



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE GUAYAQUIL
CARRERA DE MECATRÓNICA

**DESARROLLO DE UN ROBOT MÓVIL CON SISTEMA DE
POSICIONAMIENTO GPS PARA EL SEMBRADO DE MAÍZ**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de Ingeniero en Mecatrónica

AUTORES: Jordan André Cadena Villalonga
Christian Josué Freire Valverde
TUTOR: Nino Tello Vega Ureta

Guayaquil - Ecuador
2024

INFORME SOBRE REPORTE DEL PROGRAMA ANTIPLAGIO TURNITIN

PROYECTO DE TESIS: DESARROLLO DE UN ROBOT MÓVIL CON SISTEMA DE POSICIONAMIENTO GPS PARA EL SEMBRADO DE MAÍZ

AUTORES: JORDAN ANDRÉ CADENA VILLALONGA
CHRISTIAN JOSUÉ FREIRE VALVERDE

TUTOR DE TESIS: Ing. NINO TELLO VEGA URETA, MSc.

FECHA: 20 de Agosto del 2024

El presente informe tiene como finalidad la justificación de resultados obtenidos al ejecutar el programa anti-plagio TURNITIN sobre el trabajo de titulación DESARROLLO DE UN ROBOT MÓVIL CON SISTEMA DE POSICIONAMIENTO GPS PARA EL SEMBRADO DE MAÍZ

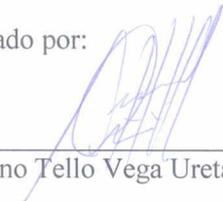
Para la configuración del reporte se eligió excluir similitudes en:

- BIBLIOGRAFÍA
- COINCIDENCIAS MENORES (15 palabras o menos)

Dada esta configuración se obtuvo una **SIMILITUD GENERAL POR UN TOTAL DE 3%**. Algunas coincidencias se atribuyen a palabras y oraciones de formatos de trabajos de titulación de tesis de la UPS e inclusive de algunos trabajos enviados al repositorio en el AVAC de la Universidad Politécnica Salesiana.

Esto con respecto al informe sobre reporte del programa anti-plagio TURNITIN

Elaborado por:



Ing. Nino Tello Vega Ureta, MSc.

PAPER NAME

DESARROLLO DE UN ROBOT M%C3%93VIL CON SISTEMA DE POSICIONAMIENTO GPS PARA EL SEMBRADO DE MA%C3%8DZ_CADENA_FREIRE.pdf

AUTHOR

JORDAN ANDRE CADENA VILLALONGA

WORD COUNT

29236 Words

CHARACTER COUNT

165587 Characters

PAGE COUNT

104 Pages

FILE SIZE

9.1MB

SUBMISSION DATE

Aug 20, 2024 6:25 PM EDT

REPORT DATE

Aug 20, 2024 6:26 PM EDT

● 3% Overall Similarity

The combined total of all matches, including overlapping sources, for each database.

- 2% Internet database
- 0% Publications database
- Crossref database
- Crossref Posted Content database
- 2% Submitted Works database

● Excluded from Similarity Report

- Bibliographic material
- Cited material
- Small Matches (Less than 15 words)



Handwritten signature and date: 20/08/20

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, **Jordan André Cadena Villalonga** con documento de identificación N° **0940360928** y **Christian Josué Freire Valverde** con documento de identificación N° **0941781692**; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo.

Guayaquil, 16 de agosto del año 2024

Atentamente,



Jordan André Cadena Villalonga
0940360928



Christian Josué Freire Valverde
0941781692

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

Nosotros, **Jordan André Cadena Villalonga** con documento de identificación N° **0940360928** y **Christian Josué Freire Valverde** con documento de identificación N° **0941781692**, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del **Dispositivo Tecnológico: DESARROLLO DE UN ROBOT MÓVIL CON SISTEMA DE POSICIONAMIENTO GPS PARA EL SEMBRADO DE MAÍZ**, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero en Mecatrónica, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

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

Guayaquil, 16 de agosto del año 2024

Atentamente,



Jordan André Cadena Villalonga
0940360928



Christian Josué Freire Valverde
0941781692

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, **Nino Tello Vega Ureta**, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **DESARROLLO DE UN ROBOT MÓVIL CON SISTEMA DE POSICIONAMIENTO GPS PARA EL SEMBRADO DE MAÍZ**, realizado por **Jordan André Cadena Villalonga** con documento de identificación N° **0940360928** y por **Christian Josué Freire Valverde** con documento de identificación N° **0941781692**, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción **Dispositivo Tecnológico** que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 16 de agosto del año 2024

Atentamente,



Ing. Nino Tello Vega Ureta, Mg.
0801602160

DEDICATORIA

Dedico el siguiente trabajo de titulación a mis padres, Rosita María Villalonga Paredes y Carlos Alberto Cadena Almeida, por ser mi fuente de inspiración y mi ejemplo a seguir. Su amor y dedicación me han guiado y motivado en cada paso de este camino. Esta tesis es un agradecimiento por todo lo que me han enseñado y todo lo que han hecho por mí.

Jordan André Cadena Villalonga

Dedico este trabajo con profundo amor y gratitud a mis padres. A mi madre, por su apoyo incondicional y su amor constante, y a mi padre, quien aunque ya no está físicamente, ha estado siempre presente en mi corazón. Su inspiración y sacrificio han sido mi guía y fortaleza a lo largo de este viaje.

Christian Josué Freire Valverde

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a todas las personas que han sido parte de este importante capítulo de mi vida.

A mis padres, Rosita María Villalonga Paredes y Carlos Alberto Cadena Almeida, por su amor incondicional y su apoyo constante. Gracias por enseñarme el valor del esfuerzo y la perseverancia. Su confianza en mí ha sido fundamental para alcanzar este logro.

A mi enamorada, Kenia Alexandra Guato Vera, por su paciencia, comprensión y apoyo incondicional. Gracias por estar a mi lado en los momentos difíciles y por celebrar conmigo cada pequeño triunfo. Tu amor y compañía han sido una fuente de fortaleza y motivación.

A mis amigos, Gabriel, Guido, Elian y Marcos por su constante apoyo y por ser un refugio de risas y buenos momentos durante este proceso. Gracias por su comprensión y por siempre estar ahí cuando los necesitaba. Su amistad ha sido invaluable para mantenerme equilibrado y motivado.

A mis tíos y otros familiares, por su aliento y cariño. Sus palabras de apoyo y sus consejos han sido una parte importante de este viaje.

A todos aquellos que, de alguna manera, contribuyeron a la realización de este trabajo, mi más sincero agradecimiento.

Jordan André Cadena Villalonga

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que han hecho posible la culminación de nuestro trabajo de titulación.

En primer lugar agradezco a mis padres por su amor incondicional y apoyo constante, a mi madre por su fortaleza y estímulo constante a lo largo de este proceso.

Agradezco a mi querida familia por sus palabras de aliento y por estar siempre a mi lado. Un agradecimiento especial a mi hermana y a mi novia, cuyo apoyo y comprensión han sido invaluableles y esenciales para mi progreso. Mi gratitud también para el Ing. Jorge Fariño quien siempre como Director de nuestra carrera se preocupa por el bienestar de nosotros, a mi tutor el Ing. Nino Vega por su orientación, apoyo y su paciencia a lo largo de este proceso. Sin el respaldo y aliento de todos ustedes, este logro no habría sido posible. Gracias de corazón.

Christian Josué Freire Valverde

RESUMEN

El presente documento detalla un proyecto de investigación enfocado en el desarrollo de un robot móvil equipado con un sistema de posicionamiento GPS, diseñado específicamente para optimizar el proceso de siembra de maíz. La investigación surge debido a que los métodos tradicionales resultan a menudo ineficaces y laboriosos. Esta problemática plantea la pregunta fundamental: ¿Cómo puede un robot móvil con tecnología avanzada mejorar el proceso de siembra en comparación con los métodos convencionales? El objetivo del proyecto es diseñar e implementar un robot que emplee un microcontrolador y sensores precisos para lograr un posicionamiento exacto en el terreno de cultivo, con una efectividad mínima del 90 % en condiciones controladas. La investigación pretende demostrar que la automatización y la tecnología GPS pueden revolucionar la agricultura, haciéndola más eficiente y sostenible. Para ello, se ha seguido una metodología que incluye el diseño y la construcción del robot, así como la implementación de una interfaz de usuario intuitiva para el control y la supervisión en tiempo real. Se realizaron pruebas comparativas del rendimiento del robot frente a métodos tradicionales, evaluando su eficacia en la siembra y la precisión del posicionamiento. Los resultados obtenidos muestran que el robot consiguió un porcentaje de error de siembra inferior al 10 % en comparación con los métodos tradicionales, lo que respalda la hipótesis inicial sobre la efectividad de la tecnología en la agricultura. Además, se observó una alta satisfacción del usuario con la interfaz desarrollada. En conclusión, el estudio demuestra que la integración de tecnologías avanzadas en la agricultura, como el robot móvil con GPS, puede mejorar significativamente la eficiencia y precisión en el proceso de siembra. Se recomienda seguir investigando para explorar la aplicación de esta tecnología en otros cultivos y condiciones de terreno, así como para continuar mejorando el diseño y la funcionalidad del robot.

Palabras claves: robot móvil, GPS, eficiencia agrícola, precisión en siembra, tecnología avanzada.

ABSTRACT

This document outlines a research project focused on the development of a mobile robot equipped with a GPS positioning system, specifically designed to optimize the maize planting process. The research arises from the need to improve efficiency and precision in agriculture, where traditional methods often prove ineffective and laborious. This issue raises the fundamental question: How can a mobile robot with advanced technology enhance the planting process compared to conventional methods? The project's goal is to design and implement a robot that uses a microcontroller and precise sensors to achieve accurate positioning in the cultivation field, with a minimum effectiveness of 90 % under controlled conditions. The research aims to demonstrate that automation and GPS technology can revolutionize agriculture, making it more efficient and sustainable. The methodology includes the design and construction of the robot, as well as the implementation of an intuitive user interface for real-time control and monitoring. Comparative tests of the robot's performance against traditional methods were conducted, evaluating its effectiveness in planting and positioning accuracy. The results show that the robot achieved a planting error rate of less than 10 % compared to traditional methods, supporting the initial hypothesis about the effectiveness of the technology in agriculture. Additionally, high user satisfaction with the developed interface was observed. In conclusion, the study demonstrates that integrating advanced technologies in agriculture, such as the mobile robot with GPS, can significantly enhance efficiency and precision in the planting process. Further research is recommended to explore the application of this technology in other crops and terrain conditions, as well as to continue improving the robot's design and functionality.

Keywords: mobile robot, GPS, agricultural efficiency, planting precision, advanced technology.

ÍNDICE

I.	Introducción	1
II.	Problema	2
III.	Objetivos	3
III-A.	Objetivo general	3
III-B.	Objetivos específicos	3
III-C.	Matriz de Objetivos	4
IV.	Fundamentos Teóricos	5
IV-A.	Robots	5
IV-A1.	Definición y Clasificación de Robots.	5
IV-A2.	Clasificación de Robots.	5
IV-A3.	Aplicaciones de Robots en la Agricultura	7
IV-B.	Diseño del Robot Móvil	7
IV-B1.	Robots Móviles Terrestres	8
IV-B2.	transmisión diferencial	9
IV-B3.	Sistema de Transmisión con Rueda Única para Robots Móviles	10
IV-B4.	Especificaciones del Hardware	10
IV-B5.	Estructura	11
IV-B6.	Computadora a Bordo	11
IV-B7.	Sistemas de Prevención de Errores	11
IV-B8.	Chasis y Estructura	12
IV-B9.	Sistema de Autodiagnóstico	12
IV-B10.	Interfaz de Usuario	12
IV-C.	Sistema de navegación	12
IV-D.	Sensores de Posicionamiento Global (GPS)	13
IV-D1.	Sensores de Odometría	13
IV-D2.	Sistemas de Visión Computarizada	13
IV-D3.	Unidad de Control de Navegación	13
IV-D4.	Sistemas de Comunicación	14
IV-D5.	Módulos Anti-Colisión	14
IV-D6.	Sensores y su Aplicación en Agricultura Robótica	14
IV-D7.	Fusión de Sensores en Sistemas Robóticos	14
IV-E.	Agricultura de precisión	15
IV-E1.	Prácticas agrícolas	16
IV-E2.	Preparación del terreno	16
IV-F.	Tipos de suelo	16
IV-F1.	Suelos Arcillosos	16
IV-F2.	Suelos Francos	16
IV-F3.	Suelos Arenosos	16
IV-F4.	Suelos Limosos	17
IV-F5.	Siembra	17
IV-F6.	Recopilación de Datos	18
IV-F7.	Análisis de Datos	18
IV-F8.	Toma de Decisiones Basada en Datos	18
IV-F9.	Gestión de Variabilidades Espaciales	18
IV-F10.	Uso Eficiente de Recursos	18
IV-F11.	Automatización y Tecnología	18

	IV-F12.	Registro y Documentación	18
IV-G.		Rol de la Robótica en la Agricultura de Precisión	18
	IV-G1.	Siembra y Plantación	19
	IV-G2.	Método tradicionales de siembra	19
	IV-G3.	Siembra a Voleo	19
	IV-G4.	Siembra a Chorrillo o Surco	19
	IV-G5.	Siembra a Golpe	19
	IV-G6.	Siembra a Trasplante	19
	IV-G7.	Desmalezado y Mantenimiento de Cultivos	19
	IV-G8.	Sistemas de Riego Autónomos	19
	IV-G9.	Manejo de Ganado	19
	IV-G10.	Registro y Análisis de Datos	20
IV-H.		Principios y Funcionamiento del Sistema de Posicionamiento Global (GPS)	20
	IV-H1.	Constelación de Satélites	20
	IV-H2.	Recepción de Señales	20
	IV-H3.	Triangulación	21
	IV-H4.	Sincronización de Tiempo	21
	IV-H5.	Cálculo de Posición	21
IV-I.		Desafíos Actuales en el Proceso de Siembra	22
	IV-I1.	Costos de Tecnología	22
	IV-I2.	Capacitación y Adaptación	22
	IV-I3.	Acceso a Tecnología	22
	IV-I4.	Compatibilidad de Suelo	22
	IV-I5.	Sostenibilidad Ambiental	23
	IV-I6.	Sistemas de Suspensión y Neumáticos Eficientes	23
	IV-I7.	Modos de Operación Eficientes	23
	IV-I8.	Tecnologías de Recuperación de Energía	23
	IV-I9.	Diagnóstico y Monitoreo de la Batería	23
	IV-I10.	Investigación en Nuevas Tecnologías	23
	IV-I11.	Integración de Sensores de Bajo Consumo	23
IV-J.		Componentes del robots	24
	IV-J1.	ESP32 TIPO-C	24
	IV-J2.	USB Tipo-C:	24
	IV-J3.	PROTOBOARD	24
	IV-J4.	MOTORES 350W	24
	IV-J5.	BLCD 36V PARA MOTORES	25
	IV-J6.	BATERIA 36V	25
	IV-J7.	MPU-9250 - SENSOR INERCIAL	25
	IV-J8.	GPS-9250-SENSOR INERCIAL	25
IV-K.		Especificaciones Técnicas:	26
	IV-K1.	Modulo ZS-X11H	26
	IV-K2.	Voltaje de entrada:	26
	IV-K3.	Potencia máxima:	26
	IV-K4.	Corriente máxima:	26
	IV-K5.	Frecuencia de PWM:	26
	IV-K6.	Control de velocidad:	26
	IV-K7.	Características:	26
	IV-K8.	Protección de sobrecarga:	27
	IV-K9.	Compatibilidad con sensores Hall:	27

V.	Marco Metodológico	28
V-A.	Diseño sistema mecánico	28
	V-A1. Diseño de la base	28
	V-A2. Diseño de los broches de seguridad	28
	V-A3. Diseño del cobertor	29
	V-A4. Diseño del soporte de la base	29
	V-A5. Diseño de la rueda dispensadora	30
	V-A6. Diseño de las ruedas	31
	V-A7. Diseño del ensamblaje final en Inventor 3D	31
	V-A8. Análisis y esfuerzos de Von Misses	32
	V-A9. Pieza de análisis estructura base	32
	V-A10. Pieza de análisis ruedas	36
	V-A11. Motor y Características	40
V-B.	Diseño de sistema electrónicos	42
	V-B1. Simulación Proteus	42
	V-B2. Diseño de la placa Pcb	45
V-C.	Diseño del sistema de control	46
	V-C1. Diagramas de flujos	46
	V-C2. Diagramas de flujos usuario-robot	46
	V-C3. Diagramas de flujos robot	47
	V-C4. Diagrama lógico	48
	V-C5. Programación del Diagrama Lógico	49
V-D.	Listas de materiales de diseño y componentes electrónicos	50
V-E.	Desarrollo del sistema mecánico, sistema electrónico y sistema de control	51
	V-E1. Estructura del diseño de la base	51
	V-E2. Construcción de planta	51
	V-E3. Piezas metálicas	52
	V-E4. Ensamble	53
V-F.	Elaboración de la Pcb	54
	V-F1. Elaboración de las pistas de conexión	54
	V-F2. Placa Pcb terminada	55
V-G.	Desarrollo del sistema dinámico del robot sembrador	56
	V-G1. Fórmulas de las Velocidades de los Motores	56
	V-G2. Simulación de la respuesta del sistema Movimiento en línea recta	61
	V-G3. Simulación de la respuesta del sistema Movimiento en laterales	61
	V-G4. Simulación de la respuesta del sistema Movimiento en Rotación	62
V-H.	Interfaz usuario-robot	62
V-I.	Pruebas de funcionamiento del robot sembrador	65
	V-I1. Análisis y pruebas de funcionamiento del robot sembrador en terreno ideal	65
	V-I2. Análisis y pruebas de funcionamiento del robot sembrador en terreno no ideal	66
	V-I3. Análisis y comparación entre Robot sembrador, siembra manual y maquinarias pesadas	67
VI.	Resultados	68
VII.	Cronograma y actividades a desarrollar	70
VIII.	Presupuesto y gastos	71
IX.	Conclusiones	72

X. Recomendaciones	73
X-A. Mejorar el Diseño Mecánico	73
X-B. Gestión del Calor	73
X-C. Mejorar el Algoritmo de Control	73
X-D. Revisar el Sistema de Alimentación	73
X-E. Pruebas y Ajustes	73
Referencias	74
Anexo A: Planos	78
Anexo B: Códigos en lenguaje C	82
Anexo C: Prueba de funcionamiento inicial campo no ideal	86
Anexo D: Prueba de funcionamiento campo ideal	87
Anexo E: Sembrado final del robot	89

ÍNDICE DE FIGURAS

1.	Robots repartidores [8].	5
2.	Robots autónomos [14].	6
3.	Posicionamiento del Robot [22].	8
4.	Transmisión diferencial [26].	9
5.	Tipos de rueda [30].	10
6.	Estructura [4].	11
7.	Sistema de Posicionamiento Global [14].	13
8.	Preparación del terreno [50].	16
9.	TIPOS DE SUELOS [54].	17
10.	Siembra Maíz [52].	17
11.	Sistema de Posicionamiento Global [14].	22
12.	Diseño de la base, por J. Cadena C.Freire, 2024.	28
13.	Broche, por J. Cadena C.Freire, 2024.	29
14.	Cobertor, por J. Cadena C.Freire, 2024.	29
15.	Soporte de la base de acero inoxidable, por J. Cadena C.Freire, 2024.	30
16.	Rueda dispensadora, por J. Cadena C.Freire, 2024.	30
17.	Rueda, por J. Cadena C.Freire, 2024.	31
18.	Diseño ensamble Inventor 3D visualización de broches, por J. Cadena C.Freire, 2024.	31
19.	Pieza con carga de 287 lbf distribuida y esfuerzos de Von Misses escalados (chasis)	32
20.	Primer esfuerzo principal en puntos de interés (chasis)	33
21.	Tercer esfuerzo principal en puntos de interés (chasis)	33
22.	Mallado de la pieza y esfuerzo de Von Mises (chasis)	34
23.	Factor de seguridad en puntos de interés	34
24.	Factor de seguridad en puntos de interés	35
25.	Pieza (rueda) a analizar, eje de acero a36 y rueda de aluminio.	36
26.	Pieza con carga de 8038 lbf distribuida y esfuerzos de Von Misses escalados (rueda).	37
27.	Primer esfuerzo principal en puntos de interés (rueda).	37
28.	Primer esfuerzo principal en puntos de interés (rueda) (rojo).	38
29.	Mallado de la pieza y esfuerzo de Von Mises (rueda).	38
30.	Factor de seguridad en puntos de interés (rueda).	39
31.	Descripción de punto maximo de desplazamiento.	39
32.	Diagrama inicial de Proteus, por J. Cadena C.Freire, 2024.	42
33.	Código motor izquierdo por J. Cadena C.Freire, 2024.	43
34.	Funcionamiento de un solo motor por J. Cadena C.Freire, 2024.	44
35.	Boceto inicial de la pcb	45
36.	Final de la pcb. , por J. Cadena C.Freire, 2024.	45
37.	Diagrama de Flujo , por J. Cadena C.Freire, 2024.	46
38.	Diagrama de flujo usuario-robot, por J. Cadena C.Freire, 2024.	47
39.	Diagrama de flujo robot, por J. Cadena C.Freire, 2024.	47
40.	Diagrama lógico, por J. Cadena C.Freire, 2024.	48
41.	Estructura de la base elaborado por J. Cadena C.Freire, 2024.	51
42.	Diseño de la base con las 4 llantas por J. Cadena C.Freire, 2024.	52
43.	Piezas metálicas, por J. Cadena C.Freire, 2024.	52
44.	Estructura de la base fija, por J. Cadena C.Freire, 2024.	53
45.	Diseño de ensamble elaborado por J. Cadena C.Freire, 2024.	54
46.	Elaboración de placa de control. , por J. Cadena C.Freire, 2024.	55
47.	Placa de control terminada. , por J. Cadena C.Freire, 2024.	55
48.	Modelo de direccionamiento de robot de 2 Ruedas por J. Cadena C.Freire, 2024.	56
49.	cinemática del Robot de 4 ruedas por J. Cadena C.Freire, 2024.	57

50.	configuración de velocidades por J. Cadena C.Freire, 2024.	58
51.	Robot Movimiento en línea recta.	61
52.	Descripción del movimiento del robot	61
53.	Modelo para comparación de técnicas de control	62
54.	Modo manual	62
55.	Modo automático	63
56.	Procesos	63
57.	Opciones de desplazamiento	64
58.	Resultados de la aplicación C.Freire, 2024.	68
59.	Malla de sembrado final robot sembrador	69
60.	Plano de la base del robot, por J. Cadena C.Freire, 2024.	78
61.	Plano de la pieza del broche del robot, por J. Cadena C.Freire, 2024.	79
62.	Plano de la pieza cobertor, por J. Cadena C.Freire, 2024.	80
63.	Plano del ensamble final, por J. Cadena C.Freire, 2024.	81
64.	Prueba de campo 1, por J. Cadena C.Freire, 2024.	86
65.	Prueba de campo 2, por J. Cadena C.Freire, 2024.	86
66.	Prueba de campo 3, por J. Cadena C.Freire, 2024.	87
67.	Prueba de campo 4, por J. Cadena C.Freire, 2024.	87
68.	Prueba de campo 5, por J. Cadena C.Freire, 2024.	88
69.	Prueba de campo 6, por J. Cadena C.Freire, 2024.	88
70.	Sembrado final campo 7, por J. Cadena C.Freire, 2024.	89

ÍNDICE DE TABLAS

I.	Datos técnicos del motor seleccionado.	40
II.	Tabla de materiales de diseño y componentes electrónicos	50
III.	Tabla de funcionamiento del robot sembrador de maíz con un desperdicio del 1 %	65
IV.	Tabla de funcionamiento del robot sembrador de maíz con un desperdicio del 5 %	66
V.	Comparación entre Robot Sembrador, Siembra Manual y Maquinarias Pesadas	67
VI.	Cálculos entre Robot Sembrador, Siembra Manual y Maquinarias Pesadas	69
VII.	Cronograma de actividades para implementación del proyecto	70
VIII.	Tabla de presupuestos	71

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la implementación de tecnologías avanzadas en la agricultura es crucial para mejorar la eficiencia y sostenibilidad de los procesos agrícolas. Esta investigación se enfoca en el desarrollo de un robot móvil equipado con un sistema de posicionamiento GPS (Global Positioning System), diseñado específicamente para la siembra de maíz. El objetivo del proyecto es enfrentar los desafíos asociados con la producción agrícola mediante una solución innovadora que optimice el proceso de siembra a través de la automatización y la precisión que ofrece la tecnología GPS.

El maíz es un cultivo de gran importancia a nivel mundial, y para satisfacer la creciente demanda de alimentos, es necesario adoptar prácticas agrícolas más eficientes. La incorporación de robots móviles en la agricultura, con la integración de sistemas GPS, ha demostrado ser prometedora al mejorar la productividad, reducir la dependencia de mano de obra y minimizar el impacto ambiental. Este proyecto se encuentra en la intersección de la robótica móvil y la agricultura de precisión, con el propósito de desarrollar un prototipo de robot autónomo para una siembra de maíz precisa, centrado en la eficiencia energética, la reducción de residuos y los beneficios económicos.

A través de esta investigación, se pretende avanzar en la agricultura moderna al proporcionar una herramienta tecnológica que no solo mejore la productividad, sino que también promueva prácticas agrícolas más sostenibles y respetuosas con el medio ambiente. La combinación de robótica y sistemas de posicionamiento GPS para la siembra de maíz representa una respuesta innovadora y estratégica a los desafíos actuales en el sector agrícola, marcando un paso significativo hacia el futuro de la producción alimentaria.

II. PROBLEMA

El maíz en Ecuador, se estima como un cultivo de alta importancia dado a la diversidad y utilidad de los productos derivados y a su vez, el aporte nutricional que brindan a los individuos que lo consumen. El proceso que se realiza para sembrar el maíz es de un período largo de tiempo y requiere de mucho esfuerzo. La siembra se efectúa mediante la participación directa del sujeto, siendo necesario que este se agache y levante de manera continua, generando un dolor a nivel lumbar, fatiga por exposición solar durante horas y otros factores intervinientes que inciden en la salud de los agricultores como resultado del desgaste físico y por consiguiente, se da una demanda de gastos [1].

Una investigación realizada por Smith, 2019, se evidencia que entre las principales causas de este fenómeno en la agricultura es la migración del campo a la ciudad, a causa de buscar una mejor calidad de vida, disminuyendo el personal que participa en los procesos de siembra de maíz. Otra problemática es el alza de los costos de la semilla de maíz en épocas de siembra, derivando a que los jornaleros que son contratados lleguen a acciones ilícitas como robar la semilla a fin de crear sus propios cultivos. Lo mencionado con anterioridad es una causa evidente de las pérdidas económicas en las fincas que hacen sus inversiones para estos grandes cultivos[2].

Otro problema que existe es el precio de la semilla y a la hora de vender no es lo suficiente para pagar una cuadrilla de trabajadores lo que representa una pérdida para los dueños del terreno [3]. Otra limitante para los agricultores y que resalta comúnmente, es el bajo precio que las sedes comerciales ofrecen por los quintales vendidos del producto, llegando a ser valores que en muchos de los casos no logran si quiera a cubrir la utilidad deseada por todo el tiempo de trabajo que se empleó en el tiempo de cosecha [4].

“En el cantón Montalvo – provincia de Los Ríos, se realiza cultivo de maíz, aunque presenta varias condiciones climáticas y topográficas que favorecen la siembra, este producto aún no logra su mayor potencial como disyuntiva para el desarrollo socioeconómico que beneficie a las familias” (pág. 25). La mano de obra, fumigación y fertilización de los cultivos de maíz han presentado altos rubros en el curso del periodo de cultivo y cosecha del producto, específicamente, del maíz amarillo. Se debe considerar que existe escases a inicios del proceso del cultivo [5].

Los micro agricultores carecen de recursos económicos para acceder a equipos pesados y costosos destinados al proceso de siembra del maíz. La siembra del maíz es una fase crítica en la producción agrícola, y su éxito influye directamente en los rendimientos. Sin embargo, debido a la limitación financiera de los micro agricultores, se enfrentan a obstáculos significativos para adoptar prácticas modernas y tecnologías avanzadas que podrían optimizar la eficiencia y la calidad de la siembra.

La propuesta de desarrollar un robot sembrador de maíz surge como una solución para estas problemáticas. Este robot estaría diseñado para llevar a cabo la siembra de manera estandarizada, siguiendo las normativas determinadas por el Ministerio de Agricultura en su Guía para la producción de maíz. De esta manera, se busca proporcionar a los micro agricultores una herramienta asequible y eficiente que les permita automatizar el proceso de siembra, mejorando sus prácticas agrícolas sin incurrir en gastos excesivos[6].

III. OBJETIVOS

III-A. Objetivo general

Desarrollar un robot móvil capaz de realizar el proceso de siembra de maíz de manera eficiente y precisa para el mejoramiento de la productividad agrícola.

III-B. Objetivos específicos

- Diseñar los mecanismos de movilidad del robot, utilizando un microcontrolador y sensores adecuados, para un posicionamiento específico dentro de los límites del terreno de cultivo de maíz.
- Implementar una interfaz de usuario intuitiva y amigable que permita la supervisión y control de las operaciones del robot en tiempo real.
- Validar el funcionamiento del robot sembrador de maíz mediante una evaluación comparativa de su desempeño frente a métodos tradicionales y tecnologías existentes en el mercado.

III-C. Matriz de Objetivos

OE.	Planteamiento	Meta	Indicador
OE.1	Diseñar los mecanismos de movilidad del robot, utilizando un microcontrolador y sensores adecuados, para un posicionamiento específico dentro de los límites del terreno de cultivo de maíz.	Lograr un posicionamiento preciso del robot en un 90 % de los intentos en un entorno controlado.	Porcentaje de posicionamiento preciso logrado en pruebas controladas.
OE.2	Implementar una interfaz de usuario intuitiva y amigable que permita la supervisión y control de las operaciones del robot en tiempo real.	Desarrollar una interfaz funcional y realizar pruebas de usabilidad, asegurando que la interfaz sea sencilla y fácil de usar.	Porcentaje de satisfacción del usuario en las encuestas de usabilidad.
OE.3	Validar el funcionamiento del robot sembrador de maíz mediante una evaluación comparativa de su desempeño frente a métodos tradicionales y tecnologías existentes en el mercado.	Realizar pruebas de siembra comparativas, logrando un error de siembra inferior al 10 % en comparación con métodos tradicionales.	Porcentaje de error de siembra en las pruebas comparativas.

IV. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

IV-A. Robots

IV-A1. Definición y Clasificación de Robots.: De acuerdo con Reyna (2017)[7], la palabra robot”proviene del inglés y tiene su origen en el término checo robot”, que a su vez deriva de robota”, que significa ”trabajo.º ”servicio personal”(pág. 19). Un robot se define como una máquina programable capaz de llevar a cabo tareas de forma autónoma o semi-autónoma véase en la Figura 1. Está diseñado para interactuar con su entorno, ya sea físico o virtual, y desempeñar diversas funciones. Los robots pueden presentar una amplia variedad de formas y tamaños, abarcando desde grandes robots industriales empleados en fábricas hasta pequeños y compactos robots destinados para uso doméstico.



Figura 1. Robots repartidores [8].

Existen robots espaciales que aportan al descubrimiento de los elementos o espacios del universo, así como, la observación de los fenómenos que se dan en el mismo. Por último, los robots inteligentes que comprenden el ambiente donde ejecutan sus funciones y generan un apoyo en las actividades que presentan mayor dificultad o esfuerzo para los seres humanos[9].

Los robots están dotados de diversos sensores, como cámaras, micrófonos, detectores de movimiento y sensores táctiles, que les permiten captar información sobre su entorno. Además, poseen actuadores, como motores y brazos robóticos, que les facilitan llevar a cabo acciones físicas[10]. Estos robots están equipados con un sistema de control que procesa la información recibida, toma decisiones y ejecuta acciones conforme a su programación o interacción con el entorno. Su versatilidad permite su aplicación en una amplia gama de áreas, incluyendo la manufactura industrial, la exploración espacial, la atención médica, la agricultura, la limpieza del hogar, la investigación científica y el apoyo a personas con discapacidades. Su habilidad para realizar tareas con alta eficiencia y precisión los convierte en herramientas valiosas en múltiples disciplinas[11].

IV-A2. Clasificación de Robots.: Hay diversas clasificaciones de robots que van acorde a su aplicación y/o uso, por ejemplo; existen robots de reproducción en que se implementa un operador que educa al robot a replicar un movimiento. Otros son de servicio, siendo de beneficio en las actividades que comete el individuo en su desarrollo humanístico[12]. En el ámbito de la educación, los robots se enfocan en ser aporte al desarrollo pedagógico y las metodologías de enseñanza aprendizaje, se pueden adquirir a través de kits que incluyen sensores, motores, poleas, engranes, entre otros suministros para su construcción. Por otra parte, están los robots militares que son empleados con fines bélicos y para seguridad de los ciudadanos, por ejemplo; pueden desactivar bombas o ser un arma de defensa, siempre y cuando estas máquinas tecnológicas estén programadas para alcanzar los objetivos

preestablecidos.

