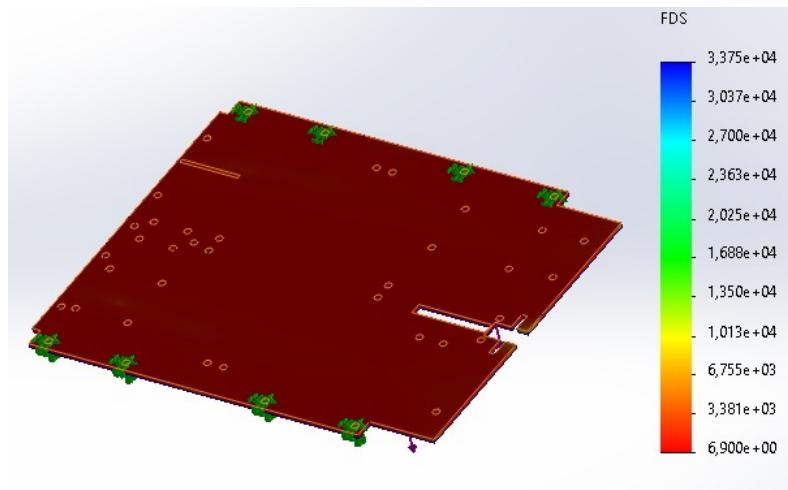


Figura 22. Factor de seguridad de la placa inferior. Imagen propia tomada de SolidWorks

Posteriormente se tiene la placa superior, esta tambien es aluminio 6061, tiene una carga distribuida aplicada de 2.46 N extendida sobre la superficie, tiene componentes considerados en el peso total que son la Raspberry Pi, la STM32, el Módulo GPS y 2 PCB con reguladores, para este se ha definido un nuevo límite elástico de $5.515e+07$ Pa (55.15 MPa).

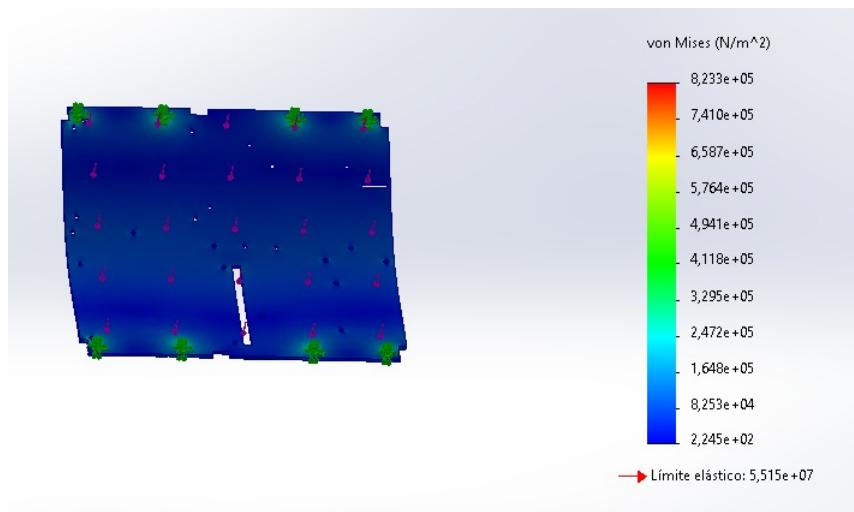


Figura 23. Simulación por elementos finitos de la placa superior. Imagen propia tomada de SolidWorks

Con esto se observa que el máximo esfuerzo von Mises es de 0.823 MPa, lo cual está muy por debajo del límite elástico (55.15 MPa), esto quiere decir que no hay riesgo de deformación plástica ni de falla, y el color predominante es azul lo que indica bajos esfuerzos en la mayoría de la placa, las flechas rosas muestran las cargas aplicadas hacia abajo, que representan el peso total de los componentes y los puntos verdes siguen representando restricciones o apoyos fijos.

Y realizando para este también el análisis de factor de seguridad, se observa que la escala de resultados obtenida en la simulación varía desde mínimo de 75.37 color rojo hasta un máximo de 276,300 color azul, evidenciando que incluso el punto más crítico de la estructura posee una resistencia de mas de 75 veces superior a la requerida por las cargas impuestas. Como se puede observar que la mayoría de la superficie se encuentra coloreada en tonos rojizos oscuros, lo que indica que la mayor parte del modelo se sitúa alrededor del valor mínimo del FOS. No obstante, este valor sigue siendo considerablemente alto desde un punto de vista de integridad estructural. Además, no se presentan zonas con valores de FOS inferiores a 1, lo cual garantiza que no existen regiones con riesgo de falla bajo las condiciones de carga analizadas. Aquí también el modelo cuenta con restricciones fijas aplicadas en los bordes, representadas en color verde, y cargas distribuidas señaladas mediante flechas moradas sobre la superficie superior de la pieza. También se aprecia una ranura central, la cual no genera concentraciones de esfuerzo que comprometan el comportamiento estructural del componente.

5.2.1. Herramienta

Para la herramienta se mantiene una estructura que estará anclada a la base del carro tal y como se ve en la siguiente imagen 24. El servomotor SG90 controlará el nivel de la herramienta con el fin de que ésta no tenga roce con el suelo cuando no es necesario.

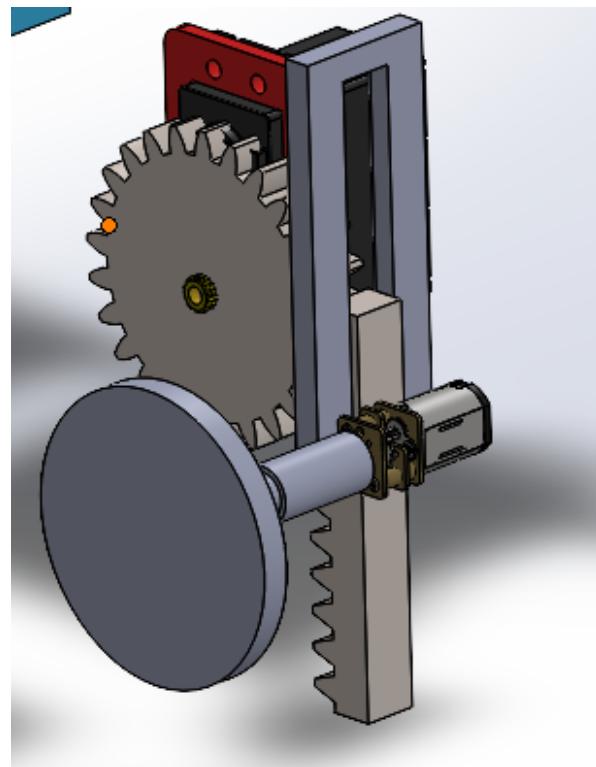


Figura 24. Herramienta. Imagen propia tomada de SolidWorks

La herramienta es un cepillo de cerdas metálicas tal y como se ve en la imagen 25.



Figura 25. Cepillo. Foto propia

5.3. Eléctrico

Realizando un diseño general de los componentes electrónicos y del cableado general que se necesita para el montaje físico, el cual tiene integrado una STM32f401 que se utilizan para leer los diversos sensores. Los sensores ultrasonido que son para la detección de los obstáculos y las personas, se encuentra también integrado, uno en cada uno de los lados relevantes del móvil, adelante y a los 2 lados. El GPS Rtk 1 De Nivel Centimétrico De Alta Precisión Quectel HEA, que se utiliza para saber la ubicación exacta en la que esta el robot, la MPU6050 que es para medir la orientación del carro con respecto a su posición inicial porque combina un acelerómetro y un giroscopio, se tiene también el puente H de 4 canales de Hiwonder para las conexiones con los dos motores de las ruedas. También se implementa una Raspberry PI 5, como unidad de procesamiento central de datos, dado que esta sirve para controlar los motores, leer la camara 3k HD de Raspberry para reconocer los objetos mediante una red neuronal para implementar una inteligencia artificial para el reconocimiento de musgo en las uniones de cada uno de los ladrillos de la plaza, seguir trayectorias deseadas y transmitir video en vivo, y este nos sirve para el procesamiento de imágenes, para complementar la interfaz de usuario. También se implementó el botón parada de emergencia, con el fin de, en emergencia, poder parar su actividad total en caso de que se presente una eventualidad. Además, como medida de seguridad eléctrica, se tienen dos reguladores de voltaje siendo uno que regulará la alimentación general del carrito a 12 V y otro que se encargará de alimentar toda la parte electrónica de 5 V. Por otro lado, para la parte de la herramienta se utilizará un servomotor SG90, con el cual se controlará el nivel de la herramienta mediante un piñón cremallera. Para el movimiento de la herramienta con el cual se quitará el musgo se accionará mediante un motor n20, que a su vez sera controlado por un circuito de accionamiento con transistor. Con esto se tiene el siguiente diagrama en Proteus, y se anexa el plano electrico en los anexos:

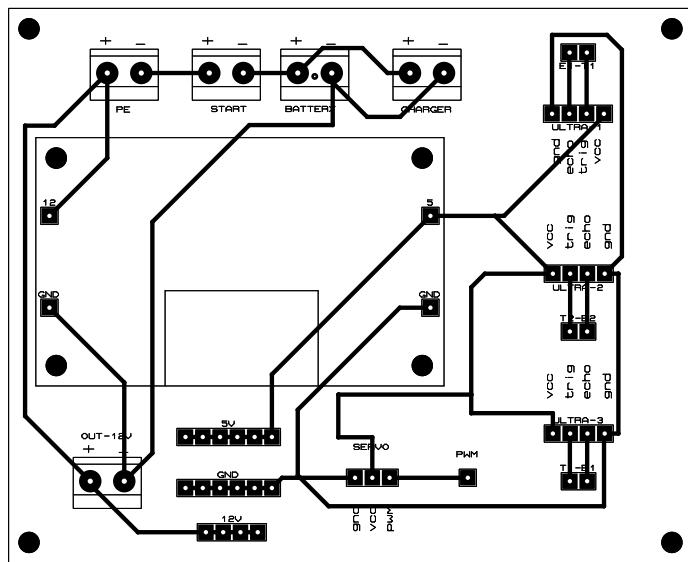


Figura 26. Esquema general de conexiones en proteus. Imagen propia tomada de Proteus

Posteriormente se tiene el diseño para la PCB que es el diseño como tal que se va a imprimir, el cual tiene los puertos de alimentación de 12 y 5 Voltios, tiene el espacio para el modulo regulador, que es el que se va a implementar cuando la PCB se imprima, y el transnsistor tip42, la resistencia y el diodo son un circuito para controlar el motor que acciona la herramienta

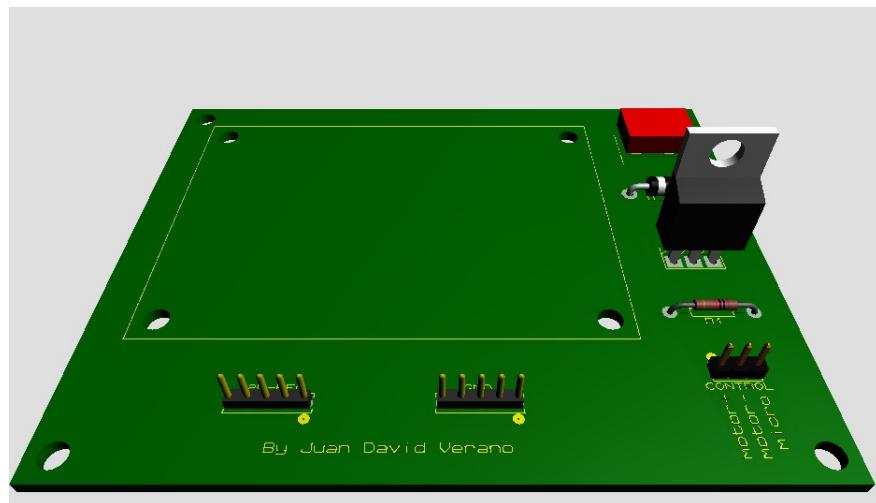


Figura 27. PCB que se va a implementar. Imagen propia tomada de Proteus

5.4. Control

El control de los motores para la dirección y orientación del carro se realiza mediante una Raspberry, dado que la conexión es mas estable, en esta se procesan las imágenes y con estas se implementa una red neuronal encargada de la identificación del musgo en la unión de los ladrillos para comandar las tareas a realizar cuando sea el momento para empezar a remover el musgo.

