
 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

Desarrollo e implementación de una plataforma robótica móvil de bajo costo para aplicaciones en el sector agrícola en terrenos irregulares

Estudiante:
Santiago Cano Molina
Ingeniería mecatrónica

Asesor:
Mateo Mejía Herrera


INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO
Facultad de ingenierías
Ingeniería mecatrónica
2025

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

RESUMEN


El desarrollo de una plataforma robótica móvil de bajo costo para terrenos irregulares busca responder a las limitaciones de movilidad en el sector agrícola. El objeto de este trabajo fue desarrollar e implementar una plataforma capaz de operar eficientemente en terrenos agrícolas, alineándose con la necesidad de acceder a tecnologías modernas adaptadas a las condiciones geográficas de entornos montañosos. La metodología utilizada incluyó el diseño mecánico, la integración de microcontroladores y un sistema de comunicación Bluetooth para la teleoperación. El enfoque fue de investigación aplicada con diseño experimental. Se implementó un sistema de suspensión tipo Rocker-Bogie, asegurando adaptabilidad y estabilidad sin necesidad de amortiguadores activos. Los componentes estructurales se fabricaron con materiales económicos como tubería de PVC y piezas impresas en PLA y TPU (para las llantas bioinspiradas). El control se centralizó en un microcontrolador ESP32 y la teleoperación se logró mediante una aplicación móvil diseñada en App Inventor. Se realizaron pruebas de campo en entornos controlados y naturales. Los principales resultados demuestran la capacidad destacada de la plataforma para adaptarse a diversas superficies irregulares. El prototipo superó con éxito obstáculos (tuberías) y pendientes de hasta 28.13° sin experimentar fallos estructurales, electrónicos o de conectividad en rangos operativos cercanos. Los cálculos validaron la adecuación del motor seleccionado y se estimó una autonomía energética de 1.59 horas. Las conclusiones indican que la plataforma es una herramienta viable, económica y adaptable para mejorar las operaciones agrícolas en terrenos difíciles. El diseño Rocker-Bogie demostró ser eficaz para mantener la estabilidad y la tracción continua. El proyecto contribuye al avance de tecnologías agrointeligentes con potencial para optimizaciones futuras, como el ajuste de la suspensión para obstáculos más complejos y la incorporación de sensores inerciales y odometría para la navegación autónoma.

Palabras clave: Robótica móvil, Terrenos irregulares, Rocker-Bogie, Agricultura de precisión, Plataforma robótica económica, Tecnología agrointeligente.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

RECONOCIMIENTOS

Este trabajo ha sido desarrollado en el marco del contrato RC130-2024, correspondiente al proyecto con código 10922, titulado *Diversificación de fuentes de proteínas para uso alimentario mediante el empleo de terrazas de cultivo aeropónicas o hidropónicas, integradas con sistemas automatizados, inteligencia artificial y energía renovable para la creación de comunidades autosostenibles*, liderado por el Grupo de Sistemas de Control y Robótica COL0123701, en colaboración con el semillero de investigación *Aplicaciones de IoT*.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

ACRÓNIMOS

BLDC	Motores sin escobillas (Brushless DC)
CAD	Diseño Asistido por Computadora
CPR	Resolución de codificador (Counts Per Revolution)
DC	Corriente continua
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
IMU	Unidad de medición inercial
IoT	Internet de las cosas (Internet of Things)
LiPo	Polímero de litio
MEMS	Sistemas microelectromecánicos
NPT	Neumáticos no neumáticos
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
ONU	Organización de las Naciones Unidas
PIB	Producto Interno Bruto
PLA	Ácido poliláctico
PVC	Policloruro de vinilo
PWM	Modulación por ancho de pulso
TPU	Poliuretano termoplástico
VDC	Voltaje de Corriente Directa




 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	7
Generalidades	7
Objetivos	8
General	8
Específicos	8
Organización de la Tesis	9
2. MARCO TEÓRICO	10
Arquitectura de Hardware y Software en Plataformas Robóticas	10
Sistemas de Suspensión y Movilidad en Terrenos Irregulares	10
Robótica Móvil y su Aplicación en la Agricultura	11
3. METODOLOGÍA	13
Enfoque metodológico	13
Estructura general y alineación con los objetivos	13
FASE 1: Diseño e implementación del sistema de suspensión Rocker-Bogie	13
Revisión del estado del arte	13
Análisis de requisitos operacionales	14
Diseño CAD del sistema mecánico	14
Selección de materiales y componentes estructurales	15
Memorias de cálculo mecánico	19
Fabricación y ensamblaje	20
Validación preliminar de movilidad	20
Presentación del BOM de la capa de control	21
FASE 2: Desarrollo del algoritmo de gestión y control	22
Especificación de componentes electrónicos	23
Arquitectura del sistema embebido	23
Interfaz de usuario para el control	24
Implementación del firmware en ESP32	25
Integración y Procesamiento de Datos del Sensor Inercial	26
Consideraciones de alcance y estabilidad	27
FASE 3: Implementación del sistema de comunicación Bluetooth	27
Diseño de la interfaz móvil en App Inventor (capa de comunicaciones)	27
Protocolo de comandos App–Robot	28
Configuración del módulo Bluetooth SPP en ESP32	29
Validación de conectividad y alcance	30
FASE 4: Evaluación del rendimiento en pruebas de campo	30
Objetivo y alcance	30
Diseño del protocolo experimental	30
Configuración de escenarios y aparejos de prueba	30
Procedimiento experimental	30
Criterios de evaluación y variables a registrar	31

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

Limitaciones y consideraciones	31
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	32
Evaluación del sistema en pruebas de campo	32
Resultados obtenidos	32
Discusión técnica	32
Movilidad y estabilidad frente a obstáculos y pendientes	32
Tracción en superficies blandas y mixtas	33
Correspondencia con el dimensionamiento previo	33
Teleoperación y estabilidad del enlace	33
Comparación con trabajos relacionados	33
Fortalezas y limitaciones del desempeño observado	33
Implicaciones y trabajo futuro	34
5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO	35
Conclusiones	35
Recomendaciones	35
Trabajo futuro	35

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

1. INTRODUCCIÓN

Generalidades


La agricultura es un pilar fundamental en la economía global, proporcionando alimentos y recursos esenciales a nivel mundial (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), 2020). En Colombia, el sector agrícola tiene una importancia particular, no solo porque emplea a millones de personas, sino porque es un motor clave para la economía del país, representando un porcentaje significativo del PIB y siendo vital para la seguridad alimentaria (Unidad de Planificación Rural Agropecuaria (UPRA), 2023). Sin embargo, las zonas montañosas y los terrenos irregulares dificultan el acceso y la operación de maquinaria convencional, limitando la capacidad de los agricultores para monitorear, manejar y optimizar sus cultivos de manera eficiente (Velásquez, 2018). El poco acceso a tecnología que permita adaptarse para operar en estos terrenos dificulta el manejo eficiente de los recursos y aumenta el riesgo de pérdidas agrícolas (González, 2014). La falta de precisión en la operación y en la toma de decisiones incrementa la vulnerabilidad de las explotaciones agrícolas, afectando tanto la eficiencia operativa como la resiliencia frente a desafíos futuros (Cullingworth, 2015). En este contexto, se hace evidente la necesidad de desarrollar e implementar una solución tecnológica que sea no sólo asequible, sino también adaptable a los terrenos irregulares característicos de muchas zonas agrícolas en Colombia.