Dentro del amplio ámbito de la robótica, la diversidad de aplicaciones y funciones se expone a través de una clasificación minuciosa que engloba diversas perspectivas. En primer plano, la aplicación específica de los robots desvela su versatilidad funcional:

Los robots industriales, concebidos con meticulosidad, desempeñan un rol esencial en entornos de fabricación, llevando a cabo tareas que abarcan desde la soldadura y el ensamblaje hasta la aplicación de pintura. Su contribución se traduce en mayor eficiencia y precisión en los procesos industriales[13]. Por otro lado, los robots médicos han surgido como aliados cruciales en el ámbito de la salud, participando activamente en cirugías y procedimientos médicos, mejorando la precisión y posibilitando intervenciones más seguras. Los robots de servicio, diseñados para simplificar la vida cotidiana, se manifiestan en forma de aspiradoras automáticas y robots de limpieza, asumiendo labores domésticas y de asistencia para liberar a los seres humanos de tareas repetitivas. Los robots militares, con aplicaciones en diversas operaciones, ilustran la evolución tecnológica que ha permeado también en el ámbito de la defensa y la seguridad véase en la Figura 2 el ejemplo de un robots agricultor.



Figura 2. Robots autónomos [14].

En cuanto a la movilidad, los robots móviles exhiben la capacidad de desplazarse, como se ejemplifica en los robots exploradores en Marte, mientras que los robots estacionarios permanecen fijos, concentrándose en ejecutar tareas específicas de manera eficiente.

La diversidad estructural y de diseño de los robots constituye otro aspecto crucial que moldea su funcionalidad:

- Robots con ruedas, que incorporan este elemento para facilitar su movimiento.
- Robots con patas, dotados de extremidades para lograr una movilidad más versátil, encontrando aplicación en la exploración de terrenos desafiantes.
- Robots con brazos articulados, desempeñando un papel destacado en aplicaciones industriales y de manipulación precisa.

La autonomía, un atributo esencial, clasifica a los robots de acuerdo con su capacidad de operación sin intervención humana:

- Robots teleoperados, controlados directamente por operadores humanos.

- Robots autónomos, capaces de ejecutar tareas de manera independiente, gracias a la integración de sensores y programas de control.

En términos de complejidad, se distinguen entre robots simples, que realizan tareas básicas y repetitivas, y robots avanzados, equipados con inteligencia artificial que les permite enfrentar tareas más complejas y adaptarse a entornos dinámicos y cambiantes. La fuente de energía también marca una diferencia significativa en la clasificación de los robots:

- Robots eléctricos, que operan mediante la energía eléctrica.
- Robots aéreos, como drones y otros vehículos voladores no tripulados.
- Robots hidráulicos, que emplean sistemas hidráulicos para la manipulación precisa y eficiente de objetos.

IV-A3. Aplicaciones de Robots en la Agricultura: En el ámbito de la plantación y siembra automatizada, se encuentran robots meticulosamente diseñados con la capacidad de plantar semillas de manera precisa y eficiente. Adicionalmente, se han desarrollado sistemas de siembra automatizados que optimizan la distribución estratégica de las semillas en el suelo, mejorando así la productividad agrícola[15]. En lo que respecta a la cosecha automatizada, destacan los robots cosechadores capaces de recolectar frutas, verduras o cultivos específicos de manera autónoma. A su vez, los sistemas de recolección automatizados han demostrado ser eficientes al mejorar la productividad agrícola y reducir la dependencia de la mano de obra manual.

Para el manejo de plagas y enfermedades en los cultivos, se han implementado drones equipados con cámaras y sensores especializados para monitorear las plantaciones y detectar signos tempranos de plagas o enfermedades[16]. Además, robots terrestres han sido diseñados para aplicar pesticidas de manera selectiva, contribuyendo así a la reducción del uso de productos químicos en la agricultura. En el desmalezado y mantenimiento de cultivos, robots equipados con sistemas de visión llevan a cabo la identificación y eliminación precisa de malas hierbas. Asimismo, sistemas de mantenimiento automatizado que incluyen labores de poda y cuidado de cultivos se han integrado para mejorar la salud y productividad de los cultivos.

El monitoreo y gestión de cultivos ha experimentado avances con la introducción de robots equipados con sensores especializados para evaluar la salud de los cultivos, niveles de humedad del suelo y condiciones climáticas[17]. Paralelamente, sistemas de gestión agrícola que hacen uso de la inteligencia artificial han revolucionado la toma de decisiones informadas mediante el análisis de datos recopilados. En el ámbito de la automatización en invernaderos, robots específicamente diseñados asumen diversas tareas, desde el traslado de plantas hasta la gestión controlada de la temperatura y la humedad. Sistemas automatizados de riego y fertilización, controlados por robots, contribuyen a la eficiencia y precisión en el cultivo bajo condiciones controladas[18]. Los robots ganaderos han emergido como herramientas esenciales, utilizando drones para monitorear el estado de los rebaños desde el aire y robots terrestres para el cuidado y alimentación del ganado. Estos avances optimizan la gestión del ganado, asegurando su bienestar y mejorando la eficiencia en las operaciones ganaderas.

IV-B. Diseño del Robot Móvil

En el proceso de concepción del robot móvil destinado a la siembra de maíz, el diseño abarca no solo la eficiencia operativa, sino también la capacidad de adaptarse a diversas condiciones del terreno y la robustez del sistema[19]. La estructura del chasis se planifica meticulosamente para resistir terrenos variables, brindando estabilidad y fortaleza frente a condiciones adversas como desniveles, irregularidades del suelo y la posible presencia de obstáculos.

En términos de movilidad, se considera esencial la incorporación de sistemas de suspensión avanzados que aseguren un desplazamiento suave y preciso. La optimización de la tracción y el control de las ruedas se vuelve crucial para ajustarse a diferentes tipos de suelo, garantizando así una distribución uniforme de las semillas durante el proceso de siembra[20]. Además, el diseño contempla la modularidad como un elemento clave, facilitando la integración y actualización sencilla de componentes. Esta característica posibilita la incorporación de nuevas

tecnologías y la adaptación del robot a futuras innovaciones en el ámbito de la agricultura de precisión.

En relación con la capacidad de carga y almacenamiento de semillas, se aborda la optimización del espacio y la distribución equitativa de las semillas como aspectos prioritarios para asegurar una siembra eficiente y uniforme[21]. La implementación de sistemas de carga automatizada y contenedores específicos para el maíz se presenta como una contribución significativa para maximizar la productividad del robot en el proceso de siembra.

IV-B1. Robots Móviles Terrestres: En el contexto de los Robots Móviles Terrestres, es esencial comprender cómo se modela y describe la posición y orientación de estos robots. El diseño del robot se representa como un cuerpo rígido con ruedas que se mueve en un plano horizontal. Este diseño proporciona una descripción simplificada del robot, considerando principalmente los movimientos en el plano y la rotación alrededor del eje vertical [22]

El chasis del robot tiene tres grados de libertad en el plano: dos para la posición (representados por las coordenadas x e y) y uno para la orientación (representado por el ángulo θ). Estos parámetros definen completamente la configuración del robot en el plano. Los ejes X_I y Y_I se utilizan para establecer un sistema de coordenadas global en el plano, con el origen en el punto O , tal como lo muestra la Figura 3.

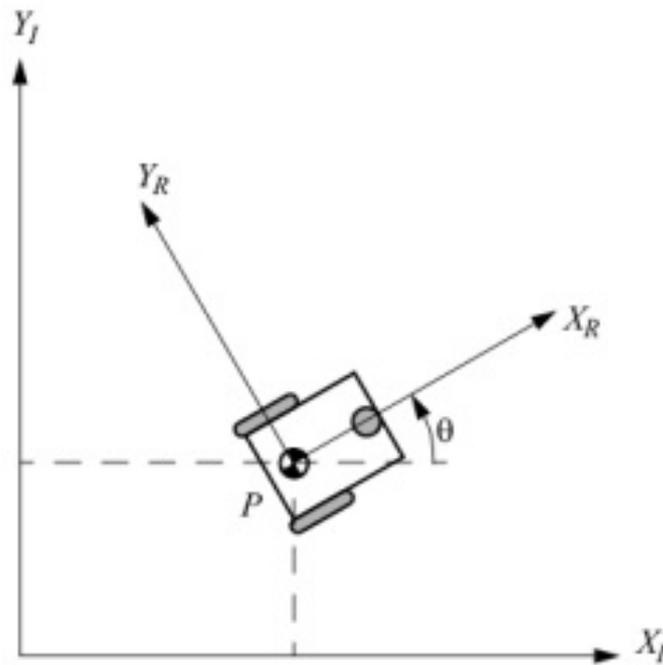


Figura 3. Posicionamiento del Robot [22].

Para describir la posición del robot de manera más detallada, se elige un punto de referencia P en el chasis. La base X_R, Y_R define dos ejes relativos a P en el robot, creando así un sistema de coordenadas local. Esta elección de punto de referencia y sistema de coordenadas locales facilita la descripción precisa de la posición y orientación del robot[22].

La configuración del robot con respecto al marco inercial se expresa mediante el vector $\xi_I = [x, y, \theta]$. Este vector contiene las coordenadas x e y que representan la posición del punto de referencia P , y el ángulo θ que indica la orientación del chasis. La velocidad del robot se describe mediante el vector $\dot{\xi}_I = [\dot{x}, \dot{y}, \dot{\theta}]$, que especifica las tasas de cambio respectivas[23].

La relación entre las coordenadas en los marcos R (local) e I (inercial) se establece mediante una transformación que consta de un componente de traslación y otro de rotación alrededor del eje Z_I . Esta rotación se expresa en términos de θ utilizando una matriz de rotación. Esta relación matemática es fundamental para convertir las coordenadas locales a las coordenadas globales y viceversa, permitiendo una descripción coherente de la posición y orientación del robot en diferentes marcos de referencia[22].

La relación entre las coordenadas en los marcos R (local) e I (inercial) se establece mediante una transformación que consta de un componente de traslación y otro de rotación alrededor del eje Z_I . Esta rotación se expresa en términos de θ utilizando una matriz de rotación. Esta relación matemática es fundamental para convertir las coordenadas locales a las coordenadas globales y viceversa, permitiendo una descripción coherente de la posición y orientación del robot en diferentes marcos de referencia.

IV-B2. transmisión diferencial: El mecanismo de transmisión diferencial, una opción ampliamente utilizada en robótica móvil, consiste en la disposición de dos ruedas fijas estándar con motores independientes, colocadas a los lados derecho e izquierdo del robot[24]. En ocasiones, este mecanismo puede complementarse con una o dos ruedas pasivas tipo castor para brindar mayor estabilidad al robot.

La operación de este sistema se basa en el control independiente de la velocidad de las ruedas fijas, lo que permite direccionar el movimiento del robot de manera eficiente. Si ambas ruedas giran a la misma velocidad y en la misma dirección, el robot se desplazará hacia adelante o hacia atrás. En cambio, si giran a la misma velocidad pero en direcciones opuestas, el robot realizará un giro en su propio eje. Por último, si una rueda gira mientras la otra permanece estática, el centro de rotación del robot estará ubicado en la rueda que no está en movimiento.

En la Figura 4 se puede apreciar sobre el mecanismo ofrece diversas ventajas, como su eficacia en terrenos planos, su diseño sencillo y su fácil implementación. Además, brinda la posibilidad de seleccionar el centro de rotación del carro, dependiendo del funcionamiento de los motores, lo que aporta flexibilidad en la planificación del movimiento[25].

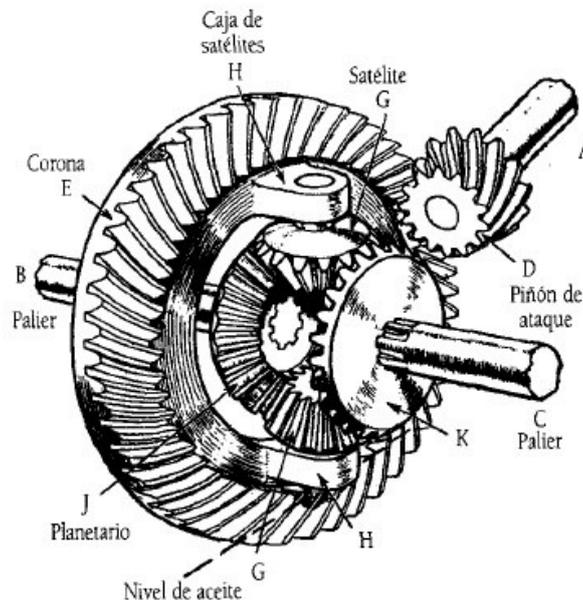


Figura 4. Transmisión diferencial [26].

Sin embargo, se deben considerar algunas desventajas. Controlar el direccionamiento en línea recta puede ser más complejo en comparación con otros sistemas, ya que las ruedas con motores de impulso son independientes. Asimismo, este mecanismo puede resultar ineficiente al enfrentarse a obstáculos, limitando su rendimiento en entornos con desafíos adicionales[27].

IV-B3. Sistema de Transmisión con Rueda Única para Robots Móviles: En la concepción de robots móviles, la simplicidad y eficacia se encuentran en el diseño elemental que incorpora una única rueda con sistemas de transmisión y dirección[28]. En este enfoque, la disposición consta de una rueda activa con mecanismos de impulso y dirección, y para asegurar la estabilidad, se incorporan dos ruedas pasivas adicionales, conocidas como ruedas castor, que mantienen tres puntos de contacto con la superficie.

El funcionamiento básico de este diseño es notable en su versatilidad de movimiento. Cuando se requiere desplazarse en línea recta, la rueda activa se posiciona en cero grados, su posición natural[29]. En cambio, para realizar curvas y giros, la rueda se ajusta en el ángulo deseado, permitiendo al robot adaptar su trayectoria con agilidad y precisión. Por tal motivo se propuso la Figura 5 en donde muestra diferentes tipos de ruedas que se pueden utilizar para el empleo de un robot diseñado para los trabajos agrícolas.

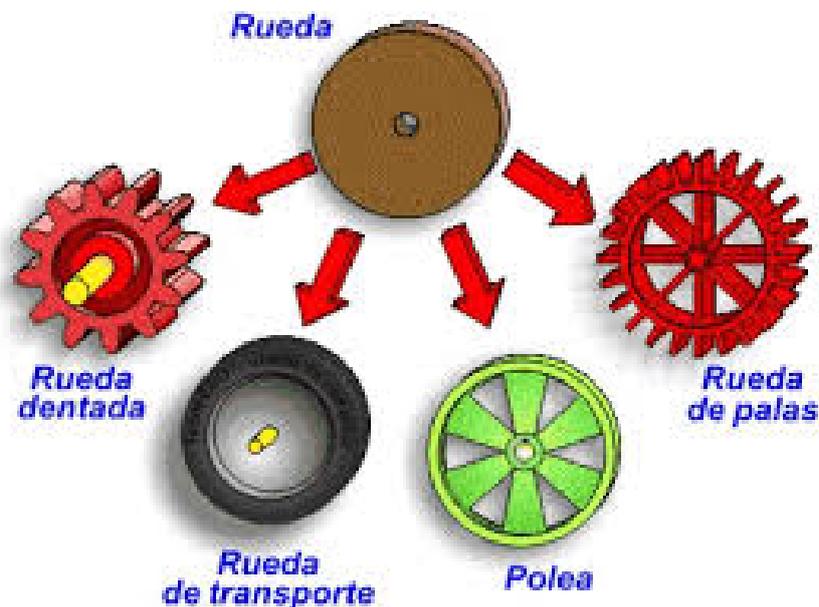


Figura 5. Tipos de rueda [30].

Entre las ventajas notables de esta configuración se encuentra su eficiencia energética, siendo caracterizada por un bajo consumo de potencia. La simplicidad en su diseño y su facilidad de control son atributos destacados, lo que facilita la implementación y operación del robot[31]. Además, su construcción de bajo costo lo convierte en una opción atractiva para diversas aplicaciones.

No obstante, es vital considerar las limitaciones de este sistema, ya que su idoneidad se ve restringida a entornos interiores. La falta de tracción en superficies irregulares o exteriores constituye una desventaja significativa, lo que limita su aplicación en escenarios que demandan mayor adherencia y capacidad de sortear obstáculos[32].

IV-B4. Especificaciones del Hardware: En cuanto a las especificaciones del hardware, se requiere una cuidadosa selección de componentes para asegurar un rendimiento óptimo. El sistema debe contar con motores adecuados para la movilidad del robot, así como sensores que permitan recopilar datos sobre el entorno y optimizar la

navegación[33]. La elección de baterías eficientes y duraderas es esencial para mantener la autonomía del robot durante las operaciones de siembra. Asimismo, la integración de un sistema de posicionamiento GPS preciso y confiable es fundamental para garantizar la exactitud en la ubicación y distribución de las semillas de maíz. Se debe considerar la conectividad y comunicación entre los diferentes componentes del hardware para facilitar un funcionamiento coordinado y eficiente del robot móvil[34].

IV-B5. Estructura: Un robot está compuesto por articulaciones que posibilitan la ejecución de movimientos, ya sean sucesivos, repetitivos o lineales, según la naturaleza de la tarea que deba llevar a cabo, por tal motivo se propuso la Figura 6 en donde muestra un ejemplo de un robot a escala y como se encuentra estructurado. Estos movimientos permiten al robot realizar desplazamientos y giros de manera simultánea y coordinada[29]. La totalidad de estos movimientos se denomina grados de libertad, los cuales son programados en función de la tarea específica y la finalidad del dispositivo robótico creado. En este proceso de programación se detallan los giros, rotaciones y articulaciones que el robot incorporará para cumplir con su función de manera eficiente[32].

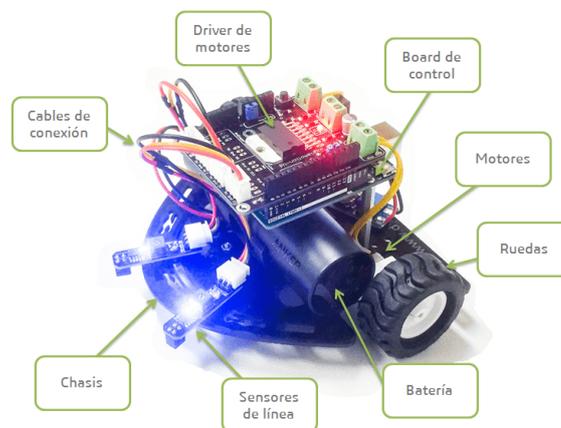


Figura 6. Estructura [4].

IV-B6. Computadora a Bordo: La computadora a bordo es el núcleo de procesamiento del robot móvil diseñado para el sembrado de maíz. Se trata de una unidad de procesamiento de última generación, equipada con la capacidad de ejecutar algoritmos especializados en control y toma de decisiones[4].

Con esta implementación, se espera que esta computadora a bordo esté programada con algoritmos que permitan la planificación de rutas óptimas para el sembrado, teniendo en cuenta variables como la topografía del terreno, las distancias entre filas de siembra y la cantidad de semillas a ser depositadas en cada punto[22]. La integración de técnicas de aprendizaje automático puede permitir al robot adaptarse y mejorar continuamente su rendimiento a lo largo del tiempo, ajustando sus decisiones en base a la retroalimentación obtenida durante las operaciones de siembra.

IV-B7. Sistemas de Prevención de Errores: La seguridad y precisión son elementos cruciales en la operación del robot de siembra, los sistemas de prevención de errores desempeñan un papel fundamental[35]. Estos sistemas incorporarán mecanismos redundantes, como sensores adicionales y actuadores de respaldo, con el objetivo de garantizar que el robot pueda mantener su funcionalidad en caso de fallos en algún componente.

Además, se implementarán algoritmos y protocolos de seguridad que detecten posibles errores durante la operación, como la pérdida de señal GPS, mal funcionamiento de sensores o condiciones ambientales adversas[10].

Estos sistemas no solo identificarán los errores, sino que también tomarán medidas correctivas para minimizar el impacto en la operación y asegurar la integridad del proceso de siembra.

IV-B8. Chasis y Estructura: El chasis y la estructura del robot móvil estarán diseñados con un enfoque en la resistencia y robustez necesaria para enfrentar las condiciones del terreno agrícola[11]. Se utilizarán materiales duraderos y livianos, como aleaciones de aluminio o acero inoxidable, para garantizar la estabilidad y durabilidad del robot.

El diseño del chasis se optimizará para soportar las demandas específicas del sembrado de maíz, incluyendo la capacidad de navegar en terrenos irregulares y sortear obstáculos. Además, se considerará la disposición de los componentes electrónicos y mecánicos para facilitar el mantenimiento y reparación en caso de ser necesario.

IV-B9. Sistema de Autodiagnóstico: El sistema de autodiagnóstico es esencial para la eficiencia y confiabilidad del robot de siembra. Este sistema incorporará sensores y algoritmos específicos diseñados para monitorear continuamente el estado de los componentes críticos del robot[10]. En caso de detectar cualquier anomalía o mal funcionamiento, el sistema de autodiagnóstico generará alertas y reportes en tiempo real.

La capacidad de identificar y reportar problemas de manera automática permitirá a los operadores y técnicos realizar diagnósticos rápidos y efectivos, facilitando la resolución de problemas y reduciendo el tiempo de inactividad del robot. Esto contribuirá significativamente a la eficiencia operativa del sistema.

IV-B10. Interfaz de Usuario: La interfaz de usuario proporcionará una plataforma amigable y accesible para la programación, monitoreo y control manual del robot durante las operaciones de siembra. Se diseñará un software intuitivo que permita a los operadores planificar rutas, establecer parámetros de siembra y monitorear el estado general del robot[36].

Además, la interfaz facilitará la integración con sistemas de gestión agrícola más amplios, permitiendo a los usuarios recopilar datos detallados sobre el rendimiento del robot y las condiciones del cultivo. Esto contribuirá a la toma de decisiones informadas y a la optimización continua de las operaciones agrícolas.

IV-C. Sistema de navegación

El monitoreo continuo de los campos, a través de la recopilación de información, facilita la identificación temprana de problemas y permite tomar decisiones oportunas. La agricultura de precisión se beneficia significativamente del uso de sensores y sistemas de navegación, que son cruciales para la recolección de datos y la toma de decisiones informadas. Los sensores agrícolas miden y supervisan diversas variables en el campo, proporcionando datos esenciales para optimizar las prácticas agrícolas[33].

Según Smith (2019)[37], los sensores juegan un papel fundamental en la agricultura de precisión al medir parámetros clave como la humedad del suelo, la temperatura, la conductividad eléctrica y la reflectancia de los cultivos. La información detallada que estos sensores proporcionan sobre el estado de los cultivos y el entorno agrícola permite a los agricultores tomar decisiones más precisas y fundamentadas (pág. 61).

Además de los sensores, los sistemas de navegación son esenciales en la agricultura de precisión. Empleando tecnologías como el GPS, estos sistemas proporcionan una ubicación precisa y permiten el seguimiento del equipo agrícola en el campo así se puede apreciar en la Figura 7. Esto facilita la delimitación de áreas específicas, la planificación de rutas y la aplicación precisa de insumos agrícolas, lo que mejora la eficiencia y el uso de los recursos. La combinación de sensores y sistemas de navegación se está volviendo cada vez más común en la agricultura de precisión[38].

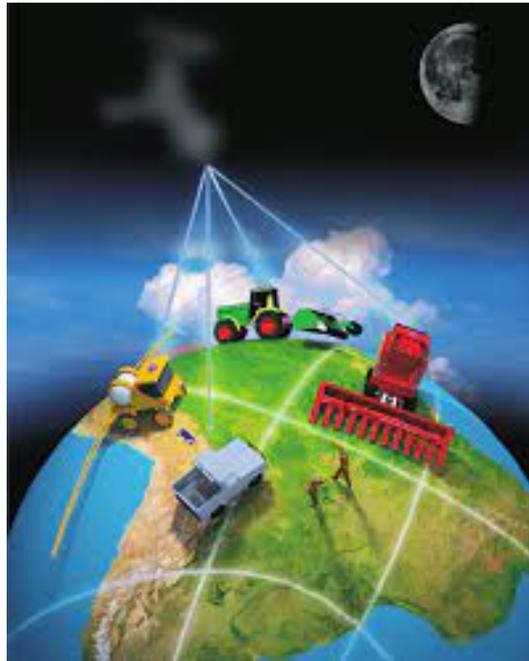


Figura 7. Sistema de Posicionamiento Global [14].

Li (2021)[39] destaca la importancia de los sistemas de navegación integrados, que combinan datos de sensores con tecnologías de navegación. Estos sistemas proporcionan una precisión superior en la ubicación y orientación de los equipos agrícolas, lo que resulta en una aplicación más eficiente de insumo y un mejor desempeño de los cultivos (pág. 197).

IV-D. Sensores de Posicionamiento Global (GPS)

Los sensores de posicionamiento global (GPS) son dispositivos fundamentales en el contexto del desarrollo del robot móvil para el sembrado de maíz. Estos receptores GPS de alta precisión permiten determinar la ubicación exacta del robot en el campo. Esta información es esencial para la planificación de rutas, la geolocalización precisa de las áreas sembradas y el seguimiento detallado de la operación agrícola. Los sensores GPS proporcionan coordenadas geográficas precisas, lo que contribuye a la eficiencia y precisión en la ejecución de las tareas de siembra.

IV-D1. Sensores de Odometría: Los sensores de odometría juegan un papel crucial en la medición precisa de la distancia recorrida por el robot móvil. Estos sensores, ubicados en las ruedas o patas del robot, registran el movimiento y contribuyen a la estimación precisa de la posición. La información proveniente de los sensores de odometría es fundamental para corregir posibles errores acumulativos en la estimación de la posición del robot, garantizando así una navegación precisa y confiable durante todo el proceso de siembra.

IV-D2. Sistemas de Visión Computarizada: La implementación de sistemas de visión computarizada en el robot móvil para el sembrado de maíz permite la captura, procesamiento y análisis de información visual del entorno circundante[12]. Mediante el uso de cámaras y algoritmos especializados, el sistema de visión computarizada permite al robot identificar obstáculos, marcadores de referencia y, lo más crucial, la ubicación precisa de los puntos de siembra. Esta capacidad de percepción visual contribuye significativamente a la adaptabilidad del robot ante condiciones variables del terreno y la toma de decisiones autónomas durante la operación de siembra.

IV-D3. Unidad de Control de Navegación: La unidad de control de navegación es el componente central encargado de procesar la información proveniente de los sensores, tanto GPS, de odometría como de visión

computarizada[40]. Esta unidad ejecuta algoritmos de control y toma de decisiones que permiten al robot mantener una navegación autónoma y optimizada. La unidad de control ajusta la ruta y la velocidad del robot en tiempo real, teniendo en cuenta la información recibida, y contribuye a la eficiencia y precisión del proceso de siembra.

IV-D4. Sistemas de Comunicación: Los sistemas de comunicación integrados en el robot móvil posibilitan la transmisión de datos esenciales para su operación. Estos módulos permiten la recepción de señales de satélites GPS para la actualización constante de la ubicación del robot[2]. Además, facilitan la comunicación remota con un centro de control, lo que puede ser crucial para la supervisión de la operación, la corrección de parámetros y la recepción de comandos a distancia. La conectividad efectiva garantiza una operación coordinada y una respuesta rápida ante cambios en las condiciones del entorno.

IV-D5. Módulos Anti-Colisión: Los módulos anti-colisión son elementos críticos en términos de seguridad y prevención de accidentes durante la operación del robot. Estos módulos incorporan sensores ultrasónicos, láser o de otro tipo, diseñados para detectar obstáculos en el camino del robot[41]. La información recopilada por estos sensores permite al robot ajustar su trayectoria, evitando colisiones y garantizando la integridad tanto del robot como del entorno agrícola circundante. La implementación efectiva de módulos anti-colisión es esencial para la operación autónoma segura y eficiente del robot durante las fases de siembra.

IV-D6. Sensores y su Aplicación en Agricultura Robótica: En el ámbito de la agricultura robótica, la utilización de diversos sensores desempeña un papel crucial para mejorar la eficiencia y la gestión de los cultivos. Cada tipo de sensor posee funciones específicas que contribuyen a la toma de decisiones precisa y a la optimización de los recursos agrícolas[41]. Los sensores de proximidad ultrasónicos, por ejemplo, permiten a los robots evitar colisiones y mantener distancias seguras mientras se desplazan por el entorno agrícola. Miden la distancia entre el sensor y los objetos circundantes mediante ondas ultrasónicas.

Los sensores de infrarrojos, por otro lado, evalúan la temperatura de los cultivos y del suelo al detectar la radiación infrarroja emitida por los objetos. Este tipo de sensor es valioso para la gestión del riego y la monitorización de la salud de las plantas[42]. Las cámaras RGB, al capturar imágenes en el espectro visible de luz, permiten el monitoreo visual de los cultivos, facilitando la detección de enfermedades y el análisis de la salud vegetal. En contraste, las cámaras multiespectrales se centran en diversas bandas del espectro, incluido el infrarrojo cercano, para proporcionar información más detallada sobre la salud de los cultivos.

El LIDAR, mediante la emisión de pulsos láser, contribuye a la navegación y mapeo tridimensional del terreno, siendo esencial para planificar rutas y evitar obstáculos en robots agrícolas. El GPS, en cambio, brinda información de ubicación precisa, utilizada para el seguimiento de vehículos agrícolas y el mapeo detallado de parcelas[25]. Sensores específicos, como los de humedad del suelo, son esenciales para la gestión eficiente del riego al proporcionar datos sobre el contenido de agua en el suelo. Mientras tanto, los sensores de velocidad del viento evalúan la dirección y velocidad del viento, informando sobre el riesgo de dispersión de plaguicidas y permitiendo una aplicación más eficaz de sustancias químicas.

IV-D7. Fusión de Sensores en Sistemas Robóticos: La dependencia exclusiva de un solo sensor en un sistema robótico conlleva desafíos considerables asociados a posibles puntos de falla, incertidumbres inherentes y rangos de medición limitados[25]. Ante estos problemas, surge la necesidad de emplear diversas técnicas de fusión de sensores, que se encargan de mitigar estas limitaciones al coordinar diferentes tipos de sensores en el sistema robótico.

La motivación principal detrás de la fusión de sensores radica en abordar los errores inherentes a las mediciones, tales como el ruido y la incertidumbre[43]. Este término abarca cualquier proceso que involucre la combinación de información proveniente de múltiples sensores para generar una medición única. Tres estrategias fundamentales se

utilizan para llevar a cabo esta fusión: redundante, coordinada y complementaria.

La estrategia de sensores redundantes, también conocida como competitiva, permite que los sensores compitan por ofrecer la percepción más precisa. Por otro lado, la estrategia de sensores coordinados utiliza una secuencia de sensores, a menudo diseñados para proporcionar un enfoque de atención específico[44]. En contraste, la estrategia de sensores complementarios ofrece tipos distintos de información sobre un objeto, enriqueciendo así la comprensión general.

En situaciones donde un sensor particular es propenso a imprecisiones o ruido, la incorporación de múltiples sensores puede proporcionar datos más confiables y coherentes[10]. Agregar un segundo sensor, en esencia, otorga otro voto a favor de una percepción específica. La redundancia se manifiesta cuando dos sensores ofrecen la misma percepción, lo que contribuye a la validación y fiabilidad de los resultados.

La fusión de sensores se revela como una respuesta a la falta de una tecnología única óptima para la automatización de vehículos en todos los escenarios[16]. La elección del sensor más adecuado depende del entorno específico de aplicación, y en todos los casos, la integración de información proveniente de múltiples sensores abre oportunidades para lograr resultados superiores a los obtenidos con un único sensor.

En la agricultura, las técnicas de fusión sensorial se aplican utilizando diversos métodos como análisis probabilístico, lógica difusa, filtros de Kalman Extendidos (EKF) y otros algoritmos para resolver sistemas lineales y no lineales, así como algoritmos evolutivos, entre otros[45]. Estas estrategias avanzadas no solo mejoran la precisión de las mediciones, sino que también permiten una toma de decisiones más informada y eficiente en este campo específico.

IV-E. Agricultura de precisión

La planta del maíz es originaria del grupo de los “poaceae”, de la zona tropical de América. “Es un producto de gran relevancia a nivel global por su amplitud en la cadena de valor, su aporte es en la alimentación del ser humano, del animal y piscícola, hasta su procesamiento en plantas que poseen un elevado nivel tecnológico”[37]. El resultado final de la producción de este cereal puede ser componentes que sirven en la elaboración de bienes de utilidad química o a su vez, para consumo alimenticio. En temporada de lluvia, es decir, en los primeros seis meses del año, también se puede cultivar y sacar provecho de los beneficios del suelo que está regado de manera natural.

En las provincias de la Sierra, especialmente en el norte, como Pichincha, Carchi e Imbabura, se observa una amplia distribución de cultivos. En estas áreas, el maíz amarillo harinoso se produce de manera constante. En la región central de la Sierra, que incluye Cotopaxi, Chimborazo, Tungurahua y particularmente Bolívar, se cultiva el maíz blanco harinoso. Mientras tanto, en la Sierra sur, en Azuay y Cañar, se destaca el maíz conocido como “zhima” (blanco amorochado)[46]. Según estudios del Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias, de las 29 variedades de maíz identificadas, 17 provienen de la Sierra[46].