Para estimar con precisión la posición y orientación del carrito autónomo, se implementará un filtro de Kalman extendido (EKF), el cual permite fusionar datos provenientes de sensores como GPS, encoders y una IMU (giroscopio). El estado del sistema está definido por las variables principales: la posición (x,y) y la orientación theta, que se actualizan empleando un modelo cinemático no lineal. Este modelo describe el movimiento del carrito a partir de las velocidades lineales de las ruedas y la velocidad angular w, calculadas a partir de los encoders y el giroscopio, respectivamente. En cada iteración, el EKF realiza una predicción del estado utilizando estas velocidades y luego la corrige mediante las mediciones del GPS y la orientación derivada de la IMU. Este enfoque proporciona una estimación robusta del estado real del sistema, considerando tanto el comportamiento del modelo como el ruido de las mediciones. Los datos estimados serán almacenados en una base de datos en la nube, permitiendo su posterior análisis y visualización en tiempo real a través de una interfaz web.

Por otra parte, se tiene en cuenta los sistemas de seguridad implementados que serán dirigidos desde ultrasonidos SHc Sr04 en 3 partes distintas: adelante y ambos lados.

6. CONTRUCCIÓN Y PRUEBAS

Teniendo ya claros todos los componentes que se van a utilizar, se realizó el respectivo montaje de todos los elementos en la simulación en SolidWorks, como se muestra en la siguiente imagen.

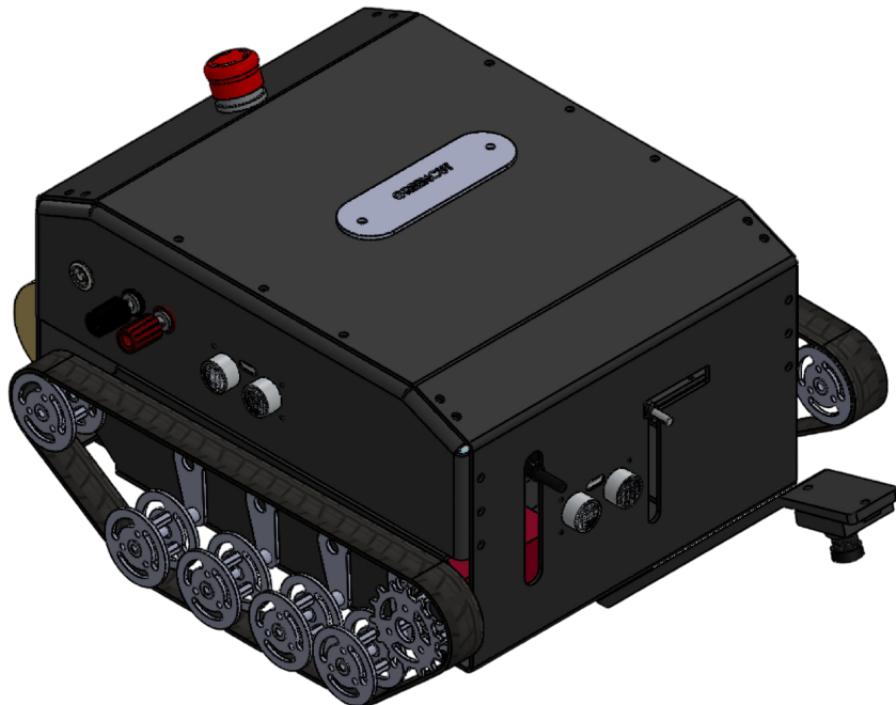


Figura 28. Montaje del chasis con los elementos incluidos. Imagen propia tomada de SolidWorks

Con los cálculos antes hechos en los modelos, tanto cinemático como dinámico, se obtuvo que el motor y la batería que se requieren para que el robot funcione son:

- Motorreductor de metal 12V 500RPM N20
 - Modelo: GA12-N20-20.
 - Voltaje nominal: 6 V.

- Rango de voltaje: 3 a 9 V.
- Velocidad de rotación: 500 rpm a 6 V.
- Par nominal: 0.15 kg.cm.
- Par de calado: 1 kg.cm.
- Corriente nominal: 0.23 A.
- Corriente de parada: 0.56 A.
- Longitud total: 34 mm.
- Material del engranaje: Metal.
- Peso neto: 10g.

[14]

■ BATERIA 12V -7AH

- Voltaje promedio: 12V
- Corriente: 16Ah
- Voltaje máximo: 13.6
- Voltaje mínimo: 10.8
- Vida de ciclo más larga: 400-600 ciclos a 100
- Tamaño: Largo: 15 cm, Ancho: 10 cm, Alto: 10 cm
- Peso: 4,45 Kg

[15]

Con estas consultas se procedió a realizar la respectiva lista de materiales:

	Elemento	Referencia
1	Bateria	BATERIA SELLADA 12v-18 AH FL12180GS
2	Chasis	Diseño de Solid
3	Cargador inteligente	
4	Cable	Cable 18 AWG
5	Modulo GPS RTK	Rtk 1 De Nivel Centimétrico
6	Antena GPS	Quectel-antena YB0017AA GNSS L1 L5
7	Adaptador	Adaptador RF SMA Hembra a uFL
8	Jumpers	
9	Convertidor DC-DC	XL4015 5A REDUCTOR CON VOLTIMETRO
10	Comunicacion radio frecuencia	nRF24L01+ 2.4 Ghz con Antena SMA LNA
11	Paro de emergencia	
12	MOTOR N20 500rpm	Motorreductor de metal 12V 500RPM N20
13	Convertidor de voltaje sesnores	
14	Convertidor de voltaje STM	LM2596 REDUCTOR SALIDA USB
15	Convertidor de voltaje motores	Conversor DC-DC Tipo Buck Ajustable 12A
16	Ultrasonido	SRF02
17	Motores	
18	STM	STM32F401
19	ESP 32	ESP32-Cam-MB con cámara Ov2640 ESP de 32 Mb
20	Cepillo	Cabezal De Corte De Césped
21	Camara	Cámara Nocturna Ov5647 1080p
22	Tornillos	
23	Lamina	Diseño propio
24	PCB	Diseño propio
25	Disipador	Disipador con Ventilador Activo
26	Memoria	SanDisk SDSQXA2-064G-GN6MA
27	Raberry	Raspberry Pi 5 4GB
28	IMU-9250	Giroscopio Acelerometro Mpu-9250 Gy-9250

Tabla 2. Tabla de componentes utilizados.

Para la implementación del proyecto se planteó una planificación de costos los cuales tienen un organización de la siguiente forma:

Para comprar los materiales inicialmente se tiene un presupuesto de:

Estudiante	Abono 1	Abono 2
Santiago Crespo	200.000	200.000
Juan Verano	200.000	200.000
Laura Pareja	200.000	200.000
May-ling Moreno	200.000	200.000
Jisel Rodriguez	200.000	200.000
TOTAL	1.000.000	1.000.000

Tabla 3. Tabla de abonos.

Ya con la simulación completada se procede a realizar el respectivo montaje físico, para esto se adquirió un sistema de Oruga, el cual es el siguiente:



Figura 29. Montaje del chasis con los motores. Imagen propia

Teniendo esto se procedió a mandar a cortar el chasis, el cual se realizó en Aluminio 6061 teniendo como resultado:



Figura 30. Tapa del robot físico. Imagen propia

Realizando los respectivos montajes por parte se tiene, en un principio el montaje del chasis, la batería y el sistema oruga:

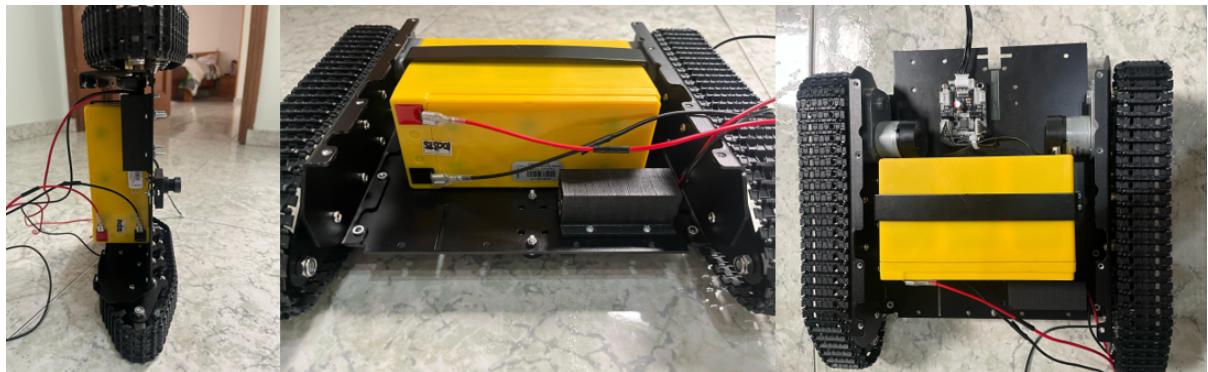


Figura 31. Montaje físico del robot en su interior. Imagen propia

Posteriormente se realizo en la otra parte del chasis, como este tiene dos pisos, el respectivo montaje de los controladores y las pcbs los reguladores y el GPS.

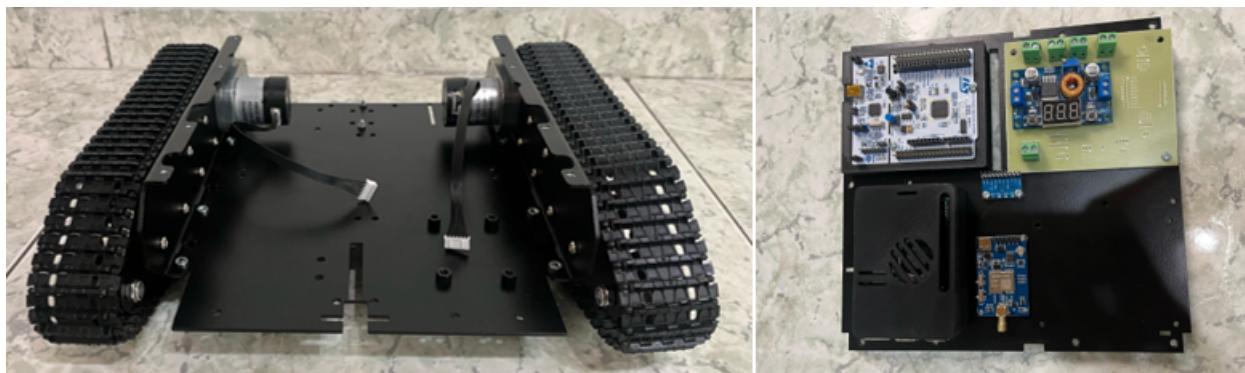


Figura 32. Montaje físico de los controladores y sensores adicionales. Imagen propia

Realizando el respectivo montaje del robot, y poniendo los elementos donde corresponde, se tiene el siguiente montaje físico:



Figura 33. Montaje físico del robot en su interior. Imagen propia

6.1. Control para motores e interfaz gráfica

Teniendo ya los componentes insertados en el chasis y el robot completo, se procede a realizar las pruebas para los motores que funcionan por medio de puente H. Para esto se implemento una interfaz gráfica, la cual esta servida en una dirección ip a la que se accede por la misma ip de la rpi, esta se muestra en la figura.