Uno de los principales desafíos en la agricultura moderna es la movilidad en terrenos irregulares, especialmente en regiones montañosas o áreas rurales con infraestructura limitada, donde la mecanización agrícola tradicional es menos efectiva (Tarolli & Straffellini, 2020). La falta de tecnologías adecuadas y accesibles para pequeños y medianos agricultores es una barrera significativa para la modernización del sector (Centro Provisional de Gestión Agroempresarial, 2019). La FAO destaca la importancia de la tecnología apropiada y la adaptación a las condiciones locales para evitar incompatibilidades de cultivos y otros problemas asociados a la introducción de nuevas tecnologías (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), 2019).

En respuesta a estos desafíos, la búsqueda de soluciones innovadoras que puedan adaptarse a las complejas condiciones del terreno se ha convertido en una prioridad para el sector agrícola. Las tecnologías emergentes no solo buscan mejorar la eficiencia y precisión en la operación de los cultivos, sino también proporcionar herramientas que permitan superar las limitaciones impuestas por la geografía y la infraestructura. Entre las innovaciones tecnológicas que destacan por su potencial de adaptación a terrenos difíciles se encuentra el sistema Rocker-Bogie, una tecnología originalmente desarrollada para la exploración espacial que ha encontrado aplicaciones prometedoras en el ámbito agrícola. El sistema Rocker-Bogie, inicialmente utilizado en vehículos de exploración planetaria, permite que cada rueda se adapte de manera independiente a las irregularidades del terreno, manteniendo la estabilidad del vehículo y minimizando el riesgo de vuelco (Rivellini, 2000). Este sistema ha demostrado su eficacia en aplicaciones agrícolas, mejorando la movilidad en terrenos hostiles y garantizando la recolección de datos precisa y la ejecución de tareas en entornos desafiantes (McEntee et al., 2020).

Además de su éxito en la exploración espacial, el sistema Rocker-Bogie ha demostrado su eficacia en aplicaciones agrícolas. Una de las aplicaciones más críticas es la fumigación. Los pulverizadores manuales implican esfuerzo y riesgos para los trabajadores (Hotchkiss, 1992). En respuesta, Panneerselvam et al. propusieron un pulverizador de pesticidas basado en el mecanismo Rocker-Bogie, diseñado para desplazarse eficientemente en superficies irregulares. Controlado por un Arduino, este sistema permite una aplicación más segura y eficiente de pesticidas, optimizando el proceso y mejorando las condiciones laborales (Panneerselvam et al., 2021). Además, estudios de simulación como los realizados por Califano et al. han demostrado que el sistema Rocker-Bogie ofrece un mejor rendimiento en términos de ahorro energético y capacidad de mantener el contacto con el suelo en terrenos difíciles, lo que es crucial para las operaciones agrícolas (Califano et al., 2022).

Para abordar las limitaciones del terreno agrícola, se propone desarrollar una plataforma robótica móvil de bajo costo con un sistema de suspensión de cuatro ruedas teniendo como enfoque principal el sistema tipo Rocker-Bogie realizándole modificaciones en cuanto a funcionalidad mecánica. Esta plataforma estará diseñada para superar obstáculos y mantener la estabilidad en terrenos irregulares, asegurando precisión en tareas agrícolas. Cada rueda se moverá de manera independiente, ajustándose al terreno y reduciendo el riesgo de vuelco. La plataforma incluirá microcontroladores para gestionar sus funciones

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

y un sistema de comunicación Bluetooth para su teleoperación. Se utilizarán materiales económicos y tecnologías de modelado 3D para crear un diseño adaptable y eficiente, ideal para agricultores con recursos limitados. En conjunto, estas características proponen que la plataforma no solo sea económica, sino también altamente adaptable y eficiente, proporcionando una solución práctica para los desafíos que enfrentan los agricultores en Colombia y otras regiones con terrenos irregulares.

La relevancia de esta plataforma en el contexto de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) es significativa. Al mejorar la eficiencia y sostenibilidad de la agricultura mediante la implementación de tecnologías más precisas, la plataforma contribuye directamente al ODS 2 (Hambre Cero), al ayudar a mejorar la seguridad alimentaria y reducir el hambre en comunidades rurales. Además, la promoción de la innovación y el desarrollo de infraestructuras tecnológicas apoya el ODS 9 (Industria, Innovación e Infraestructura), fomentando la modernización del sector agrícola. La inclusión de prácticas más sostenibles también tiene un impacto positivo en el ODS 15 (Vida de Ecosistemas Terrestres), contribuyendo a la preservación de la biodiversidad y la salud de los ecosistemas Organización de las Naciones Unidas (ONU), 2020.

La plataforma robótica móvil propuesta representa una solución innovadora y de bajo costo para los desafíos de movilidad en terrenos irregulares en el sector agrícola. Su diseño adaptativo y accesible tiene el potencial de transformar no solo la agricultura en regiones como Colombia, sino también de expandir su aplicación a otros sectores industriales. La implementación de esta tecnología puede ser un catalizador para el desarrollo económico y la sostenibilidad en comunidades rurales, alineándose con los Objetivos de Desarrollo Sostenible y promoviendo un futuro más equitativo y próspero para todos.


Objetivos

General

Desarrollar e implementar una plataforma robótica móvil de bajo costo con un sistema de suspensión, capaz de operar eficientemente en terrenos agrícolas.

Específicos


1. Diseñar e implementar el sistema de suspensión basado en el Rocker-Bogie para la plataforma robótica, asegurando su adaptabilidad a diferentes tipos de terrenos agrícolas irregulares.
2. Generar un algoritmo que permita la gestión de las funciones operativas de la plataforma, incluyendo el control y la estabilidad.
3. Implementar un sistema de comunicación inalámbrica Bluetooth que permita la teleoperación de la plataforma en tiempo real.
4. Evaluar el rendimiento de la plataforma robótica en pruebas de campo, identificando áreas de mejora para su adaptación a las condiciones específicas del sector agrícola.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

Organización de la Tesis

Esta tesis está organizada en seis capítulos principales, además de las referencias y apéndices:

1. **Generalidades:** Introduce el contexto, justificación y relevancia del trabajo, junto con el planteamiento del problema que busca resolver.
2. **Objetivos:** Presenta el objetivo general del proyecto, acompañado de los objetivos específicos que guían el desarrollo del trabajo.
3. **Marco Teórico:** Describe los fundamentos teóricos y revisa la literatura relacionada, con énfasis en tecnologías de movilidad en terrenos irregulares y sistemas de suspensión Rocker-Bogie.
4. **Metodología:** Expone el enfoque experimental, las herramientas y los procedimientos utilizados para desarrollar e implementar la plataforma robótica propuesta.
5. **Resultados y Discusión:** Presenta los resultados obtenidos en el desarrollo del proyecto, con un análisis crítico de los mismos en relación con los objetivos planteados y el estado del arte.
6. **Conclusiones, Recomendaciones y Trabajo Futuro:** Resumen los principales hallazgos del proyecto, ofrecen recomendaciones para su aplicación práctica y proponen líneas futuras de investigación.
7. **Referencias:** Incluye todas las fuentes bibliográficas consultadas y citadas a lo largo del trabajo.
8. **Apéndice:** Proporciona información complementaria, como esquemas técnicos, cálculos detallados y fragmentos de código utilizados en el desarrollo.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

2. MARCO TEÓRICO

El desarrollo de plataformas robóticas móviles para el sector agrícola en terrenos irregulares requiere una base teórica robusta que abarque conceptos de robótica, mecánica, electrónica y agricultura de precisión. Este capítulo proporcionará un marco conceptual y técnico que permitirá comprender los fundamentos que soportan la implementación de la plataforma robótica propuesta.