En la región costera, se cultiva el maíz borona amarillento duro (cristalino), que es de alta calidad tanto para consumo alimenticio como para la fabricación de balanceados. El proceso de siembra, que implica colocar semillas o plántulas en el suelo con el propósito de cultivarlas[47], es fundamental en la agricultura y la horticultura. Este proceso establece las bases para el crecimiento y desarrollo de las plantas. La siembra debe realizarse de manera que las semillas o plántulas tengan un buen contacto con el suelo y se les proporcione un entorno adecuado para su germinación y crecimiento[48].

Existen diferentes métodos de siembra, como la siembra directa, en almácigos o semilleros, a voleo y en hoyos, que varían según el tipo de cultivo y las prácticas agrícolas utilizadas. Es crucial considerar factores como la

profundidad de siembra, la distancia entre semillas o plántulas, el riego y el cuidado posterior para garantizar el adecuado establecimiento y crecimiento de las plantas. La siembra marca el inicio del ciclo de vida de las plantas cultivadas y es un paso esencial para asegurar una cosecha exitosa[7].

IV-E1. Prácticas agrícolas: Además, el conjunto de principios, normas y sugerencias técnicas conocido como Buenas Prácticas Agrícolas (BPA) tiene como objetivo aplicarse en la producción, procesamiento y traslado de alimentos. Su enfoque se centra en preservar la salud y mejorar las condiciones de los trabajadores y sus familias [49]. Estas prácticas se fundamentan en la aplicación del conocimiento disponible para asegurar el uso sostenible de los recursos, buscando la viabilidad económica y la generación de alimentos saludables, véase en la Figura 8.



Figura 8. Preparación del terreno [50].

IV-E2. Preparación del terreno: Para la preparación del terreno se lleva a cabo un proceso de labranza con una herramienta que combina arado y grada para asegurar un suelo que tenga la capacidad de retener el agua sin provocar estancamientos[14]. Además, se realiza un arado de vertedera con una profundidad que oscila entre 30 y 40 cm, asegurándose de que el terreno esté completamente libre de rastrojos. Es aconsejable seleccionar semillas que exhiban resistencia a enfermedades y plagas antes de iniciar la siembra [51].

IV-F. Tipos de suelo

IV-F1. Suelos Arcillosos: Los suelos arcillosos están compuestos principalmente por partículas de arcilla, lo que les confiere una textura fina y una alta capacidad de retención de agua[52]. Debido a su naturaleza compacta, estos suelos pueden experimentar problemas de drenaje y compactación, lo que puede afectar negativamente el crecimiento de las plantas. Sin embargo, su capacidad para retener nutrientes es notable, lo que puede ser beneficioso en términos de fertilidad.

IV-F2. Suelos Francos: Los suelos francos son una mezcla equilibrada de partículas de arena, limo y arcilla. Esto les proporciona una textura moderada y una capacidad equitativa tanto de retención de agua como de drenaje[53]. Su equilibrio permite un buen desarrollo de las raíces y facilita la disponibilidad de nutrientes para las plantas. Estos suelos son considerados ideales para la agricultura, ya que proporcionan un entorno propicio para el crecimiento de una variedad de cultivos.

IV-F3. Suelos Arenosos: Los suelos arenosos están constituidos principalmente por partículas de arena, lo que les confiere una textura gruesa y una excelente capacidad de drenaje[52]. Aunque permiten un rápido paso del agua, su capacidad de retención de nutrientes es limitada. Estos suelos son propicios para el cultivo de plantas que prefieren un drenaje rápido y no son sensibles a la falta de retención de agua, pero pueden requerir una gestión cuidadosa para mantener la fertilidad.

IV-F4. Suelos Limosos: Los suelos limosos contienen una proporción elevada de partículas de limo, otorgándoles una textura suave y sedosa. Poseen una capacidad de retención de agua y nutrientes intermedia entre los suelos arcillosos y arenosos[53]. Estos suelos son beneficiosos para la agricultura, ya que ofrecen una buena retención de agua sin experimentar problemas de compactación. Su capacidad para proporcionar nutrientes a las plantas es favorable, convirtiéndolos en suelos productivos para el cultivo, ver en la Figura 9.



Figura 9. TIPOS DE SUELOS [54].

IV-F5. Siembra: Cuando la temperatura del suelo alcance los 12°C, se procede a sembrar a una profundidad de 5 cm, optando por un método llano, a golpes o a surcos. Se sugiere llevar a cabo la siembra en el mes de abril. En el caso del maíz destinado a la producción de granos, se cultiva normalmente con una separación entre surcos que varía de 50 a 120 cm, así tenemos un breve ejemplo en la Figura 10. El maíz muestra una buena adaptación a diversos tipos de suelos, aunque su desempeño es óptimo en suelos con un rango de pH entre 6 y 7. Además, requiere suelos ricos en materia orgánica, profundos y con una adecuada circulación para favorecer el drenaje [51].



Figura 10. Siembra Maíz [52].

IV-F6. Recopilación de Datos: La recopilación de datos en el contexto del desarrollo del robot móvil para el sembrado de maíz implica la utilización de diversas tecnologías avanzadas. Entre estas tecnologías se incluyen sensores, drones y sistemas de posicionamiento global (GPS)[5]. Estas herramientas se emplean para recopilar datos detallados sobre variables agrícolas clave, tales como el rendimiento del cultivo, la calidad del suelo, niveles de humedad y otros parámetros relevantes. La recopilación de datos exhaustivos proporciona la base necesaria para la toma de decisiones informadas y la optimización de las prácticas agrícolas.

IV-F7. Análisis de Datos: Una vez recopilados los datos, se procede al procesamiento y análisis detallado de la información. Esto se lleva a cabo mediante el uso de software especializado en análisis de datos y algoritmos diseñados para identificar patrones y variabilidades en el campo[5]. El análisis de datos permite obtener una comprensión profunda de la salud del cultivo y del entorno agrícola, facilitando así la toma de decisiones precisa y estratégica.

IV-F8. Toma de Decisiones Basada en Datos: La toma de decisiones basada en datos es un elemento clave en la gestión agrícola moderna. La información analizada proveniente de la recopilación de datos se utiliza para tomar decisiones informadas y personalizadas. Esto incluye la gestión de recursos como la aplicación de agua, fertilizantes, pesticidas y otros insumos agrícolas. La capacidad de tomar decisiones basadas en datos contribuye a la eficiencia operativa y a la optimización de la producción agrícola.

IV-F9. Gestión de Variabilidades Espaciales: La gestión de variabilidades espaciales implica el reconocimiento y consideración de las diferencias dentro de un campo agrícola. Esto implica ajustar las prácticas agrícolas según las variaciones en la calidad del suelo, rendimiento del cultivo y otros factores específicos de cada área del campo[13]. La implementación de estrategias que respondan a estas variabilidades contribuye a maximizar el rendimiento del cultivo y minimizar el desperdicio de recursos.

IV-F10. Uso Eficiente de Recursos: El enfoque principal del uso eficiente de recursos es evitar el uso indiscriminado y optimizar la distribución de insumos agrícolas según las necesidades específicas de cada área del campo[31]. La información recopilada y analizada se utiliza para determinar la cantidad precisa de recursos necesarios en cada sección del campo, lo que resulta en una aplicación más eficiente y sostenible de agua, fertilizantes y pesticidas.

IV-F11. Automatización y Tecnología: La automatización y tecnología son componentes esenciales en la gestión agrícola moderna. En el contexto del desarrollo del robot móvil para el sembrado de maíz, se implementan tecnologías automatizadas como vehículos autónomos, drones y robots agrícolas[10]. Estas tecnologías llevan a cabo tareas específicas de manera eficiente y precisa, contribuyendo a la optimización de los procesos agrícolas y a la reducción de la dependencia de la mano de obra manual.

IV-F12. Registro y Documentación: El registro y la documentación son aspectos críticos para el seguimiento y la evaluación de las operaciones agrícolas. Se mantiene un registro detallado de todas las actividades, decisiones y resultados obtenidos a lo largo del proceso[31]. Esta documentación proporciona una referencia valiosa para la planificación futura, el análisis de tendencias y la mejora continua de las prácticas agrícolas. Además, contribuye a la transparencia y trazabilidad de las operaciones, aspectos cada vez más importantes en la agricultura moderna.

IV-G. Rol de la Robótica en la Agricultura de Precisión

La integración de la robótica en la agricultura de precisión ha revolucionado la manera en que se llevan a cabo las prácticas agrícolas, permitiendo una gestión más eficiente y sostenible de los recursos[13]. Veamos con más detalle cómo la robótica influye en diferentes aspectos clave de la agricultura de precisión a continuación:

IV-G1. Siembra y Plantación: Los robots de siembra y plantación desempeñan un papel crucial en la optimización del proceso agrícola inicial. Equipados con tecnología GPS y sistemas avanzados de orientación, estos robots pueden operar con una precisión milimétrica, asegurando la distribución uniforme de semillas a lo largo del campo. Además, algunos modelos pueden ajustar dinámicamente la profundidad de siembra y la cantidad de semillas en función de las variaciones en el tipo de suelo, maximizando así el potencial de crecimiento de los cultivos. La eficiencia en la siembra no solo ahorra tiempo y recursos, sino que también contribuye a una germinación más uniforme y, en última instancia, a un rendimiento de cultivo más consistente[13].

IV-G2. Método tradicionales de siembra: Siembra a Mano

En este método, las semillas son colocadas manualmente en el suelo por los agricultores. Esta práctica, que requiere habilidad y destreza, se utiliza comúnmente en pequeñas parcelas de tierra y ha sido un método esencial en cultivos de subsistencia[4].

IV-G3. Siembra a Voleo: La siembra a voleo implica esparcir las semillas manualmente sobre la superficie del suelo de manera uniforme, sin un patrón específico. Este método, simple y económico, es adecuado para cultivos como legumbres y pastos[4].

IV-G4. Siembra a Chorrillo o Surco: En este enfoque, los agricultores abren surcos o canales en el suelo y depositan las semillas en ellos a intervalos regulares. Posteriormente, se cubren las semillas con tierra, lo que mejora la gestión del espacio y se utiliza comúnmente en cultivos como maíz[4].

IV-G5. Siembra a Golpe: La siembra a golpes implica la inserción manual de semillas en pequeños agujeros en el suelo. Este método, utilizado en cultivos hortícolas, ofrece un mayor control sobre la distancia entre las plantas y es práctico en áreas con espacio limitado[4].

IV-G6. Siembra a Trasplante: En lugar de sembrar directamente en el suelo, las plántulas se cultivan en viveros y luego se trasplantan al campo cuando han alcanzado un tamaño adecuado. Este enfoque, realizado manualmente, permite un control preciso sobre la distribución de las plantas y se utiliza comúnmente en cultivos como tomates y pimientos[4].

IV-G7. Desmalezado y Mantenimiento de Cultivos: Los robots diseñados para desmalezar y mantener cultivos utilizan sistemas de visión computarizada avanzada y algoritmos de aprendizaje automático. Estos sistemas permiten la identificación precisa de malas hierbas, lo que facilita la aplicación selectiva de tratamientos herbicidas[3]. La capacidad de realizar tareas específicas, como la poda de ramas no deseadas o la remoción de plantas no deseadas, mejora la salud general de los cultivos al reducir la competencia por recursos y maximizar la exposición solar. La robótica en el mantenimiento de cultivos no solo aporta precisión sino también una respuesta inmediata a las condiciones cambiantes del campo, proporcionando soluciones ágiles para problemas específicos que puedan surgir.

IV-G8. Sistemas de Riego Autónomos: Los sistemas de riego autónomos aprovechan sensores y actuadores para monitorear y ajustar las necesidades de agua en tiempo real. Sensores de humedad del suelo, combinados con algoritmos predictivos, permiten que estos sistemas determinen cuándo y cuánta agua aplicar en cada área del campo[3]. Además, algunos sistemas incorporan la capacidad de acceder a pronósticos climáticos para anticipar las condiciones meteorológicas y ajustar la programación de riego en consecuencia. La robótica en sistemas de riego autónomos garantiza una distribución eficiente del agua, reduciendo el desperdicio y promoviendo el uso sostenible de este recurso vital.

IV-G9. Manejo de Ganado: En el manejo de ganado, los robots autónomos han introducido mejoras significativas en términos de bienestar animal y eficiencia operativa. Estos robots pueden realizar tareas como la alimentación automática, el monitoreo del estado de salud individual de los animales, e incluso la gestión del pastoreo[3]. La

tecnología de identificación por radiofrecuencia (RFID) se utiliza para rastrear a los animales y recopilar datos sobre su comportamiento y salud. La robótica en el manejo de ganado mejora la eficiencia en la gestión de rebaños, asegurando un cuidado individualizado y reduciendo la carga laboral para los agricultores.

IV-G10. Registro y Análisis de Datos: La robótica contribuye significativamente a la recopilación y análisis de datos agrícolas, proporcionando información valiosa para la toma de decisiones informadas. Los robots agrícolas, equipados con una variedad de sensores, generan datos en tiempo real sobre condiciones del suelo, salud de los cultivos, y otras variables relevantes[3]. Estos datos se almacenan y procesan utilizando software especializado que permite a los agricultores analizar patrones a lo largo del tiempo y tomar decisiones informadas sobre la gestión del campo. La capacidad de registrar y analizar datos de manera precisa y continua permite una mejora continua en las prácticas agrícolas, promoviendo una toma de decisiones más inteligente y adaptativa. En conjunto, la integración de la robótica en la agricultura de precisión ofrece un enfoque integral y tecnológicamente avanzado para la gestión agrícola, maximizando la eficiencia, la sostenibilidad y la productividad en la producción de alimentos.

IV-H. Principios y Funcionamiento del Sistema de Posicionamiento Global (GPS)

IV-H1. Constelación de Satélites: La constelación de satélites desempeña un papel fundamental en el funcionamiento del sistema de posicionamiento global (GPS) para el robot móvil destinado al sembrado de maíz. Esta constelación, compuesta por al menos 24 satélites en órbita terrestre, garantiza una cobertura global efectiva. Cada satélite emite señales continuas que contienen información crucial, como su identificación única, posición orbital y la marca de tiempo de la transmisión[2]. La disposición estratégica de los satélites permite que, desde cualquier punto en la Tierra, el receptor GPS del robot pueda recibir señales de al menos tres satélites simultáneamente, lo que es esencial para llevar a cabo el proceso de triangulación y calcular con precisión la posición del robot en el campo de maíz.

La constante transmisión de señales desde la constelación de satélites hacia la Tierra proporciona una cobertura continua, lo que significa que el robot móvil puede mantener una conexión constante con múltiples satélites en todo momento. Esto resulta crucial para garantizar una precisión constante en el cálculo de la posición, ya que el robot puede seleccionar los satélites óptimos para triangulación en función de su visibilidad y posición relativa. En resumen, la constelación de satélites en órbita alrededor de la Tierra establece la base para la eficacia del sistema GPS, permitiendo al robot móvil recibir y procesar señales cruciales para determinar su ubicación con una precisión excepcional durante la operación de siembra de maíz[4].

IV-H2. Recepción de Señales: La recepción de señales es un proceso clave en el sistema de posicionamiento GPS del robot móvil destinado al sembrado de maíz. Equipado con un receptor GPS altamente sensible, el robot capta las señales emitidas por los satélites de la constelación. Estas señales, que viajan a la velocidad de la luz, contienen datos vitales, incluyendo la identificación del satélite, la posición orbital y, lo más importante, la marca de tiempo de la transmisión[55]. La capacidad del receptor para captar estas señales de manera efectiva es esencial para garantizar mediciones precisas durante el proceso de triangulación.

La recepción de señales no solo implica la capacidad del receptor para "escuchar" las transmisiones de los satélites, sino también para discriminar entre las señales directas y aquellas que pueden reflejarse en objetos circundantes, como edificios o terreno elevado. El robot móvil utiliza técnicas avanzadas de filtrado y procesamiento de señales para minimizar interferencias y mejorar la calidad de la información recibida. Este proceso no solo contribuye a la precisión del cálculo de la posición, sino que también asegura que el robot pueda mantener una conexión estable con los satélites a medida que se desplaza por el campo de maíz, permitiendo una navegación continua y precisa durante la operación de siembra. En consecuencia, la eficiente recepción de señales se convierte en un componente crítico para el rendimiento exitoso del sistema GPS en el contexto de la agricultura robótica[55].

IV-H3. Triangulación: La triangulación es el núcleo del proceso mediante el cual el robot móvil determina su posición con alta precisión en el campo de maíz. Después de recibir señales de al menos tres satélites de la constelación GPS, el receptor en el robot utiliza la información para calcular la distancia a cada satélite. La técnica de triangulación implica la intersección de esferas imaginarias centradas en cada satélite, y el punto de intersección de estas esferas representa la posición exacta del robot en tres dimensiones: latitud, longitud y altitud[55]. Este método geométrico asegura mediciones precisas, permitiendo que el robot determine su ubicación con una exactitud milimétrica.

La triangulación no solo se limita a la determinación de la posición, sino que también se emplea para corregir errores inherentes al sistema, como la demora atmosférica y otros efectos que podrían afectar la velocidad de propagación de las señales GPS. Al utilizar información de múltiples satélites y aplicar algoritmos avanzados, el robot puede compensar estos factores para proporcionar una ubicación más precisa. La triangulación, en combinación con la constante actualización de señales y la sincronización precisa del tiempo, culmina en la capacidad del robot para navegar y operar con un nivel excepcional de exactitud durante la tarea de siembra de maíz, contribuyendo así a la eficiencia global del proceso agrícola[56].

IV-H4. Sincronización de Tiempo: La sincronización precisa del tiempo es esencial para la operación efectiva del sistema GPS en el robot móvil. Cada señal emitida por los satélites incluye información de tiempo que indica cuándo se transmitió la señal. El receptor GPS ajusta su reloj interno al tiempo proporcionado por los satélites, corrigiendo cualquier desfase temporal. La alta precisión de los relojes atómicos a bordo de los satélites contribuye a la sincronización confiable, permitiendo al robot calcular con precisión la diferencia de tiempo entre la emisión de la señal y su recepción[57].

La sincronización de tiempo es esencial para calcular distancias precisas durante la triangulación, ya que cualquier error en el tiempo afectaría directamente la exactitud de la ubicación determinada. Además, la sincronización precisa del tiempo asegura que el robot mantenga una referencia temporal coherente con los satélites a lo largo de su operación en el campo de maíz. Este proceso de ajuste temporal es continuo, permitiendo al robot realizar correcciones en tiempo real y adaptarse a cualquier variación que pueda surgir debido a factores ambientales o cambios en la posición del robot. En resumen, la sincronización de tiempo constituye un componente crítico para la coherencia y fiabilidad del sistema GPS, asegurando la precisión de las operaciones del robot móvil durante el sembrado de maíz[57].

IV-H5. Cálculo de Posición: Una vez completados los procesos de triangulación y sincronización de tiempo, el receptor GPS realiza el cálculo de la posición del robot móvil en coordenadas geográficas precisas. Los algoritmos matemáticos empleados tienen en cuenta diversos factores, como la geometría de la constelación de satélites, la demora atmosférica y la relatividad del tiempo. Estos algoritmos garantizan la máxima precisión en la determinación de la ubicación tridimensional del robot, permitiendo que este se desplace con exactitud milimétrica en el campo de maíz[57].

La información de posición calculada se utiliza de manera dinámica para guiar las operaciones del robot durante el sembrado de maíz. La capacidad de ajustar continuamente la posición en tiempo real permite al robot seguir rutas predeterminadas con precisión y distribuir las semillas de manera uniforme según las coordenadas exactas, ver en la Figura 11. Además, el cálculo de posición proporciona datos detallados que pueden ser registrados y utilizados para análisis posteriores, contribuyendo a una gestión más eficiente del proceso agrícola. En conjunto, el cálculo de posición representa el corazón operativo del sistema GPS en el robot móvil, garantizando una navegación precisa y una ejecución eficiente de las tareas de siembra en el campo de maíz[58].

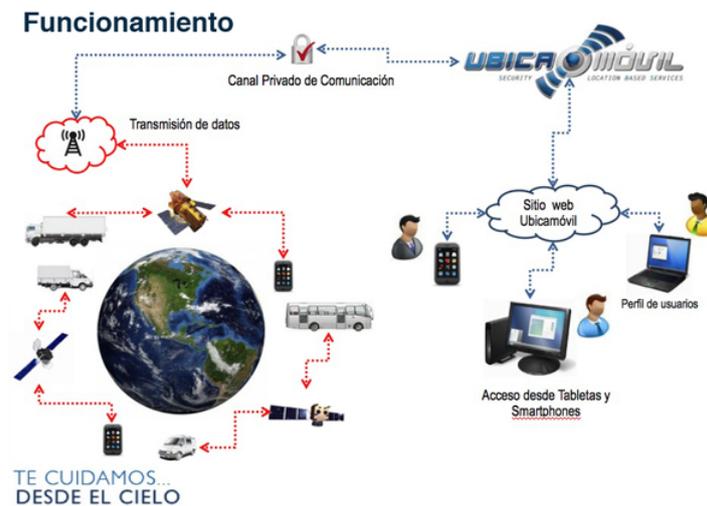


Figura 11. Sistema de Posicionamiento Global [14].

IV-I. Desafíos Actuales en el Proceso de Siembra

IV-11. Costos de Tecnología: La implementación de un robot móvil con sistema de posicionamiento GPS para el sembrado de maíz implica consideraciones significativas en términos de costos. La adquisición de tecnología GPS de alta precisión, junto con los sensores y actuadores necesarios para el funcionamiento del robot, puede representar una inversión considerable. Además, los costos de investigación y desarrollo para personalizar la tecnología según las necesidades agrícolas específicas del sembrado de maíz deben tenerse en cuenta. Sin embargo, es importante destacar que los beneficios potenciales, como la eficiencia en la siembra y la optimización de recursos, pueden justificar estos costos a largo plazo[58].

IV-12. Capacitación y Adaptación: La introducción de un robot móvil en el proceso de siembra de maíz conlleva la necesidad de capacitación y adaptación por parte de los agricultores y operadores. La formación en el manejo de la tecnología GPS, así como en la programación y operación del robot, es esencial para garantizar un uso efectivo. Los agricultores deben familiarizarse con la interfaz del sistema GPS y comprender cómo interpretar y utilizar los datos generados por el robot. La adaptación a esta nueva forma de agricultura implica un cambio en la mentalidad y en las prácticas tradicionales, pero la capacitación adecuada puede facilitar una transición suave y permitir que los agricultores aprovechen al máximo la tecnología[56].

IV-13. Acceso a Tecnología: El acceso a la tecnología GPS puede variar según la ubicación geográfica y los recursos disponibles para los agricultores. En áreas rurales o en países en desarrollo, el acceso a la infraestructura necesaria para la implementación del sistema de posicionamiento GPS puede ser limitado. La disponibilidad de señal satelital y la conectividad a Internet son factores críticos que deben considerarse para garantizar un funcionamiento efectivo del robot móvil. La democratización del acceso a esta tecnología es esencial para permitir que agricultores de diversas regiones se beneficien de las ventajas que ofrece en términos de eficiencia y productividad en la siembra de maíz[58].

IV-14. Compatibilidad de Suelo: La compatibilidad de la tecnología con las características específicas del suelo en el que se realizará el sembrado de maíz es crucial para el éxito del robot móvil. Diferentes tipos de suelos pueden presentar desafíos únicos, como variaciones en la textura, dureza o contenido de humedad. El diseño del robot y la tecnología GPS deben ser adaptables a estas variaciones para garantizar un rendimiento óptimo en diferentes condiciones de suelo[58]. La capacidad del robot para navegar eficientemente y realizar operaciones de siembra de manera precisa en diversos entornos agrícolas dependerá en gran medida de la atención prestada a la compatibilidad

del sistema con la variabilidad del suelo.

IV-15. Sostenibilidad Ambiental: La sostenibilidad ambiental es un aspecto crítico en el desarrollo y operación de un robot móvil para el sembrado de maíz. La tecnología debe ser diseñada con enfoques eco-amigables, minimizando la huella ambiental y reduciendo el impacto negativo en el entorno agrícola. Esto incluye la eficiencia energética del robot, la utilización sostenible de recursos durante la siembra y la minimización de residuos. Además, la implementación de prácticas agrícolas precisas gracias al sistema GPS puede contribuir a una gestión más sostenible del cultivo de maíz al reducir el uso innecesario de insumos y optimizar la distribución de semillas. En última instancia, la integración de la tecnología GPS en el robot móvil no solo busca mejorar la eficiencia operativa, sino también avanzar hacia prácticas agrícolas más sostenibles y respetuosas con el medio ambiente[57].

IV-16. Sistemas de Suspensión y Neumáticos Eficientes: Los sistemas de suspensión y neumáticos eficientes desempeñan un papel crucial en la eficiencia energética y el rendimiento del robot en terrenos agrícolas. Un diseño de suspensión que minimice las vibraciones y amortigüe los impactos ayuda a reducir la resistencia al avance y a mantener una operación suave. Los neumáticos diseñados específicamente para la agricultura ofrecen una tracción óptima con menor resistencia al rodaje, mejorando la eficiencia general del robot en terrenos variables[10].

IV-17. Modos de Operación Eficientes: La implementación de modos de operación eficientes permite al robot adaptarse a diferentes situaciones y demandas operativas. Estos modos pueden incluir configuraciones de bajo consumo para tareas menos intensivas, como la navegación autónoma, y modos de alto rendimiento para operaciones críticas, como la siembra. Al ajustar dinámicamente su rendimiento, el robot puede maximizar la eficiencia energética en diversas fases del proceso agrícola[24].

IV-18. Tecnologías de Recuperación de Energía: La integración de tecnologías de recuperación de energía contribuye significativamente a la eficiencia global del robot. Sistemas como frenos regenerativos convierten la energía cinética generada durante la frenada en electricidad, que luego se puede utilizar para recargar las baterías. Esta tecnología ayuda a maximizar la utilización de la energía y reducir el desperdicio, mejorando así la autonomía del robot[59].

IV-19. Diagnóstico y Monitoreo de la Batería: Los sistemas avanzados de diagnóstico y monitoreo de la batería son esenciales para un mantenimiento proactivo y una gestión eficiente de la energía. Estos sistemas permiten evaluar el estado de las baterías en tiempo real, identificar posibles problemas y realizar ajustes para maximizar la vida útil de las baterías, el monitoreo continuo también garantiza un rendimiento consistente del robot durante sus operaciones[30].

IV-110. Investigación en Nuevas Tecnologías: La investigación en nuevas tecnologías es un aspecto dinámico y en constante evolución para mejorar la eficiencia energética de los robots agrícolas. Investigaciones en baterías más avanzadas, sistemas de almacenamiento de energía innovadores y tecnologías emergentes, como la inteligencia artificial aplicada a la gestión de la energía, son áreas clave que impulsan la evolución de estos robots[26].

IV-111. Integración de Sensores de Bajo Consumo: La integración de sensores de bajo consumo energético es esencial para garantizar que el robot pueda percibir su entorno de manera eficiente sin agotar rápidamente las baterías. Sensores como cámaras y lidar con consumo optimizado permiten al robot recopilar datos precisos para la navegación y la toma de decisiones sin comprometer la eficiencia energética[26].

En conjunto, estos elementos representan un enfoque holístico hacia la optimización de la eficiencia energética en el desarrollo de un robot móvil para el sembrado de maíz. La combinación de algoritmos inteligentes, sistemas mecánicos eficientes, modos de operación adaptativos y tecnologías de recuperación de energía garantiza un rendimiento sostenible y eficiente del robot en el campo agrícola[59].

IV-J. Componentes del robots

IV-J1. ESP32 TIPO-C: ESP32:

El ESP32 es un microcontrolador de bajo costo y bajo consumo de energía desarrollado por Espressif Systems. Es conocido por su capacidad de conectividad WiFi y Bluetooth, lo que lo hace ideal para una variedad de aplicaciones IoT (Internet de las cosas) y proyectos embebidos. Ofrece un amplio conjunto de funciones, como GPIO (Entrada/Salida de Propósito General), interfaces de comunicación como UART, SPI, I2C, y soporte para desarrollo mediante el entorno de desarrollo Arduino, entre otros[60].

IV-J2. USB Tipo-C: El conector USB Tipo-C es un estándar de conector reversible que se ha vuelto cada vez más común en dispositivos modernos. Puede ser utilizado para la transferencia de datos, carga de energía, y soporta velocidades de transferencia de datos más rápidas que los conectores USB más antiguos. La principal ventaja del USB Tipo-C es su reversibilidad, lo que significa que el conector se puede insertar en cualquier orientación. Además, es capaz de entregar mayor potencia para cargar dispositivos y es compatible con diversas funciones como video y audio a través del mismo conector[61].

IV-J3. PROTOBOARD: La protoboard, conocida también como breadboard o placa de pruebas, se revela como una herramienta esencial en el campo de la electrónica y el prototipado de circuitos. Su estructura se compone de una placa perforada con agujeros que están conectados eléctricamente en su interior. Cada fila de agujeros en la superficie de la protoboard está interconectada, lo que facilita la inserción de componentes electrónicos como resistencias, diodos, transistores y cables para establecer conexiones temporales[62].

La disposición organizada en columnas y filas de los agujeros posibilita la creación de circuitos sin necesidad de soldaduras. La función principal de la protoboard reside en proporcionar un entorno donde ingenieros y diseñadores electrónicos pueden prototipar circuitos de manera rápida y eficiente. La flexibilidad que ofrece, tanto en la reutilización de componentes como en la realización de cambios sin dañar elementos, es esencial para la experimentación y el desarrollo iterativo de diseños[61].

Adicionalmente, la protoboard destaca como una valiosa herramienta educativa, utilizada en entornos de enseñanza para introducir a los estudiantes en los conceptos fundamentales de la electrónica sin la necesidad de soldaduras. Además, desempeña un papel crucial en el desarrollo de proyectos electrónicos, sirviendo como paso previo a la producción de circuitos impresos (PCB). Su uso facilita la depuración de circuitos al ofrecer una plataforma accesible para identificar y solucionar problemas de manera eficiente[62].

IV-J4. MOTORES 350W: Los motores con una capacidad de 350 vatios representan dispositivos eléctricos con una potencia nominal de 350W, indicando la cantidad máxima de energía que pueden generar de manera continua sin sobrecalentarse. En la categoría de potencia media, estos motores son versátiles y encuentran aplicaciones diversas, adaptándose a una variedad de contextos según las necesidades específicas del sistema. Su versatilidad se extiende desde el ámbito doméstico hasta la maquinaria industrial. En electrodomésticos como licuadoras, aspiradoras o secadoras de ropa, los motores de 350W son comúnmente utilizados. Además, desempeñan un papel crucial en la movilidad eléctrica, siendo incorporados en bicicletas eléctricas, scooters eléctricos y otros vehículos de movilidad personal[63].

En el ámbito de las herramientas eléctricas, estos motores se integran en taladros, sierras eléctricas o destornilladores para suministrar la potencia necesaria. En entornos industriales, se emplean en maquinaria ligera, transportadores pequeños o sistemas de automatización que requieren una potencia moderada. La elección de motores de 350W se fundamenta a menudo en su equilibrio entre potencia y eficiencia energética, convirtiéndolos en una opción óptima para aplicaciones donde se busca optimizar el consumo de energía. Además, en proyectos de bricolaje (hágalo usted mismo), estos motores son utilizados para construir desde pequeñas máquinas hasta robots o dispositivos personalizados que necesitan una potencia moderada[38].

IV-J5. BLCD 36V PARA MOTORES: Los motores BLDC (Brushless DC) de 36V son altamente eficientes, duraderos y silenciosos, operando sin escobillas y utilizando un controlador electrónico para gestionar la conmutación y la entrega de potencia. Su diseño compacto y ligero, combinado con la ausencia de fricción interna, les confiere una larga vida útil y baja necesidad de mantenimiento. Son ideales para aplicaciones de movilidad ligera, como bicicletas y scooters eléctricos, donde se requiere un control preciso de la velocidad y el torque, además de características de seguridad avanzadas y, en algunos modelos, frenado regenerativo para recuperar energía[22].

IV-J6. BATERIA 36V: Una batería de 36 voltios es un dispositivo de almacenamiento de energía diseñado para suministrar electricidad a diferentes dispositivos y sistemas que operan a un nivel de voltaje de 36V. Estas baterías son versátiles y se encuentran comúnmente en una variedad de aplicaciones, desde vehículos eléctricos hasta herramientas y robots. Estas baterías, dependiendo de su capacidad de almacenamiento medida en amperios-hora (Ah), tienen la capacidad de proporcionar una cantidad específica de energía antes de necesitar recargarse. En el mundo de las baterías, existen varios tipos, como las de iones de litio, plomo-ácido o níquel-metal hidruro, cada uno con sus propias características y beneficios[62].

Las baterías de 36V son elegidas para aplicaciones que requieren un nivel moderado de potencia. Por ejemplo, son ideales en vehículos eléctricos más pequeños, sistemas de energía solar y, como mencionaste anteriormente, en la alimentación de motores en robots. Además, su elección también puede depender de consideraciones como peso, densidad de energía y ciclo de vida. Es fundamental tener en cuenta la seguridad y el mantenimiento de estas baterías, especialmente en el caso de tecnologías como las de iones de litio, que a menudo requieren sistemas de gestión y monitoreo para garantizar su seguridad y prolongar su vida útil[63].