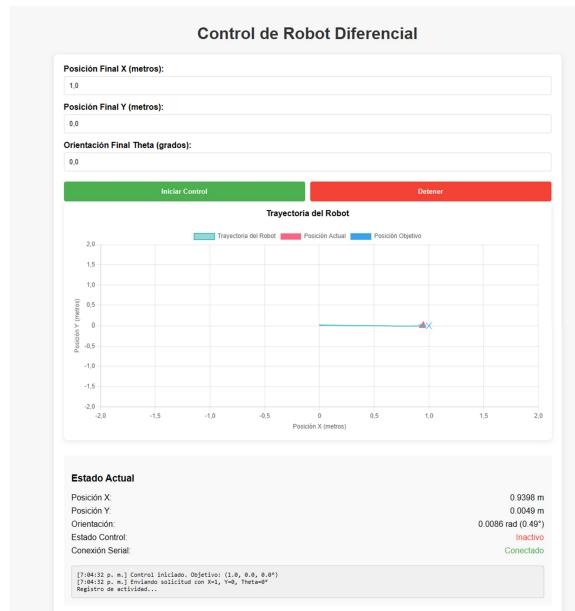


Figura 34. Interfaz gráfica para el control de los motores. Imagen propia

6.1.1. Datos de sensores

Posteriormente se probró el recibimiento de datos mediante la tarjeta con referencia STMF401 que se muestra en la figura 35, aqui ya se están leyendo todos los sensores que se van a utilizar para estimar la posición del carro, por medio de protocolo I2C. En esta tarjeta se están leyendo 2 sensores, los cuales son: una IMU MPU6050 (acelerómetro y giroscopio en 3 ejes) y un sensor GY273 (megnetometro de 2 ejes), con ellos se puede estimar y calcular la orientación global del carro que es lo que se muestra en la imagen. Tambien se estan leyendo 3 sensores ultrasonido que son los que aseguran la seguridad del robot y se esta haciendo la comunicación con el modulo controlador de los motores. De la mano con la lectura de los sensores ya se hicieron las primeras pruebas de la estimación de la posición con un filtro de Kalman extendido, que funciona con la linealización del modelo cinemático del robot.

```

Trama válida: [9.75, -0.1, 0.08, 0.03, 0.09, -0.05, -1.47, 1.39, 1.79, 0.0, 0.0]
Encoders: [0. 0.]
Roll: 1.33°, Pitch: -2.27°, Yaw: -1.29°
Cuaternion: [ 0.99967617 0.01134548 -0.01991081 -0.01106329]

Trama válida: [9.8, -0.03, 0.06, -0.11, -0.27, 0.12, -1.54, 1.46, 1.88, 0.0, 0.0]
Encoders: [0. 0.]
Roll: 1.28°, Pitch: -2.43°, Yaw: -1.26°
Cuaternion: [ 0.99965423 0.01096234 -0.02135115 -0.01074097]

Trama válida: [9.78, -0.01, 0.04, -0.08, 0.0, 0.11, -1.46, 1.41, 2.02, 0.0, 0.0]
Encoders: [0. 0.]
Roll: 1.26°, Pitch: -2.44°, Yaw: -1.22°
Cuaternion: [ 0.99965777 0.01075884 -0.02144173 -0.01043951]

Trama válida: [9.78, -0.08, 0.11, -0.06, -0.23, -0.17, -1.43, 1.43, 1.88, 0.0, 0.0]
Encoders: [0. 0.]
Roll: 1.25°, Pitch: -2.58°, Yaw: -1.35°
Cuaternion: [ 0.99961934 0.010866225 -0.02267045 -0.01155599]

Trama válida: [9.75, 0.02, 0.11, -0.09, -0.02, -0.18, -1.35, 1.49, 1.82, 0.0, 0.0]
Encoders: [0. 0.]
Roll: 1.23°, Pitch: -2.60°, Yaw: -1.49°
Cuaternion: [ 0.99960363 0.010842793 -0.02285196 -0.01271363]

Trama válida: [9.79, -0.01, -0.02, 0.06, -0.08, 0.17, -1.53, 1.41, 2.06, 0.0, 0.0]
Encoders: [0. 0.]
Roll: 1.28°, Pitch: -2.66°, Yaw: -1.42°
Cuaternion: [ 0.99959453 0.01090827 -0.0233507 -0.01210466]

Trama válida: [9.78, 0.04, 0.15, 0.02, 0.02, -0.08, -1.55, 1.36, 1.88, 0.0, 0.0]
Encoders: [0. 0.]
Roll: 1.32°, Pitch: -2.66°, Yaw: -1.49°
Cuaternion: [ 0.99958353 0.01121566 -0.02333155 -0.01275181]

```

Figura 35. Lectura de los sensores mediante el protocolo I2C. Imagen propia

6.1.2. Filtros de Madgwick

El filtro de Madgwick estima la orientación tridimensional de un cuerpo rígido usando datos del giroscopio $\omega = [\omega_x, \omega_y, \omega_z]^T$, del acelerómetro \mathbf{a} , y opcionalmente del magne-

tómetro \mathbf{m} . La orientación se representa mediante un cuaternión $\mathbf{q} = [q_0, q_1, q_2, q_3]^T$.

Primero, se predice la orientación integrando la velocidad angular:

$$\dot{\mathbf{q}} = \frac{1}{2} \mathbf{q} \otimes \boldsymbol{\omega}_q \quad (22)$$

donde $\boldsymbol{\omega}_q = [0, \omega_x, \omega_y, \omega_z]^T$ y \otimes es el producto de cuaterniones.

Luego, se corrige esta predicción usando un descenso por gradiente. Se minimiza el error entre la dirección esperada de la gravedad (calculada a partir de \mathbf{q}) y la medida por el acelerómetro:

$$\dot{\mathbf{q}}_{corr} = \dot{\mathbf{q}} - \beta \nabla f(\mathbf{q}) \quad (23)$$

donde $\nabla f(\mathbf{q})$ es el gradiente del error y β es un parámetro de ajuste.

La orientación se actualiza como:

$$\mathbf{q}_k + 1 = \mathbf{q}_k + \dot{\mathbf{q}}_{corr} \cdot \Delta t \quad (24)$$

y se normaliza para mantener unidad de norma.

Este enfoque combina la rapidez del giroscopio con la estabilidad a largo plazo del acelerómetro y magnetómetro, proporcionando una estimación precisa, estable y computacionalmente eficiente de la orientación.

En este en conclusión lo que hace el filtro de Madgwick es que es capaz de estimar la orientación global de un objeto ya que tiene en cuenta las medidas del acelerómetro, giroscopio y magnetómetro, este calcula los ángulos pitch, roll y yaw y se nota la acción del filtro al girar los sensores acoplados a una protoboard.

6.2. Ubicación: Modulos de orientación y GPS

Para la prueba del modulo GPS, se implemento el modulo LC29HEA de Quectel que esta funcionando con protocolo de eliminación de errores RTK, que se logra mediante la conexión a un servidor caster NTRIP. Se logró llegar al modo Float RTK, el cual tiene una medición de posicionamiento con un grado de error de 30 cm, lo cual mejora la tolerancia sin RTK que es de 1 a 2 metros.

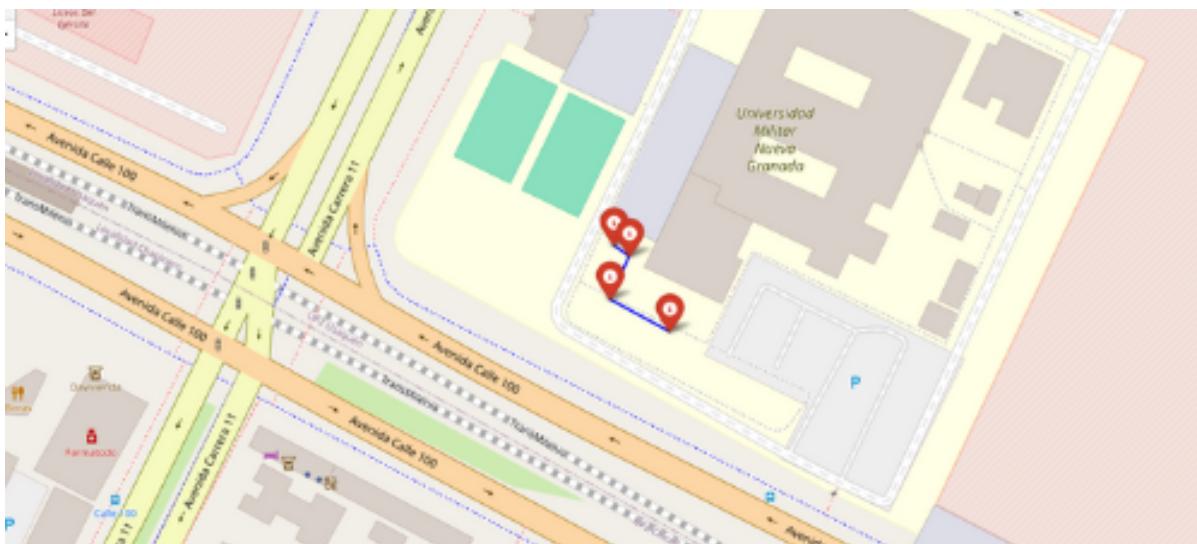


Figura 36. Medicion del modulo GPS LC29HEA. Imagen propia

6.3. Reconocimiento de imágenes mediante Inteligencia Artificial

Implementando la inteligencia artificial, se realizo una red convolucional (CNN) capaz de identificar los lugares en los que hay o no musgo entre los ladrillos de forma que se puede entender el entorno por el que se esta moviendo el carro para su respectivo direccionamiento en el momento de cortar el musgo, y se agrego tambien una segmentación por color el cual genera una mascara para saber especificamente por donde tiene que ir la herramienta. En especifico, en esta parte del funcionamiento general del ca-

rro, se piensa hacer un especie de seguidor de linea, direccionado con las divisiones de los ladrillos que tengan musgo, ya que la red es capaz de identificar y discriminar el musgo del ladrillo. Así se garantizará la remoción del musgo que crece en los ladrillos del piso de la Universidad Militar, mostrando el resultado del funcionamiento de la red convolucional.

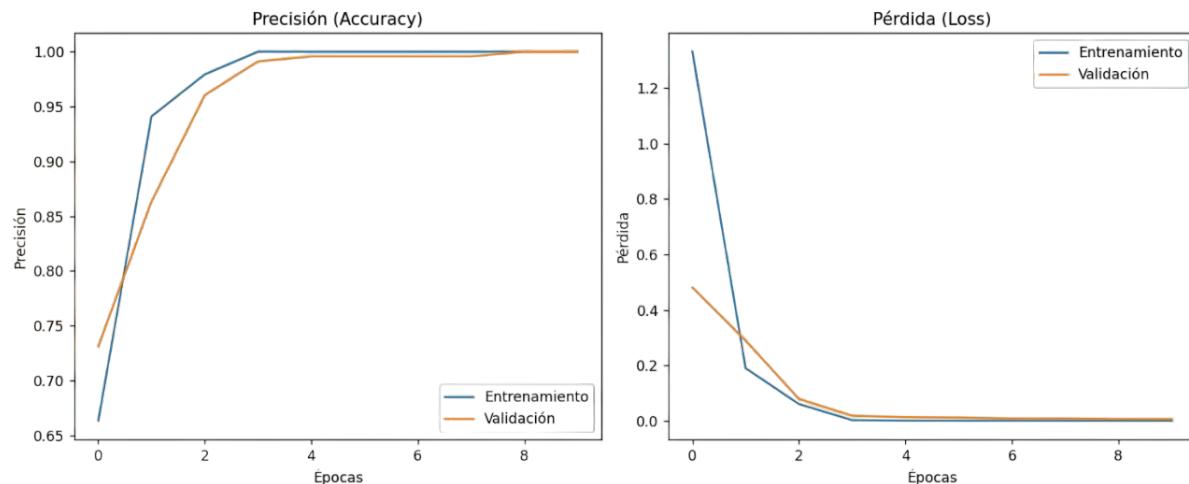


Figura 37. Comportamiento de la red convolucional. Imagen propia

Posteriormente se muestra la imagen real y como queda el reconocimiento mediante IA:



Figura 38. a) Imagen real del piso. b) Imagen entrenada por IA para el reconocimiento de musgo. Imagen propia

6.4. Control

Para el control final del carro se implementaron dos controles, uno de nivel bajo y otro de alto nivel.

- El control a bajo nivel son 2 controles de velocidad, una para cada oruga del carro. Consta de un control PI discreto con un tiempo de estabilización de 0.1 segundo para cada motor, este tiempo es con el fin de acatar lo mas rápido posible las señales de control que vienen dados por el control a alto nivel. Este control se ejecuta con un tiempo de muestreo de 2 ms. Este control se ejecuta en la stm teniendo encuentra el control en tiempo real de las variables que se están evaluando con ayuda de los modulos timer que permiten una lectura idonea del encoder.
- El control de alto nivel es un control cinemático que actúa sobre la tarea entera del robot en seguir una trayectoria determinada, esta funciona estimando las posiciones x y y y su respectiva orientación desde las velocidades medidas desde los encoders de los motores, su ley de control es:

$$u = \text{velocidades_deseadas} * k_1 + \text{error_posicion}k_2 \quad (25)$$

Donde u son las velocidades en x y y theta a las que se le calculan cinemática inversa y son las velocidades que son enviadas al robot para que se ejecute

Este es el control final del carro implementado en simulación:

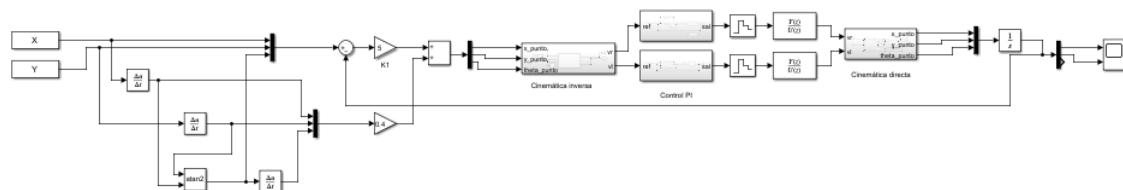


Figura 39. Control final del carro. Imagen propia

Explicando mejor el control, en la primera parte:

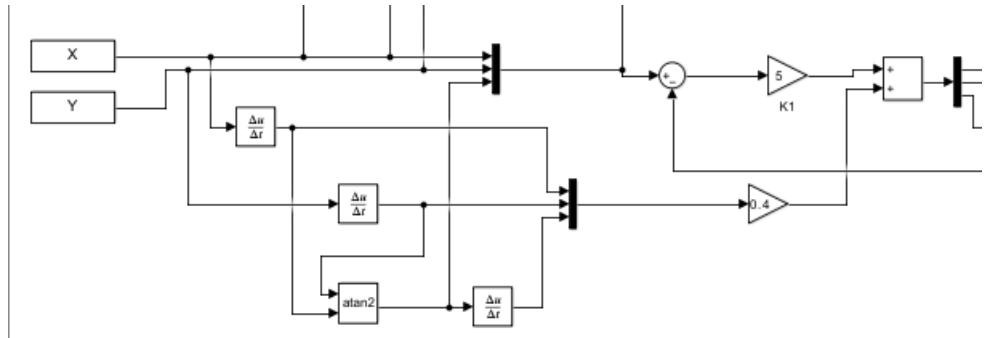


Figura 40. Orientación deseada y corrección del error. Imagen propia

Las entradas X y Y representan las coordenadas actuales del robot o las coordenadas deseadas, posteriormente con las derivadas se calculan la velocidad en X y en Y mediante la derivada de las posiciones, el bloque atan2 calcula el ángulo de orientación deseado (theta deseado) a partir del vector formado por las coordenadas X y Y lo cual indica hacia dónde debe girar el robot para estar orientado hacia su destino, luego se calcula el error de posición, y para el bloque de ganancia K1 y multiplicador, como el error de posición es amplificado por un controlador proporcional con ganancia K1, que en este caso es 5. Esto se multiplica para generar una velocidad o corrección proporcional al error y la ganancia 0.4 se usa para ajustar la magnitud de otro componente del error angular.