La agricultura es un sector crítico para la economía y la seguridad alimentaria mundial (Baidybekova et al., 2022). Sin embargo, en regiones con terrenos irregulares, el uso de maquinaria agrícola tradicional se encuentra limitado (Vidoni et al., 2015). Es aquí donde la robótica juega un papel clave, ofreciendo soluciones innovadoras para mejorar la eficiencia y la productividad. La implementación de robots móviles en la agricultura no solo optimiza procesos, sino que también reduce costos operativos y mejora la sostenibilidad (Abdul Manap & Ismail, 2019).

Arquitectura de Hardware y Software en Plataformas Robóticas


Para la implementación de una plataforma robótica móvil eficiente, se requiere una arquitectura de hardware y software adecuada que integre sensores, actuadores y sistemas de control (Podlubne et al., 2021).

Los principales elementos que conforman una plataforma robótica móvil incluyen:

- **Microcontroladores:** Los microcontroladores son el núcleo del procesamiento de datos en robots móviles, permitiendo la ejecución de algoritmos de control y la interacción con sensores y actuadores. Estos dispositivos han sido ampliamente utilizados debido a su bajo costo y facilidad de integración con múltiples periféricos. Estos microcontroladores permiten la adquisición de datos en tiempo real y la toma de decisiones autónomas en función de las condiciones del entorno (Levshun et al., 2021).
- **Motores y actuadores:** Los motores y actuadores juegan un papel crucial en la movilidad y capacidad de respuesta de un robot. Existen diversos tipos de motores utilizados en robótica móvil, incluyendo motores de corriente continua (DC), motores paso a paso y motores sin escobillas (BLDC). La eficiencia energética y la capacidad de respuesta son aspectos fundamentales en su diseño. Recientes avances han introducido actuadores con recuperación de energía que mejoran la eficiencia general del sistema, permitiendo reducir el consumo de energía sin afectar el rendimiento (Krimsky & Collins, 2024). En aplicaciones agrícolas, los actuadores deben ser robustos para soportar condiciones adversas del terreno, garantizando una operación prolongada y fiable.
- **Sensores:** La navegación y recolección de datos dependen de una variedad de sensores, los cuales proporcionan información en tiempo real sobre el entorno del robot (Andreasson et al., 2023).
- **Módulos de comunicación:** La comunicación inalámbrica es fundamental en plataformas robóticas móviles, especialmente cuando se requiere teleoperación o trabajo colaborativo entre múltiples robots. Se utilizan diversas tecnologías de comunicación según los requisitos de la aplicación:

 - **Bluetooth:** Ideal para comunicaciones de corto alcance con bajo consumo energético.
 - **Wi-Fi:** Proporciona ancho de banda alto para la transmisión de datos en tiempo real.
 - **LoRa (Long Range):** Permite la comunicación de largo alcance con bajo consumo energético, adecuada para entornos agrícolas remotos.

La elección del protocolo de comunicación depende de factores como la latencia, el ancho de banda requerido y el consumo energético. Estudios recientes han demostrado la importancia de optimizar la infraestructura de comunicación para mejorar la estabilidad de la conexión en entornos complejos (Behera et al., 2018).

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

Sistemas de Suspensión y Movilidad en Terrenos Irregulares

El desplazamiento eficiente de una plataforma robótica en terrenos agrícolas irregulares requiere un sistema de suspensión adecuado que garantice estabilidad y capacidad de adaptación (Zhao et al., 2024).

Los sistemas de suspensión permiten que un vehículo distribuya de manera uniforme las fuerzas sobre sus ruedas, mejorando la tracción y reduciendo el impacto de las irregularidades del terreno. Entre los sistemas más utilizados en robótica móvil destacan:

- **Suspensión independiente:** Este sistema permite que cada rueda se ajuste de manera individual a las irregularidades del terreno. Su principal ventaja es la mejora en la estabilidad y el confort del sistema, ya que cada rueda opera de manera autónoma sin afectar a las demás. Es ampliamente utilizado en vehículos de exploración y aplicaciones en terrenos accidentados. Estudios han demostrado que este sistema optimiza la maniobrabilidad y minimiza la transferencia de vibraciones al chasis del robot (Dziopa, 2024).
- **Suspensión rígida:** Se caracteriza por la conexión fija entre las ruedas y el chasis del robot, lo que proporciona una estructura robusta y resistente. Aunque no permite adaptaciones individuales a irregularidades del terreno, es una opción confiable para aplicaciones que requieren simplicidad mecánica y resistencia estructural. Este tipo de suspensión es común en robots diseñados para tareas específicas en terrenos planos o de baja variabilidad (Akwara, 2021).
- **Sistema Rocker-Bogie:** Desarrollado originalmente para exploración planetaria, este sistema ha demostrado ser altamente efectivo en terrenos irregulares. Su diseño permite que las ruedas del robot se adapten de forma automática a obstáculos, asegurando un contacto constante con el suelo sin necesidad de amortiguadores adicionales. Este sistema ha sido ampliamente estudiado y aplicado en la robótica agrícola debido a su capacidad para atravesar terrenos difíciles sin comprometer la estabilidad del robot (Cosenza et al., 2023).

Para el caso de la agricultura en terrenos irregulares, el sistema de suspensión Rocker-Bogie se ha postulado como una solución viable debido a su capacidad para adaptarse a superficies desiguales sin comprometer la estabilidad del robot (Sandbhor et al., 2024).

Robótica Móvil y su Aplicación en la Agricultura


La robótica móvil es un área de la ingeniería que estudia el diseño, control y aplicación de robots capaces de desplazarse de manera autónoma o teleoperada en distintos entornos (Rubio et al., 2019). En el sector agrícola, estos sistemas han evolucionado significativamente en las últimas décadas, con la introducción de robots autónomos para siembra, fumigación, monitoreo de cultivos y cosecha (Lytridis et al., 2021).

Un robot móvil es un sistema autónomo o semi-autónomo capaz de moverse en un entorno sin una infraestructura fija. Estos sistemas pueden clasificarse según su método de locomoción en distintas categorías, cada una con ventajas y limitaciones dependiendo del entorno de operación según (Bruzzzone et al., 2022) los sistemas de locomoción más utilizados en robots móviles terrestres incluyen:

- **Robots con ruedas:** Mayor eficiencia en terrenos planos.
- **Robots con patas:** Mejor adaptación a terrenos irregulares, pero mayor complejidad mecánica.
- **Robots híbridos:** Combinación de ruedas y patas para adaptabilidad.