IV-J7. MPU-9250 - SENSOR INERCIAL: El MPU-9250 es un sensor inercial que integra diversas capacidades en un solo dispositivo, diseñado para medir y proporcionar información detallada sobre el movimiento y la orientación de un objeto. Fabricado por InvenSense, ahora parte de TDK, este sensor es conocido por su versatilidad en aplicaciones que requieren una precisa captura de datos relacionados con el movimiento espacial. Este dispositivo incorpora un acelerómetro de tres ejes, lo que significa que puede detectar la aceleración en tres direcciones diferentes, permitiendo así el seguimiento del movimiento lineal del objeto al que está conectado. Además, cuenta con un giróscopo de tres ejes para medir la velocidad angular de rotación en cada uno de los ejes, lo que resulta fundamental para determinar la orientación y el movimiento angular del objeto[62].

El MPU-9250 también incluye un magnetómetro de tres ejes que mide el campo magnético circundante. Esta capacidad permite determinar la orientación del objeto con respecto al campo magnético de la Tierra, proporcionando datos valiosos de brújula. Un componente clave del MPU-9250 es su procesador integrado, encargado de realizar cálculos complejos para fusionar y procesar los datos provenientes de los tres sensores mencionados anteriormente. Esta capacidad de procesamiento mejora significativamente la precisión y la estabilidad de las mediciones, especialmente en aplicaciones que demandan una alta exactitud en la determinación de la orientación espacial. Además, este dispositivo se comunica con otros dispositivos, como microcontroladores, a través de interfaces de comunicación como I2C o SPI. Esta funcionalidad facilita la integración del sensor en una amplia variedad de sistemas, desde drones y robots hasta dispositivos de realidad virtual y portátiles[63].

IV-J8. GPS-9250-SENSOR INERCIAL: El GPS-9250 es un sensor inercial avanzado que combina un módulo GPS con un sistema de medición inercial (IMU) para ofrecer datos precisos sobre la ubicación y la orientación. Este dispositivo proporciona información en tiempo real mediante señales de satélite para la ubicación y utiliza acelerómetros y giroscopios para medir la aceleración y la rotación. Su alta precisión y capacidad para ofrecer datos estables hacen que sea ideal para aplicaciones en navegación, vehículos autónomos, drones y robots móviles, donde se requiere un control exacto de la posición y el movimiento[2].

IV-K. Especificaciones Técnicas:

IV-K1. Modulo ZS-X11H: El ZS-X11H es un avanzado sistema de iluminación LED, ideal para aplicaciones que requieren alta precisión y eficiencia energética, como la iluminación arquitectónica, escenografía, y otros entornos profesionales. Utiliza tecnología LED de última generación para proporcionar una iluminación de alta calidad, con opciones de ajuste de intensidad y color que permiten una personalización detallada según las necesidades específicas del proyecto[62].

El ZS-X11H es un dispositivo de iluminación profesional con controles inteligentes que permite la programación y gestión a través de interfaces digitales y es compatible con sistemas DMX. Destaca por su eficiencia energética, con funciones como apagado automático y atenuación programable, y está construido con materiales de alta calidad que aseguran durabilidad y resistencia en condiciones exigentes. Su diseño facilita la instalación y el mantenimiento, y su versatilidad lo hace ideal para aplicaciones comerciales, arquitectónicas y eventos en vivo, ofreciendo soluciones de iluminación personalizadas y de alta calidad[38].

IV-K2. Voltaje de entrada:: El controlador ZS-X11H puede operar con un voltaje de entrada que varía entre 6V y 60V DC, ofreciendo una gran flexibilidad en términos de aplicación. Esto permite su uso en una amplia gama de dispositivos y sistemas que pueden requerir diferentes niveles de voltaje, desde pequeños proyectos electrónicos hasta grandes sistemas industriales. La capacidad de manejar un rango tan amplio de voltajes de entrada también facilita su integración en sistemas existentes sin necesidad de modificaciones significativas en la fuente de alimentación[31].

IV-K3. Potencia máxima:: Con una potencia máxima de 400W, el controlador es capaz de manejar motores de alta potencia, asegurando un rendimiento robusto en aplicaciones exigentes. Esta alta capacidad de potencia lo hace adecuado para aplicaciones que requieren un gran esfuerzo de torque o velocidad, como vehículos eléctricos, bicicletas eléctricas y sistemas de automatización industrial. Además, la gestión eficiente de la potencia ayuda a prevenir el sobrecalentamiento y asegura una operación confiable a largo plazo[64].

IV-K4. Corriente máxima: : La corriente máxima que el controlador puede manejar depende del voltaje de entrada y la potencia máxima del sistema. Por ejemplo, a un voltaje de 12V, la corriente máxima sería aproximadamente 33.33A (400W / 12V), mientras que a 24V, la corriente máxima sería alrededor de 16.67A (400W / 24V). Esta relación directa entre voltaje y corriente es crucial para dimensionar adecuadamente el controlador y asegurar que no se excedan los límites operativos, previniendo daños y sobrecargas[26].

IV-K5. Frecuencia de PWM:: La frecuencia de modulación por ancho de pulso (PWM) del controlador suele ser de alrededor de 20kHz, aunque puede variar dependiendo del diseño específico. Una alta frecuencia de PWM permite un control más preciso y eficiente del motor, minimizando el ruido eléctrico y las pérdidas de energía. Esta característica es especialmente importante en aplicaciones donde la eficiencia energética y el control fino de la velocidad son críticos[13].

IV-K6. Control de velocidad: : El ZS-X11H permite el control de velocidad del motor a través de una señal PWM externa o un potenciómetro. Esta flexibilidad en el control de velocidad permite a los usuarios ajustar la operación del motor según las necesidades específicas de la aplicación, proporcionando un mayor grado de control y precisión. El uso de un potenciómetro es ideal para ajustes manuales, mientras que una señal PWM externa es adecuada para aplicaciones automatizadas[21].

IV-K7. Características: : Control de velocidad: El ZS-X11H ofrece una flexibilidad significativa en el control de la velocidad del motor, permitiendo ajustes precisos mediante dos métodos: un potenciómetro o una señal PWM externa. Utilizar un potenciómetro es una solución simple y efectiva para ajustes manuales, donde el usuario puede girar una perilla para aumentar o disminuir la velocidad del motor en tiempo real. Esta opción es ideal para aplicaciones que requieren ajustes frecuentes y directos por parte del operador. Por otro lado, la opción de control mediante una señal PWM externa es perfecta para sistemas automatizados donde la velocidad del motor necesita

ser regulada por un controlador central o una computadora, proporcionando un ajuste más dinámico y preciso según las condiciones operativas[21].

IV-K8. Protección de sobrecarga: : Una característica vital del controlador ZS-X11H es su protección contra sobrecargas. Esta protección asegura que tanto el motor como el controlador estén protegidos contra condiciones de corriente excesiva que podrían causar daños. Cuando se detecta una sobrecarga, el controlador puede reducir la velocidad del motor o apagarlo temporalmente para evitar daños permanentes. Esto es crucial para mantener la integridad del sistema en aplicaciones donde las cargas pueden variar significativamente y de manera impredecible, asegurando una operación segura y prolongada del equipo[38].

IV-K9. Compatibilidad con sensores Hall: : Los motores BLDC controlados por el Portoboard ZS-X11H deben estar equipados con sensores Hall. Estos sensores son fundamentales para la detección de la posición del rotor, lo que permite al controlador sincronizar la conmutación de las fases del motor con precisión. Esta sincronización es esencial para asegurar un funcionamiento eficiente y suave del motor. Los sensores Hall proporcionan información crítica sobre la posición del rotor, permitiendo ajustes precisos en tiempo real que mejoran la eficiencia, el rendimiento y la durabilidad del motor. Sin esta información, el motor podría experimentar conmutaciones erráticas, lo que podría llevar a una operación ineficiente y a un desgaste prematuro[32].

El diseño del controlador ZS-X11H incluye conectores claramente etiquetados y de fácil acceso para la conexión de los cables de alimentación, los cables del motor y los sensores Hall. Esto simplifica significativamente el proceso de instalación, reduciendo el tiempo y el esfuerzo necesarios para poner en marcha el sistema. La facilidad de instalación es especialmente beneficiosa en aplicaciones donde el tiempo es un factor crítico o donde el equipo debe ser mantenido por personal con diferentes niveles de experiencia técnica. Los conectores de fácil uso ayudan a minimizar errores de conexión, asegurando que el sistema esté configurado correctamente desde el inicio[5].

V. MARCO METODOLÓGICO

V-A. Diseño sistema mecánico

V-A1. *Diseño de la base:* El diseño de la base para un robot sembrador es fundamental para asegurar la estabilidad, resistencia y funcionalidad del robot en el campo. Actuando como la estructura principal, la base debe soportar el peso de los componentes como las ruedas con motor, dispensadores de semillas, y sensores, garantizando una distribución equilibrada del peso para evitar desequilibrios que puedan afectar la precisión de la siembra y el desplazamiento en terrenos irregulares.

Para lograr esto, la base generalmente se construye con materiales ligeros pero resistentes, como aleaciones de aluminio o compuestos duraderos, lo que proporciona robustez sin añadir peso excesivo. Además, el diseño debe ser modular para facilitar la integración y mantenimiento de los componentes, mientras protege los sistemas sensibles del polvo y la humedad. Los puntos de montaje deben ser seguros para asegurar que todos los elementos permanezcan firmemente en su lugar durante el funcionamiento. En resumen, la base debe combinar estabilidad, resistencia y ligereza para permitir un rendimiento eficiente y preciso en diversas condiciones agrícolas como se muestra en la Figura 12

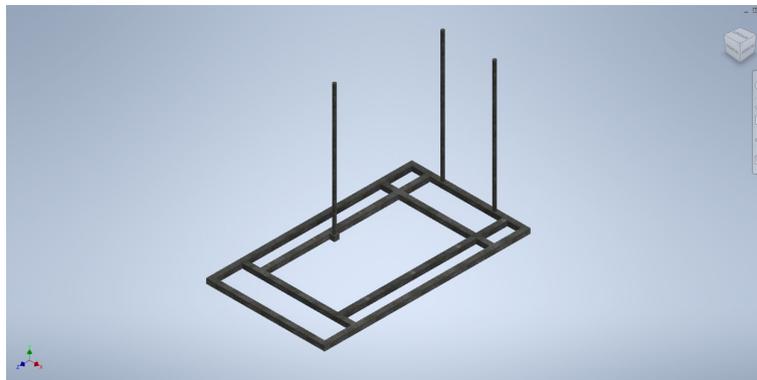


Figura 12. Diseño de la base, por J. Cadena C.Freire, 2024.

V-A2. *Diseño de los broches de seguridad:* En la Figura 13 esta imagen se aprecia el diseño de los broches utilizados en el robot, los cuales han sido meticulosamente fabricados con dimensiones optimizadas para soportar el peso y la carga dinámica de las ruedas, asegurando una fijación segura y estable incluso en terrenos irregulares. Fabricados con materiales de alta resistencia, estos broches no solo garantizan durabilidad en condiciones de uso intensivo, sino que también facilitan el ensamblaje y mantenimiento, evitando movimientos indeseados y optimizando la eficiencia del robot. Para fijar protecciones o guardas que evitan que los residuos del suelo o piedras afecten las ruedas. Estos broches aseguran que las partes móviles y componentes estén firmemente sujetas y funcionando correctamente durante el uso del sembrador.

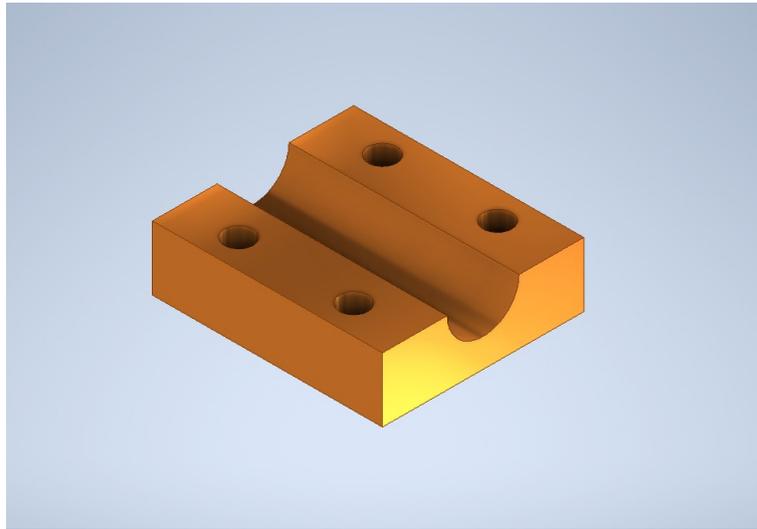


Figura 13. Broche, por J. Cadena C.Freire, 2024.

V-A3. *Diseño del cobertor*: En la Figura 14 muestra un cobertor de una pieza fundamental en el diseño de un robot sembrador, ya que protege los componentes sensibles, como sistemas electrónicos, sensores y motores, de factores externos como polvo, humedad y condiciones adversas en el campo. Fabricado con materiales duraderos y resistentes, como plásticos de alta densidad o compuestos impermeables, el cobertor asegura la integridad del robot sin comprometer su rendimiento. Además, su diseño ligero y aerodinámico no solo protege, sino que también permite un acceso fácil a los componentes internos para facilitar el mantenimiento y las reparaciones, garantizando así la continuidad operativa del robot.

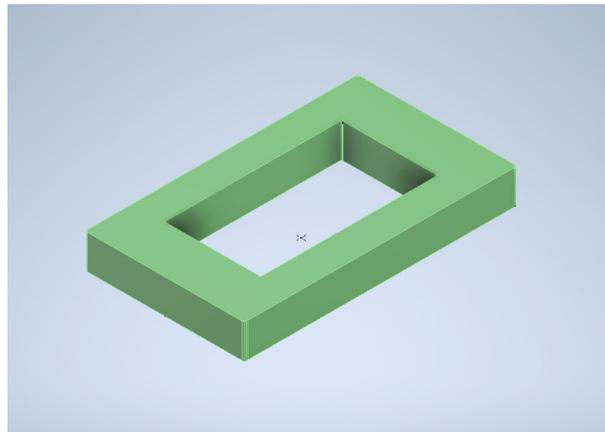


Figura 14. Cobertor, por J. Cadena C.Freire, 2024.

V-A4. *Diseño del soporte de la base*: En la Figura 15 muestra el soporte de la base de acero inoxidable que se utilizó este es un componente clave que proporciona estabilidad y durabilidad a la estructura de un robot sembrador. Este soporte está diseñado para soportar cargas pesadas y resistir condiciones adversas, como la humedad, la corrosión y el desgaste, características comunes en entornos agrícolas. Gracias a las propiedades del acero inoxidable, el soporte no solo asegura una larga vida útil, sino que también mantiene la integridad estructural del robot, evitando deformaciones o daños que puedan comprometer su funcionamiento. Además, su diseño robusto y resistente garantiza que la base del robot permanezca firmemente anclada, permitiendo un desempeño eficiente y preciso durante las operaciones de siembra en diferentes tipos de terrenos.

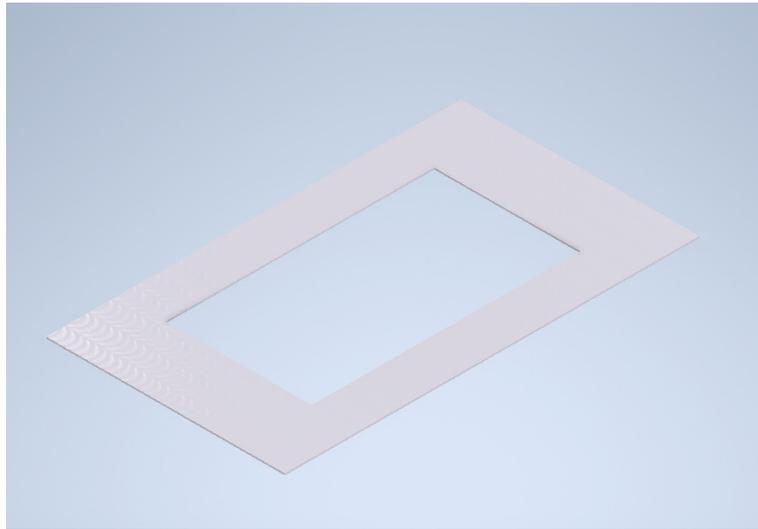


Figura 15. Soporte de la base de acero inoxidable, por J. Cadena C.Freire, 2024.

V-A5. *Diseño de la rueda dispensadora:* En la Figura 16 muestra sobre la rueda dispensadora de semillas es un componente esencial en la agricultura, esta se encuentra diseñada para distribuir semillas de manera uniforme y precisa mientras el robot se desplaza por el terreno. Equipada con cavidades o ranuras, la rueda recoge y libera semillas en intervalos regulares, garantizando una siembra consistente. Su diseño tiene en cuenta el tamaño y tipo de semillas, la velocidad del robot y la profundidad de siembra necesaria. Además, esta rueda sembradora de maíz optimiza la eficiencia y precisión del proceso de siembra, controlando la densidad de plantación y mejorando el rendimiento de la cosecha al reducir desperdicios.

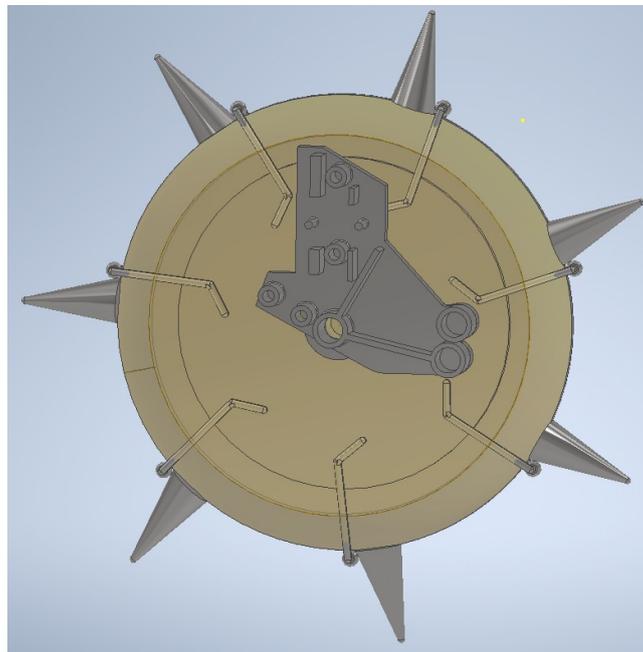


Figura 16. Rueda dispensadora, por J. Cadena C.Freire, 2024.

V-A6. *Diseño de las ruedas:* En la Figura 17 muestra sobre las ruedas con motor para un robot sembrador son esenciales para su desplazamiento preciso y controlado en terrenos agrícolas, proporcionando la tracción necesaria tanto en suelos planos como irregulares. Equipadas con motores eléctricos cuidadosamente seleccionados para ofrecer el torque y potencia adecuados, estas ruedas aseguran que el robot funcione eficientemente incluso en condiciones difíciles. Su durabilidad y robustez permiten soportar el peso del robot y resistir el desgaste constante, contribuyendo de manera crucial a la eficiencia y éxito del proceso de siembra automatizada.



Figura 17. Rueda, por J. Cadena C.Freire, 2024.

V-A7. *Diseño del ensamblaje final en Inventor 3D:* En la Figura 18 se desarrolla el diseño del ensamblaje en Autodesk Inventor el mismo que es crucial para garantizar precisión y eficiencia en el proceso de ingeniería, permitiendo el modelado paramétrico de componentes, la detección de interferencias, y la simulación de movimiento y análisis FEA (Finite Element Analysis) para evaluar el comportamiento dinámico y estructural del ensamblaje.

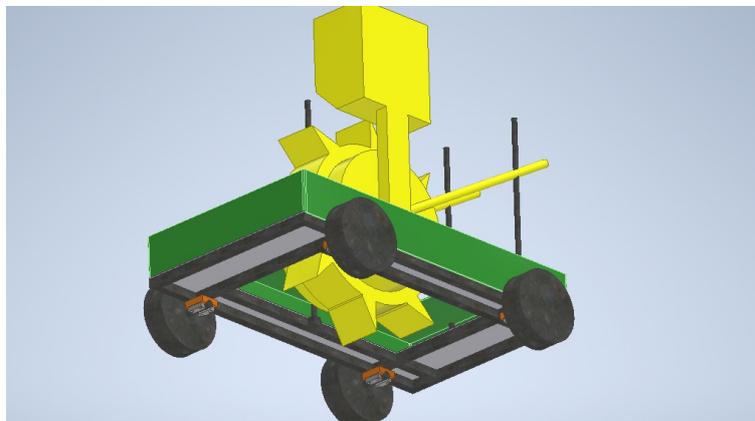


Figura 18. Diseño ensamblaje Inventor 3D visualización de broches, por J. Cadena C.Freire, 2024.

V-A8. *Análisis y esfuerzos de Von Misses :*

V-A9. *Pieza de análisis estructura base: Propiedades del Acero SAE 1008*

PROPIEDADES	VALOR
Material	Acero SAE 1008
Resistencia a la tensión (S_{ut})	340 MPa
Resistencia a la fluencia (S_y)	285 MPa

- Teoría de falla a utilizar: Energía de distorsión
- Análisis de elemento finito: Se seleccionarán 3 puntos en áreas de mayor manifestación de esfuerzos Von Misses dentro de la pieza para poder analizar las zonas donde es más propensa la falla, ver en la figura 19 .

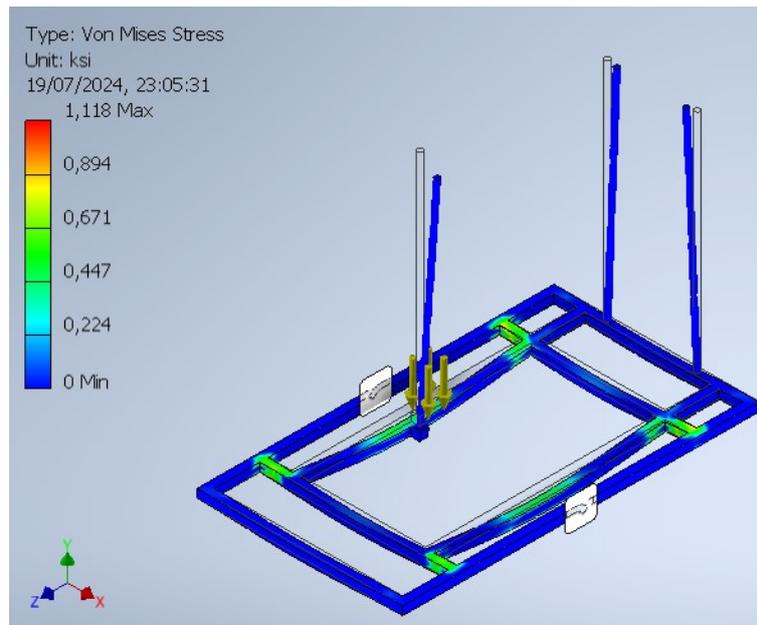


Figura 19. Pieza con carga de 287 lbf distribuida y esfuerzos de Von Misses escalados (chasis)

Dado que Inventor solo muestra la magnitud del esfuerzo de Von Mises, no podemos determinar si la pieza está en compresión o tensión. Por lo tanto, se presentan los primeros y terceros esfuerzos principales de la pieza en tres ubicaciones específicas para comprender mejor si predomina la tensión o la compresión en los puntos seleccionados. Esto nos permitirá un análisis más detallado y preciso del comportamiento de la pieza bajo carga como se observa en la Figura 20.

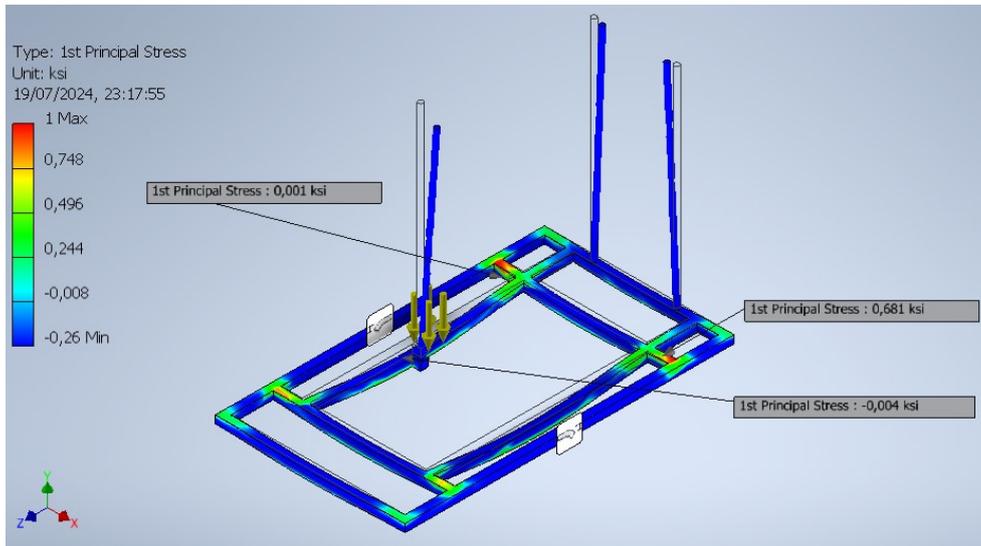


Figura 20. Primer esfuerzo principal en puntos de interés (chasis)

Podemos notar que el módulo del tercer esfuerzo principal es mayor que la magnitud del primer esfuerzo, por lo tanto, la pieza es más propensa que falle por compresión se puede apreciar en la Figura 21.

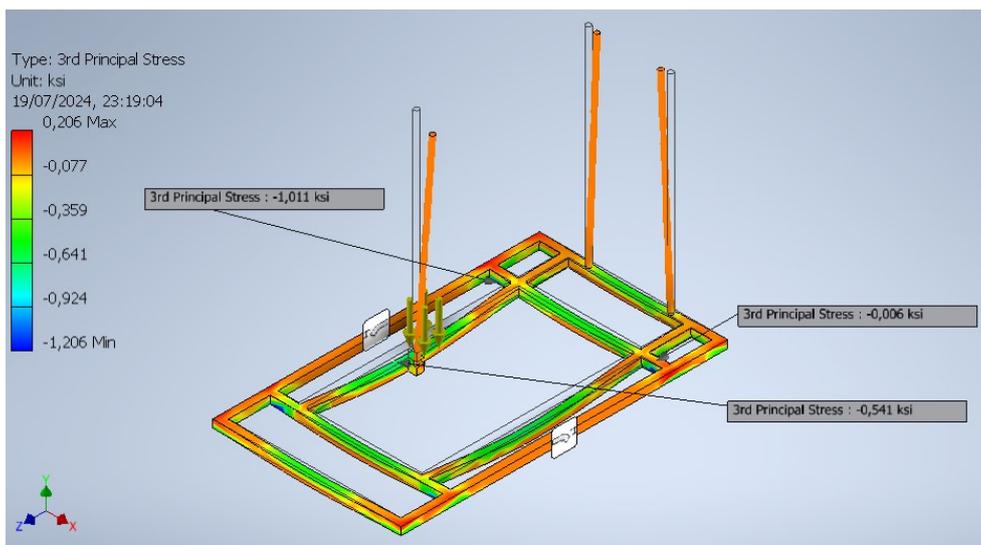


Figura 21. Tercer esfuerzo principal en puntos de interés (chasis)

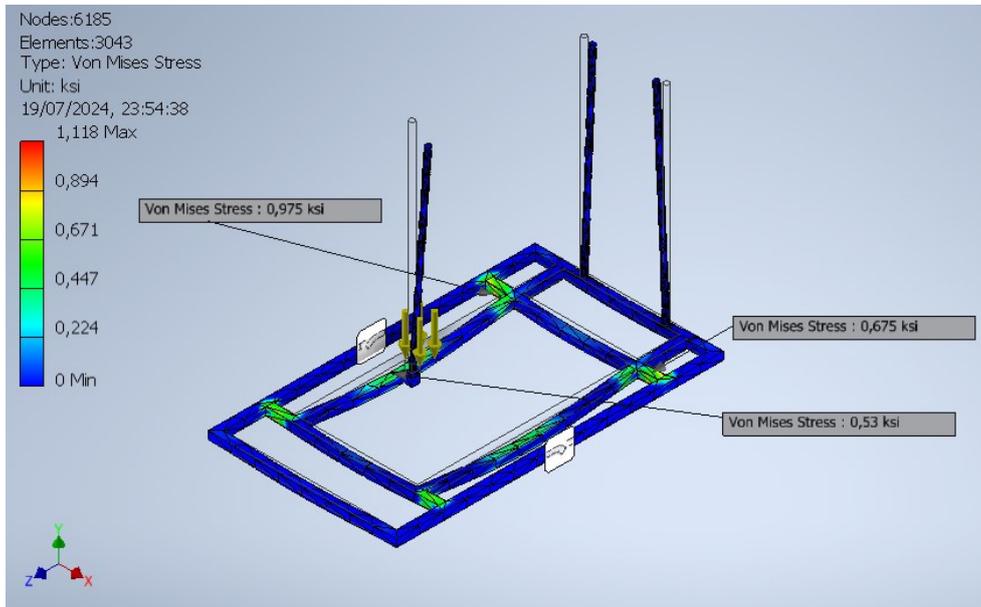


Figura 22. Mallado de la pieza y esfuerzo de Von Mises (chasis)

El gráfico de los factores de seguridad muestra que la pieza está sobredimensionada, ya que el factor de seguridad es muy alto. Sin embargo, esto es ventajoso en nuestro caso, ya que asegura que la pieza no será propensa a fallar y puede soportar condiciones de carga inesperadas hasta unas 15 veces mayores. Este sobredimensionamiento proporciona una robustez adicional, garantizando la fiabilidad y la durabilidad de la pieza incluso bajo condiciones extremas, ver en la Figura 23.

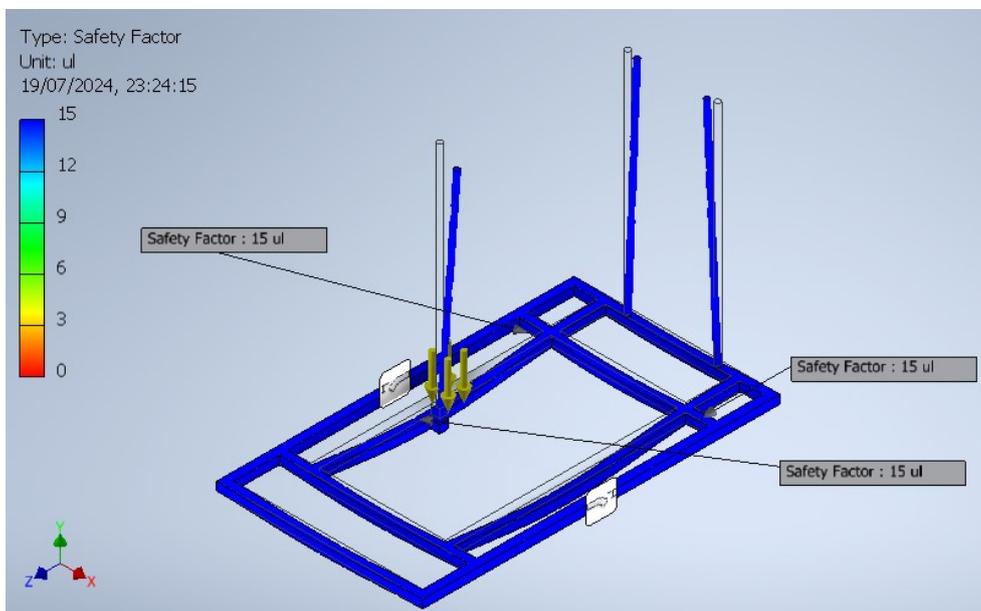


Figura 23. Factor de seguridad en puntos de interés

Factores de seguridad en cada punto

Punto	N
1	15
2	15
3	15

Puntos de máximo desplazamiento

Podemos observar en la Figura 24 que el desplazamiento máximo que se puede generar en la pieza, en el peor de los casos, es de 0.003827 pulgadas, lo que equivale aproximadamente a una décima parte de un milímetro. Dado que este desplazamiento es muy pequeño, no representa un problema significativo dentro de nuestro diseño.

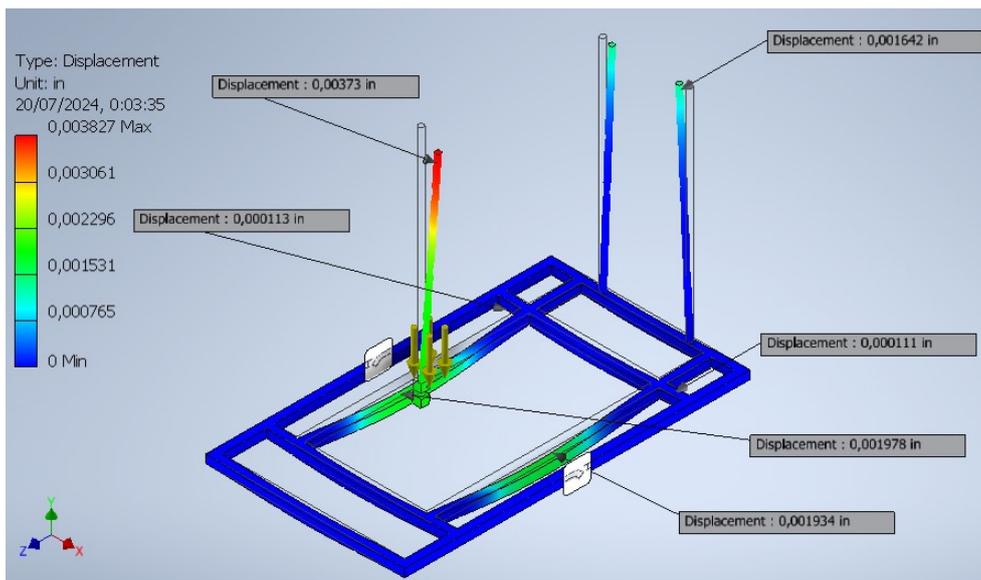


Figura 24. Factor de seguridad en puntos de interés

V-A10. *Pieza de análisis ruedas:* Vamos a realizar un análisis del comportamiento de las ruedas al aplicar una carga sobre su eje, ver en la Figura 25. Esta carga incluye tanto el peso del carrito como la carga previamente analizada en el chasis. Este análisis es crucial para evaluar cómo las ruedas soportan y distribuyen estas cargas, garantizando la seguridad y funcionalidad de la estructura durante su uso. El chasis tiene un peso de 31,863 lbf, que sumado a la carga anterior de 287 lbf, da un total de 32,150 lbf. Dado que el carrito tiene cuatro ruedas, el eje de cada rueda soporta una cuarta parte de la carga total, lo que equivale a 8,037.5 lbf, aproximadamente 8,038 lbf.