Para la otra parte del control final se tiene:

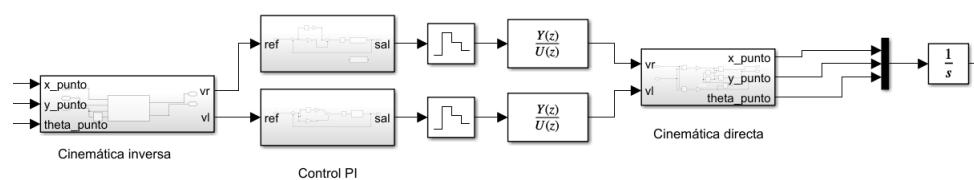


Figura 41. Control de velocidad de las ruedas. Imagen propia

Primero se tiene la cinemática inversa la cuales tiene como entradas Xp, Yp y Thetap

que son las velocidades deseadas en coordenadas globales y tiene como salidas, vr : velocidad de la rueda derecha y vl : velocidad de la rueda izquierda. Luego se tienen los controladores PI uno para la rueda derecha y otro para la rueda izquierda, su función es minimizar el error entre la velocidad de rueda deseada (de la cinemática inversa) y la real que es la salida del sistema, luego se tiene un saturador que limita las señales de salida dentro de un rango físico para que así las señales pasen por un modelo dinámico del actuador y la cinemática directa transforma estas velocidades de rueda en movimiento real del robot, esto se hace con el fin de actualizar la posición del robot y esta posición se retroalimenta al sistema para seguir corrigiendo el error.

Dando la respuesta deseada, a continuación se muestra la entrada y la salida del control final:

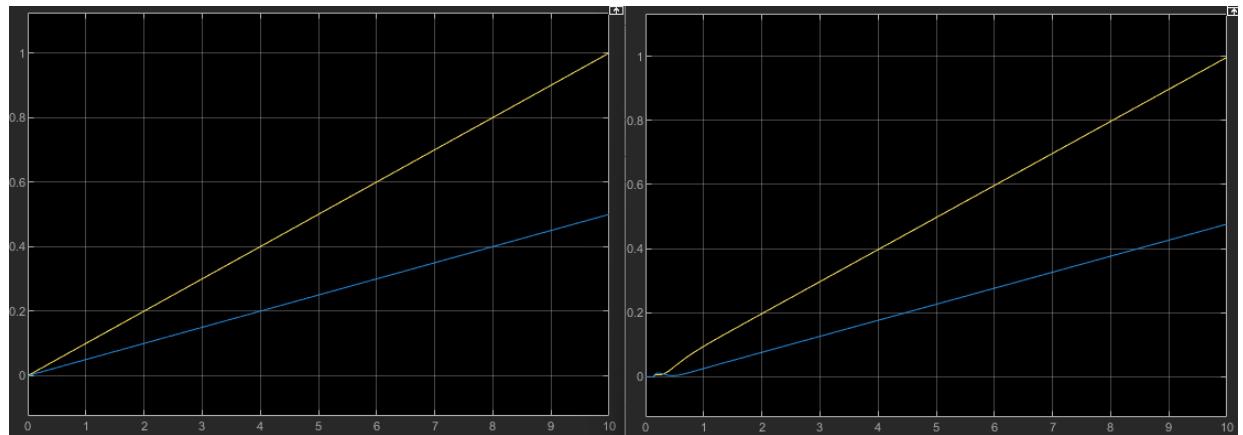


Figura 42. Entrada y salida del control en simulación. Imagen propia

Mostrando la señal de error:

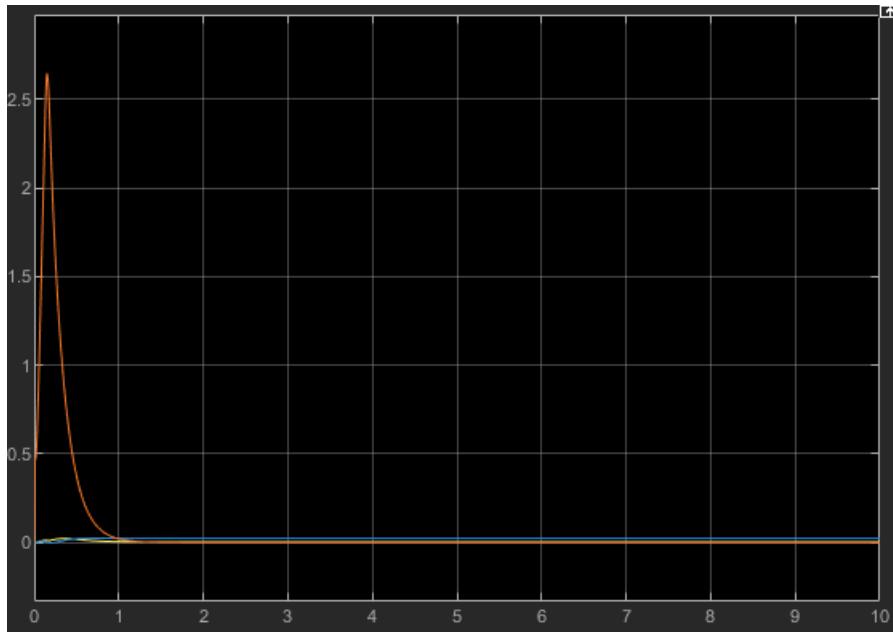


Figura 43. Entrada y salida del control en simulación. Imagen propia

6.5. Trayectoria

La trayectoria mostrada corresponde al recorrido planeado para un carro autónomo desarrollado con el fin de desplazarse de forma inteligente desde un punto inicial hasta un destino final, atravesando varias ubicaciones intermedias previamente definidas. Esta ruta está basada en coordenadas GPS reales y ha sido diseñada teniendo en cuenta las condiciones del entorno donde se llevará a cabo la prueba. El objetivo es que el vehículo pueda navegar de manera autónoma, reconociendo su posición, planificando su trayectoria y corrigiendo su rumbo en tiempo real sin intervención humana directa.

Para lograr una navegación precisa, se hará uso de un módulo GPS que proporcionará la localización global del carrito durante todo su trayecto. Además, se implementará un Filtro de Kalman Extendido (EKF), el cual permitirá fusionar los datos provenientes de múltiples sensores —incluyendo GPS, encoders, IMU, entre otros— para estimar con mayor exactitud la posición y orientación del vehículo. Esta estimación precisa es

fundamental para que el carro pueda tomar decisiones de navegación eficientes, evitando desviaciones significativas y garantizando un desplazamiento seguro hasta su destino final. La trayectoria a realizar se puede ver en la figura ??.



Figura 44. Evidencia del robot en diferentes partes. Imagen propia

7. ANÁLISIS Y RESULTADOS

Las encuestas realizadas a las personas con conocimiento arrojaron que la mayoría prefieren métodos mecánicos antes que el uso de agentes químicos ya sea vinagre blanco o que madores a gas, valorando además la autonomía, eficiencia y el bajo impacto ambiental de la solución propuesta por el grupo, en cuanto a la energía, se validó el uso de baterías de ion-litio como una fuente de energía adecuada por su equilibrio entre rendimiento y sostenibilidad.

Durante la fase de pruebas, el robot móvil se puso en práctica en escenarios reales dentro del campus de la Universidad Militar Nueva Granada, específicamente en la ruta entre la carpa y al frente de las canchas. Para la navegación, se implementaron sensores como GPS, IMU, encoders y un sistema de visión artificial la cual se implementó con un Filtro de madgwick y este filtro permitió una fusión efectiva de los datos sensoriales, proporcionando una estimación más precisa de la posición y orientación del robot móvil.

Los resultados obtenidos evidencian un correcto funcionamiento del sistema de detección basado en visión artificial dado que el robot fue capaz de identificar con precisión la presencia de vegetación o musgo que crece en las juntas de los ladrillos

Con la implementación de esto se observó que para una escalabilidad del proyecto estos fueron los los gastos obtenidos para este:

MATERIAL	COSTO
Componentes	2.297.727
Mano de obra (3h*5d*16sem*5est)	17.217.600
TOTAL	19.515.327

Tabla 4. Tabla de abonos.

Con estos gastos se observa que el proyecto para una empresa grande, encargada de varios proyectos tecnológicos justificaría la inversión, dado que este proyecto en específico

se podría vender a diferentes empresas que tengan espacios abiertos en sus instalaciones y así le optimiza el trabajo a las personas del aseo y se abstienen de ponerles esas tareas tediosas, monótonas y que pueden afectar sus salud física.

Con esto se observó que con los análisis y estudios que se le realizaron a la simulación la deformación no es mayor a 1 mm y eso quiere decir que las estructuras son resistentes, por ende el proyecto no tuvo ninguna complicación a la hora de implementarse en la realidad, también con las simulaciones tanto del modelo cinemático como dinámico se observó que el modelo planteado inicialmente fue correcto dado que en las simulaciones se obtuvo el comportamiento deseado, por otro lado con el filtro de Madgwick se observó que este fue capaz de estimar la orientación global de un objeto ya que tiene en cuenta los sensores como los son el acelerómetro, el giroscopio y magnetómetro, y con esto se calculan los ángulos que son pitch, roll y yaw, por consiguiente se mostró un correcto funcionamiento de los controles implementados que para el control de los motores, el control de bajo nivel, que era en PI se comportó de manera adecuada a pesar de que como primero se realizaron las pruebas en entornos distintos, como lo fue adentro de los bloques, ya que esto afectaba el coeficiente de fricción porque es más bajo a comparación del pavimento normal al que se tenía que someter el robot, con esto también se tuvo que probar diferentes tiempos de muestreo para que el control se adaptara adecuadamente a las condiciones de terreno.

8. CONCLUSIONES

- El robot móvil autónomo desarrollado demostró una integración efectiva de sensores, algoritmos de control e inteligencia artificial. Gracias al uso combinado de GPS, IMU, encoders y visión artificial con el filtro de Madgwick, se logró una estimación precisa de posición y orientación, validando el funcionamiento del sistema en entornos reales.
- Se comprobó que el robot tiene un bajo impacto ambiental, al utilizar energía eléctrica, evitar el uso de químicos y ejecutar acciones precisas que no comprometen la integridad del pavimento y como en las encuestas realizadas evidenciaron que el público objetivo valora las soluciones mecánicas sobre las químicas, se dice que el impacto positivo del proyecto al evitar el uso de vinagre blanco o quemadores de gas, y optar por una solución automatizada, limpia y segura.
- El diseño final permite la escalabilidad del proyecto, no solo en cuanto a su implementación en otras zonas del campus, sino también en contextos externos relacionados con la jardinería o el mantenimiento urbano automatizado.
- En cuanto a la seguridad, el proyecto tiene en cuenta las medidas importantes como el paro de emergencia, sensores de proximidad y redundancia en el sistema de control para prevenir riesgos a los estudiantes, administrativos, trabajadores o personas que puedan estar al rededor del robot.
- Gracias a su diseño modular y validación estructural (con deformaciones menores a 1 mm según simulaciones FEA), el sistema es escalable. Puede implementarse en otras zonas del campus o adaptarse a contextos externos como parques, conjuntos residenciales, universidades o empresas con amplios espacios peatonales, sin embargo algo por mejorar es la adaptabilidad a los climas.