Los robots agrícolas se emplean en diversas tareas, entre ellas:

- **Monitoreo y recolección de datos:** Sensores que capturan información del suelo y cultivos para optimizar la gestión agrícola y mejorar la productividad. Los sistemas autónomos equipados con visión artificial permiten identificar el estado de los cultivos y detectar problemas en tiempo real (Yu et al., 2024).

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

- **Siembra y cosecha:** Sistemas robóticos diseñados para la automatización de la siembra y recolección de cultivos. En particular, los robots cosechadores han demostrado ser altamente efectivos en la recolección automatizada de frutas y vegetales, utilizando sistemas de navegación avanzados y brazos robóticos con algoritmos de visión artificial para la identificación de frutos maduros (Droukas et al., 2023).
- **Fumigación y control de plagas:** Robots agrícolas diseñados para la aplicación precisa de agroquímicos han reducido significativamente el desperdicio de pesticidas y mejorado la eficiencia en el control de plagas. Mediante drones y vehículos autónomos terrestres, la pulverización se realiza solo en áreas afectadas, minimizando el impacto ambiental y la exposición de los trabajadores a sustancias químicas (Vibhute et al., 2021).

Estos avances han permitido una transición hacia la agricultura de precisión (Sharma, 2023), un modelo que optimiza recursos mediante tecnología, reduciendo costos y aumentando la eficiencia.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

3. METODOLOGÍA

Enfoque metodológico

El proyecto se desarrolló bajo un enfoque de *investigación aplicada* con diseño experimental para validar el desempeño de una plataforma robótica móvil de bajo costo en terrenos agrícolas irregulares. La metodología combina (i) el diseño y la integración mecatrónica de la solución, (ii) el desarrollo del sistema embebido y la interfaz hombre-máquina, y (iii) la verificación experimental en condiciones reales, con trazabilidad directa entre fases y objetivos específicos.

Estructura general y alineación con los objetivos

A continuación se presentan las fases metodológicas, cada una alineada explícitamente con su objetivo específico (OE). La Tabla 1 resume la relación 1:1.

Tabla 1: Alineación entre objetivos específicos (OE) y fases metodológicas

Fase	Descripción (corresponde a OE)
Fase 1	Revisión del estado del arte, levantamiento de requisitos del entorno agrícola y especificación técnico-funcional de la plataforma (OE1).
Fase 2	Diseño, fabricación e integración mecánica tipo Rocker-Bogie; memorias de cálculo y BOM (OE2).
Fase 3	Desarrollo del sistema embebido (ESP32), control de motores, sensórica e interfaz Bluetooth (App Inventor) (OE3).
Fase 4	Validación experimental en campo y análisis de desempeño de la plataforma en terreno irregular (OE4).


FASE 1: Diseño e implementación del sistema de suspensión Rocker-Bogie

Esta fase aborda el primer objetivo específico del proyecto, enfocándose en el diseño, dimensionamiento, selección de materiales, fabricación y ensamblaje del sistema de suspensión pasiva tipo Rocker-Bogie. El proceso metodológico se estructuró en siete etapas secuenciales que aseguran la viabilidad técnica y funcional del sistema mecánico antes de su integración con los subsistemas electrónicos.

Revisión del estado del arte

Se realizó una búsqueda exhaustiva de literatura científica, informes técnicos y estudios previos sobre plataformas robóticas móviles, sistemas de suspensión tipo Rocker-Bogie y tecnologías de automatización en la agricultura. Esta etapa permitió:

- Identificar los desarrollos recientes en el campo de la robótica aplicada a la agricultura y sistemas de locomoción para terrenos irregulares.
- Establecer los requerimientos funcionales y limitaciones de diseño para plataformas móviles en entornos agrícolas colombianos.
- Analizar las ventajas comparativas del sistema Rocker-Bogie frente a suspensiones independientes y rígidas en términos de estabilidad, complejidad mecánica y costo.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

- Identificar materiales de bajo costo con propiedades mecánicas adecuadas para aplicaciones de robótica móvil.

Los hallazgos de esta revisión fundamentaron las decisiones de diseño posteriores, especialmente en cuanto a geometría del sistema de suspensión, selección de materiales estructurales y criterios de dimensionamiento.

Análisis de requisitos operacionales

El diseño del sistema de suspensión se fundamentó en un análisis riguroso de las condiciones del entorno agrícola colombiano, particularmente en terrenos con pendientes irregulares (Vidoni et al., 2015), presencia de obstáculos naturales como piedras, raíces y surcos (Aula & Tanjungpura, 2024), y características de baja compactación del suelo (Vidoni et al., 2018).

A partir de este diagnóstico, se establecieron los siguientes requisitos funcionales y de diseño:

- **Capacidad de superación de obstáculos:** El sistema debe permitir sortear obstáculos de hasta 12 cm de altura sin comprometer la estabilidad del conjunto ni generar pérdida de tracción en las ruedas motrices.
- **Adaptabilidad a pendientes pronunciadas:** La configuración geométrica debe garantizar operación estable en pendientes de hasta 25°, manteniendo un centro de gravedad bajo y distribución equitativa de cargas entre ejes delantero y trasero.
- **Robustez estructural con bajo peso:** Los materiales seleccionados deben ofrecer resistencia mecánica adecuada ante esfuerzos de flexión, torsión y fatiga, minimizando la masa total del sistema para reducir el consumo energético y mejorar la relación potencia-peso.
- **Modularidad y mantenibilidad:** El diseño debe facilitar el desmontaje de componentes para mantenimiento preventivo y correctivo, así como la integración futura de sensores, actuadores o sistemas de carga útil.
- **Bajo costo de fabricación:** Priorizar materiales y procesos de manufactura accesibles en el contexto colombiano, tales como tubería comercial, impresión 3D FDM y mecanizado CNC básico.

Con base en estos requerimientos, se optó por implementar una configuración tipo Rocker-Bogie modificada, que garantiza tracción continua de las seis ruedas sobre terrenos irregulares sin necesidad de sistemas de amortiguación activa, reduciendo así la complejidad mecánica y el costo total del sistema.

Diseño CAD del sistema mecánico

La etapa de diseño estructural se llevó a cabo empleando el software Fusion 360, una herramienta CAD paramétrica que permitió modelar tridimensionalmente los componentes mecánicos del sistema de suspensión tipo Rocker-Bogie. Este entorno de diseño facilitó:

- Visualización detallada de las relaciones geométricas entre los elementos del sistema (brazos, pivotes, soportes de motor, anclajes de ruedas).
- Detección temprana de interferencias físicas entre piezas móviles durante el ciclo de operación.
- Evaluación espacial del ensamblaje completo, considerando rutas de cableado, ubicación de componentes electrónicos y accesibilidad para mantenimiento.
- Generación de planos técnicos con cotas, tolerancias y especificaciones de materiales para procesos de fabricación.

El proceso de modelado incluyó la configuración de parámetros clave como la longitud de los brazos de suspensión (optimizada para maximizar el ángulo de escalada), la ubicación estratégica de los puntos de pivote (para distribuir cargas de forma equilibrada) y el diámetro de las ruedas (seleccionado en función del torque disponible y la velocidad lineal deseada).