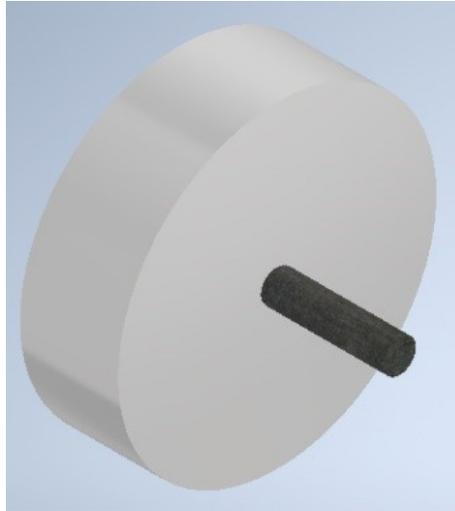


Figura 25. Pieza (rueda) a analizar, eje de acero a36 y rueda de aluminio.

Propiedades del aluminio:

Propiedades	Valor
Material	Aluminio
Resistencia a la tensión (S_{ut})	310 MPa
Resistencia a la fluencia (S_y)	275 MPa

Propiedades del Acero A36:

Propiedades	Valor
Material	Acero A36
Resistencia a la tensión (S_{ut})	400 MPa
Resistencia a la fluencia (S_y)	250 MPa

Parámetros de análisis estático para las ruedas

- Teoría de falla a utilizar: Energía de distorsión
- Análisis de elemento finito: Al igual que la pieza anterior se seleccionarán 3 puntos en áreas de mayor manifestación de esfuerzos Von Misses, como se observa en la Figura 26.

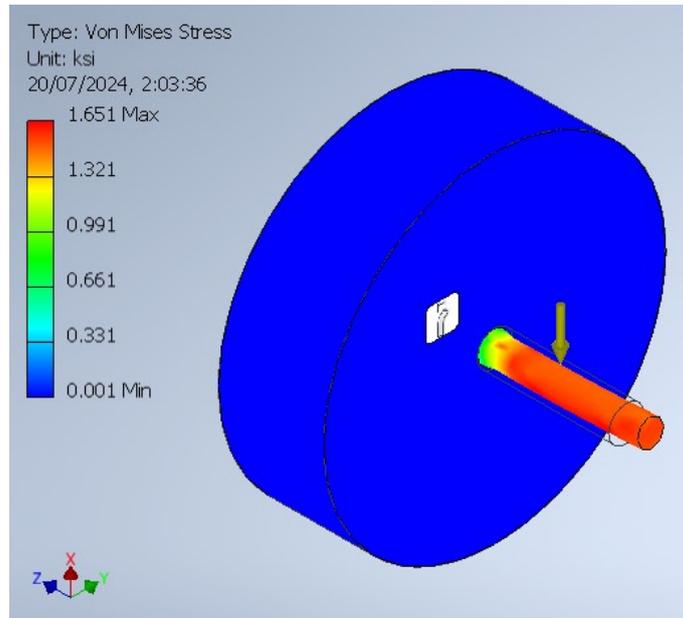


Figura 26. Pieza con carga de 8038 lbf distribuida y esfuerzos de Von Misses escalados (rueda).

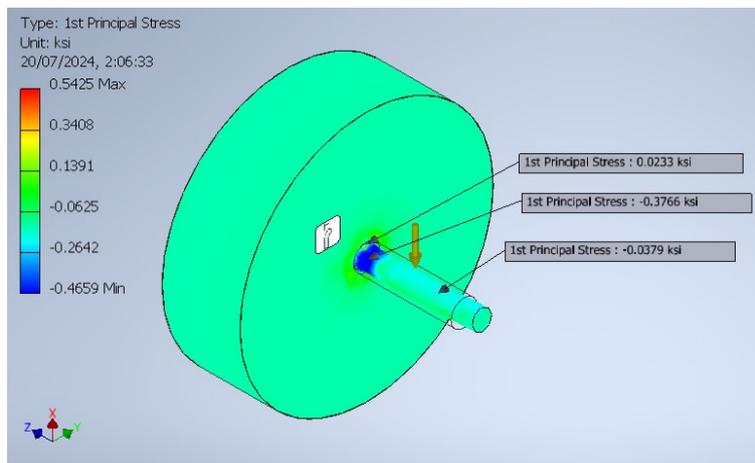


Figura 27. Primer esfuerzo principal en puntos de interés (rueda).

Podemos notar en la Figura 28 que el módulo del tercer esfuerzo principal es mayor que la magnitud del primer esfuerzo, por lo tanto, la pieza es más propensa que falle por compresión.

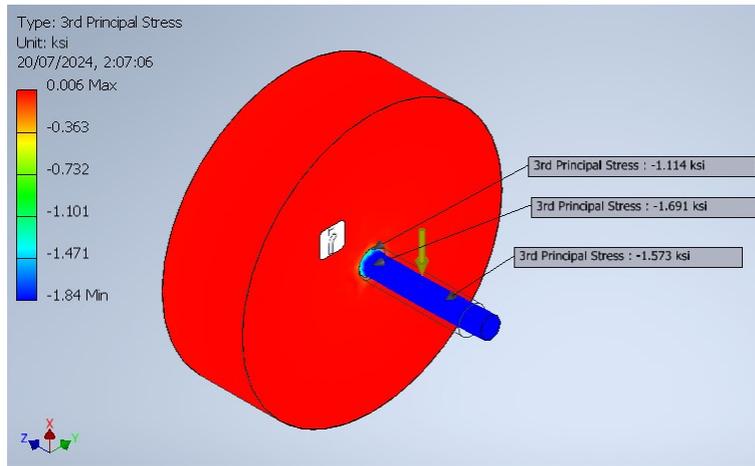


Figura 28. Primer esfuerzo principal en puntos de interés (rueda) (rojo).

El mallado en Autodesk Inventor es el proceso de dividir una pieza en pequeños elementos finitos para realizar un análisis por elementos finitos, esto permite simular y calcular con mayor precisión la distribución de esfuerzos y deformaciones bajo diversas cargas y condiciones. En la Figura 29 se observa un mallado el mismo que mejora la precisión del análisis

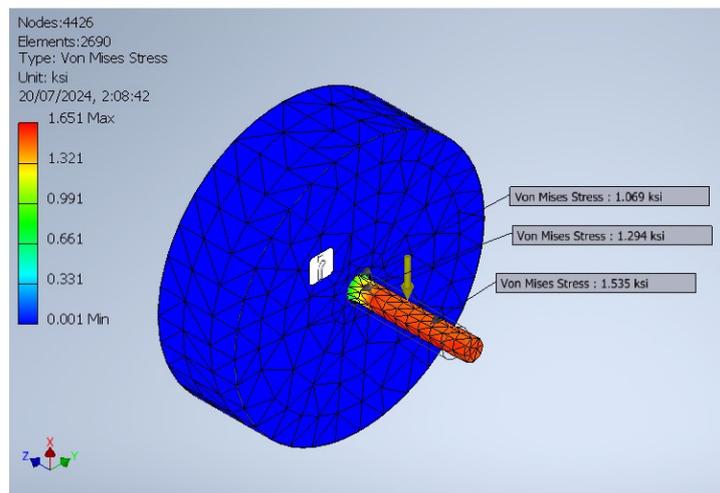


Figura 29. Mallado de la pieza y esfuerzo de Von Mises (rueda).

Al igual que en el caso anterior, la pieza de la rueda está sobredimensionada lo cual es un buen indicador debido a que no es propensa a que falle de manera estática y puede soportar hasta variaciones de sobrecarga inesperadas de hasta 15 veces la carga analizada, ver la Figura 30.

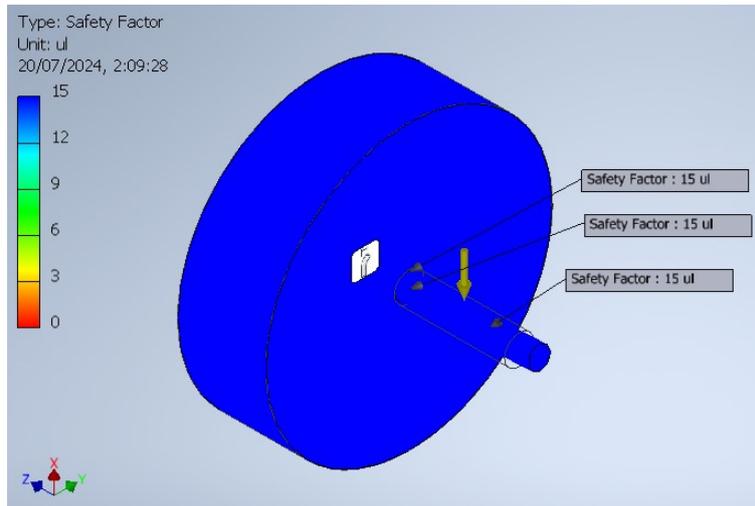


Figura 30. Factor de seguridad en puntos de interés (rueda).

Factores de seguridad en cada punto

Punto	N
1	15
2	15
3	15

Puntos de máximo desplazamiento

El desplazamiento máximo de $7.529e-05$ pulgadas es extremadamente pequeño, equivalente a aproximadamente 2 milésimas de milímetro. Por lo tanto, en este caso, el desplazamiento debido a la deformación de la pieza no representa un problema significativo, ver en la Figura 31.

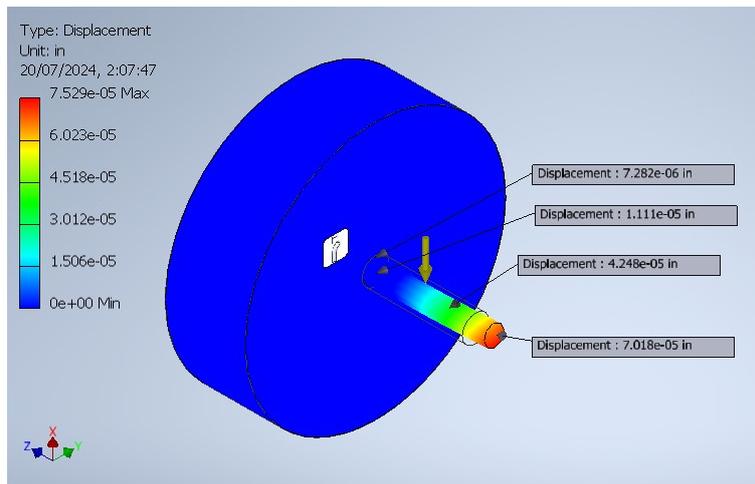


Figura 31. Descripción de punto maximo de desplazamiento.

V-A11. Motor y Características:

Selección del Motor

En esta sección se describe el porque se selecciono el motor y las características técnicas que ofrece. Además, de proporciona datos relevantes (datasheet) del motor seleccionado así como se describirá la justificación.

Tabla de Datos del Motor

CARACTERÍSTICA	VALOR
Voltaje	36 V
Potencia Mecánica	350 W
Velocidad nominal	1500 rpm
Carga permitida	20 kg a 100 kg

Tabla I

DATOS TÉCNICOS DEL MOTOR SELECCIONADO.

Cálculo del Torque Nominal

Sabemos que la potencia mecánica $P_{\text{mecánica}}$ se calcula con la fórmula:

$$P_{\text{mecánica}} = \omega \times T$$

Donde ω es la velocidad angular y T es el torque. Con una velocidad de 1500 rpm o 157,08 rad/s, el torque nominal se calcula como:

$$T_{\text{nominal}} = \frac{P_{\text{mecánica}}}{\omega} = \frac{350}{157,08} \approx 2,23 \text{ Nm}$$

Justificación Técnica

Voltaje y Potencia

El motor de 36V proporciona un buen equilibrio entre potencia y eficiencia energética. Los 350W de potencia son suficientes para mover el robot con una carga significativa, asegurando que pueda transportar la carga del sembrador sin problemas. Esta potencia permite un rendimiento adecuado para superar inclinaciones y obstáculos menores que puedan encontrarse en su recorrido.

Velocidad

La velocidad variable de 5 a 1500rpm ofrece una gran flexibilidad en el control del robot. Esto permite ajustes precisos en la velocidad de movimiento, lo cual es importante para maniobrar en diferentes entornos. La posibilidad de operar a bajas velocidades es especialmente útil para realizar tareas que requieren precisión, mientras que la capacidad de alcanzar altas velocidades puede ser ventajosa para desplazamientos rápidos en terrenos planos.

Capacidad de Carga

La capacidad de carga del motor, de 20 Kg a 100 Kg, es adecuada para soportar el peso del sembrador e incluso una persona promedio, que generalmente está en el rango de 60 a 80 Kg. Esto asegura que el robot podrá transportar al sembrador sin comprometer su desempeño ni su durabilidad.

Reducción de Pérdidas Resistivas

La potencia eléctrica de un motor se puede calcular mediante la fórmula $P = V \times I$, donde P es la potencia, V es el voltaje y I es la corriente. Suponiendo que el motor mantiene su potencia eléctrica de consumo constante, un voltaje más alto (36V en este caso) implica una corriente más baja comparada con un motor que opera a un voltaje menor para la misma potencia.

Justificación Práctica

Compatibilidad con el Chasis: El chasis del robot está diseñado para soportar cargas pesadas y, por lo tanto, requiere un motor que pueda proporcionar la fuerza necesaria para mover dicha carga. El motor seleccionado cumple con estos requisitos debido a su valor de carga que puede soportar, asegurando una integración eficiente con el chasis y un rendimiento óptimo del sistema.

Mayor Eficiencia del Sistema de Control: Los controladores de motores diseñados para operar a voltajes más altos suelen ser más eficientes. Esto se debe a que los componentes electrónicos (como transistores y MOSFETs) tienen menores pérdidas de conmutación y conducción cuando manejan corrientes más bajas. Así, al utilizar un motor de 36V, se logra una mayor eficiencia energética en comparación con motores de menor voltaje, lo cual es crucial para prolongar la autonomía del robot.

Durabilidad y Fiabilidad

La potencia y capacidad de carga del motor aseguran que el robot no estará trabajando al límite de sus capacidades, lo que contribuye a una mayor vida útil y fiabilidad del sistema. Esto es esencial para aplicaciones que requieren un funcionamiento continuo y seguro.

Experiencia de Uso en Proyectos Similares

La elección del motor de 36V y 350W puede estar respaldada por experiencias previas exitosas en proyectos similares, donde ha demostrado ser confiable y eficiente.

Disponibilidad en el Mercado: Los motores de 36V y 350W son comunes y están ampliamente disponibles en el mercado, lo que facilita su adquisición y reposición en caso de necesidad. La disponibilidad de piezas de repuesto y componentes adicionales es crucial para el mantenimiento y la longevidad del robot.

Compatibilidad con Fuentes de Energía: Las baterías de 36V son comunes y están disponibles en una variedad de capacidades. Esto permite una fácil integración del sistema de energía del robot y facilita la sustitución de baterías si es necesario.

V-B. *Diseño de sistema electrónicos*

V-B1. *Simulación Proteus:* En la simulación realizada en Proteus, ver en la Figura 32, el código desarrollado permite un control preciso y eficiente del movimiento del robot a través de comandos Bluetooth. El robot responde adecuadamente a las instrucciones enviadas desde un dispositivo móvil, interpretando los comandos para moverse hacia adelante, hacia atrás y realizar giros. La implementación de la función cambiar data motor asegura que los motores se ajusten a la velocidad y dirección indicadas, permitiendo un control suave y exacto del desplazamiento y rotación del robot. Los motores responden correctamente a los cambios en los comandos, demostrando la capacidad del sistema para ejecutar movimientos complejos basados en señales inalámbricas.

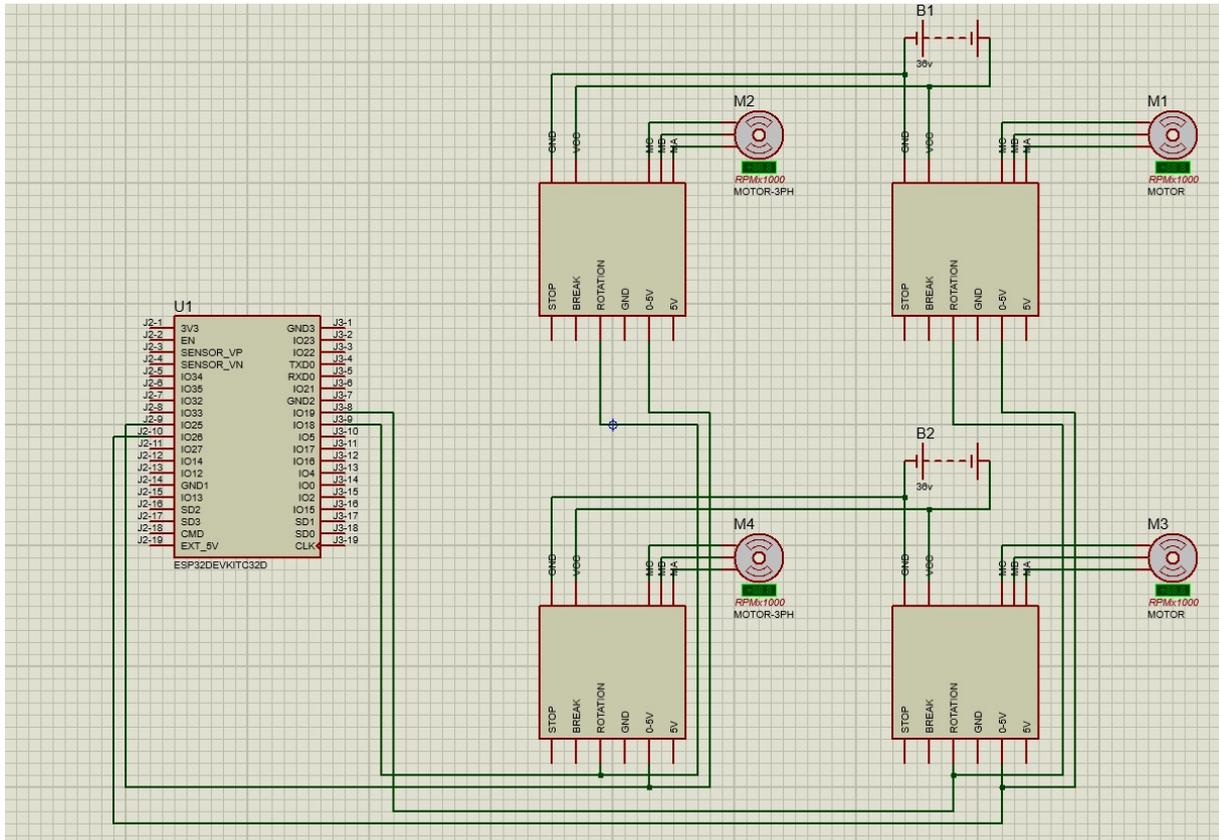


Figura 32. Diagrama inicial de Proteus, por J. Cadena C.Freire, 2024.

Además la simulación destaca la robustez del sistema en la gestión de la comunicación Bluetooth y el procesamiento de los comandos. La estructura del código permite que el robot maneje eficientemente las variaciones en las instrucciones, ajustando dinámicamente la velocidad y dirección según los datos recibidos. Este nivel de control y adaptabilidad es crucial para aplicaciones prácticas, donde la precisión y la respuesta rápida son esenciales. En conjunto, los resultados obtenidos en Proteus confirman que el sistema es viable y efectivo para el control remoto de robots móviles, abriendo posibilidades para su implementación en diversos proyectos de robótica y automatización.

Una vez finalizado el proceso de programación de los motores para los movimientos de desplazamiento y rotación, se procede a la prueba mediante una aplicación móvil con una interfaz sencilla y fácil de usar para cualquier persona. Esta aplicación permite enviar comandos intuitivos para mover el robot hacia adelante, hacia atrás y girar en ambos sentidos. La velocidad y dirección de los motores se ajustan dinámicamente según los datos recibidos, asegurando un control suave y preciso. Además, la aplicación proporciona retroalimentación en tiempo real sobre la velocidad y dirección del robot, permitiendo ajustes precisos según sea necesario. Esta combinación de un código robusto y una

interfaz móvil accesible garantiza un sistema de control eficiente, preciso y fácil de usar, validando su efectividad en escenarios prácticos.

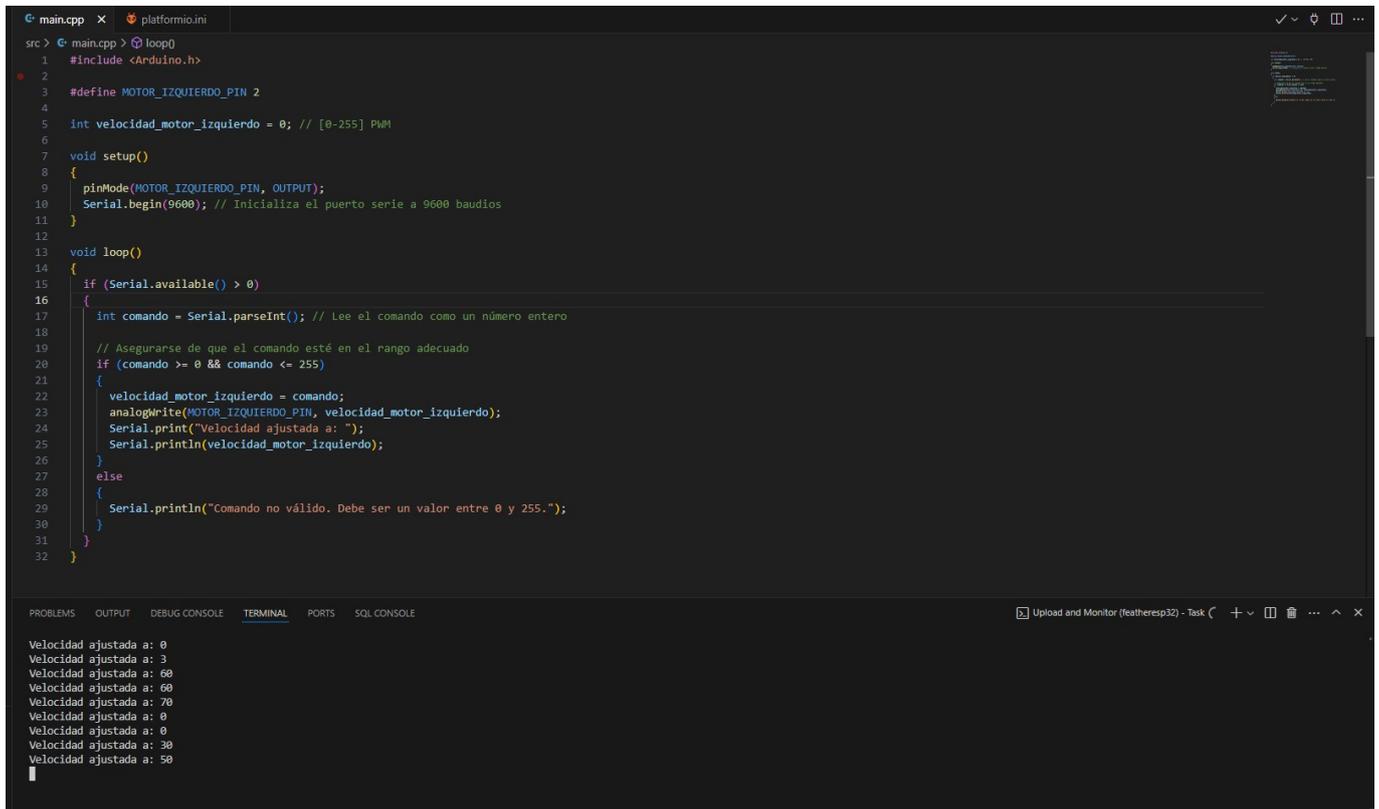
A continuación se muestra en la figura 33, los códigos utilizados para la prueba del sistema.

```
main.cpp x
src > main.cpp > loop()
1  #include <Arduino.h>
2
3  #define MOTOR_IZQUIERDO_PIN 2
4
5  int velocidad_motor_izquierdo = 0; // [0-255] PWM
6
7  void setup()
8  {
9      pinMode(MOTOR_IZQUIERDO_PIN, OUTPUT);
10     Serial.begin(9600); // Inicializa el puerto serie a 9600 baudios
11 }
12
13 void loop()
14 {
15     if (Serial.available() > 0)
16     {
17         int comando = Serial.parseInt(); // Lee el comando como un número entero
18
19         // Asegurarse de que el comando esté en el rango adecuado
20         if (comando >= 0 && comando <= 255)
21         {
22             velocidad_motor_izquierdo = comando;
23             analogWrite(MOTOR_IZQUIERDO_PIN, velocidad_motor_izquierdo);
24             Serial.print("Velocidad ajustada a: ");
25             Serial.println(velocidad_motor_izquierdo);
26         }
27         else
28         {
29             Serial.println("Comando no válido. Debe ser un valor entre 0 y 255.");
30         }
31     }
32 }
```

Figura 33. Código motor izquierdo por J. Cadena C.Freire, 2024.

El código para el control de velocidad de un motor con Arduino permite ajustar la velocidad en un rango de 0 a 255 usando PWM a través de comandos enviados por el puerto serie. Inicialmente, se configura el pin de salida y la velocidad de comunicación. En el bucle principal, el código verifica continuamente los datos disponibles en el puerto serie, valida el valor recibido y ajusta la velocidad del motor en consecuencia. Si el valor está fuera del rango permitido, se notifica al usuario con un mensaje de error. Este enfoque asegura una interacción efectiva y clara, subrayando la importancia de la validación de entradas y la comunicación precisa en sistemas de control basados en microcontroladores.

En la figura 34 el código en C++ para Arduino presenta un enfoque estructurado para el control de motores, comenzando con una definición clara de pines y la inicialización de variables en la función `setup()`, que configura el modo de los pines y la comunicación serie. Este diseño modular facilita la comprensión y mantenimiento del código, crucial en proyectos electrónicos donde los errores pueden ser costosos. En el bucle principal (`loop()`), se implementa una lógica de validación para aceptar solo comandos dentro de un rango específico, protegiendo el hardware de posibles daños. La retroalimentación al usuario sobre la velocidad ajustada o errores mejora la usabilidad y la interacción, optimizando el control del motor y fomentando una interacción efectiva en aplicaciones de robótica y automatización. Este enfoque ejemplifica buenas prácticas en la programación de sistemas embebidos.



```
src > main.cpp x platformio
src > main.cpp > loop0
1 #include <Arduino.h>
2
3 #define MOTOR_IZQUIERDO_PIN 2
4
5 int velocidad_motor_izquierdo = 0; // [0-255] PWM
6
7 void setup()
8 {
9   pinMode(MOTOR_IZQUIERDO_PIN, OUTPUT);
10  Serial.begin(9600); // Inicializa el puerto serie a 9600 baudios
11 }
12
13 void loop()
14 {
15   if (Serial.available() > 0)
16   {
17     int comando = Serial.parseInt(); // Lee el comando como un número entero
18
19     // Asegurarse de que el comando esté en el rango adecuado
20     if (comando >= 0 && comando <= 255)
21     {
22       velocidad_motor_izquierdo = comando;
23       analogWrite(MOTOR_IZQUIERDO_PIN, velocidad_motor_izquierdo);
24       Serial.print("Velocidad ajustada a: ");
25       Serial.println(velocidad_motor_izquierdo);
26     }
27     else
28     {
29       Serial.println("Comando no válido. Debe ser un valor entre 0 y 255.");
30     }
31   }
32 }
```

PROBLEMS OUTPUT DEBUG CONSOLE TERMINAL PORTS SQL CONSOLE Upload and Monitor (featheresp32) - Task

```
Velocidad ajustada a: 0
Velocidad ajustada a: 3
Velocidad ajustada a: 60
Velocidad ajustada a: 60
Velocidad ajustada a: 70
Velocidad ajustada a: 0
Velocidad ajustada a: 0
Velocidad ajustada a: 30
Velocidad ajustada a: 50
```

Figura 34. Funcionamiento de un solo motor por J. Cadena C.Freire, 2024.

El ajuste manual de los componentes fue crucial para garantizar la fiabilidad del sistema. Los elementos que se podían atornillar fueron asegurados herméticamente para prevenir fallas técnicas y cortocircuitos causados por el movimiento. Esta atención al detalle no solo asegura una operación sin problemas en el campo, sino que también facilita el mantenimiento y el reemplazo de piezas cuando sea necesario.

V-C. Diseño del sistema de control

V-C1. Diagramas de flujos: En la figura 37 se muestra un diagrama de flujo que sirve como herramienta visual para planificar y representar de manera precisa y estructurada los pasos que el usuario debe seguir. Este diagrama no solo detalla cada proceso necesario para la comunicación entre el usuario y el robot, sino que también facilita la identificación de posibles mejoras o ajustes en el flujo de trabajo, asegurando una interacción eficiente y sin errores.

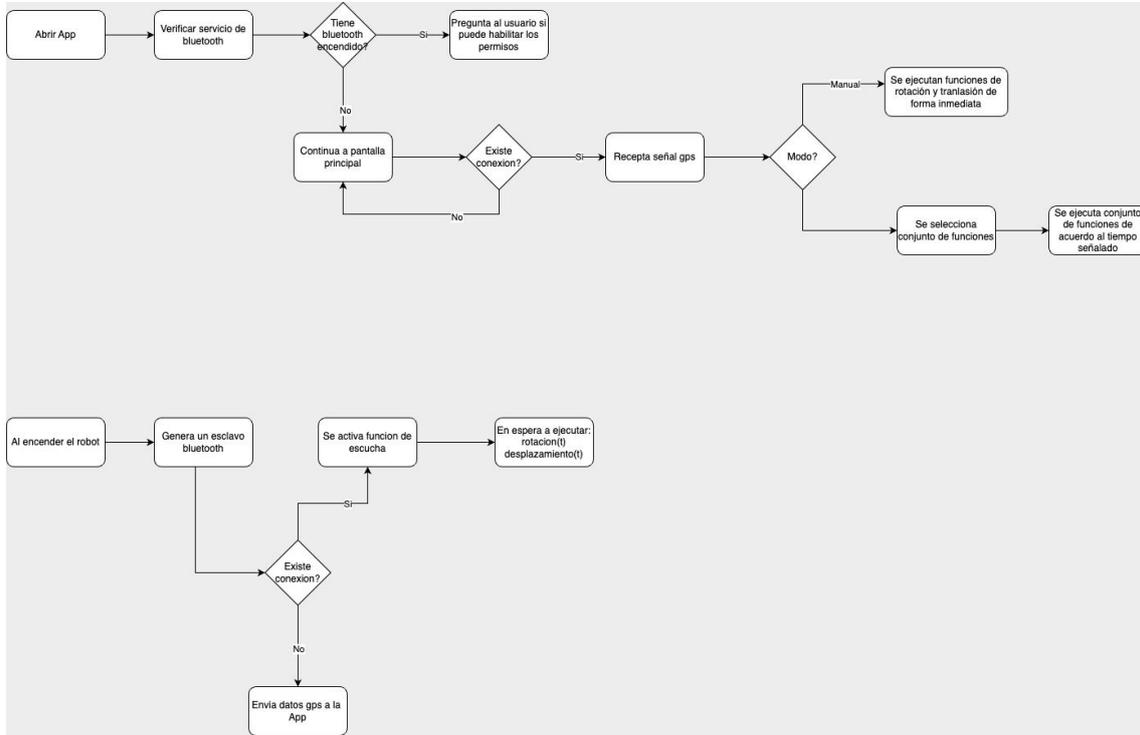


Figura 37. Diagrama de Flujo , por J. Cadena C.Freire, 2024.

V-C2. Diagramas de flujos usuario-robot: La figura 38 ilustra el funcionamiento interno de la aplicación, explicando cada paso que el usuario debe seguir al utilizarla. Primero, el usuario debe abrir la aplicación y establecer una conexión Bluetooth, para lo cual es necesario habilitar los permisos correspondientes. Una vez completados estos pasos iniciales, el usuario puede elegir entre dos modos: el modo manual, donde controla directamente las funciones de rotación y traslación del robot, o el modo automático, donde selecciona un conjunto de funciones predefinidas. Este diseño modular de la aplicación permite al usuario adaptarse a diferentes escenarios operativos, optimizando el rendimiento del robot en cada situación.