- Se desarrollaron y ajustaron diferentes estrategias de control, incluyendo un control PI de bajo nivel, para adaptarse a distintos tipos de terreno y coeficientes de fricción, garantizando un comportamiento robusto del sistema incluso en condiciones no ideales.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Olmedo, S. (2012). MANUAL DE CINEMÁTICA Y DINÁMICA [Universidad Politécnica Salesiana]. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/5642/1/Manual20de20cinematica20y20dinamica.pdf>
- [2] Tractor de orugas: guía completa y su importancia. (2022, diciembre 29). Blog de maquinaria pesada | IPESA. <https://www.ipesa.com.pe/blog/tractor-de-orugas-guia-completa-y-su-importancia/>
- [3] West Instruments. (s/f). MANUAL DE APLICACIÓN DE ENCODERS. Udg.mx. Recuperado el 11 de abril de 2025, de <https://www.lagos.udg.mx/sites/default/files/adjuntos/encoders.pdf>
- [4] IMU: unidades precisas de medición inercial. (s/f). SBG Systems. Recuperado el 11 de abril de 2025, de <https://www.sbg-systems.com/es imu/>
- [5] Bonilla, M. N. I. (2009). Navegación autónoma de un robot con técnicas de localización y ruteo [Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica]. <https://inaoe.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1009/394/1/IbarraBMN.pdf>
- [6] Modelado de sistemas mecanicos. (2004). Sciencedirect.com. <https://www.sciencedirect.com/topics/mathematics/holonomic-constraint>
- [7] González, Á. R. (s/f). APLICACIÓN MÓVIL PARA LA GESTIÓN DE ROBOTS CORTACÉSPED. Uniovi.es. Recuperado el 4 de abril de 2025, de <https://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/handle/10651/74026/TFGAlvaroRodriguezGonzalez.pdf?sequence=5&isAllowed=y>

- [8] MapeadoynavegacionaplicadoaunrobotcortacespedCanoGarciaPablo.pdf. (s/f). Google Docs. Recuperado el 11 de abril de 2025, de <https://drive.google.com/file/d/1V47ePj7YWPHvEA9cTVvciaq35mC2i-/view?pli=1>
- [9] Gómez, C., y Paola, J. (2011). Desarrollo de un sistema de control en la aplicación de técnicas selectivas de eliminación de maleza.
- [10] Alcolea, A. (2023, abril 20). Pensaba que los robots ya no podían sorprenderme. Hasta que probé un robot cortacésped. Xataka.com; Xataka. <https://www.xataka.com/analisis/segway-navimow-h1500e-analisis-caracteristicas-precio-especificaciones>
- [11] EcoFlow BLADE. (s/f). EcoFlow. Recuperado el 26 de marzo de 2025, de <https://www.ecoflow.com/es/blade-robotic-lawn-mower>
- [12] González, D. I. J. (s/f). MODELADO, SIMULACIÓN, CONTROL E IMPLEMENTACIÓN DE ROBOTS MÓVILES TIPO VELOCISTAS. Edu.co. Recuperado el 4 de abril de 2025, de <https://fiet.unicauca.edu.co/deic/sites/default/files/deic/programa/Velocistas.pdf>
- [13] Siciliano, B., Sciavicco, L., Villani, L., y Oriolo, G. (2010). Robotics: Modelling, Planning and Control. Springer.
- [14] Motorreductor de metal 12V 500RPM N20. (s/f). Electronilab. Recuperado el 11 de abril de 2025, de <https://electronilab.co/tienda/motorreductor-de-metal-12v-500rpm-n20/>
- [15] Batería Neata 12v 7ah - Ups Y Otros- 12 Voltios 7 Amperios. (s/f). Com.co. Recuperado el 11 de abril de 2025, de <https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO->

1276186981-bateria-neata-12v-7ah-ups-y-otros-12-voltios-7-amperios-

JM?variation=

- [16] Sarmiento, S. R. (2024, octubre 26). ¿Automatización de procesos le pegará al trabajo en Colombia? Valora Analitik. <https://www.valoraanalitik.com/trabajo-en-colombia-golpe-por-automatizacion/>
- [17] Kevin Estiven Giraldo Paniagua Santiago Jiménez Salazar. (2020). Sistema de navegación autónomo guiado mediante generación de trayectorias para un robot móvil en entorno controlado. Edu.co. <https://repository.eia.edu.co/server/api/core/bitstreams/ce8ac042-41cf-4d0f-a8e8-217579de8ed1/content>
- [18] Hernández, C. A., Chavez, J. J. C., y Nieto, E. (2015). Implementación de sistema de navegación autónomo en robot móvil experimental para reconstrucción y exploración de entornos desconocidos. Memorias. <https://revistabme.eia.edu.co/index.php/mem/article/view/817>
- [19] Adán, C. M. (2024, julio 16). Becas de Investigación: Qué son y cuál es su importancia académica y social. Fundación MAPFRE. <https://www.fundacionmapfre.org/blog/becas-investigacion-que-son-importancia-academica-social>
- [20] Robot cortacésped SILENO minimo, 250 m2. (s/f). Gardena.com. Recuperado el 4 de abril de 2025, de <https://www.gardena.com/es/productos/cuidado-del-cesped/robots-cortacesped/robot-cortacesped-sileno-minimo-250-m/970462812.html>
- [21] Siciliano, B., Sciavicco, L., Villani, L., y Oriolo, G. (2008). Robotics: Modelling, planning and control (1a ed.). Springer.

[22] González, Á. R. (s/f). APLICACIÓN MÓVIL PARA LA GESTIÓN DE ROBOTS CORTACÉSPED. Uniovi.es. Recuperado de <https://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/handle/10651/74026/TFGAI>

9. ANEXOS

9.1. Resultados de encuestas

¿Cuál de los siguientes métodos para la eliminación del césped considera usted que es el más adecuado?

11 respuestas

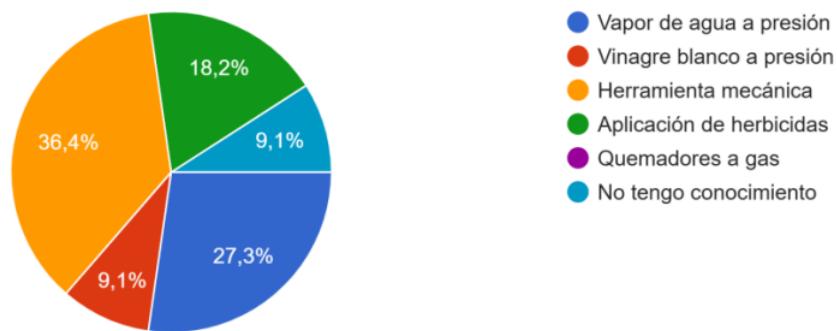


Figura 45. Pregunta 1.

¿Qué factores considera más importantes al elegir un método para eliminar la maleza en espacios públicos? Asigne una calificación del 1 al 4 a cada factor, asegurándose de no repetir ninguna calificación.

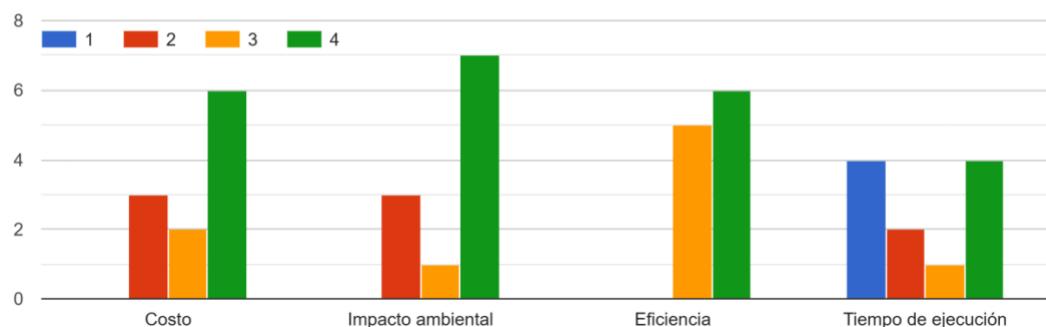


Figura 46. Pregunta 2.

¿Cuál cree que sería el método más adecuado para monitorear la posición del móvil, considerando las características del camino (este móvil se desplaza rampas de cemento y ladrillo) que debe recorrer?
11 respuestas

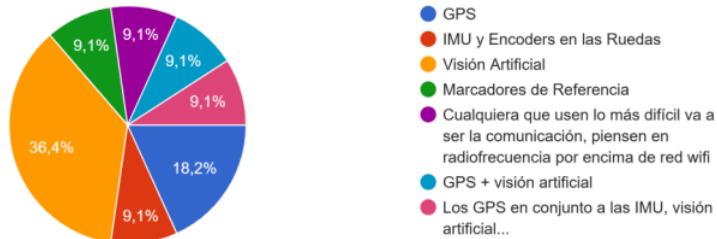


Figura 47. Pregunta 3.

¿Cree usted que el desarrollo de un móvil que elimina las plantas que se ubican en las juntas de los ladrillos del suelo de forma autónoma es necesario ...sidad Militar en el espacio de la plaza Cervantes?
11 respuestas

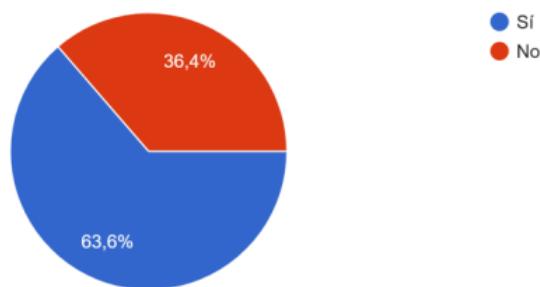


Figura 48. Pregunta 4.

¿Cuál considera usted que es el nivel de impacto ambiental que puede provocar la implementación del proyecto?
11 respuestas

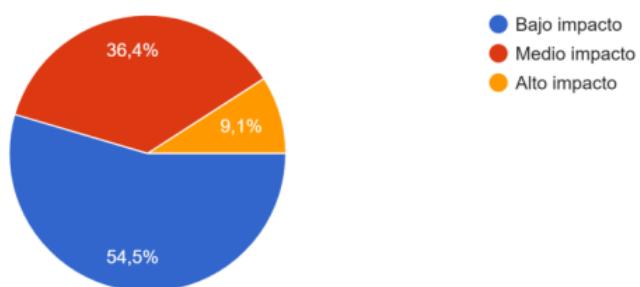


Figura 49. Pregunta 5.

¿Cuáles considera que son los principales factores a evaluar para garantizar la durabilidad del carro móvil autónomo? Asigne una calificación del 1 al 5 a cada fact... mayor, asegurándose de no repetir ninguna calificación.

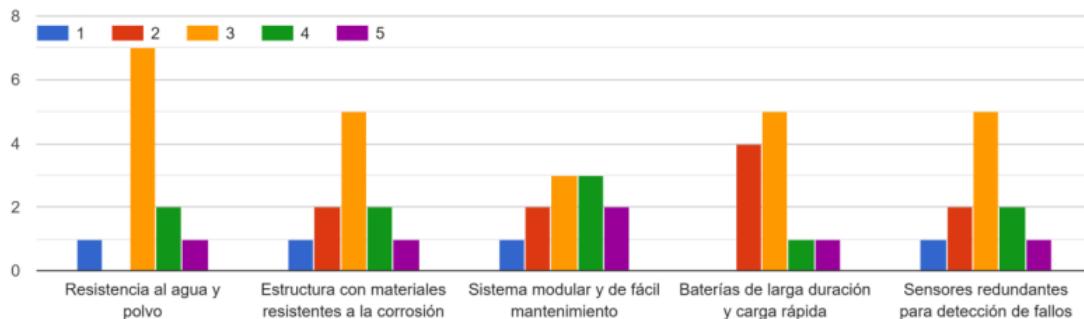


Figura 50. Pregunta 6.

¿Qué fuente de poder considera más adecuado para el funcionamiento del carro autónomo?
11 respuestas

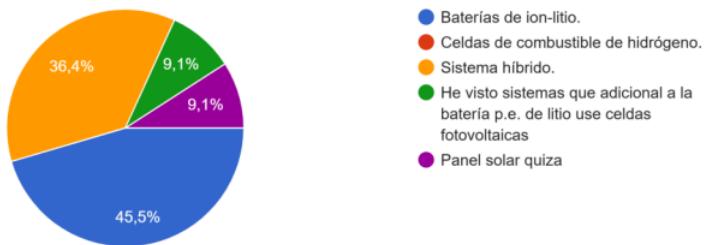


Figura 51. Pregunta 7.

¿Qué factores deben considerarse para minimizar el impacto ambiental del carro autónomo? Asigne una calificación del 1 al 4 a ca..., asegurándose de no repetir ninguna calificación.