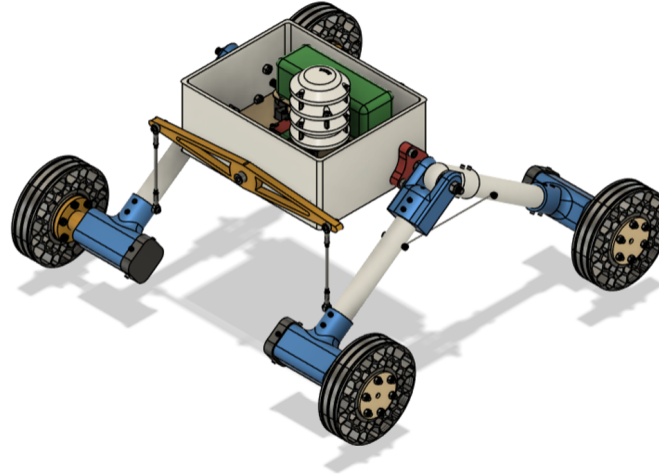


Figura 1: Modelo 3D del sistema de suspensión Rocker-Bogie con vista general del ensamblaje, diseñado en Fusion 360.

Aunque no se realizaron simulaciones de elemento finito (FEA) debido a limitaciones de licenciamiento, las decisiones de diseño se fundamentaron en criterios técnicos obtenidos de la literatura especializada sobre sistemas Rocker-Bogie aplicados a terrenos irregulares, particularmente en cuanto a relaciones geométricas entre segmentos del bogie y ángulos de pivote diferencial.

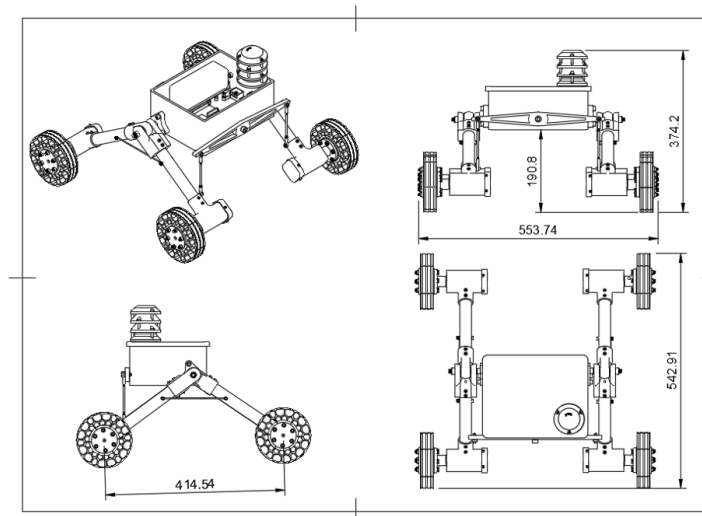



Figura 2: Detalle técnico del diseño: cotas principales, puntos de articulación y distribución del sistema tipo Rocker-Bogie.

Selección de materiales y componentes estructurales

Para la selección de materiales se priorizaron dos criterios fundamentales: bajo peso específico y resistencia mecánica adecuada para uso en campo. La estrategia de diseño consideró la función estructural de cada componente, diferenciando entre elementos primarios (que soportan cargas críticas) y secundarios (acoples, cubiertas, soportes auxiliares).

Brazos principales del sistema Rocker-Bogie

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

Los brazos fueron contruidos utilizando tubería de PVC rígido Schedule 40 de $\frac{3}{4}$ de pulgada, un material que presenta una excelente relación entre peso, rigidez y facilidad de mecanizado. El módulo de elasticidad del PVC rígido se encuentra típicamente entre 2.5 y 3 GPa, con resistencia a la tracción entre 40 y 60 MPa, dependiendo de la formulación del compuesto (Hoo Fatt et al., 2024). Estos valores son suficientes para soportar cargas moderadas durante maniobras sobre terrenos agrícolas irregulares, especialmente considerando que el peso total estimado de la plataforma es menor a 6 kg. Además, el PVC ha demostrado durabilidad en aplicaciones estructurales ligeras y resistencia al desgaste mecánico y ambiental (Enayati, 2021).

Acoples y conectores impresos en PLA

Los acoples de unión entre la tubería de PVC y el sistema de ruedas fueron diseñados e impresos en PLA (ácido poliláctico), un polímero termoplástico ampliamente empleado en fabricación aditiva. El PLA presenta un módulo de elasticidad promedio entre 3 y 4 GPa, con buena calidad de impresión y bajo coeficiente de expansión térmica (Coppola et al., 2018). Aunque no es recomendado para cargas elevadas ni exposición prolongada a radiación UV o temperaturas superiores a 60°C, su uso se justifica porque los componentes permanecen protegidos dentro del chasis y están sometidos principalmente a esfuerzos de acople, no a cargas estructurales primarias (dos Santos et al., 2023). Su facilidad de manufactura mediante impresión FDM permite iteraciones rápidas de diseño a bajo costo.

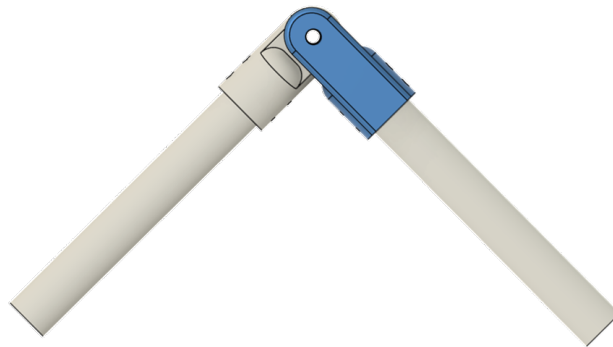



Figura 3: Conexión entre brazos de PVC y acoples PLA mediante fijación mecánica atornillada.

Carcasas de protección para motores

Las carcasas que alojan los motores de tracción fueron diseñadas en PLA con espesor de pared aumentado (2.5 mm) para soportar impactos moderados, vibraciones y exposición ocasional al agua o tierra. El diseño incluye ventanas de ventilación para disipar calor generado por los motores bajo carga y permite acceso rápido para mantenimiento sin necesidad de desmontar el sistema completo de suspensión.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

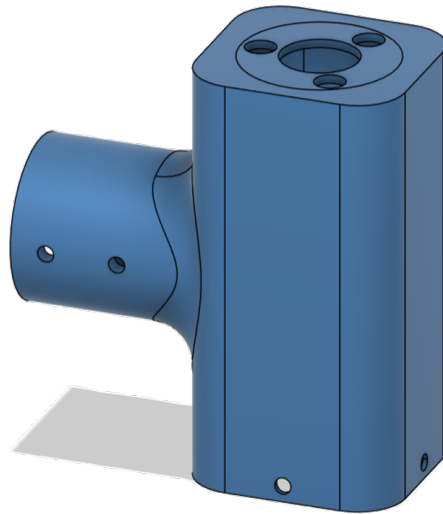



Figura 4: Soporte y carcasa de protección para motores DC con ventilación integrada.