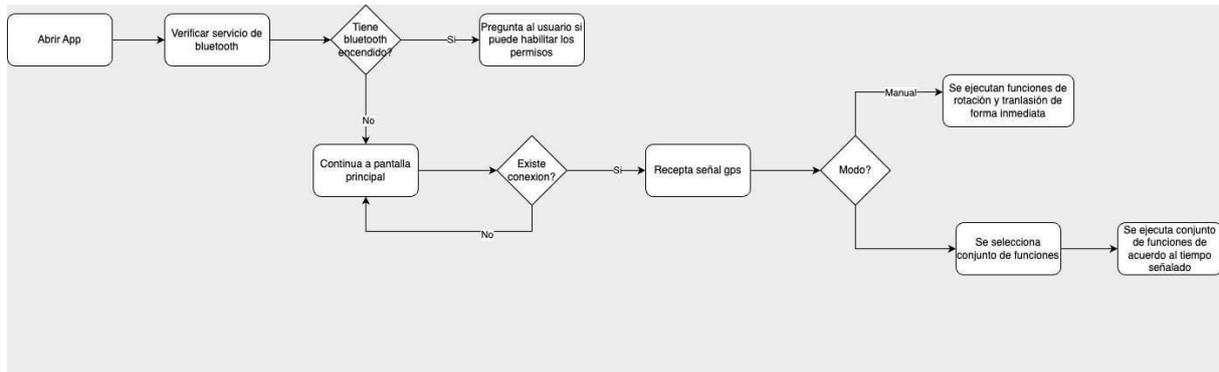


Figura 38. Diagrama de flujo usuario-robot, por J. Cadena C.Freire, 2024.

V-C3. *Diagramas de flujos robot:* El diagrama de flujo también representa el funcionamiento del robot, comenzando con su encendido y la posterior conexión a la interfaz usuario-robot. Si la conexión Bluetooth se establece correctamente, el usuario puede continuar con el proceso dentro de la aplicación, lo que garantiza un control fluido y continuo del robot durante la operación. Este enfoque asegura que el sistema sea intuitivo y fácil de seguir, reduciendo la posibilidad de errores y mejorando la experiencia del usuario, ver la Figura 39.

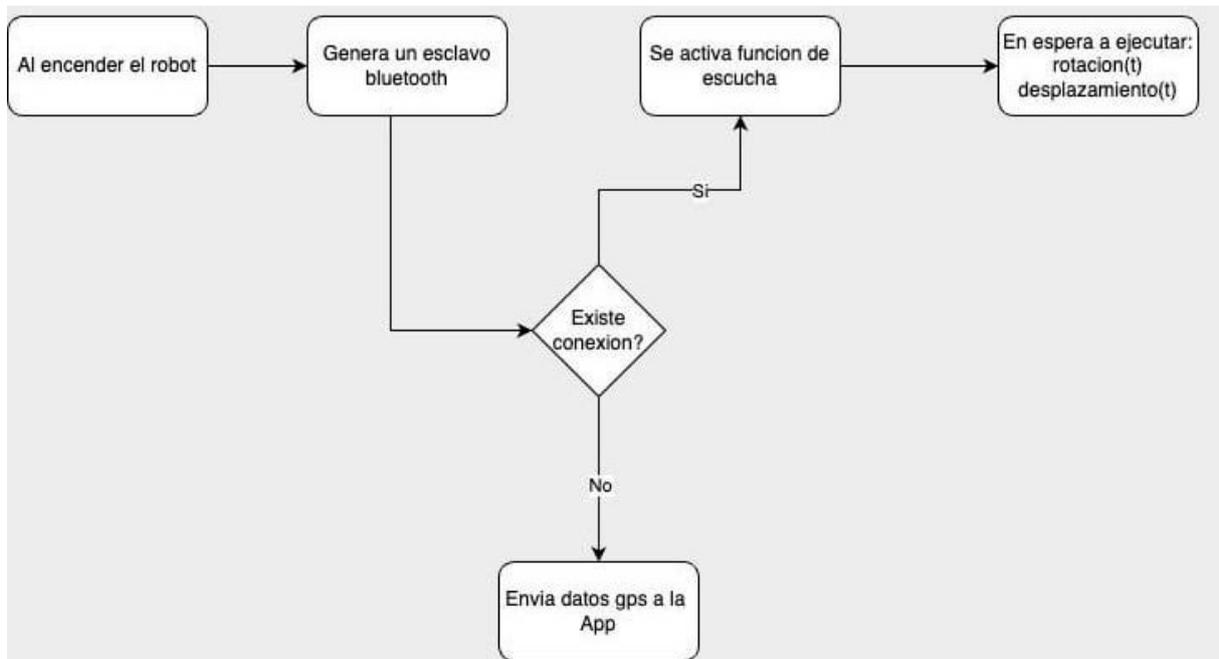


Figura 39. Diagrama de flujo robot, por J. Cadena C.Freire, 2024.

V-C4. *Diagrama lógico:* En la Figura 40 muestra como es el diagrama lógico representa un sistema de gestión de procesos, compuesto por tres tablas relacionadas:

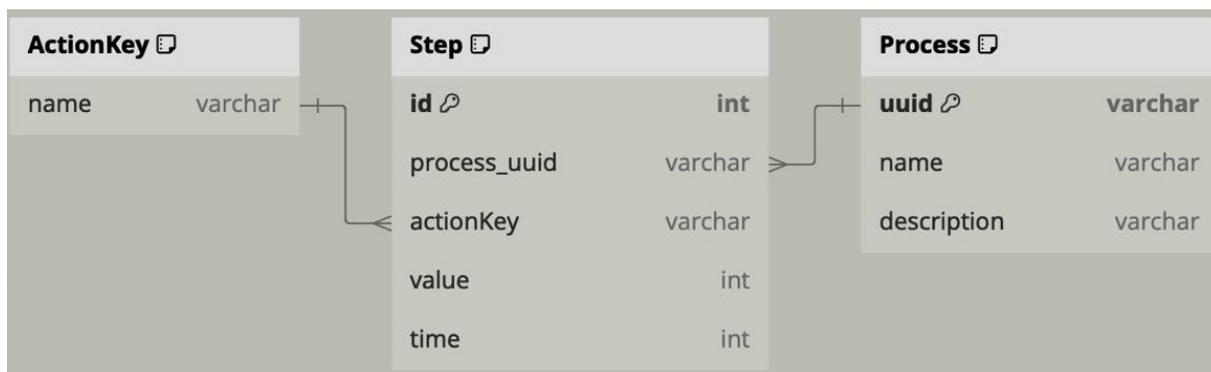


Figura 40. Diagrama lógico, por J. Cadena C.Freire, 2024.

ActionKey: Define un conjunto de acciones que pueden realizarse en un paso del proceso, como "desplazar"(move) y rotar"(rotate).

Process: Representa un proceso general, con un identificador único (UUID), un nombre y una descripción.

Step: Define un paso específico dentro de un proceso, asociado a un proceso mediante el UUID y que incluye una acción, un valor y un tiempo específicos.

Explicación de las Tres Tablas

ActionKey: Esta tabla define las acciones posibles en un paso del proceso, como desplazar (move) o rotar (rotate). El campo "name" almacena el nombre de la acción que se ejecutará.

Step: Representa un paso individual en un proceso, especificando la acción a realizar, su valor y el tiempo que tomará. Incluye un identificador único, la referencia al proceso correspondiente, la acción a ejecutar, el valor asociado (por ejemplo, distancia o ángulo), y el tiempo necesario para completar ese paso.

Process: Representa un proceso completo, que incluye varios pasos. Almacena un identificador único (UUID), un nombre y una descripción del proceso, detallando su propósito o ejecución.

V-C5. *Programación del Diagrama Lógico*: Este esquema define un sistema estructurado para modelar procesos lógicos que consisten en una serie de pasos secuenciales. Cada paso está asociado a una acción específica y tiene un valor y un tiempo asignado, lo que facilita la programación y la ejecución de procesos en sistemas que requieren control detallado, como robots o sistemas automatizados. Este diseño permite además la reutilización de procesos y facilita la modificación o expansión de la lógica implementada, ya que los procesos y sus pasos están claramente separados y definidos.

```
// Enum para las acciones que se pueden realizar en un paso del proceso
Table ActionKey {
  name varchar
  Note: "Enum for actions: desplazar (move) and rotar (rotate)"
}
```

```
// Tabla que representa un paso dentro de un proceso
Table Step {
  id int [pk, increment]
  process_uuid varchar [ref: > Process.uuid]
  actionKey varchar [ref: > ActionKey.name]
  value int
  time int
  Note: "Represents a step in the process with an action, value, and time"
}
```

```
// Tabla que representa un proceso, compuesto por varios pasos
Table Process {
  uuid varchar [pk]
  name varchar
  description varchar
  Note: "Represents a process which includes a list of steps"
}
```

V-D. Listas de materiales de diseño y componentes electrónicos

Antes de comenzar la implementación de un proyecto de diseño electrónico, es importante realizar la lista de materiales (también conocidas como Bill of Materials o BOM) tanto para los componentes de diseño como para los electrónicos. Las mismas que nos ayudarán a organizar y planificar el proyecto de manera sencilla y efectiva.

El propósito de realizar estas listas de materiales es garantizar que todos los componentes físicos del proyecto se encuentren disponibles en el mercado, además de facilitar la organización de compras y gestión de costos tanto para los componentes mecánicos y electrónicos.

En la Tabla II se puede observar el desarrollo de la base del módulo, el cual se muestra una lista de materiales que son importantes para la planificación y ejecución exitosa.

Tabla II
TABLA DE MATERIALES DE DISEÑO Y COMPONENTES ELECTRÓNICOS

Materiales	Cantidad
ESP32 Tipo-C	1
Protoboard	2
Motores 350W	4
BLCD 36V para motores	4
Batería 36V	2
Pack Jumpers	6
MPU-9250 - Sensor inercial	1
GPS NEO-7M GPS	1
Cables para alta tensión baterías	2
Tubo cuadrado 1/4 in	1
Tornillo de cabeza plana A2-70 pack	1
Tubo redondo de acero inoxidable de 1/2 in	1
Varilla de soldadura pack	1
Broche metálico para rueda	4
Plancha de aluminio	1
Plancha de acero negro	1
Cable para circuito	1
Parque de brida de nylon	1
Tornillo tripa de pato 1/2 in pack	1
Convertidor de voltaje	1
Espadachines hembra para PCB de 40 pines	1
Conector banana hembra de 4mm	12
Rollo de estaño	1
Bornera de 2 pines	6
Spray de pintura negra	1
Varilla de soldadura de acero inoxidable pack	1
Termoencogible	1

V-E. Desarrollo del sistema mecánico, sistema electrónico y sistema de control

V-E1. Estructura del diseño de la base: En la figura 41 Se puede observar el desarrollo de la base del módulo, el cual desempeña un papel crucial al soportar el peso de todos los componentes. Este soporte es fundamental para garantizar la estabilidad y funcionalidad del sistema, dado que su diseño robusto está específicamente creado para manejar la carga de manera eficiente. La estructura del módulo, con unas medidas de 31 cm de ancho y 90 cm de longitud, es esencial para asegurar que el peso de las semillas y otros elementos se distribuya de manera uniforme. Estas dimensiones no son arbitrarias; han sido cuidadosamente calculadas para proporcionar la estabilidad necesaria que evita cualquier desequilibrio o colapso potencial.



Figura 41. Estructura de la base elaborado por J. Cadena C.Freire, 2024.

Además, estas medidas contribuyen a la reducción del esfuerzo requerido por las ruedas del módulo. Al optimizar la distribución del peso y proporcionar una base sólida y amplia, se minimiza la carga y la fricción sobre las ruedas, facilitando su movimiento y prolongando su vida útil. De este modo, el diseño del módulo no solo garantiza la estabilidad y seguridad de los componentes que sostiene, sino que también mejora la eficiencia y durabilidad del sistema de transporte. Esta consideración es especialmente importante en aplicaciones donde el módulo debe ser móvil o reubicado frecuentemente, asegurando un funcionamiento suave y sin problemas.

V-E2. Construcción de planta: La planta se ha construido mediante el uso de dos materiales, los cuales son acero inoxidable y acero negro. Para la construcción de cada pieza se utilizaron diferentes tipos de procedimientos de manufactura, los cuales fueron corte manual o con maquinaria, y el uso de una moladora de esmeril. Además, se utilizó una soldadora para unir las piezas y asegurar la integridad de la estructura final, ver en la Figura 42.



Figura 42. Diseño de la base con las 4 llantas por J. Cadena C.Freire, 2024.

V-E3. Piezas metálicas: Se construyeron los soportes y la base principalmente con acero inoxidable de 1,2 mm de grosor para asegurar la durabilidad y resistencia necesaria como se puede apreciar en la figura 43. Esta decisión se tomó debido a la necesidad de que estos componentes, que soportarán la mayor carga del sistema, sean extremadamente rígidos y duraderos. Además, la estructura asegura que la carga de las semillas permanezca estable, evitando cualquier desplazamiento indeseado.

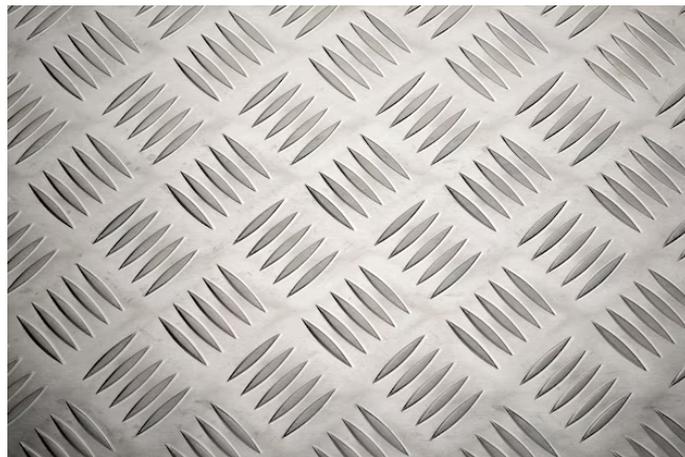


Figura 43. Piezas metálicas, por J. Cadena C.Freire, 2024.

La estructura robusta de metal fue cuidadosamente construida para soportar el peso de los componentes electrónicos y la batería, además de asegurar la durabilidad en condiciones de campo difíciles. Las cuatro ruedas neumáticas fueron seleccionadas por su capacidad de desplazarse sobre terrenos variados, desde suelos sueltos hasta superficies más compactas, lo que garantiza una movilidad eficiente en diferentes tipos de terrenos agrícolas, como se muestra en la figura 44



Figura 44. Estructura de la base fija, por J. Cadena C.Freire, 2024.

Para asegurar un ensamblaje robusto y confiable, cada componente del robot para la siembra de maíz fue meticulosamente ajustado. Los elementos que se pueden atornillar, como los motores de las ruedas, las placas de montaje de los módulos electrónicos y los soportes para la batería, fueron asegurados herméticamente. Este ajuste preciso no solo previene fallas técnicas, sino que también minimiza el riesgo de cortocircuitos que podrían generarse debido al movimiento del robot en terrenos irregulares.

Durante el ensamblaje manual, se prestó especial atención a la fijación de todos los componentes críticos. Los tornillos se apretaron con el torque adecuado para asegurar una unión firme sin dañar los componentes o la estructura. Esto garantiza que, incluso bajo vibraciones o sacudidas causadas por el desplazamiento en el campo, los elementos del robot permanezcan en su lugar y funcionen correctamente.

V-E4. Ensamble: Una vez finalizados los procesos de corte y de impresión, se procedió a ensamblar físicamente el sistema. Los componentes de acero inoxidable, previamente cortados e impresos según las especificaciones del diseño, fueron manipulados para formar los pliegues necesarios. Cada pieza fue cuidadosamente doblada y ajustada para asegurar un encaje perfecto, lo que garantizaba tanto la robustez como la estabilidad de la estructura.

El proceso de ensamblaje también incluyó la integración de los componentes electrónicos. Las placas de prototipos, los controladores de motores, las baterías y otros módulos electrónicos fueron instalados en sus respectivos lugares dentro del chasis de acero inoxidable. Se aseguraron todos los elementos con soportes y fijaciones adecuadas para prevenir cualquier movimiento durante la operación del robot, se obtiene el siguiente módulo mostrado en la Figura 45 el diseño del módulo en este caso se procederá a realizar pruebas.



Figura 45. Diseño de ensamble elaborado por J. Cadena C.Freire, 2024.

Para verificar el funcionamiento de uno de los motores delanteros del robot para la siembra de maíz, se llevó a cabo una serie de pruebas detalladas que incluyeron tanto la conexión del hardware como la programación en C++. Primero, se preparó todo el material necesario: el motor delantero, una placa de desarrollo Arduino, un controlador de motor (como el L298N), cables de conexión, una fuente de alimentación adecuada y una computadora con el entorno de desarrollo Arduino IDE. La conexión del hardware se realizó con precisión para asegurar la funcionalidad y prevenir cualquier posible problema técnico.

El procedimiento de conexión comenzó con la integración de la placa de desarrollo y el controlador del motor. Se conectaron los pines de control del controlador del motor a los pines digitales de la placa de desarrollo, específicamente los pines D2 y D3. Luego, se conectaron los terminales del motor a las salidas del controlador del motor, asegurándose de que las conexiones fueran firmes y seguras. La fuente de alimentación se conectó tanto al controlador del motor como a la placa de desarrollo para proporcionar la energía necesaria para las pruebas.

V-F. *Elaboración de la Pcb*

V-F1. *Elaboración de las pistas de conexión:* En la Figura 46 muestra el diagrama presenta el diseño final de la placa PCB, donde se destaca la distribución optimizada de los componentes electrónicos y las pistas de conexión. La disposición refleja una planificación meticulosa para minimizar las interferencias electromagnéticas y asegurar un flujo de corriente eficiente. Además, se ha prestado especial atención a la separación adecuada entre las señales de alta y baja frecuencia para evitar ruidos que puedan afectar el rendimiento. Los planos de tierra y de alimentación

están diseñados para proporcionar una distribución uniforme de energía, mejorando la estabilidad y reduciendo las posibles caídas de tensión. En conjunto, este diseño final demuestra un equilibrio entre funcionalidad, eficiencia y robustez, cumpliendo con los requisitos del proyecto para una operación fiable y precisa.

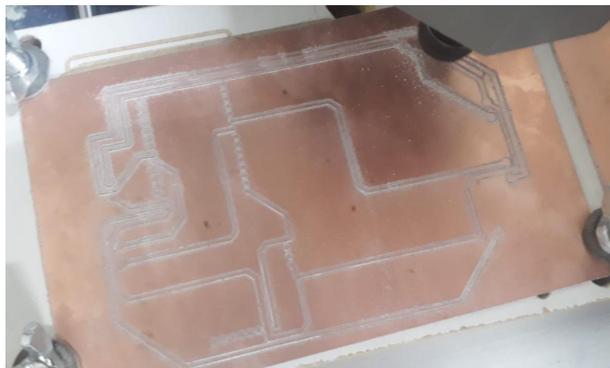


Figura 46. Elaboración de placa de control. , por J. Cadena C.Freire, 2024.

V-F2. Placa Pcb terminada: Una vez terminada la Pcb como se observa en la figura 47 se realiza una inspección visual para detectar defectos, seguida de pruebas eléctricas para verificar continuidad y funcionalidad.

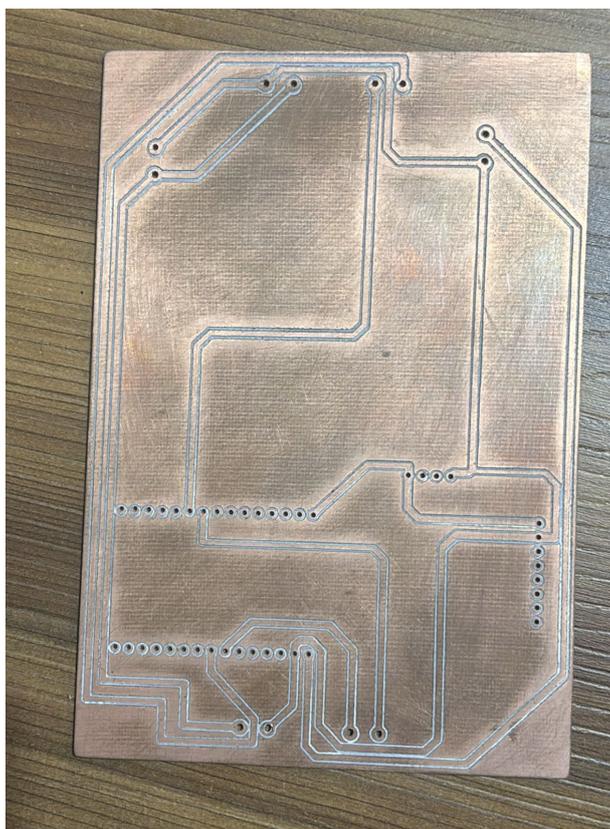


Figura 47. Placa de control terminada. , por J. Cadena C.Freire, 2024.

V-G. Desarrollo del sistema dinámico del robot sembrador

V-G1. Fórmulas de las Velocidades de los Motores: Para este análisis, nos basamos en la cinemática de un robot móvil con ruedas. Primero, consideramos las ecuaciones de cinemática de un robot diferencial de dos ruedas.

Se traza un sistema de referencia cartesiano local sobre el robot, en el cual su velocidad en X' sería V_i y como nunca se mueve en Y' , su velocidad en ese eje sería 0. Cada rueda aporta con una velocidad lineal x_1, x_2 y una velocidad angular $\dot{\phi}_1, \dot{\phi}_2$.

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{x_1+x_2}{2} \\ 0 \\ \frac{x_1-x_2}{L} \end{pmatrix}$$

Donde L es la distancia entre las ruedas. Sabiendo que $\dot{x} = r\dot{\phi}$, donde r es el radio de las ruedas, entonces:

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{r\dot{\phi}_1+r\dot{\phi}_2}{2} \\ 0 \\ \frac{r\dot{\phi}_1-r\dot{\phi}_2}{L} \end{pmatrix}$$

La velocidad \dot{x} corresponde a la velocidad en x' del robot, por lo tanto, $\dot{x} = V_i$. Ahora necesitamos adaptar el modelo para un robot de 4 ruedas fijas, ver en la Figura 48.

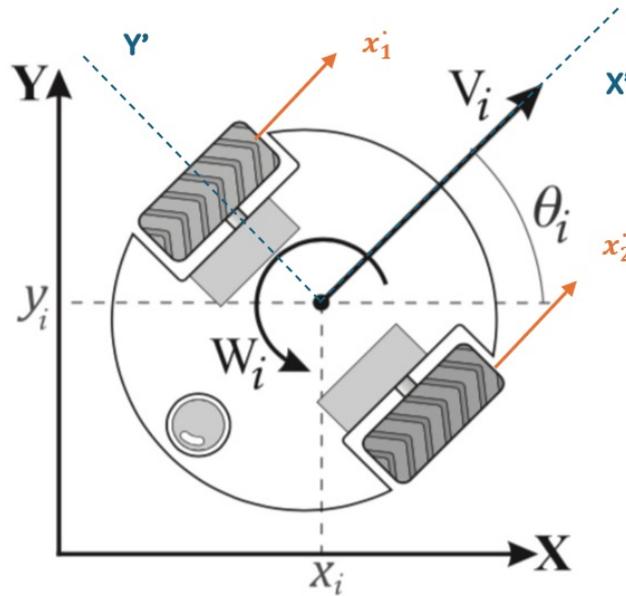


Figura 48. Modelo de direccionamiento de robot de 2 Ruedas por J. Cadena C.Freire, 2024.

Un robot móvil de 4 ruedas puede analizarse como un robot diferencial de dos ruedas, debido a que el par de ruedas de cada lado está en la misma orientación, por lo que solo se necesita agregar o tomar en cuenta su contribución al movimiento.

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{r\dot{\phi}_1+r\dot{\phi}_2+r\dot{\phi}_3+r\dot{\phi}_4}{4} \\ 0 \\ \frac{r\dot{\phi}_1+r\dot{\phi}_2-r\dot{\phi}_3-r\dot{\phi}_4}{L} \end{pmatrix}$$

Al comparar la cinemática de un robot de cuatro ruedas con uno de dos ruedas, notamos que la distancia entre las ruedas debe aumentar. Esto se debe a que en la fórmula que describe la velocidad angular $\dot{\theta}$, al incrementar

la contribución de movimiento de las otras dos ruedas, los términos numéricos en la parte superior de la ecuación aumentan. Dado que $\dot{\theta}$ debe mantenerse constante en ambas configuraciones de ruedas (ya sea cuatro o dos), el factor L , que representa la distancia entre las ruedas, debe incrementarse para que esta relación se mantenga coherente, ver en la Figura 49.

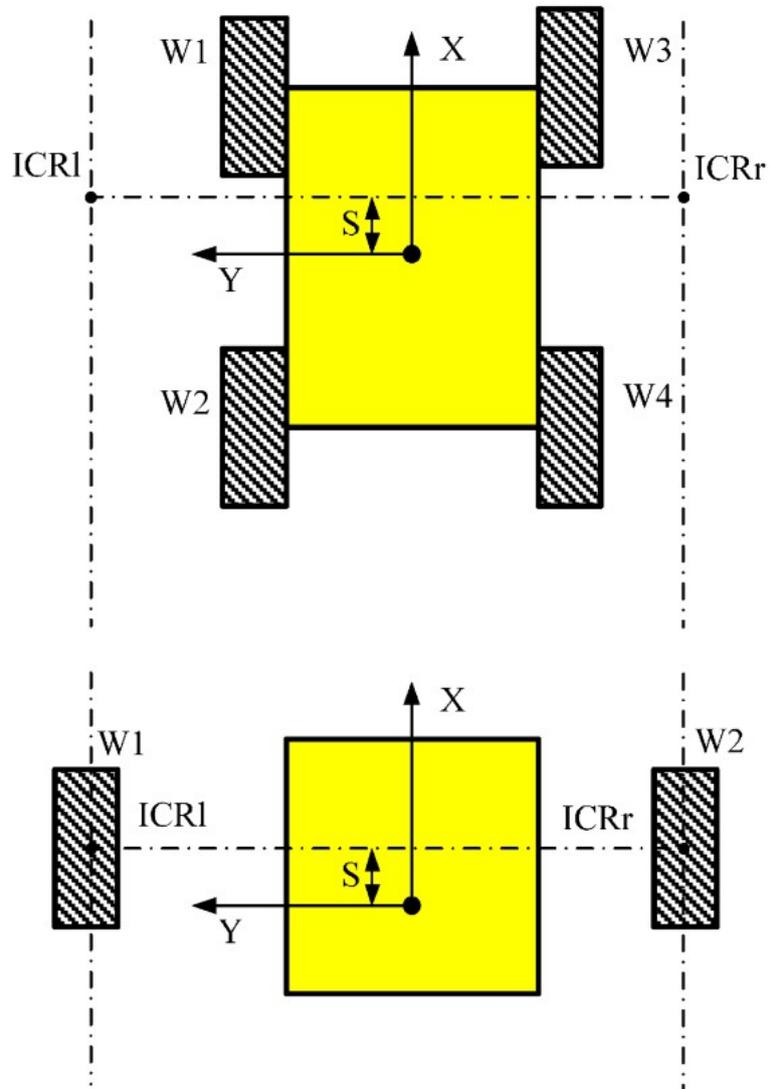
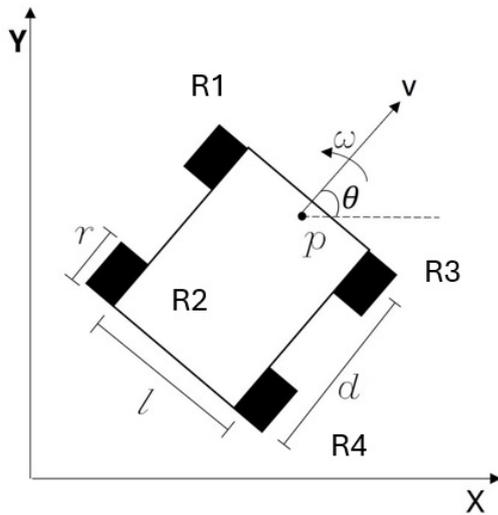


Figura 49. cinemática del Robot de 4 ruedas por J. Cadena C.Freire, 2024.

Ahora tenemos las fórmulas para poder configurar las velocidades angulares de las ruedas en función de la velocidad lineal y/o velocidad angular que queremos que tenga el robot así como lo muestra la Figura 50.



$$v = \frac{r(\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2 + \dot{\varphi}_3 + \dot{\varphi}_4)}{4}$$

$$\omega = \frac{r(\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_3 - \dot{\varphi}_4)}{L}$$

Figura 50. configuración de velocidades por J. Cadena C.Freire, 2024.

Donde:

- v es la velocidad del robot
- ω es la velocidad angular con la que el robot gira sobre el plano
- L es la distancia entre el par de ruedas 1, 2 y 3, 4
- $\dot{\varphi}_1$ es la velocidad angular de la rueda 1
- $\dot{\varphi}_2$ es la velocidad angular de la rueda 2
- $\dot{\varphi}_3$ es la velocidad angular de la rueda 3
- $\dot{\varphi}_4$ es la velocidad angular de la rueda 4

Suponiendo que las ruedas 1 y 2 tienen la misma velocidad angular, al igual que las ruedas 3 y 4: $\dot{\varphi}_1 = \dot{\varphi}_2$, $\dot{\varphi}_3 = \dot{\varphi}_4$, entonces:

$$v = \frac{r(\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_3)}{2}$$

$$\omega = \frac{2r(\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_3)}{L}$$

Resolviendo el sistema para $\dot{\varphi}_1$ y $\dot{\varphi}_3$:

$$\dot{\varphi}_1 = \frac{v}{r} + \frac{\omega L}{4r}$$

$$\dot{\varphi}_3 = \frac{v}{r} - \frac{\omega L}{4r}$$

De esta forma, podemos configurar la velocidad de las ruedas en función de la velocidad del robot v , la velocidad angular de giro ω y la longitud entre las ruedas L .

El robot sembrador debe moverse a una velocidad lenta debido a la operación de sembrado de las semillas. En promedio, una persona caminando lento puede llegar a una rapidez de 3 km/h, y cuando deba ejecutar giros en la trayectoria podría hacerlo con una velocidad también baja de unos 0.4 rad/s. Por lo tanto:

$$3 \text{ km/h} = 83,33 \text{ cm/s}, \quad \text{se lo deja en } 83 \text{ cm/s}$$

La longitud L es de 53.34 cm, y el radio de las ruedas es de 8.26 cm.

Para las ruedas 1 y 2:

$$\dot{\phi}_1 = \frac{83}{8,26} + \frac{0,4 \times 53,34}{4 \times 8,26} = 10,70 \text{ rad/s} = 102,18 \text{ rpm} \approx 102 \text{ rpm}$$

Para las ruedas 3 y 4:

$$\dot{\phi}_3 = \frac{83}{8,26} - \frac{0,4 \times 53,34}{4 \times 8,26} = 9,40 \text{ rad/s} = 89,76 \text{ rpm} \approx 90 \text{ rpm}$$

Si queremos que el carrito gire con una velocidad angular de 0.4 rad/s y avance a una velocidad de 83 cm/s, entonces las ruedas 1 y 2 deben girar a 102 rpm y las ruedas 3 y 4 a 90 rpm. Sin embargo, eso es cuando se topa con obstáculos donde deba girar mientras avanza. Si queremos que solo gire sin avanzar, entonces $v = 0$:

$$\dot{\phi}_1 = \frac{0,4 \times 53,34}{4 \times 8,26} = 0,65 \text{ rad/s} = 6,21 \text{ rpm} \approx 6 \text{ rpm}$$

$$\dot{\phi}_3 = -\frac{0,4 \times 53,34}{4 \times 8,26} = -0,65 \text{ rad/s} = -6,21 \text{ rpm} \approx -6 \text{ rpm}$$

El negativo solo denota que gira en sentido contrario, por lo tanto, las ruedas 1 y 2 deben girar a 6 rpm y las ruedas 3 y 4 a 6 rpm en sentido contrario.

Para el último caso, cuando queremos que solo avance $\omega = 0$:

$$\dot{\phi}_1 = \frac{83}{8,26} = 10,05 \text{ rad/s} = 95,97 \text{ rpm} \approx 96 \text{ rpm}$$

$$\dot{\phi}_3 = \frac{83}{8,26} = 10,05 \text{ rad/s} = 95,97 \text{ rpm} \approx 96 \text{ rpm}$$

Las ruedas 1 y 2 deben girar a 96 rpm al igual que las ruedas 3 y 4 para que el carrito solo avance en línea recta. Con estas configuraciones de odometría, podemos hacer mover el carrito a la velocidad deseada.

Análisis de la Tasa de Sembrado

Suponiendo que el carrito se mueva siempre hacia adelante (con el parámetro v del análisis anterior diferente de cero), se puede estimar el número de semillas que incrusta en la tierra.