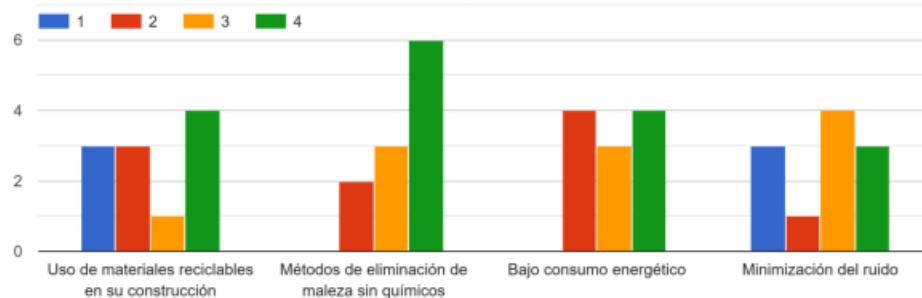


Figura 52. Pregunta 8.

¿Cuáles serían sus principales preocupaciones o dudas sobre el uso de un móvil autónomo para esta tarea?

11 respuestas

El costo y la capacitación necesaria para el uso del dispositivo

El Mapeo del sitio, es una tarea que toma mucho tiempo

La seguridad

Costo

Temas de seguridad de las personas que estén cerca del móvil

Que pueda equivocarse en el sitio de aplicación ó dañar personas, animales o cosas a su paso

¿El móvil será capaz de trabajar en diversas condiciones meteorológicas, como lluvia o césped mojado?

¿Qué tan seguro es que el móvil autónomo opere cerca de personas o sobre todo animales?

Cómo diferenciara el robot entre distintos tipos de maleza?

La cantidad de área a limpiar por unidad de carga (cuánto es capaz de limpiar con una sola batería por ejemplo)

El clima y la cantidad de personas al ser espacio público

Autonomía eléctrica y seguridad de los peatones

Figura 53. Pregunta 9.

¿Considera usted que es posible escalar el proyecto a áreas como la agronomía, la jardinería u otras?

11 respuestas

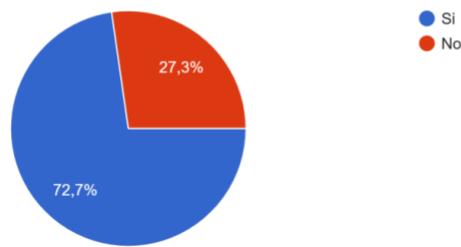


Figura 54. Pregunta 10.

9.2. Descomposición Funcional

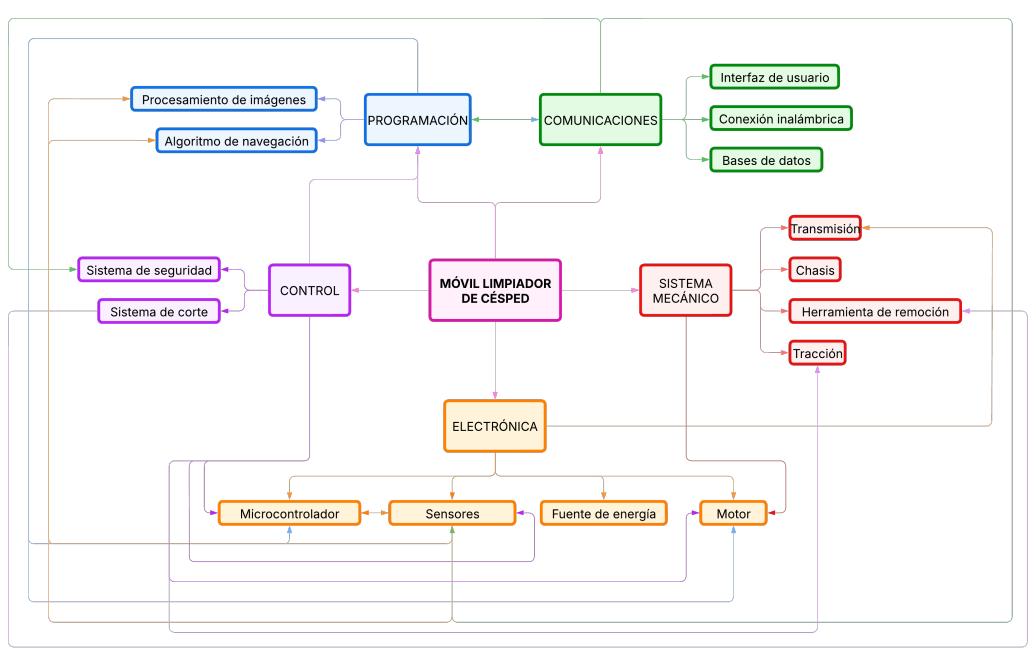


Figura 55. Base pila. Imagen propia

9.3. Planos del chasis del robot

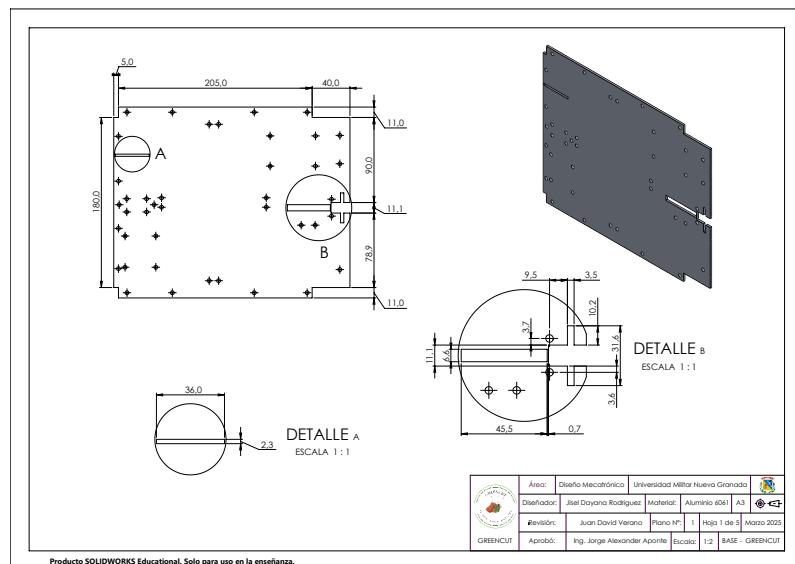


Figura 56. Base pila. Imagen propia

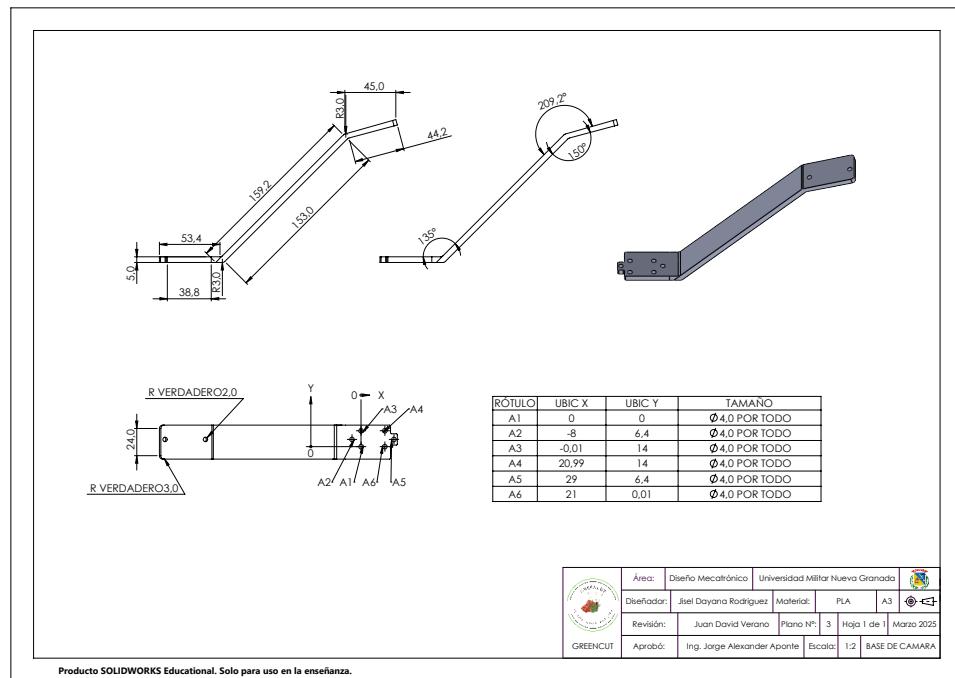


Figura 57. Base. Imagen propia.

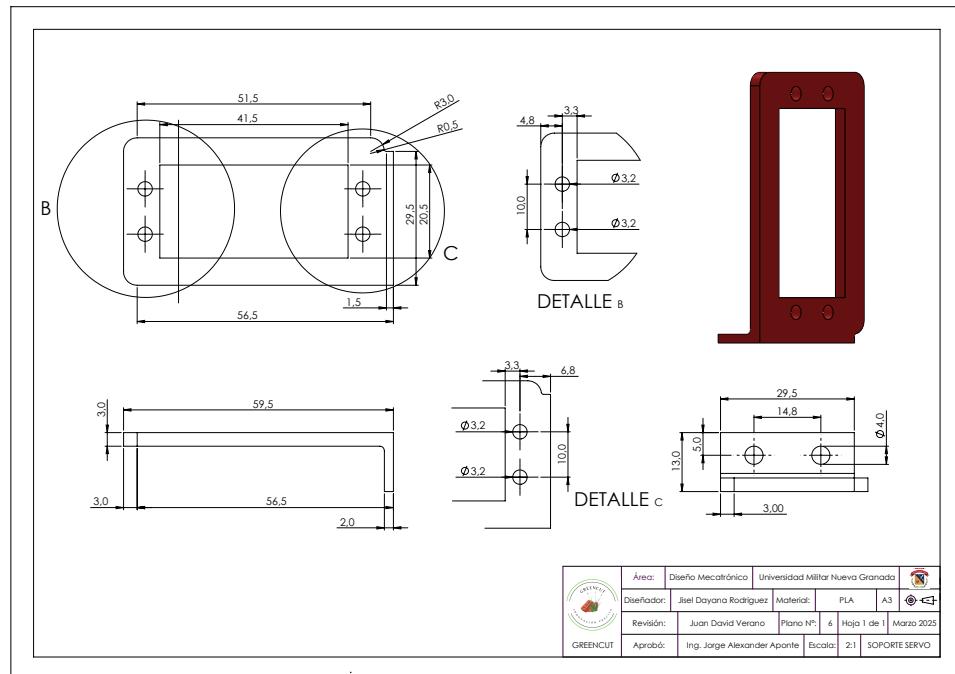


Figura 58. BaseGDL. Imagen propia

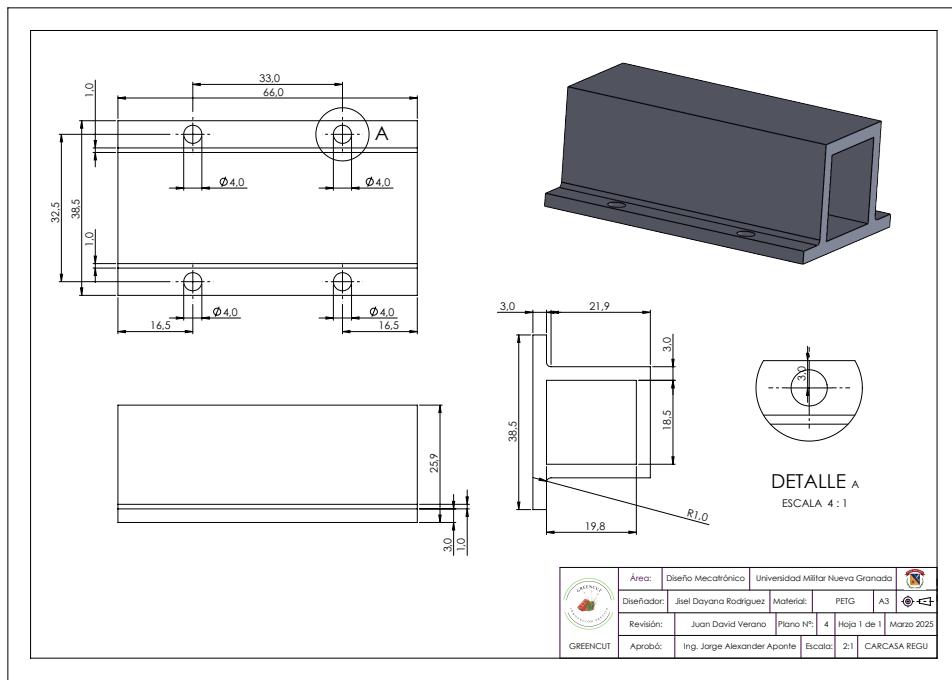


Figura 59. Carcaza de controles. Imagen propia.