Llantas bioinspiradas en TPU

Las llantas del robot fueron fabricadas mediante impresión 3D en poliuretano termoplástico (TPU), material que destaca por su alta elasticidad (elongación superior al 500 %) y excelente resistencia al desgarro (Rajan et al., 2012). Estas propiedades hacen del TPU una opción ideal para aplicaciones que requieren alta resistencia al impacto y deformación elástica reversible.

La estructura interna de las llantas está basada en un diseño bioinspirado de panal de abeja (geometría hexagonal). Este tipo de arquitectura permite distribuir uniformemente las cargas aplicadas, mejorar la absorción de vibraciones y optimizar la tracción sobre superficies blandas (Lee et al., 2012). Estudios recientes muestran que los patrones hexagonales contribuyen significativamente a mejorar la resistencia al desgaste y a mantener buen agarre incluso en condiciones húmedas (Mao et al., 2019). La elección de celdas hexagonales también se justifica por investigaciones en neumáticos no neumáticos (NPT) fabricados en TPU, donde se ha demostrado que mejoran significativamente el desempeño en cargas dinámicas (Andriya et al., 2022).

Finalmente, el uso de TPU no solo aporta flexibilidad estructural, sino también un coeficiente de fricción adecuado que garantiza buen agarre en distintas superficies, evitando la necesidad de neumáticos inflables y reduciendo riesgos de fallas por pinchazos (Chen et al., 2022).

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

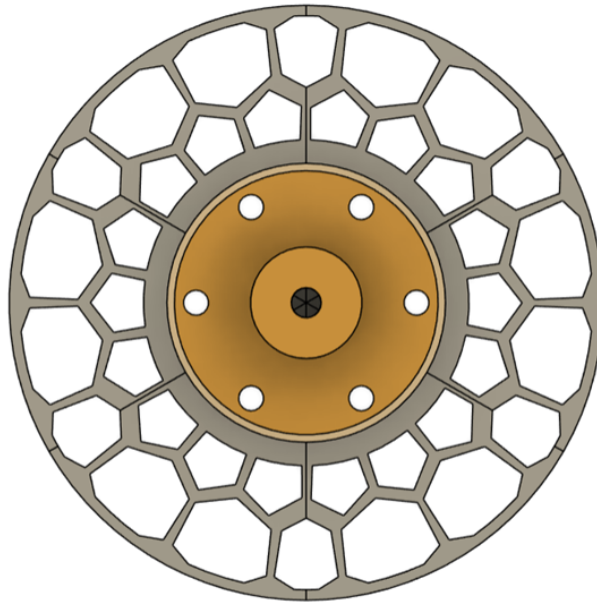


Figura 5: Diseño bioinspirado en forma de panal de abeja para amortiguación pasiva y distribución uniforme de cargas en la llanta.

Caja de protección electrónica IP65

Para albergar y proteger los componentes electrónicos críticos (ESP32, controladores L298N, IMU y regulador de voltaje), se seleccionó una caja hermética modelo 17×22 cm marca Halux, diseñada para instalación de dispositivos electrónicos en entornos exteriores exigentes (Arias, 2025). Las características técnicas clave incluyen:

- Cuerpo de ABS con protección UV y rigidez mecánica adecuada.
- Tapa de policarbonato transparente para visualización directa del estado de componentes sin apertura.
- Sellado con empaque de neopreno, garantizando protección IP65 contra polvo y chorros de agua a presión.
- Bandeja porta-equipos interna para organización y fijación segura, minimizando vibración y desconexiones accidentales.
- Knock-outs laterales para instalación de prensaestopas y entradas de cableado selladas.

Pivote diferencial en aluminio mecanizado

Un componente crítico del sistema Rocker-Bogie es el pivote diferencial central, encargado de distribuir las cargas entre las ruedas delanteras y traseras, permitiendo que cada lado del robot se adapte de forma independiente al terreno (Miller & Lee, 2002). Este mecanismo actúa como compensador mecánico que transfiere fuerzas entre ambos extremos del bogie, evitando inclinaciones excesivas y reduciendo el riesgo de vuelco en terrenos irregulares.

Debido a su función estructural y la necesidad de alta precisión en el eje de rotación, el pivote fue fabricado en aluminio 6061 mediante mecanizado CNC. Este material ofrece una resistencia a la tracción de 290 MPa y excelente relación peso-resistencia (Jana, 2019). El aluminio fue seleccionado por su rigidez, facilidad de maquinado, resistencia a la corrosión y compatibilidad con rodamientos estándar. Se incorporaron cojinetes metálicos en los puntos de rotación para asegurar movimiento suave y duradero bajo cargas cíclicas.


	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27



Figura 6: Vista frontal del pivote diferencial mecanizado en aluminio 6061.



Figura 7: Vista lateral en corte del pivote diferencial con rodamientos integrados.

Memorias de cálculo mecánico

Con el objetivo de validar la viabilidad estructural, funcional y energética del sistema de suspensión desarrollado, se realizaron cálculos mecánicos y dinámicos tomando como base las condiciones reales del prototipo. Estos análisis permiten asegurar que el sistema de tracción, el dimensionamiento de motores y la integridad estructural se encuentren dentro de parámetros seguros y eficientes.

Torque total requerido por rueda

Con el fin de asegurar que el robot sea capaz de superar las condiciones propias del terreno agrícola, se calculó el torque requerido por cada rueda como la suma de tres componentes principales: (1) torque necesario para vencer una pendiente con ángulo de inclinación $\theta = 28^\circ$, (2) torque asociado a la resistencia al rodamiento en suelo blando, y (3) torque requerido para superar obstáculos de hasta 6 cm de altura. Este modelo ha sido validado en estudios previos sobre robots móviles en entornos irregulares (Kim et al., 2024).

Las expresiones utilizadas son:

$$T_{\text{pendiente}} = m \cdot g \cdot r \cdot \sin(\theta) \quad (1)$$

$$T_{\text{rodamiento}} = m \cdot g \cdot C_{rr} \cdot r \quad (2)$$

$$T_{\text{obstaculo}} = m \cdot g \cdot h \quad (3)$$

$$T_{\text{total}} = T_{\text{pendiente}} + T_{\text{rodamiento}} + T_{\text{obstaculo}} \quad (4)$$

Donde: $m = 1.365$ kg (masa por rueda, $\frac{1}{4}$ del peso total), $r = 0.065$ m (radio de rueda), $g = 9.81$ m/s² (aceleración gravitacional), $C_{rr} = 0.07$ (coeficiente de resistencia al rodamiento en suelo agrícola), $h = 0.06$ m (altura de obstáculo).

Al aplicar estos valores se obtuvo $T_{\text{total}} = 1.296$ Nm. Este valor fue comparado con el torque nominal del motor seleccionado, el Faulhaber 2342L012CR ($T_{\text{motor}} = 1.72$ Nm), concluyéndose que el motor es adecuado con margen de seguridad del 33 %.

Velocidad lineal estimada

La velocidad máxima sin carga de la plataforma fue estimada mediante el modelo cinemático clásico:

$$v = \frac{n \cdot \pi \cdot d}{60} \quad (5)$$


Donde: $n = 120$ rpm (velocidad sin carga del motor), $d = 0.13$ m (diámetro de rueda).

Se obtuvo $v = 0.816$ m/s, valor adecuado para operaciones de navegación en terrenos agrícolas estrechos. Modelos similares han sido empleados en robots móviles agrícolas (Fan et al., 2017).