La rueda sembradora cuenta con 7 dientes a su alrededor, que a medida que el carrito recorre un cierto desplazamiento, va depositando las semillas. Como la velocidad configurada del carrito es de 83 cm/s (velocidad a la que una persona promedio camina a un ritmo lento), y la rueda cuenta con un diámetro de 45 cm, si calculamos su perímetro:

$$P = 2\pi r = \pi D = \pi(45) = 141,37 \text{ cm}$$

Esto quiere decir que por cada 141.37 cm que recorre el carrito, habrá sembrado 7 semillas. Ahora, con esta información, podemos calcular la tasa de cambio del sembrado.

El número de semillas que se incrustan en la tierra puede ser calculado como:

$$n_s = \frac{7}{141,37}x \approx 0,05x$$

$$n_s = 0,05x$$

Donde n_s es el número de semillas y x es la distancia que recorre el carrito en cm.

Si derivamos con respecto al tiempo t :

$$\dot{n}_s = 0,05\dot{x}$$

Como sabemos que la derivada con respecto al tiempo de la distancia recorrida es la rapidez, \dot{x} corresponde a la rapidez del carrito en cm/s. Por lo tanto, tenemos una expresión para calcular la tasa de sembrado en caso de que se quiera configurar el carrito a otra rapidez.

Calculando la tasa con la rapidez actual:

$$\dot{n}_s = 0,05 \times 83 = 4,15 \approx 4 \text{ semillas/s}$$

Lo que indica que el carrito puede sembrar aproximadamente 4 semillas por segundo.

Para saber cuántas semillas puede sembrar en función del tiempo t en segundos:

$$n_s = 4,15t$$

Es recomendable dejar la tasa de cambio lo más aproximada con decimales y redondear al final en el cálculo de las semillas si es necesario. Por ejemplo, si han transcurrido 60 segundos de operación:

Con 4,15:

$$n_s = 4,15 \times 60 = 249 \text{ semillas}$$

Con 4:

$$n_s = 4 \times 60 = 240 \text{ semillas}$$

Se puede notar la diferencia en los cálculos, por lo que es recomendable dejar la tasa de cambio lo más aproximada con decimales y redondear al final en el cálculo de las semillas si es necesario. Ahora, si se desea configurar el carrito con otra velocidad, las semillas se deben estimar usando esta expresión combinada con el parámetro de su rapidez v del análisis anterior y el tiempo de operación del carrito:

$$n_s = 0,05vt$$

En esta sección, se detalla toda la información correspondiente a las funciones matemáticas aplicadas para el análisis del movimiento y el direccionamiento de un robot móvil con ruedas.

Para este análisis, nos basamos en los principios de la cinemática de robots móviles con ruedas. En particular, consideramos un robot diferencial de dos ruedas, el cual es un tipo común de robot móvil debido a su simplicidad y capacidad de maniobra.

Primero, establecemos un sistema de referencia cartesiano local fijado al robot. En este sistema, la rapidez a lo largo del eje X' se denota como V_i , mientras que en el eje Y' , la rapidez es cero, ya que el robot no se desplaza lateralmente. Cada rueda del robot contribuye a su movimiento con velocidades lineales \dot{x}_1 y \dot{x}_2 , así como con velocidades angulares $\dot{\varphi}_1$ y $\dot{\varphi}_2$.

V-G2. *Simulación de la respuesta del sistema Movimiento en línea recta* : En la Figura 51, las flechas rojas también indican las fuerzas aplicadas por las ruedas del robot. Aquí, todas las ruedas empujan hacia una sola dirección, lo que resulta en un desplazamiento lineal del robot.

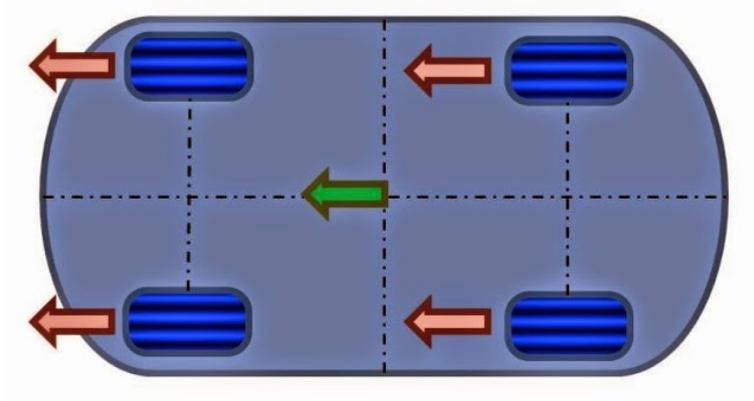


Figura 51. Robot Movimiento en línea recta.

V-G3. *Simulación de la respuesta del sistema Movimiento en laterales*: La Figura 52 muestra un esquema de un robot con 4 ruedas en el que las flechas rojas indican las fuerzas aplicadas por cada rueda. Las ruedas superior izquierda e inferior derecha empujan hacia la izquierda, mientras que las ruedas superior derecha e inferior izquierda empujan hacia la derecha. Este patrón de fuerzas diagonales provoca una rotación del robot en sentido horario alrededor de su centro.

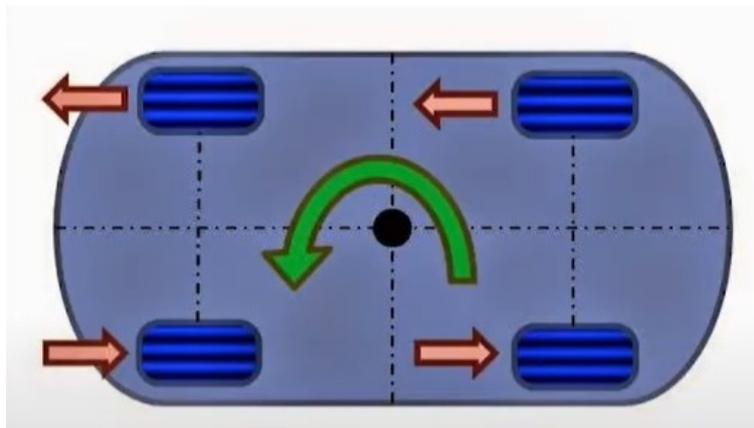


Figura 52. Descripción del movimiento del robot

V-G4. *Simulación de la respuesta del sistema Movimiento en Rotación:* En la Figura 53, las flechas rojas también indican las fuerzas aplicadas por las ruedas del robot. con la diferencia de que 2 de las 4 ruedas ejercen una fuerza inferior, este movimiento se logra al alinear las fuerzas en la misma dirección para mover el robot lateralmente.

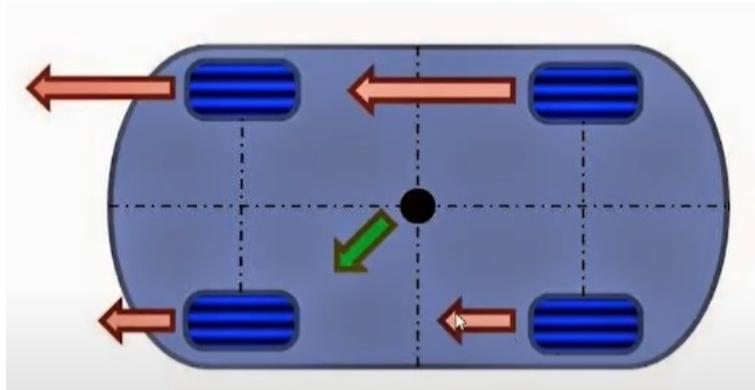


Figura 53. Modelo para comparación de técnicas de control

V-H. *Interfaz usuario-robot*

En la figura 54, se puede visualizar que en el modo manual, el usuario tiene el control total sobre el movimiento del robot. Puede ajustar la potencia aplicada a las ruedas para lograr un movimiento constante o equilibrado, lo cual es esencial para mantener una velocidad uniforme durante las maniobras. Además, el modo manual permite dirigir el robot tanto hacia adelante como hacia atrás, proporcionando flexibilidad en la navegación. El usuario también puede modificar la intensidad del movimiento de las ruedas, ajustando la velocidad del robot según las condiciones del terreno o las necesidades específicas de la tarea en cuestión.



Figura 54. Modo manual

Por otro lado, en la figura 55 se puede apreciar sobre el modo automático, la interfaz está integrada con Google Maps, lo que permite al robot realizar navegación autónoma con base en rutas predefinidas. Este modo simplifica el proceso de movimiento al permitir que el robot siga trayectorias diseñadas previamente, aprovechando la precisión de los mapas geoespaciales. En este modo, el usuario cuenta con tres opciones principales: iniciar, detener y seleccionar procesos. La opción de iniciar activa la operación automática del robot según la configuración establecida, mientras que la opción de detener permite suspender la operación en cualquier momento, ya sea para ajustar configuraciones o en caso de emergencia.



Figura 55. Modo automático

En la figura 56 se puede apreciar como se visualiza la opción de seleccionar procesos en la interfaz de la aplicación y como permite al usuario elegir entre diferentes rutas, configuraciones de navegación o tareas específicas, adaptando el comportamiento del robot a las necesidades de la operación automatizada.

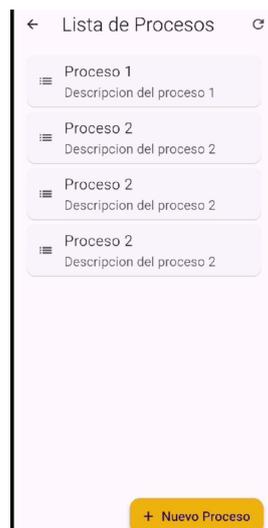


Figura 56. Procesos

En la figura 57, se muestran los procesos implementados en la aplicación móvil, donde el usuario puede seleccionar la opción de desplazar y rotar elementos. Esta funcionalidad permite mover y ajustar la orientación de los objetos dentro de la interfaz, ofreciendo flexibilidad en la disposición de los componentes. El diseño intuitivo guía al usuario a través de un flujo de trabajo sencillo, optimizando la interacción y facilitando tareas como la personalización o alineación de contenidos, lo que mejora la experiencia de uso y maximiza la adaptabilidad a diferentes necesidades y dispositivos móviles.

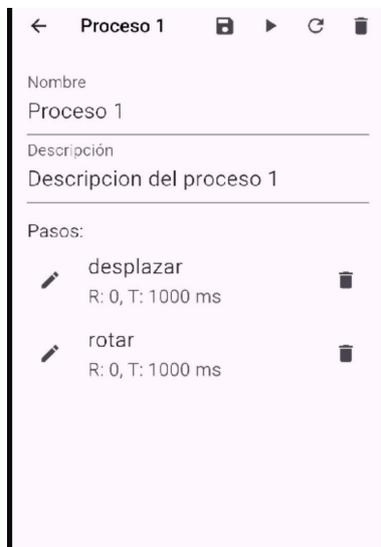


Figura 57. Opciones de desplazamiento

V-I. Pruebas de funcionamiento del robot sembrador

V-II. Análisis y pruebas de funcionamiento del robot sembrador en terreno ideal: La Tabla III evalúa el rendimiento del robot sembrador de maíz con un desperdicio del 1% en modos manual y automático, durante tiempos de operación de 30, 60 y 90 segundos. Ambos modos muestran un desempeño sólido y consistente, con una velocidad constante de 83 cm/s y una distancia recorrida que aumenta linealmente con el tiempo. La tasa de siembra y la tasa por unidad de distancia se mantienen constantes, indicando eficiencia uniforme. Sin embargo, el número de semillas efectivas disminuye ligeramente debido al desperdicio. El modo automático destaca por su mayor precisión y eficiencia en tiempos prolongados, mientras que el modo manual, aunque efectivo, muestra menos consistencia en pruebas más largas. Estos valores los podemos calcular mediante las pruebas de Funcionamiento Anexo D y mediante cálculos matemáticos de la pág 56-60.

Tabla III
TABLA DE FUNCIONAMIENTO DEL ROBOT SEMBRADOR DE MAÍZ CON UN DESPERDICIO DEL 1 %

Prueba	Modo	Tiempo de operación (s)	Velocidad del carrito (cm/s)	Distancia total recorrida(m)	Numero de semillas	Tasa de siembra	Espacio entre semillas(cm)	Desperdicio de semillas(5 por ciento)	Número de semillas efectivas	Obs
1	Manual	30s	83cm/s	24.9m	120	4	15cm	1.2	118.8	Buen desempeño en tiempos reducidos
2	Manual	60s	83cm/s	49.8m	240	4	15cm	2.4	237.6	Alta precisión y buen rendimiento manual
3	Automático	30s	83cm/s	24.9m	120	4	15cm	1.2	118.8	Alta precisión y buen rendimiento automático
4	Automático	60s	83cm/s	49.8m	240	4	15cm	2.4	237.6	Buen rendimiento automático
5	Manual	90s	83cm/s	74.7m	360	4	15cm	3.6	356.4	Excelente rendimiento en tiempos extendidos
6	Automático	90s	83cm/s	74.7m	360	4	15cm	3.6	356.4	Máxima eficiencia en operación extendida

V-12. *Análisis y pruebas de funcionamiento del robot sembrador en terreno no ideal:* La Tabla IV evalúa el desempeño del robot en terreno no ideal, con un desperdicio de semillas del 5%. Aunque la velocidad del carrito se mantiene constante a 83 cm/s y la distancia recorrida sigue una tendencia similar a la de la primera tabla, el mayor desperdicio afecta significativamente el número de semillas efectivas. Tanto el modo manual como el automático enfrentan desafíos adicionales en estas condiciones. La tasa de siembra y la tasa por unidad de distancia permanecen constantes, pero el incremento en el desperdicio reduce la cantidad de semillas efectivas. El modo automático sigue mostrando precisión y eficiencia, aunque el desperdicio afecta negativamente el rendimiento. El modo manual también es efectivo, pero la cantidad de semillas efectivas disminuye proporcionalmente debido al mayor desperdicio. Estos valores los podemos calcular mediante las pruebas de Funcionamiento Anexo C y mediante cálculos matemáticos de la pág 56-60.

Tabla IV
TABLA DE FUNCIONAMIENTO DEL ROBOT SEMBRADOR DE MAÍZ CON UN DESPERDICIO DEL 5 %

Prueba	Modo	Tiempo de operación (s)	Velocidad del carrito (cm/s)	Distancia total recorrida(m)	Numero de semillas	Tasa de siembra	Espacio entre semillas(cm)	Desperdicio de semillas(5 por ciento)	Número de semillas efectivas	Obs
1	Manual	30s	83cm/s	24.9m	120	4	15cm	6	114	Buen desempeño en tiempos reducidos
2	Manual	60s	83cm/s	49.8m	240	4	15cm	12	228	Alta precisión y buen rendimiento manual
3	Automático	30s	83cm/s	24.9m	120	4	15cm	6	114	Alta precisión y buen rendimiento automático
4	Automático	60s	83cm/s	49.8m	240	4	15cm	12	228	Buen rendimiento automático
5	Manual	90s	83cm/s	74.7m	360	4	15cm	18	342	Excelente rendimiento en tiempos extendidos
6	Automático	90s	83cm/s	74.7m	360	4	15cm	18	342	Máxima eficiencia en operación extendida

V-13. *Análisis y comparación entre Robot sembrador, siembra manual y maquinarias pesadas:* Realizando un análisis de la Tabla V en donde el robot sembrador ofrece una alta precisión, eficiencia y consistencia en comparación con la siembra manual y las maquinarias pesadas, destacándose con un margen de error del 1 %, [65]. Aunque requiere una alta inversión inicial, su capacidad para minimizar el desperdicio y reducir la fatiga del trabajador lo convierte en una opción sostenible a largo plazo. Por otro lado, la siembra manual, aunque más flexible y accesible, es menos eficiente y sujeta a errores humanos, mientras que las maquinarias pesadas, aunque rápidas y eficaces en grandes superficies, pueden ser menos precisas, generar más desperdicio y tener un mayor impacto ambiental.

Tabla V
COMPARACIÓN ENTRE ROBOT SEMBRADOR, SIEMBRA MANUAL Y MAQUINARIAS PESADAS

Factor	Robot Sembrador	Siembra Manual	Maquinarias Pesadas
Precisión	Alta precisión con un margen de error de 1 %.	Varía según la habilidad del trabajador, con posibles errores.	Precisión moderada, puede haber desperdicio en áreas pequeñas.
Eficiencia y Consistencia	Consistente en largos periodos de trabajo.	La eficiencia puede disminuir con el cansancio.	Alta eficiencia en áreas grandes, pero puede ser menos precisa.
Velocidad	Operación a 83 cm/s, cubriendo grandes áreas rápidamente.	Generalmente más lenta, depende de la resistencia del trabajador.	Muy rápida, adecuada para grandes superficies.
Reducción de Desperdicio	Desperdicio mínimo del 1 %.	Puede haber mayor desperdicio debido a la variabilidad humana.	Mayor desperdicio posible en áreas con irregularidades o pequeñas.
Adaptabilidad y Flexibilidad	Ideal para grandes campos y condiciones uniformes.	Más flexible en terrenos difíciles y áreas pequeñas.	Menos flexible, requiere terreno preparado y amplio espacio.
Costo y Accesibilidad	Alta inversión inicial, amortizable con el tiempo.	Bajos costos iniciales, pero menos eficiente a largo plazo.	Costos elevados de adquisición y mantenimiento, pero eficiente en grandes superficies.
Impacto en la Fatiga y Salud del Trabajador	No requiere intervención humana constante.	La siembra prolongada puede causar fatiga y problemas de salud.	Requiere operador, pero la fatiga es menor comparado con la siembra manual.
Impacto Ambiental	Baja huella ambiental debido a su menor tamaño y eficiencia energética.	Bajo impacto, aunque el trabajo manual es intensivo.	Puede tener un alto impacto ambiental debido al uso de combustible y al compactamiento del suelo.

VI. RESULTADOS

Después de un proceso de diseño, se construyó un robot con dimensiones de 31.25 x 18 pulgadas, equipado con cuatro motores de alta potencia. Este robot se dirige mediante GPS y se comunica a través de Bluetooth mediante una aplicación personalizada. Para la lógica del proceso se utilizó un ESP32, que facilita la programación con el entorno IDE de Arduino. El control del robot se realiza mediante un sistema de retroalimentación con el sensor inercial MPU, que proporciona datos sobre los grados de rotación.

El robot tiene la capacidad de trasladarse y rotar hacia cualquier punto, controlado a través de una aplicación desarrollada en Android Studio. La aplicación permite un control manual y automático: en el modo manual, se pueden realizar desplazamientos hacia adelante y hacia atrás, así como rotaciones en sentido horario y antihorario, además de ajustar la potencia. En el modo automático, se utiliza una interfaz de automatización que guarda un conjunto de rotaciones y translaciones en la memoria del teléfono. Estas acciones se envían al controlador del robot, que las ejecuta, permitiendo monitorear su movimiento en tiempo real a través de un mapa.

Además, la rueda sembradora, montada en el robot, permite una siembra simétrica gracias a la fricción de la superficie, colocando cada semilla a aproximadamente 15 cm de distancia. Esto demuestra un control exitoso del robot, combinando conocimientos en mecánica, electrónica y programación.

El diseño del sistema de movilidad del robot sembrador ha sido efectivo en cumplir con los requisitos de posicionamiento preciso dentro del terreno de cultivo. El robot logró sembrar las semillas a una distancia aproximada de 15 cm, siguiendo el patrón deseado, lo que valida el correcto funcionamiento del sistema de control y navegación en modo automático. Sin embargo, se identificaron desafíos como las vibraciones y el deslizamiento de las ruedas, lo que sugiere la necesidad de realizar mejoras en el diseño mecánico y la selección de materiales.

Aunque la interfaz de usuario fue diseñada para ser intuitiva y amigable, la operación en tiempo real del robot sembrador demostró que la supervisión y el control fueron efectivos, contribuyendo al éxito general del proceso de automatización. La facilidad de uso de la interfaz permitió que el robot operara con eficiencia, aunque se identificaron áreas donde el sistema de control podría mejorarse para una mayor precisión y adaptación a condiciones variables del terreno, ver en la 58



Figura 58. Resultados de la aplicación C.Freire, 2024.

La evaluación comparativa reveló que el robot sembrador de maíz tiene un rendimiento adecuado en comparación con los métodos tradicionales y otras tecnologías disponibles en el mercado, como se muestra en la Figura 59. Durante una operación de media hora, el robot demostró buena tracción y potencia, alcanzando los objetivos fundamentales de desempeño. No obstante, se identificaron áreas para mejora, especialmente en cuanto a la durabilidad de sus baterías y la optimización del sistema de refrigeración, aspectos esenciales para prolongar la vida útil del robot y mejorar su eficiencia en aplicaciones agrícolas más amplias.



Figura 59. Malla de sembrado final robot sembrador

A continuación, en la tabla VI se observa una tabla comparativa entre el robot sembrador de maíz, siembra manual y maquinarias pesadas, los cálculos los podemos obtener mediante las pruebas de funcionamiento y los Anexos que están situadas en los Anexos C-F.

Tabla VI
CÁLCULOS ENTRE ROBOT SEMBRADOR, SIEMBRA MANUAL Y MAQUINARIAS PESADAS

Método	Área	Tiempo de operación	Número de semillas sembradas	Número de personas necesarias	Recomendaciones
Carro Sembrador	10,000 m ²	121 minutos (2 horas y 1 minuto)	7200 semillas	1 robot	Alta precisión y eficiencia con rueda sembradora interna.
Siembra Manual	Estimado	Estimado (aprox. 8 horas)	900 semillas (1 persona)	8 personas	Menos eficiente, se requiere más tiempo y mano de obra.
Maquinaria Pesada	10,000 m ²	Estimado (aprox. 30 minutos)	135,000 semillas	1 operador	Alta eficiencia en grandes áreas, pero requiere equipo especializado.

VIII. PRESUPUESTO Y GASTOS

En la siguiente tabla podemos observar los valores aproximados de los gastos mediante la cotización en diferentes electrónicas del país para poder tener un presupuesto de lo que se va a gastar para elaborar el proyecto de tesis.

Tabla VIII
TABLA DE PRESUPUESTOS

Materiales	Cantidad	Costo/U	Total
ESP32 Tipo-C	1	\$28.00	\$28.00
Protoboard	2	\$10.00	\$20.00
Motores 350W	4	\$50.00	\$200.00
BLCD 36V para motores	4	\$20.00	\$80.00
Batería 36V	2	\$50.00	\$100.00
Pack Jumpers	6	\$3.00	\$18.00
MPU-9250 - Sensor inercial	1	\$10.00	\$10.00
GPS NEO-7M GPS	1	\$15.00	\$15.00
Cables para alta tensión baterías	2	\$1.00	\$2.00
Tubo cuadrado 1/4 in	1	\$8.00	\$8.00
Tornillo de cabeza plana A2-70 pack	1	\$3.00	\$3.00
Tubo redondo de acero inoxidable de 1/2 in	1	\$20.00	\$20.00
Varilla de soldadura pack	1	\$3.00	\$3.00
Broche metálico para rueda	4	\$30.00	\$120.00
Plancha de aluminio	1	\$15.00	\$15.00
Plancha de acero negro	1	\$22.00	\$22.00
Cable para circuito	1	\$10.00	\$10.00
Parque de brida de nylon	1	\$1.00	\$1.00
Tornillo tripa de pato 1/2 in pack	1	\$5.00	\$5.00
Convertidor de voltaje	1	\$10.00	\$10.00
Espadachines hembra para PCB de 40 pines	1	\$1.75	\$1.75
Conector banana hembra de 4mm	12	\$15	\$15
Rollo de estaño	1	\$1.00	\$1.00
Bornera de 2 pines	6	\$7	\$7
Spray de pintura negra	1	\$10.00	\$10.00
Varilla de soldadura de acero inoxidable pack	1	\$5.00	\$5.00
Termoencogible	1	\$2.00	\$2.00
Total			\$732

IX. CONCLUSIONES

El desarrollo del robot móvil ha sido exitoso en alcanzar el objetivo general de mejorar la productividad agrícola a través de la siembra automatizada de maíz. El robot demostró ser eficiente y preciso en el proceso de siembra, colocando las semillas con la distancia adecuada y siguiendo un patrón establecido. Aunque se identificaron desafíos de diseño como vibraciones y deslizamiento de las ruedas, el rendimiento general del robot fue satisfactorio, cumpliendo con las expectativas de tracción y potencia. Las áreas de mejora identificadas proporcionan una base sólida para futuras optimizaciones, lo que permitirá incrementar aún más la eficiencia y durabilidad del sistema, consolidando su impacto positivo en la productividad agrícola.

El diseño del sistema de movilidad del robot sembrador ha sido efectivo en cumplir con los requisitos de posicionamiento preciso dentro del terreno de cultivo. El robot logró sembrar las semillas a una distancia aproximada de 15 cm, siguiendo el patrón deseado, lo que valida el correcto funcionamiento del sistema de control y navegación en modo automático. Sin embargo, se identificaron desafíos como las vibraciones y el deslizamiento de las ruedas, lo que sugiere la necesidad de realizar mejoras en el diseño mecánico y la selección de materiales.

Aunque la interfaz de usuario fue diseñada para ser intuitiva y amigable, la operación en tiempo real del robot sembrador demostró que la supervisión y el control fueron efectivos, contribuyendo al éxito general del proceso de automatización. La facilidad de uso de la interfaz permitió que el robot operara con eficiencia, aunque se identificaron áreas donde el sistema de control podría mejorarse para una mayor precisión y adaptación a condiciones variables del terreno.

La evaluación comparativa mostró que el robot sembrador de maíz tiene un rendimiento satisfactorio en comparación con los métodos tradicionales y otras tecnologías existentes en el mercado. El robot operó durante media hora con buena tracción y potencia, cumpliendo con los objetivos básicos de funcionamiento. Sin embargo, se destacaron áreas de mejora, especialmente en lo referente a la durabilidad y optimización del sistema de refrigeración, lo que será crucial para extender la vida útil del robot y aumentar su eficiencia en aplicaciones agrícolas más amplias.

X. RECOMENDACIONES

X-A. Mejorar el Diseño Mecánico

Reducir Vibraciones: Se observó que el carro sembrador tiene vibraciones que dependen del terreno. Se recomienda agregar amortiguadores o sistemas de absorción de vibraciones para mejorar la estabilidad, especialmente en terrenos irregulares.

Optimización de Ruedas: Se notó deslizamiento en las ruedas durante las rotaciones. Se sugiere utilizar ruedas con un diseño más pronunciado o materiales que ofrezcan mejor tracción para reducir el deslizamiento y mejorar el agarre en diferentes tipos de terreno.

X-B. Gestión del Calor

Materiales de Construcción: El carro se calienta debido al uso de acero negro en su construcción. Se recomienda considerar materiales con mejor capacidad de disipación térmica, como aleaciones de aluminio, para evitar el sobrecalentamiento y prolongar la vida útil del carro.

Refrigeración Adicional: Para prevenir el sobrecalentamiento durante largas operaciones, se sugiere instalar ventiladores pequeños o disipadores de calor en las áreas críticas del carro.

X-C. Mejorar el Algoritmo de Control

Ajustar Navegación: En modo automático, el carro sembrador logró colocar las semillas a intervalos de aproximadamente 15 cm. Se recomienda revisar y ajustar el algoritmo de navegación para asegurar que el carro mantenga esta precisión incluso en terrenos variables.

Pruebas en Diferentes Terrenos: Se aconseja realizar pruebas en terrenos de distintos tipos y condiciones para ajustar el comportamiento del carro y garantizar que funcione adecuadamente en diversas situaciones.

X-D. Revisar el Sistema de Alimentación

Autonomía y Durabilidad: El carro funcionó correctamente durante media hora. Se recomienda revisar la capacidad de la batería y considerar opciones para extender la autonomía si el carro se utilizará por períodos más largos o en campos extensos.

X-E. Pruebas y Ajustes

Pruebas Extensas: Se deben realizar pruebas más amplias en diferentes configuraciones y condiciones para validar el rendimiento del carro. Esto ayudará a identificar problemas y ajustar los parámetros para mejorar la eficiencia y efectividad.

Plan de Mantenimiento: Se sugiere desarrollar un plan de mantenimiento regular para revisar y ajustar los componentes del carro, asegurando que el sistema de siembra y los controles funcionen correctamente durante su vida útil.

REFERENCIAS

- [1] R. Gebbers y V. I. Adamchuk, «Precision agriculture and food security,» 2010.
- [2] C. Delgado, «Caracterización Energética y Bioeconómica de las briquetas elaboradas con biomasa residual del cultivo de maíz en Ecuador,» *Researchgate.Net*, 2020, Retrieved August 5, 2023, from <https://www.researchgate.net/profile/Nancy-Hernandez>.
- [3] J. Vera Rodríguez, W. Cepeda Landin, D. Cárdenas Carreño et al., «Efecto de 3 formas de fertilización en cultivo de Maíz variedad DAS 3383, La Troncal-Ecuador,» *Revista Colombiana de Ciencia Animal*, vol. 12, n.º 1, págs. 1-8, 2020. DOI: 10.24188/recia.v12.n1.2020.750.
- [4] G. Cepeda, «Generación de tecnologías para el cultivo de maíz (*Zea mays* L) en el Ecuador,» *Dialnet.Unirioja.Es*, 2022, Retrieved August 5, 2023, from <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8437236>.
- [5] G. Gil, D. E. Casagrande, L. P. Cortés y R. Verschae, «Why the low adoption of robotics in the farms? Challenges for the establishment of commercial agricultural robots,» *Smart Agricultural Technology*, vol. 3, 2023. DOI: 10.1016/j.atech.2022.100069.
- [6] C. Zambrano, «Productividad y precios de maíz duro pre y post Covid-19 en el Ecuador,» *Scielo*, 2023, Retrieved August 5, 2023, from http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S221836202021000400143&script=sci_arttext.
- [7] H. Reyna, O. Fernández, A. Marisa y A. Fierro Álvarez, *Manual de propagación de plantas superiores*. 2017.
- [8] Bejerano, pablo, *Así crecen los servicios de entregas con robots autónomos*, Accedido: 09-01-2024, 2020. dirección: <https://dplnews.com/asi-crecen-los-servicios-de-entregas-con-robots-autonomos/>.
- [9] A. Redondo Galván, *FUNDAMENTOS DE ROBÓTICA UNIDAD I COMPRENDER LOS CONCEPTOS BÁSICOS DE LA ROBÓTICA DE MANIPULADORES*. 2022.
- [10] Avilés, Domínguez, Muños y Sánchez, *Ingeniería de control moderna*. Sahagún, España: Ingenio Y Conciencia Boletín Científico De La Escuela Superior Ciudad Sahagún, 2018.
- [11] R. Guamán, «Evaluación del desarrollo y rendimiento del cultivo de maíz (*Zea mays* L.) utilizando cuatro híbridos,» *Scielo.Senescyt.Gob.Ec*, 2020, Retrieved August 5, 2023, from http://scielo.senescyt.gob.ec/scielo.php?pid=S2477-88502020000100047&script=sci_arttext.
- [12] J. Soto, *Droidcam: Cómo usar la cámara de tu móvil como Webcam del PC*, Accedido: 05-03-2022, 2020. dirección: <https://www.geeknetic.es/Guia/1763/Droidcam-Como-usar-la-camara-de-tu-movil-como-Webcam-del-PC.html>.
- [13] M. A. Carpio Alemán, *Contribución al modelado y control de robots paralelos accionados por cables flexibles*, Tesis doctoral, 2023. DOI: 10.20868/UPM.article.73137.
- [14] Agroempresario, *Francia: robots autónomos para una agricultura más sostenible*, Accedido: 11-01-2024, 2024. dirección: <https://agroempresario.com/publicacion/28334/francia-robots-autonomos-para-una-agricultura-mas-sostenible/>.
- [15] J. M. Jojoa, *Diseño y simulación de un prototipo de robot móvil para sembrar y fumigar semilla de papa Diacol-Capiro (*solanum tuberosum* l) en el municipio del Contadero, Nariño*, Repositorio Clara de Asís, Universidad Mariana, 2023. dirección: <https://hdl.handle.net/20.500.14112/28058>.
- [16] J. F. Vásquez Vanegas, *Diseño conceptual de un robot móvil enfocado a la agricultura de precisión en campo abierto para la eliminación de malezas en el cultivo de palma de aceite*, Repositorio de la Universidad Tecnológica de Pereira, 2020. dirección: <https://hdl.handle.net/11059/12196>.
- [17] C. I. Belupú Amaya, *Propuesta de una plataforma de agricultura inteligente basada en IoT para el monitoreo de las condiciones climáticas del cultivo de banano*, Repositorio de la Universidad de Piura, 2023. dirección: <https://pirhua.udpe.edu.pe/items/3f254ba7-a6d2-4096-b124-af8cdef9e64a>.
- [18] B. D. C. Quinchiguango Ortiz, *Implementación de un prototipo de robot agrícola para cultivo automático a pequeña escala*, Repositorio Digital Universidad Técnica del Norte, 2023. dirección: <http://repositorio.utm.edu.ec/handle/123456789/14776>.