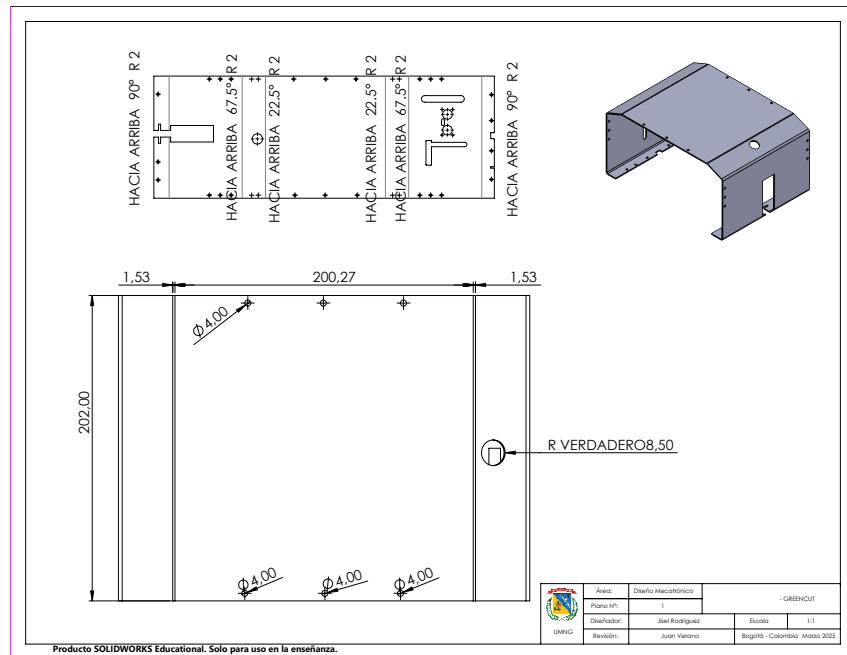


Figura 60. Carcaza central. Imagen propia

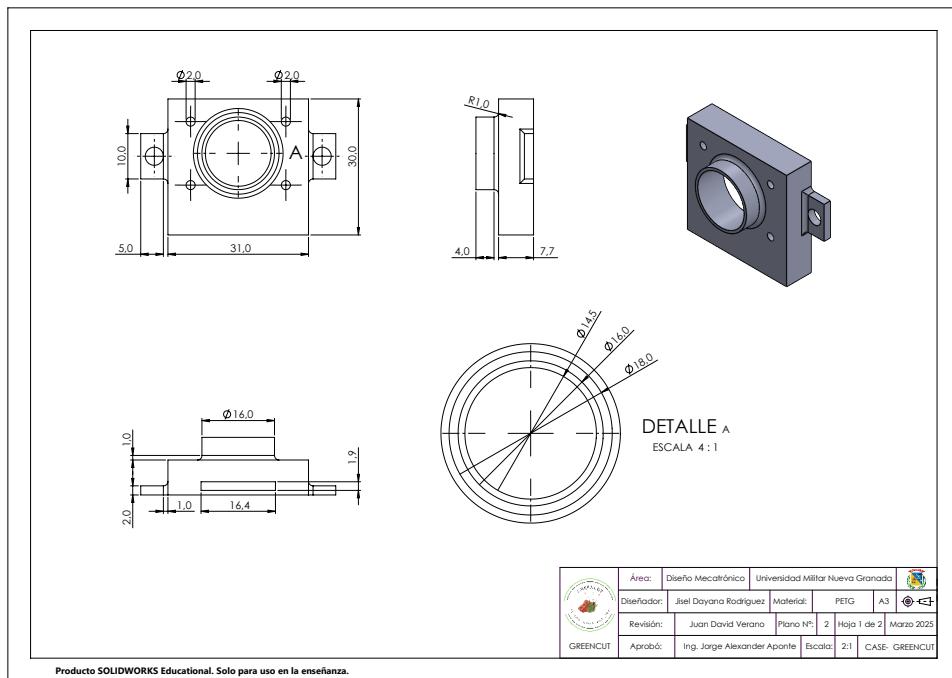


Figura 61. Case camara. Imagen propia

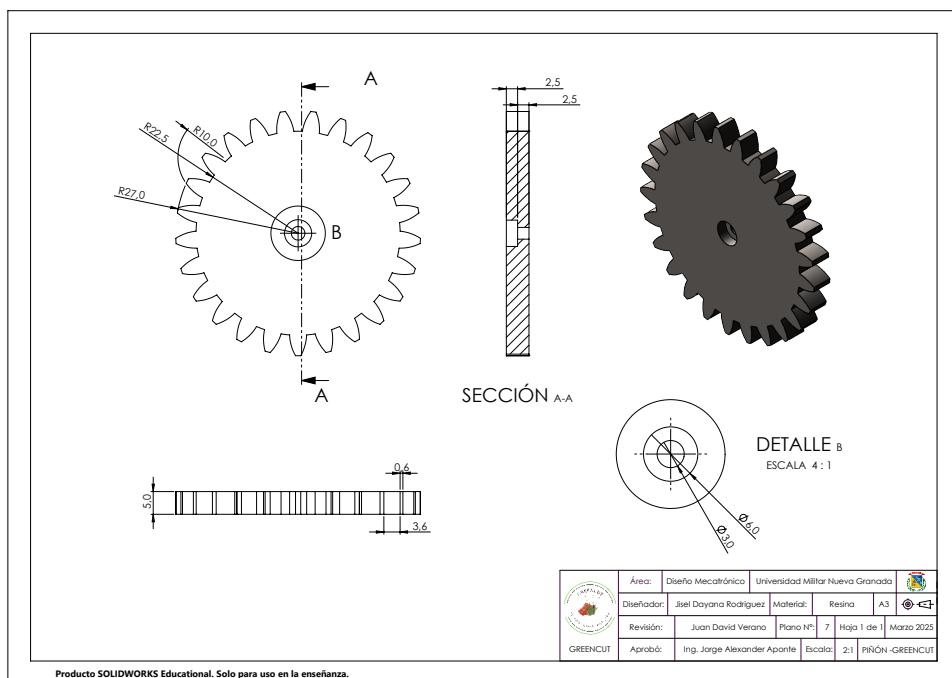


Figura 62. OIY. Imagen propia

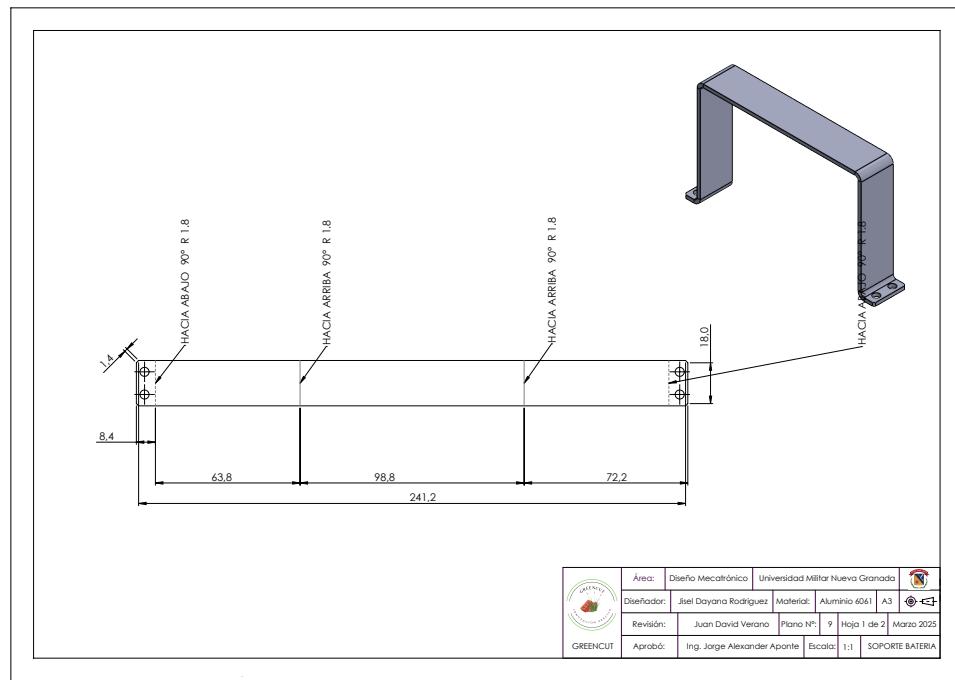


Figura 63. Soporte batería. Imagen propia

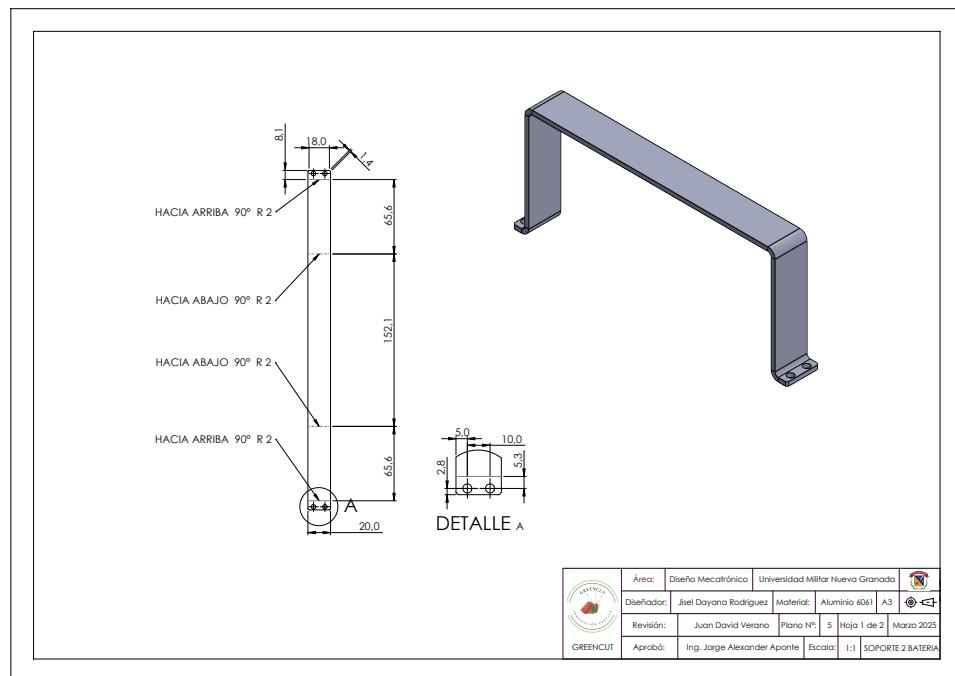


Figura 64. Soporte batería. Imagen propia

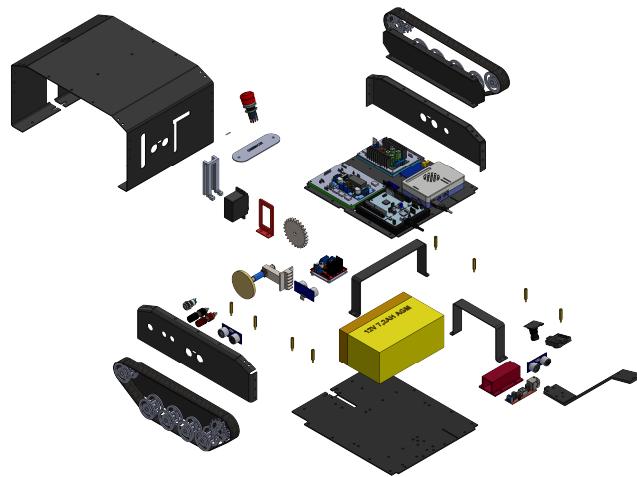


Figura 65. Ensamblaje explosionado. Imagen propia

9.4. Plano eléctrico

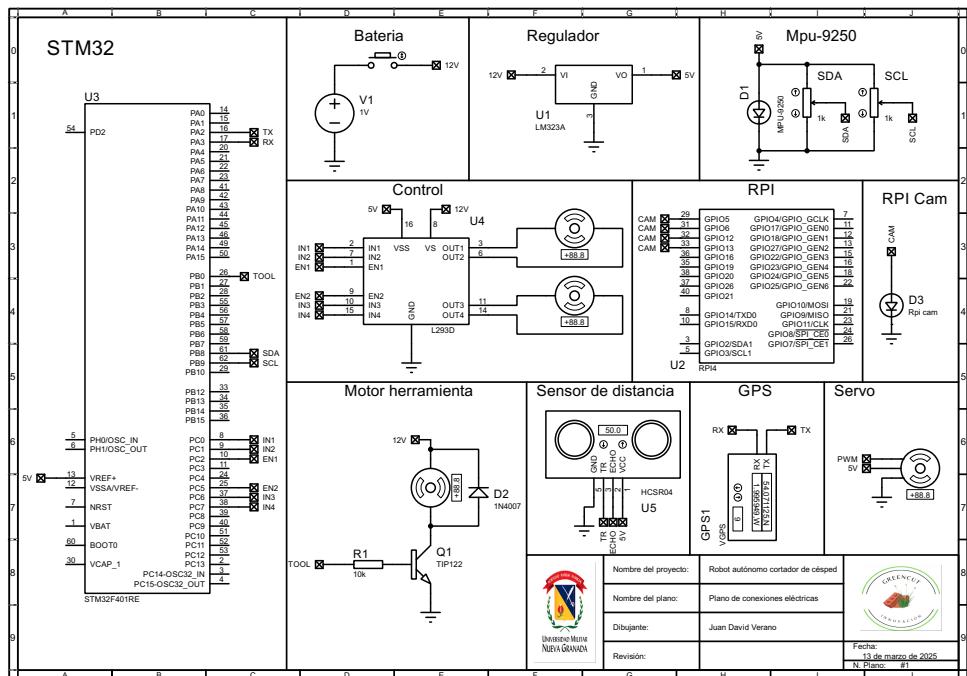


Figura 66. Plano eléctrico del robot.