Análisis dinámico

Para garantizar el desplazamiento efectivo sobre pendientes agrícolas, se estimó la fuerza de tracción total requerida:

$$F_{\text{total}} = m \cdot g \cdot \sin(\theta) + m \cdot g \cdot C_{rr} \quad (6)$$

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

Sustituyendo valores: $F_{total} = 28.92$ N. A partir de esta fuerza y la velocidad estimada, se calculó la potencia mecánica requerida:

$$P = F_{total} \cdot v = 23.6 \text{ W} \quad (7)$$

Este enfoque ha sido respaldado por estudios como el de Bayar et al., quienes proponen modelos dinámicos que incluyen fuerzas de tracción y rodamiento (Bayar et al., 2015).

Fabricación y ensamblaje

Una vez finalizado el diseño CAD y validadas las memorias de cálculo, se procedió a la fabricación de componentes mediante tres procesos principales:

- **Impresión 3D FDM:** Componentes estructurales, acoples y carcasas fueron impresos con densidad de relleno superior al 70 % para garantizar rigidez mecánica. Se utilizó una impresora Creality Ender 3 con boquilla de 0.4 mm, altura de capa de 0.2 mm y temperatura de extrusión de 210°C para PLA y 230°C para TPU.
- **Corte láser y mecanizado CNC:** Piezas metálicas como anclajes, placas soporte y el pivote diferencial fueron cortadas mediante láser CO₂ (para acrílico) y mecanizadas en fresadora CNC (para aluminio 6061), asegurando tolerancias dimensionales de ± 0.1 mm en uniones críticas.
- **Corte de tubería PVC:** Los brazos del Rocker-Bogie fueron cortados a medida con sierra de disco y limados para eliminar rebabas. Se aplicó adhesivo PVC en uniones permanentes y tornillería métrica M5 en uniones desmontables.

El ensamble mecánico se realizó incorporando rodamientos de bolas (tipo 608ZZ) en los puntos de pivote del mecanismo Rocker-Bogie, permitiendo libertad de movimiento con fricción mínima. Se utilizaron tuercas autoblocantes (Insert Locknuts) para evitar aflojamiento por vibración durante la operación en campo.

El resultado fue un prototipo mecánico funcional, diseñado para ser fácilmente integrable al chasis de la plataforma robótica. Se realizaron verificaciones preliminares de ensamblaje, espacio físico y movilidad en condiciones estáticas antes de proceder a la integración electrónica.

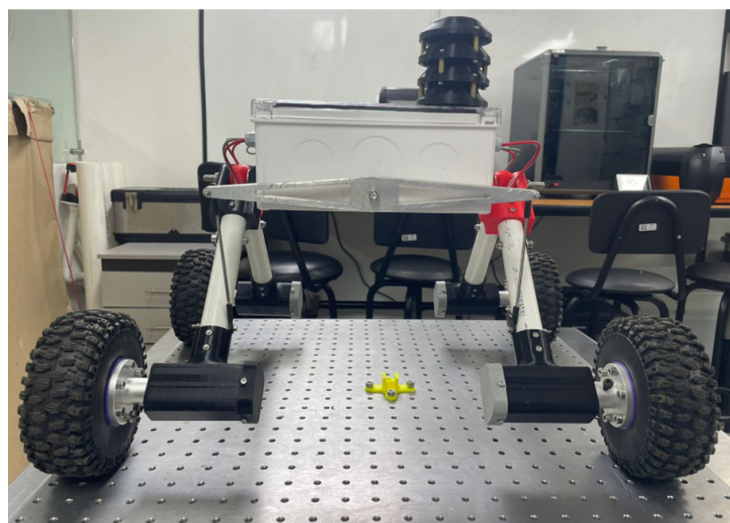



Figura 8: Vista frontal del prototipo ensamblado del sistema de suspensión tipo Rocker-Bogie antes de la integración electrónica.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

Validación preliminar de movilidad

Antes de proceder con la integración de componentes electrónicos, se realizaron pruebas de movilidad pasiva para verificar:

- Libertad de movimiento de los brazos del Rocker-Bogie sin fricción excesiva ni bloqueos mecánicos.
- Capacidad de mantener contacto simultáneo de las seis ruedas sobre superficies irregulares mediante manipulación manual.
- Ausencia de interferencias físicas entre componentes móviles durante el rango completo de movimiento del sistema de suspensión.
- Rigidez adecuada de las uniones atornilladas bajo cargas estáticas aplicadas manualmente.

Estas verificaciones permitieron identificar y corregir pequeñas desviaciones dimensionales (como espacios excesivos en rodamientos) antes de la fase de integración electrónica, optimizando el tiempo de desarrollo y reduciendo el riesgo de fallas estructurales durante las pruebas dinámicas posteriores.

Presentación del BOM de la capa de control

En esta fase se **presenta el Bill of Materials (BOM)** correspondiente a la *capa de gestión y control* (ESP32, electrónica de potencia, sensado inercial y elementos asociados al firmware). Con el fin de asegurar trazabilidad y reproducibilidad, el BOM se organiza en dos listados complementarios:

- **Partes comerciales:** componentes adquiribles (microcontrolador, drivers, sensores, elementos de fijación y ferretería técnica), con enlace a la fuente, cantidad y costo unitario.
- **Partes para fabricar:** piezas diseñadas para impresión 3D, corte o mecanizado (cajas, soportes y acoples específicos para la integración electrónica).

El detalle se encuentra en las Tablas 2 y 3. *Nota:* El BOM mecánico-estructural del sistema de suspensión se documenta en la FASE 1 (diseño/ensamble). Aquí se listan únicamente los elementos vinculados a control y su integración física inmediata.

Tabla 2: Bill of Materials — Partes comerciales

Item	Part type	Source	Qty	Unit Price	Total Price (COP)
1	Electronic box	LINK	1	\$34.900,00	\$34.900,00
5	L298N Driver	LINK	2	\$55.000,00	\$110.000,00
8	MPU 9250	LINK	1	\$92.000,00	\$92.000,00
10	Sparkfun Thing Plus	LINK	1	\$106.913,00	\$106.913,00
11	GPS module	LINK	1	\$21.000,00	\$21.000,00
13	Battery	LINK	1	\$265.000,00	\$265.000,00
15	Bearing	LINK	11	\$27.816,00	\$305.976,00
19	Threaded Rod	LINK	1	\$31.505,00	\$31.505,00
20	Locknut	LINK	4	\$4.579,00	\$18.316,00
21	Pipeline	LINK	4	\$4.000,00	\$16.000,00
22	Faulhaber DC motor	LINK	4	\$93.286,00	\$373.144,00
26	Ball Joint Rod End	LINK	4	\$7.259,00	\$29.036,00
27	Connecting Rod	LINK	2	\$4.000,00	\$8.000,00
28	Spring	LINK	1	\$52.622,00	\$52.622,00
35	O ring base	LINK	1	\$1.977,00	\$1.977,00
36	Hex Standoff	LINK	9	\$11.418,00	\$102.762,00
37	M3 x 6 mm Screw	LINK	15	\$229,00	\$3.435,00
38	M4 Washer	LINK	12	\$150,00	\$1.800,00

Continúa en la siguiente página...