- [19] R. K. Agudo Ube y F. P. Gómez Zambrano, *Diseño e implementación de robot móvil multitarea con visión artificial y programación en lenguaje python para la Universidad Politécnica Salesiana*, Repositorio de la Universidad Politécnica Salesiana, 2022. dirección: <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/23566>.
- [20] M. Rodríguez Sorní, *Diseño e implementación de un robot móvil basado en microcontrolador*, Repositorio de la Universidad Politécnica de València, 2021. dirección: <http://hdl.handle.net/10251/166106>.
- [21] J. Guarnizo Marin, D. Bautista Díaz y J. Sierra Torres, *Una revisión sobre la evolución de la robótica móvil*, Repositorio de la Universidad Santo Tomas, 2021. dirección: <http://hdl.handle.net/11634/34565>.
- [22] J. Figueroa, W. Montalvo y M. Bayas, *Cinemática y Dinámica de Robots Móviles con Ruedas*, Primera Edición. 2023.
- [23] N. A. Tolentino Medrano, *Diseño e implementación de un nodo VANET considerando un sistema de control disparado por eventos*, Repositorio de la Universidad Autónoma de Puebla, 2021. dirección: <https://hdl.handle.net/20.500.12371/11782>.
- [24] S. Buch Gorrea, «Estudio del mecanismo diferencial de un vehículo de turismo para su adaptación a la competición,» 2023. dirección: <https://riunet.upv.es/handle/10251/197235>.
- [25] M. W. Galván Astucuri y R. D. Santos Mendoza, *Diseño de un prototipo de robot móvil tipo oruga basado en el sistema exteroceptivo para labores de búsqueda y rescate en casos de desastres*, Repositorio de la Universidad Tecnológica de Perú, 2023. dirección: <https://repositorio.utp.edu.pe/handle/20.500.12867/7908>.
- [26] J. M. Angel-Leal, J. F. Hernández-Barrera y J. L. Orjuela-Peña, *Prototipo de un robot móvil con identificador de residuos*, Repositorio de la Universitaria Agustiniiana, 2023. dirección: <http://repositorio.uniagustiniana.edu.co/handle/123456789/2348>.
- [27] M. A. López, *ROBOT MODULAR AUTO RECONFIGURABLE–DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN*, Repositorio de la Universidad EIA (Escuela de Ingeniería de Antioquia), 2023. dirección: <https://repository.eia.edu.co/items/e602bf0e-be03-420b-ae4d-1a8384fca42d>.
- [28] C. G. Miguélez Machado, I. O. Benítez González, A. M. Rivera Rivera y V. Moreno Vega, «Implementación de sistema operativo robótico en una plataforma de robot móvil,» *Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones*, vol. 41, n.º 3, págs. 79-92, 2020.
- [29] D. Pérez Martínez, *Implementación de un sistema de detección y seguimiento de robots móviles basado en procesamiento de imágenes*, Repositorio de la Universidad Politécnica de València, 2023. dirección: <http://hdl.handle.net/10251/195762>.
- [30] F. Cuadros Boiza, «Estudio Técnico de un mecanismo diferencial de Automóvil,» 2020. dirección: <https://crea.ujaen.es/handle/10953.1/11290>.
- [31] M. Castro-Zenil, A. Alvarado-López, G. Peñalosa-Mendoza y V. Becerra-Tapia, «Diseño de un robot móvil para realizar la siembra de semillas de cereales en parcelas con previa labranza,» *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, 2024. dirección: <https://doi.org/10.29057/icbi.v12iEspecial2.12262>.
- [32] J. Ferreri, «Inteligencia artificial: Algunos aspectos de su impacto,» Centro de Estudios en Tecnologías Inteligentes (CETI), inf. téc., 2022. dirección: <https://www.ciencias.org.ar/user/CETI/Compilado%20CETI%20final.pdf>.
- [33] O. E. Ramos Ponce, «Conceptos Básicos de Robótica,» Universidad de Ingeniería y Tecnología, inf. téc., 2020. dirección: http://oramosp.epizy.com/teaching/201/fund-robotica/clases/2_Conceptos_Basicos_notas.pdf?i=1.
- [34] O. Pineda, S. Espinel y M. Ruiz, «Diseño e Implementación de un Sistema de Gestión de Energía Enfocado en el Control de Equipos y Luminarias,» *Revista Técnica Energía*, 2019, Disponible en: <https://doi.org/10.37116/revistaenergia.v16.n1.2019.336>.
- [35] H. K. Fleming, *La robotización del sector militar de los EE.UU.* Repositorio de la Universidad Pontificia Comillas (ICADE), 2020. dirección: <https://repositorio.comillas.edu/xmlui/handle/11531/37694>.
- [36] J. Hortelano Capetillo, J. Martínez Vázquez, M. Kantun Uicab y A. Pérez Pérez, «Análisis aerodinámico de un automóvil implementando diseños de alerón,» *Academia Journals*, págs. 1-171, 2019, Obtenido de <https://static1.squarespace.com/static/55564587e4b0d1d3fb1eda6b/t/5ff887f08334dc285e4a6c04/1610123343066/Tomo+11+-+Diseminacin+de+la+investigacin+en+la+educacin+superior+-+Celaya+2019.pdf>.
- [37] R. S. Smith, *Precision Agriculture for Sustainability*. Burleigh Dodds Science Publishing, 2019.

- [38] M. Caviedes, «Tecnologías para el cultivo de maíz (*Zea mays* L) en el Ecuador,» *Revistas.Usfq.Edu.Ec*, 2020, Retrieved August 5, 2023, from <https://revistas.usfq.edu.ec/index.php/avances/article/download/2588/3111?inline=1>.
- [39] L. Li y J. Wu, «Integrated Navigation Systems for Precision Agriculture,» en *Precision Agriculture Technology for Crop Farming*, 2021, págs. 197-212.
- [40] H. M. M. Rodríguez, *Control de un sistema Bola Balancín*. Valladolid, España: Escuela de Ingenierías Industriales, 2019.
- [41] J. M. Ramos Arreguín y J. E. Vargas Soto, *Kaizen y Mecatrónica*, 1ª Edición. Prolongación Corregidora Norte No. 168, interior E, Col. El Cerrito, C.P. 76160, Querétaro, Qro., México: Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2023, ISBN: 978-607-9394-28-8.
- [42] J. A. L. Arias, *Análisis de distintos tipos de coberturas mediante el uso de cámara multispectral tomadas desde dron en el Valle de Aburrá*, 2021. dirección: <https://hdl.handle.net/10495/20219>.
- [43] E. Maritan, J. Lowenberg-DeBoer, K. Behrendt y K. Franklin, «Economically optimal farmer supervision of crop robots,» *Smart Agricultural Technology*, vol. 3, 2023. DOI: 10.1016/j.atech.2022.100110.
- [44] I. Gallego, *Comparativa de diferentes técnicas de control con finalidad didáctica sobre una maqueta bola y viga de bajo coste*. Madrid, España: Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, 2016.
- [45] R. G. Martin, «Función Sensorial para la Localización de un Robot Guía,» págs. 1-83, 2018.
- [46] S. Blackmore, «Precision Agriculture,» *Encyclopedia of Applied Plant Sciences*, págs. 40-46, 2018.
- [47] UNODC, *El cultivo de las hortalizas*. JantunSach´a, 2023. dirección: https://www.unodc.org/documents/bolivia/DIM_Manual_de_cultivo_de_hortalizas.pdf.
- [48] D. Comunicaciones. «Manual de componentes para una vivienda.» (2017), dirección: https://issuu.com/diaconiacomunicaciones/docs/manual_de_componentes_para_una_vivi.
- [49] D. Villarreal Cupacan, «Buenas prácticas agrícolas, como estrategia de agronegocio para la comercialización de papa (*Solanum tuberosum*) estudio de caso: Cantón Montufar,» nov. de 2020, Obtenido de Repositorio Digital de la Universidad Técnica del Norte: <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/10701>.
- [50] National Instruments Support, *Aprenda LabVIEW: Introducción a programación gráfica en NI LabVIEW*, Accedido: 10-10-2021, 2021. dirección: <https://www.ni.com/getting-started/labview-basics/esa/>.
- [51] J. Sánchez Guasti, «Aplicación de aceite vegetal en el control de los gusanos de la mazorca en cultivo de maíz (*Zea mays*),» oct. de 2023, Obtenido de Repositorio Universidad Técnica de Ambato: <https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/37614>.
- [52] Rivera Gómez, S. J. and Dolmos Reyes, Y. M. «Efecto de las propiedades físicas del suelo en la infiltración de agua en la finca el Plantel UNA 2020-2022.» (2022), dirección: <https://repositorio.una.edu.ni/4542/>.
- [53] Tirado Gutiérrez, C. E. «Análisis comparativo del uso de escoria de siderurgia para la estabilización de suelo.» (2020), dirección: <https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/30933>.
- [54] Lomelí, Marco. «Textura del suelo.» (2021), dirección: <https://gatkme.com/textura-del-suelo/>.
- [55] D. F. Quiroga Guerra y B. L. Rubio Amaya, *Robot móvil autónomo para la siembra de semillas en el campo*, 2023. dirección: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/24491>.
- [56] D. A. Burgos Jiménez, *Diseño de un sistema robótico para la siembra del cultivo del maíz en la finca hermanos Wong ubicada en el Recinto El Guineo, Cantón Ventanas, Provincia De Los Ríos*, 2015. dirección: <http://repositorio.uteq.edu.ec/handle/43000/1892>.
- [57] J. P. Fonseca Rivera, C. C. Montenegro Gutiérrez y J. S. Useche Murcia, *Diseño y construcción de un robot sembrador de frijol, arveja y maíz tradicional*, 2024. dirección: <http://repositorio.unipiloto.edu.co/handle/20.500.12277/13752>.
- [58] J. C. Florez Gonzalez y V. M. Castellanos Pabon, *Diseño en Autocad de robot sembrador de semillas de fresa: Fresabot III*, 2019. dirección: <http://hdl.handle.net/11349/16257>.
- [59] J. C. Burbano Merino y L. A. Cárdenas León, «Desarrollo de un robot Móvil con sistema de recolección de objeto controlado remotamente para fines didácticos,» 2022. dirección: <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/24008>.
- [60] J. Laborda Macario, *Desarrollo de un nodo inalámbrico de bajo consumo basado en técnicas de IOT para monitorización de patrimonio cultural*, 2018. dirección: <http://hdl.handle.net/10251/108133>.

- [61] H. A. Salazar Simental, «Parametrización de intercambiador de calor autosustentable mediante tecnología IoT portátil,» Tesis de maestría., 2023. dirección: <http://hdl.handle.net/123456789/1234567>.
- [62] V. H. Romo Contreras, «Sistema inteligente de monitoreo de temperatura, TERMOSIM 2020,» Tesis de maestría., 2020.
- [63] R. Arcas Jiménez. «El mecanismo diferencial en los vehículos.» (2021), dirección: <https://es.linkedin.com/pulse/el-mecanismo-diferencial-de-los-vehiculos-roberto-j-arcas-jimnez->.
- [64] D. Quintas Freiría, «Estudio y análisis de un mecanismo diferencial,» 2019. dirección: <https://ruc.udc.es/dspace/handle/2183/23998>.
- [65] H. J. Contreras Calcetero y A. F. Cañón Faustino, *Diseño, implementación y monitoreo de un prototipo de robot sembrador de trigo*, F. d. I. M. E. y. B. Bogotá D.C: Universidad Antonio Nariño Programa Ingeniería Electrónica y Mecatrónica, ed., 2022.

ANEXO A
PLANOS

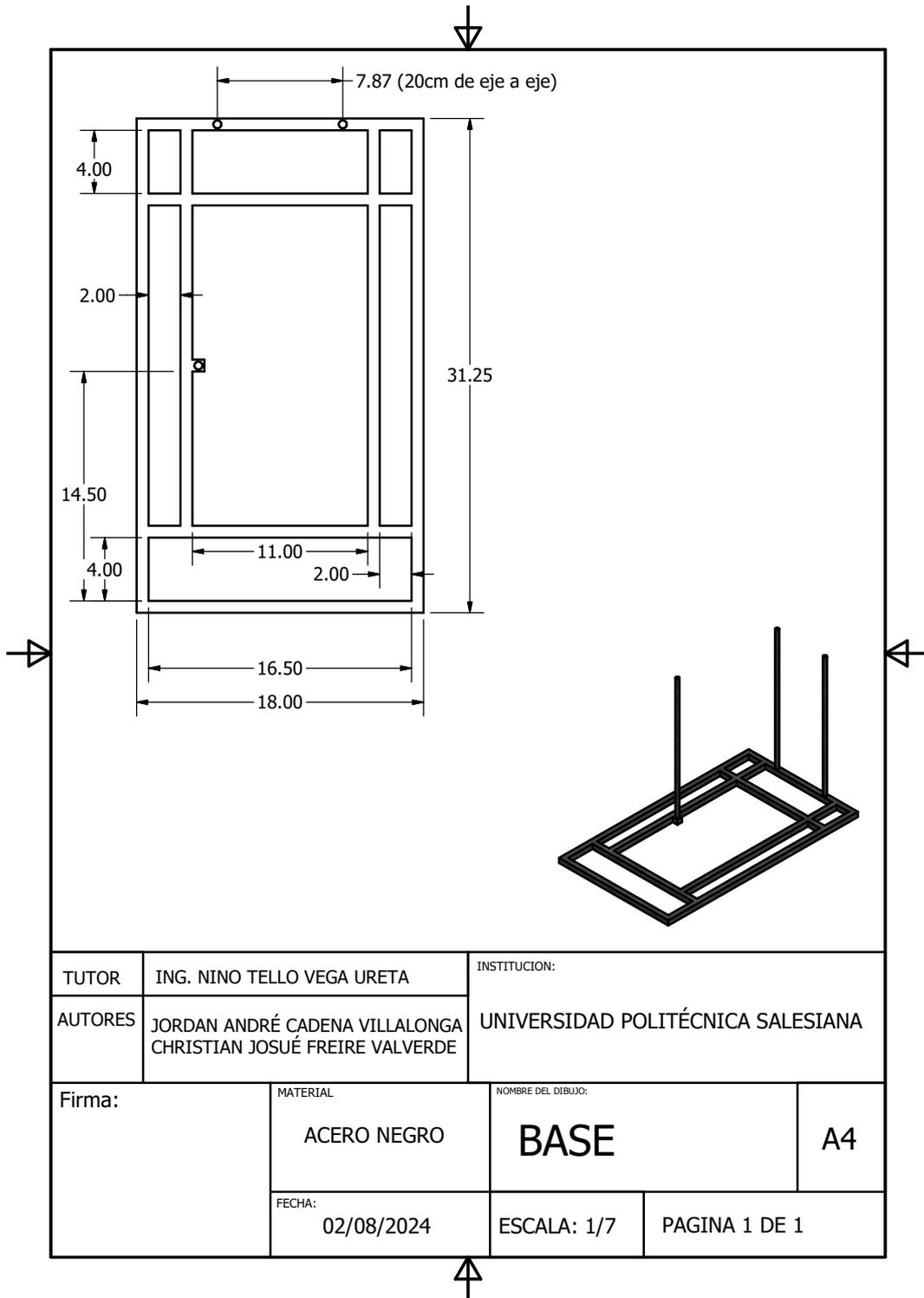


Figura 60. Plano de la base del robot, por J. Cadena C.Freire, 2024.

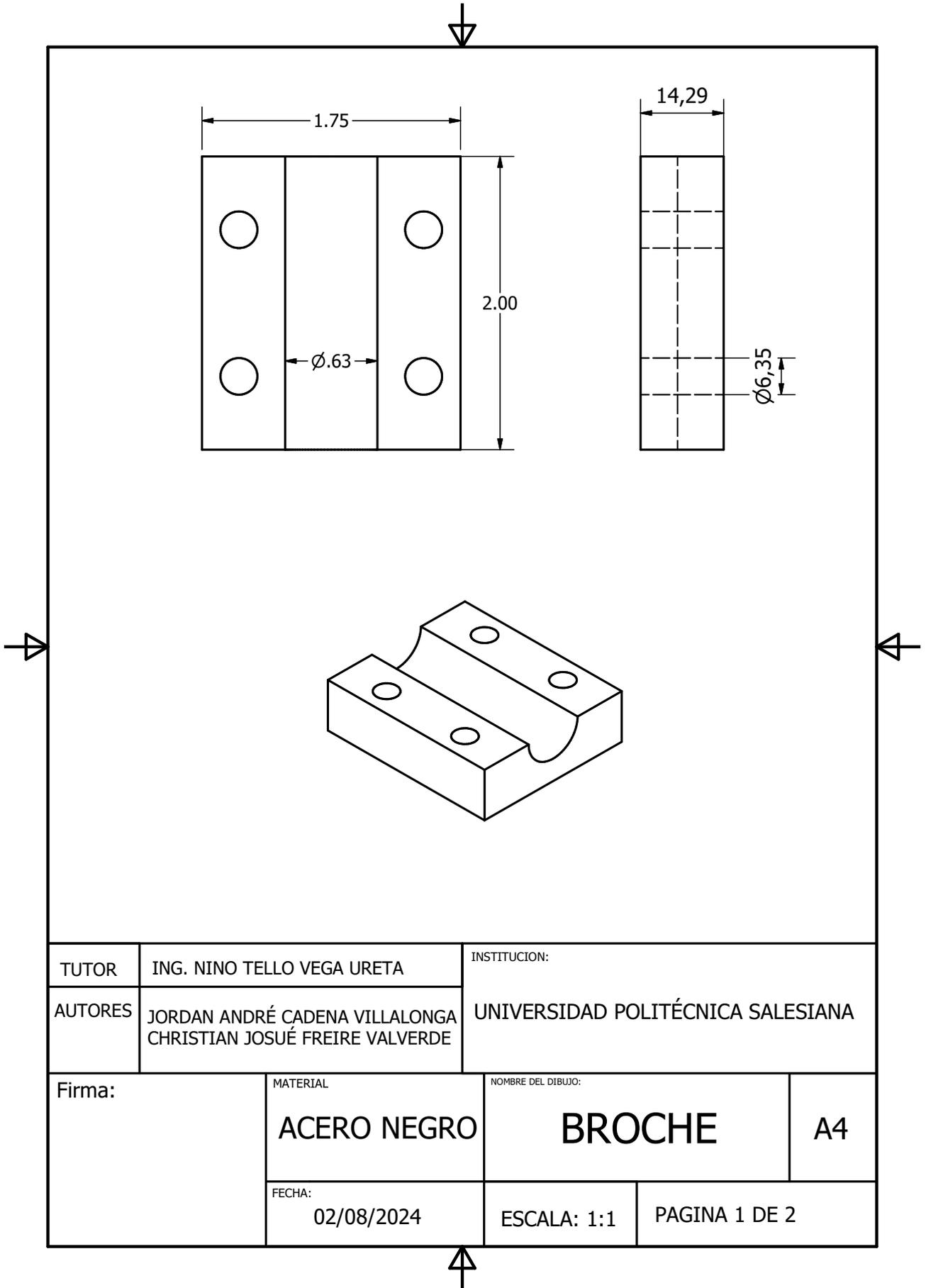


Figura 61. Plano de la pieza del broche del robot, por J. Cadena C.Freire, 2024.

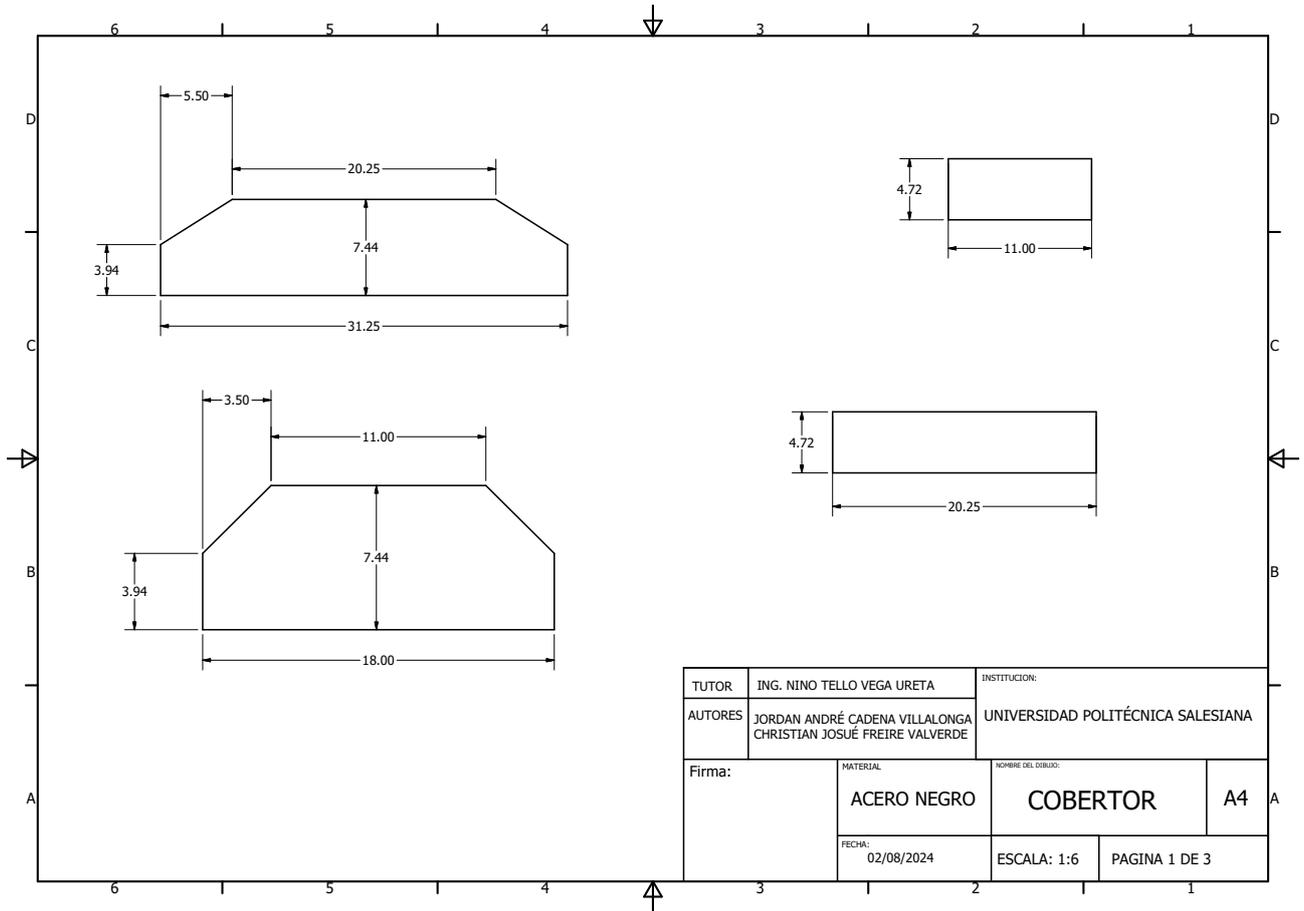


Figura 62. Plano de la pieza cobertor, por J. Cadena C.Freire, 2024.

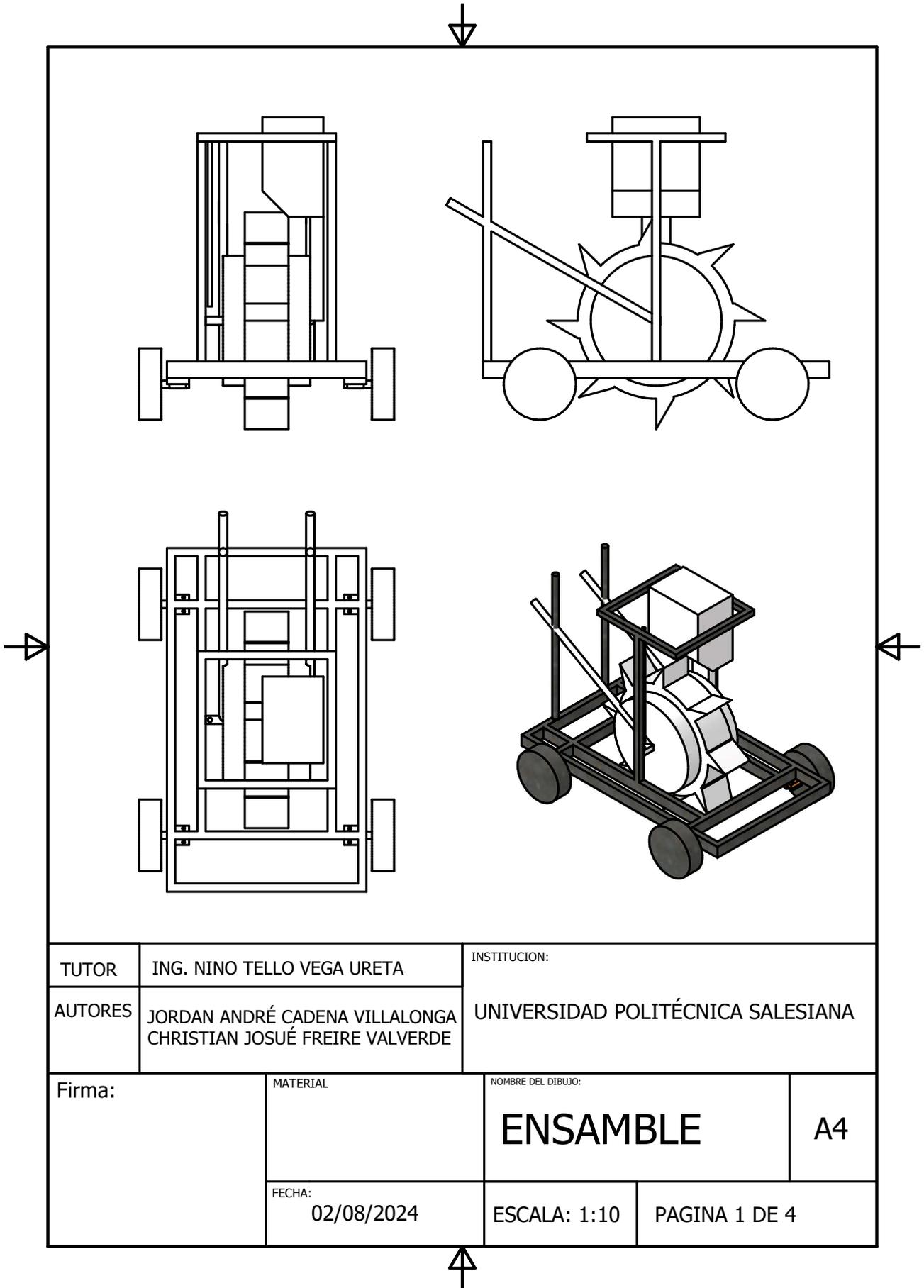


Figura 63. Plano del ensamble final, por J. Cadena C.Freire, 2024.

ANEXO B
CÓDIGOS EN LENGUAJE C

```
#include <Arduino.h>

#define LED_PIN 2

#include "BluetoothSerial.h"

// #define CONTROL_Y_DIRECCION_CH1_PIN 16
// #define CONTROL_X_DIRECCION_CH2_PIN 17

#define MOTOR_IZQUIERDO_PIN 25
#define MOTOR_DERECHO_PIN 26

#define ROTACION_IZQUIERDA_PIN 18
#define ROTACION_DERECHA_PIN 19

#define SENTIDO_NATURAL_IZQUIERDO true
#define SENTIDO_NATURAL_DERECHO false

int velocidad_motor_izquierdo = 0; // [0-255] 0 5v

String device_name = "ESP32-BT-Esclavo";

char data;
// Check if Bluetooth is available
#if !defined(CONFIG_BT_ENABLED) || !defined(CONFIG_BLUEDROID_ENABLED)
#error Bluetooth is not enabled!
Please run `make menuconfig` to and enable it
#endif

// Check Serial Port Profile
#if !defined(CONFIG_BT_SPP_ENABLED)
#error Serial Port Profile for Bluetooth is not available or not enabled.
It is only available for the ESP32 chip.
#endif

BluetoothSerial SerialBT;

// void cambiar_data_motor(int motorPin, int velocidad, byte direccion
void
cambiar_data_motor(int motorPin, int sentidoGiroPin, int velocidad,
byte direccion, boolean sentidoNatural)
{
    int v = map(velocidad, 0, 100, 0, 255);
    // Toma la dirección de la velocidad de 0 a 100% y la mapea a 0 a 255

    // Se establece la dirección del motor
```

```

// analogWrite(motorPin, v);
Serial.print("Motor: ");
Serial.print(motorPin);
analogWrite(motorPin, v);

if (velocidad != 0)
{
    direccion = sentidoNatural ? direccion : !direccion;
    digitalWrite(sentidoGiroPin, direccion);

} // Si la velocidad es 0, se establece la dirección natural
}

typedef struct
{
    int velocidad;
    byte sentido;
} VelocidadYSentido;

// FUNCIONES DE CONTROL
// Se analiza en 0 a 100%
VelocidadYSentido obtener_velocidad_sentido_control(int ch)
{
    VelocidadYSentido resultado;
    // Se lee el tiempo de pulso de 1kHz a 2kHz
    int t = pulseIn(ch, HIGH);
    // Se mapea el tiempo de pulso a un rango de -100 a 100
    // es para que en el centro sea 0
    t = map(t, 999, 1998, -100, 100);
    // si esta entre 3 y -3 se considera 0
    t = (t < 3 && t > -3) ? 0 : t;
    // siempre debe ser positivo
    resultado.sentido = t > 0 ? HIGH : LOW;
    // se obtiene el valor absoluto porque los voltajes solo funcionan
    // en valores positivos
    t = abs(t);
    resultado.velocidad = t;
    return resultado;
}

void setup()
{
    Serial.begin(115200);
    SerialBT.begin(device_name); // Bluetooth device name
    // SerialBT.deleteAllBondedDevices(); // Uncomment
    // this to delete paired devices; Must be called after begin
    Serial.printf("The device with name \"%s\" is started.\nNow
you can pair it with Bluetooth!\n", device_name.c_str());
}

```

```

// DEBUG PIN LED
pinMode(LED_PIN, OUTPUT);

// LED DATA
// pinMode(MOTOR_IZQUIERDO_PIN, OUTPUT);
// pinMode(MOTOR_DERECHO_PIN, OUTPUT);

// pinMode(CONTROL_Y_DIRECCION_CH1_PIN, INPUT);
// pinMode(CONTROL_X_DIRECCION_CH2_PIN, INPUT);

pinMode(ROTACION_IZQUIERDA_PIN, OUTPUT);
pinMode(ROTACION_DERECHA_PIN, OUTPUT);
}

/**
 * The main loop function that runs repeatedly in the program.
 * It checks for available data from the Serial and SerialBT objects,
 * and writes the data to the respective output streams.
 * It also includes a delay of 20 milliseconds between iterations.
 */

String receivedData = ""; // Variable para acumular
los caracteres recibidos
bool newDataAvailable = false; // Bandera para indicar
si se ha recibido un nuevo dato
VelocidadYSentido dataY = {0, HIGH};
VelocidadYSentido dataX = {0, HIGH};
void loop()
{
  if (SerialBT.available())
  {
    char receivedChar = SerialBT.read();
    receivedData += receivedChar;
    if (receivedChar == '&')
    {
      newDataAvailable = true;
    }
  }

  if (!newDataAvailable)
  {
    return;
  }

  if (!(receivedData.startsWith("X") ||
receivedData.startsWith("Y")) && receivedData.endsWith("&"))
  {
    return;
  }
}

```

```

String eje = receivedData.substring(0, 1);
int velocidad = receivedData.substring(2,
receivedData.length() - 1).toInt();
// abs velocidad
byte direccion = velocidad > 0 ? HIGH : LOW;
velocidad = abs(velocidad);
Serial.println(" - Eje: " + eje + " Direccion: " + direccion
+ " Velocidad: " + velocidad);
if (eje == "Y")
{
    dataY.velocidad = velocidad;
    dataY.sentido = direccion;
}
if (eje == "X")
{
    dataX.velocidad = velocidad;
    dataX.sentido = direccion;
}
Serial.println("Resumen: [Y] V: " + String(dataY.velocidad) + " S:
" + dataY.sentido + " [X] V:
" + dataX.velocidad + " S: " + dataX.sentido);
if (dataX.velocidad == 0)
{
    cambiar_data_motor(MOTOR_IZQUIERDO_PIN, ROTACION_IZQUIERDA_PIN,
dataY.velocidad, dataY.sentido, SENTIDO_NATURAL_IZQUIERDO);
    cambiar_data_motor(MOTOR_DERECHO_PIN, ROTACION_DERECHA_PIN,
dataY.velocidad, dataY.sentido, SENTIDO_NATURAL_DERECHO);
}
else if (dataY.velocidad == 0)
{
    Serial.println("Rotacion");
    cambiar_data_motor(MOTOR_IZQUIERDO_PIN, ROTACION_IZQUIERDA_PIN,
dataX.velocidad, !dataX.sentido, SENTIDO_NATURAL_IZQUIERDO);
    cambiar_data_motor(MOTOR_DERECHO_PIN, ROTACION_DERECHA_PIN,
dataX.velocidad, dataX.sentido, SENTIDO_NATURAL_DERECHO);
}
receivedData = "";
newDataAvailable = false;
}

```

ANEXO C
PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO INICIAL CAMPO NO IDEAL



Figura 64. Prueba de campo 1, por J. Cadena C.Freire, 2024.



Figura 65. Prueba de campo 2, por J. Cadena C.Freire, 2024.



Figura 66. Prueba de campo 3, por J. Cadena C.Freire, 2024.

ANEXO D PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO CAMPO IDEAL



Figura 67. Prueba de campo 4, por J. Cadena C.Freire, 2024.



Figura 68. Prueba de campo 5, por J. Cadena C.Freire, 2024.



Figura 69. Prueba de campo 6, por J. Cadena C.Freire, 2024.

ANEXO E
SEBRADO FINAL DEL ROBOT



Figura 70. Sembrado final campo 7, por J. Cadena C.Freire, 2024.