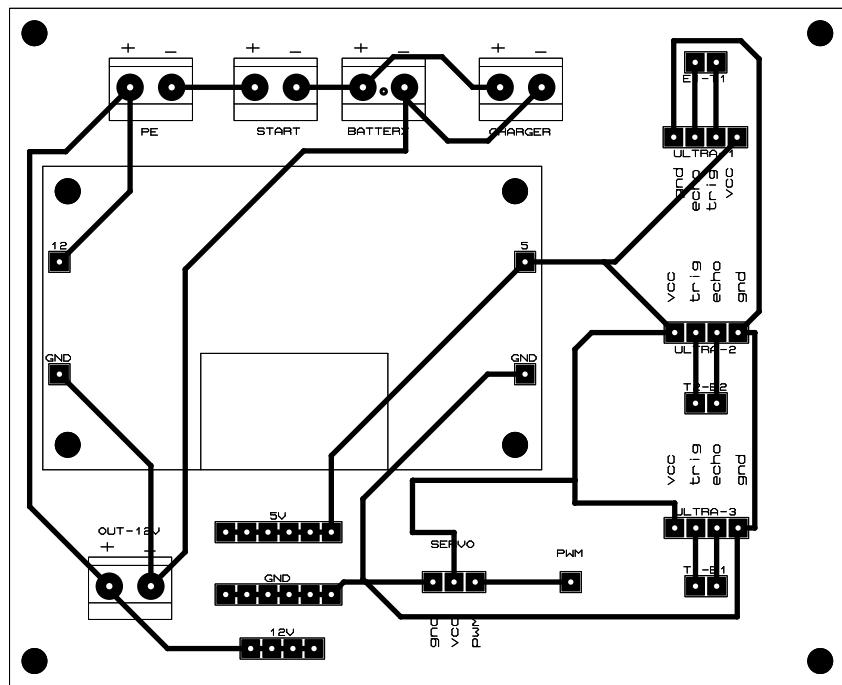


Figura 67. PCB 1. Imagen propia

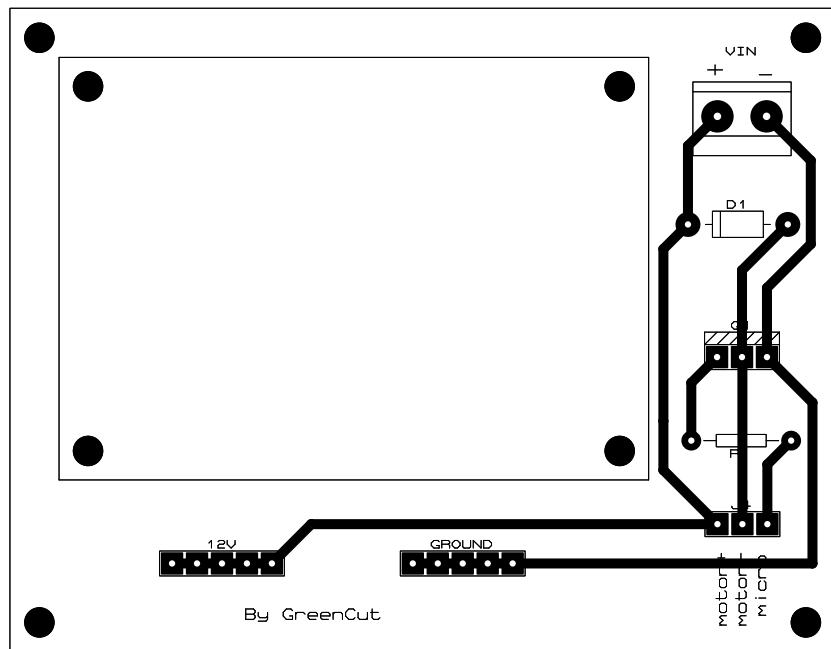


Figura 68. PCB 2. Imagen propia

9.5. Montaje del robot en físico

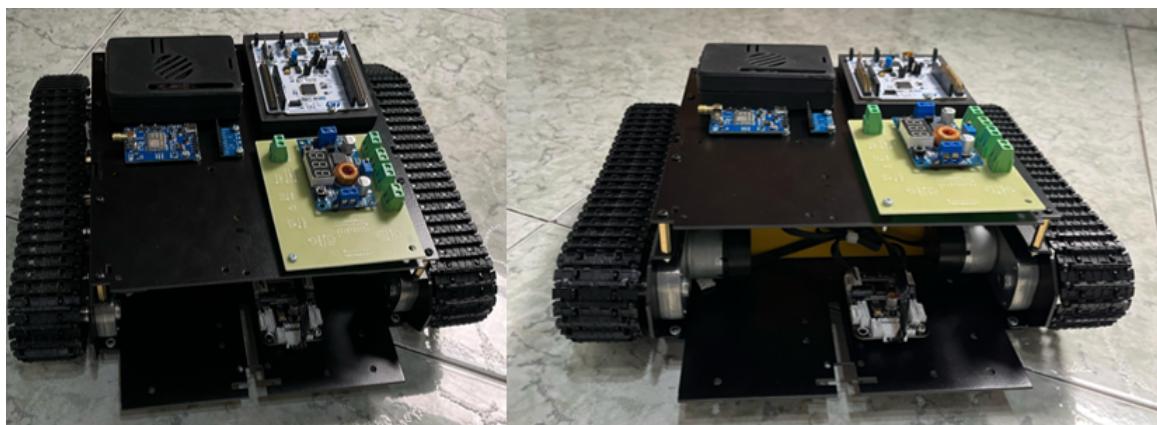


Figura 69. Montaje final de robot en interior.



Figura 70. Manual del robot.. Imagenes propia

9.6. Códigos

9.6.1. Rapberry PI

```
import smbus
import time
import struct

I2C_BUS = 1
MOTOR_ADDR = 0x34
ADC_BAT_ADDR = 0x00
MOTOR_TYPE_ADDR = 0x14
MOTOR_ENCODER_POLARITY_ADDR = 0x15
open-loop control, range: (-100~100))
MOTOR_FIXED_SPEED_ADDR = 0x33

MOTOR_ENCODER_TOTAL_ADDR = 0x3C
(P/U) * (3.14159*D)(For example, if the total number of pulses for motor 1 is P, the d

MOTOR_TYPE_WITHOUT_ENCODER = 0
MOTOR_TYPE_TT = 1
MOTOR_TYPE_N20 = 2
MOTOR_TYPE_JGB37_520_12V_110RPM = 3
MotorType = MOTOR_TYPE_JGB37_520_12V_110RPM
MotorEncoderPolarity = 0

bus = smbus.SMBus(I2C_BUS)
```

```

speed1 = [50,50,50,50]
speed2 = [-50,-50,-50,-50]
speed3 = [0,0,0,0]

pwm1 = [50,50,50,50]
pwm2 = [-100,-100,-100,-100]
pwm3 = [0,0,0,0]

def Motor_Init():
    bus.write_byte_data(MOTOR_ADDR, MOTOR_TYPE_ADDR, MotorType)
    time.sleep(0.5)
    bus.write_byte_data(MOTOR_ADDR, MOTOR_ENCODER_POLARITY_ADDR, MotorEncoderPolarity)

def main():
    while True:
        battery = bus.read_i2c_block_data(MOTOR_ADDR, ADC_BAT_ADDR)
        print("V = {0}mV".format(battery[0]+(battery[1]<<8)))

        Encode = struct.unpack('iiii',bytes(bus.read_i2c_block_data(MOTOR_ADDR, MOTOR_EN

        print("Encode1 = {0}  Encode2 = {1}  Encode3 = {2}  Encode4 = {3}".format(Encode

        bus.write_i2c_block_data(MOTOR_ADDR, MOTOR_FIXED_SPEED_ADDR,speed1)
        time.sleep(3)
        bus.write_i2c_block_data(MOTOR_ADDR, MOTOR_FIXED_SPEED_ADDR,speed2)
        time.sleep(3)

```

```

if __name__ == "__main__":
    Motor_Init()
    main()

```

9.6.2. Raspberry PI

```

import numpy as np

class EKF_Robot:
    def __init__(self):
        # Parámetros físicos del robot
        self.l = 0.2    # distancia centro - rueda
        self.r = 0.05   # radio de la rueda
        self.ri = 0.05  # distancia al IMU

        self.ts = 1/100  # periodo de muestreo (100 Hz)

        # Estado inicial: [X, x_dot, Y, y_dot, theta, theta_dot]
        self.estados = np.array([0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0])

    # Matriz de covarianza P
    self.P = np.eye(6) * 0.1

    # Matriz Q (ruido del proceso)

```

```

self.Q = np.array([
    [2.5e-9, 5e-7, 0, 0, 0, 0],
    [5e-7, 1e-4, 0, 0, 0, 0],
    [0, 0, 2.5e-9, 5e-7, 0, 0],
    [0, 0, 5e-7, 1e-4, 0, 0],
    [0, 0, 0, 0, 2.5e-9, 5e-7],
    [0, 0, 0, 0, 5e-7, 1e-4]
])

# Matriz R (ruido de medición)

self.R = np.eye(5) * 0.1

def actualizar(self, A_x, A_y, wl, wr, W_z):
    estados = self.estados
    ts = self.ts
    l = self.l
    r = self.r
    ri = self.ri

    # Guardar valores anteriores
    x_p_n1 = estados[1]
    theta_p_n1 = estados[5]

    # ---- PREDICCIÓN ----
    V = r / 2 * (wr + wl)
    estados[5] = r / (2 * l) * (wr - wl) # theta_dot

```

```

# Velocidades globales

estados[1] = V * np.cos(estados[4]) # x_dot
estados[3] = V * np.sin(estados[4]) # y_dot

# Integración

estados[4] += estados[5] * ts # theta
estados[0] += estados[1] * ts # X
estados[2] += estados[3] * ts # Y

# ---- JACOBIANO F ----

F = np.array([
    [1, ts, 0, 0, 0, 0],
    [0, 0, 0, 0, np.sin(estados[4]) * V, 0],
    [0, 0, 1, ts, 0, 0],
    [0, 0, 0, 0, np.cos(estados[4]) * V, 0],
    [0, 0, 0, 0, 1, ts],
    [0, 0, 0, 0, 0, 1]
])

# Actualizar P

self.P = F @ self.P @ F.T + self.Q

# ---- MEDICIÓN ----

V_norm = np.sqrt(estados[1]**2 + estados[3]**2)
hx = np.array([

```

```

        (estados[1] - x_p_n1) / ts,           # A_x
        ((estados[5] - theta_p_n1) / ts) * ri, # A_y
        (V_norm - estados[5]*l) / r,          # E_l
        (V_norm + estados[5]*l) / r,          # E_r
        estados[5]                           # W_z
    ])

# Vector de mediciones reales
z = np.array([A_x, A_y, wl, wr, W_z])

# Residuo de innovación
y_m = z - hx

# ---- MATRIZ H (Jacobiano de la medición) ----
if V_norm == 0:
    V_norm = 1e-5 # para evitar división por cero

H = np.array([
    [0, 1/ts, 0, 0, 0, 0],
    [0, 0, 0, 0, 0, ri/ts],
    [0, estados[1]/(V_norm*r), 0, -estados[3]/(V_norm*r), 0, 1/r],
    [0, estados[1]/(V_norm*r), 0, -estados[3]/(V_norm*r), 0, -1/r],
    [0, 0, 0, 0, 0, 1]
])

# ---- GANANCIA DE KALMAN ----

```

```

S = H @ self.P @ H.T + self.R

K = self.P @ H.T @ np.linalg.inv(S)

# ---- ACTUALIZACIÓN DE ESTADOS ----

self.estados = estados + K @ y_m

# ---- ACTUALIZACIÓN DE COVARIANZA ----

self.P = (np.eye(6) - K @ H) @ self.P

# Devuelve la posición estimada

return self.estados[0], self.estados[2] # X, Y

```