 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

Tabla 2 – continuación

Item	Part type	Source	Qty	Unit Price	Total Price (COP)
39	M3 Nut	LINK	32	\$199,00	\$6.368,00
40	M3 x 10 mm Screw	LINK	29	\$1.147,00	\$33.263,00
41	M3 Insert Locknut	LINK	43	\$564,00	\$24.252,00
42	M3 x 12 mm Screw	LINK	33	\$1.147,00	\$37.851,00
43	M3 x 40 mm Screw	LINK	4	\$1.838,00	\$7.352,00
44	M3 x 35 mm Screw	LINK	14	\$1.607,00	\$22.498,00
45	M3 x 20 mm Screw	LINK	2	\$1.314,00	\$2.628,00
46	M6 x 22 mm Screw	LINK	4	\$4.310,00	\$17.240,00
47	M6 Insert Locknut	LINK	4	\$564,00	\$2.256,00
48	M8 x 20 mm Screw	LINK	1	\$1.321,00	\$1.321,00
49	M8 Nut	LINK	1	\$730,00	\$730,00
50	M5 x 50 mm Screw	LINK	24	\$3.600,00	\$86.400,00
51	M5 Insert Locknut	LINK	24	\$700,00	\$16.800,00
52	94645A102 — High-Strength Steel Nylon-Insert Locknut	LINK	24	\$700,00	\$16.800,00
53	M5 Spring	LINK	2	\$15.000,00	\$30.000,00
54	91290A172 — Alloy Steel Socket Head Screw	LINK	4	\$1.300,00	\$5.200,00
55	94645A101 — High-Strength Steel Nylon-Insert Locknut	LINK	4	\$700,00	\$2.800,00


Tabla 3: Bill of Materials — Partes para fabricar

Item	Part type	Source	Qty	Unit Price	Total Price (COP)
2	Electronic board	LINK	1	\$5.000,00	\$5.000,00
3	Rear battery support	LINK	1	\$3.000,00	\$3.000,00
4	Battery side support	LINK	2	\$2.000,00	\$4.000,00
6	Spacer	LINK	18	\$300,00	\$5.400,00
7	MPU 9250 Box	LINK	1	\$500,00	\$500,00
9	Battery support	LINK	1	\$2.000,00	\$2.000,00
12	Motor coupling	LINK	4	\$34.000,00	\$136.000,00
14	Box union	LINK	2	\$1.500,00	\$3.000,00
16	Pivot	LINK	1	\$0,00	\$0,00
17	Coupling_1	LINK	2	\$5.000,00	\$10.000,00
18	Coupling_2	LINK	2	\$4.200,00	\$8.400,00
23	Motor cover	LINK	4	\$2.000,00	\$8.000,00
24	Motor sealing ring	LINK	4	\$200,00	\$800,00
25	Tire	LINK	8	\$12.000,00	\$96.000,00
29	Base dome	LINK	1	\$2.200,00	\$2.200,00
30	MQ135 dome	LINK	1	\$1.800,00	\$1.800,00
31	Dome	LINK	1	\$2.000,00	\$2.000,00
34	Top dome	LINK	1	\$2.000,00	\$2.000,00

Con la finalización exitosa de esta fase, se dio cumplimiento al primer objetivo específico del proyecto, estableciendo una base mecánica sólida para las fases subsecuentes de desarrollo del algoritmo de control, implementación de comunicaciones y evaluación en campo.

FASE 2: Desarrollo del algoritmo de gestión y control

La segunda fase se enfocó en el diseño, implementación y verificación del algoritmo de gestión y control de la plataforma, entendida como la capa lógica que integra el hardware electrónico (microcontrolador, electrónica de potencia y sensores inerciales) con la interfaz de operación. Esta fase se orientó a asegurar la ejecución confiable de las funciones operativas del robot (arranque, parada, avance, retroceso y giros) mediante control por modulación de ancho de pulso (PWM), el manejo

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

seguro de estados y la lectura periódica de variables inerciales para futuras mejoras de estabilidad. Cabe resaltar que los aspectos de comunicación e intercambio de datos inalámbricos *no* se abordan en esta fase, dado que fueron desarrollados en la FASE 3.

Especificación de componentes electrónicos

Con base en los criterios de disponibilidad, eficiencia energética, capacidad de control y compatibilidad con la arquitectura del sistema (véase FASE 1), se estableció el siguiente conjunto electrónico para la capa de control:


- **Unidad de control:** SparkFun Thing Plus – ESP32 WROOM (ESP32-D0WDQ6, doble núcleo hasta 240 MHz, conectividad integrada y soporte para PWM por hardware). Su capacidad de procesamiento y periféricos integrados la hacen idónea para control de motores y adquisición de sensores en tiempo real (Systems, 2023).
- **Electrónica de potencia:** Dos módulos *H-bridge* L298N para el control bidireccional de los cuatro motores DC (dos motores por módulo). Cada canal admite hasta 2 A continuos, con protección térmica y diodos de rueda libre (STMicroelectronics, 2000).
- **Sensores inerciales:** Módulo IMU tipo MPU-9250/MPU-6050 (acelerómetro y giróscopo triaxiales) para lectura de aceleraciones y velocidades angulares. En esta fase se empleó principalmente el eje de guiñada (ψ , yaw) para verificación de giros y registro básico de orientación (Chokshi, 2012).
- **Regulación de tensión:** Convertidor DC–DC tipo *buck* (12 V \rightarrow 5 V) con eficiencia >90 % para alimentación lógica estable (ESP32 e IMU) y desacople de la línea de potencia de motores (Kexin, s.f.).
- **Fuente de energía:** Batería LiPo 4S 14.8 V, 8000 mAh, seleccionada por su densidad energética y relación peso/autonomía (véase estimación de autonomía en FASE 1) (Amazon, 2024).

La asignación de pines del ESP32 se realizó atendiendo a: (i) salidas PWM con temporizadores independientes para cada canal de motor, (ii) bus I²C dedicado para la IMU (SDA/SCL), (iii) entradas digitales reservadas para eventos de usuario y estados, y (iv) líneas UART/GPIO libres destinadas a la integración posterior con el sistema de comunicaciones.

Arquitectura del sistema embebido

La arquitectura embebida define el flujo de *comando* \rightarrow *decisión* \rightarrow *actuación* y el ciclo de adquisición de variables inerciales. El ESP32 ejecuta un lazo principal (*main loop*) no bloqueante, estructurado en tareas discretas: (i) captura de eventos de usuario (desde la interfaz), (ii) decodificación y mapeo a estados de movimiento, (iii) síntesis de PWM para la electrónica de potencia, (iv) lectura periódica de la IMU por I²C, y (v) supervisión de errores (por ejemplo, comandos inválidos o ráfagas de eventos cortos).

En la Figura 9 se ilustra el diagrama de bloques de la solución, con énfasis en la separación entre la capa de control (esta fase) y la capa de comunicaciones (FASE 3). La arquitectura contempla el desacople energético (línea lógica a 5 V y potencia a 12–14.8 V), retornos de referencia comunes y cableado corto hacia los *drivers* L298N para minimizar caída de tensión y ruido conmutado.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

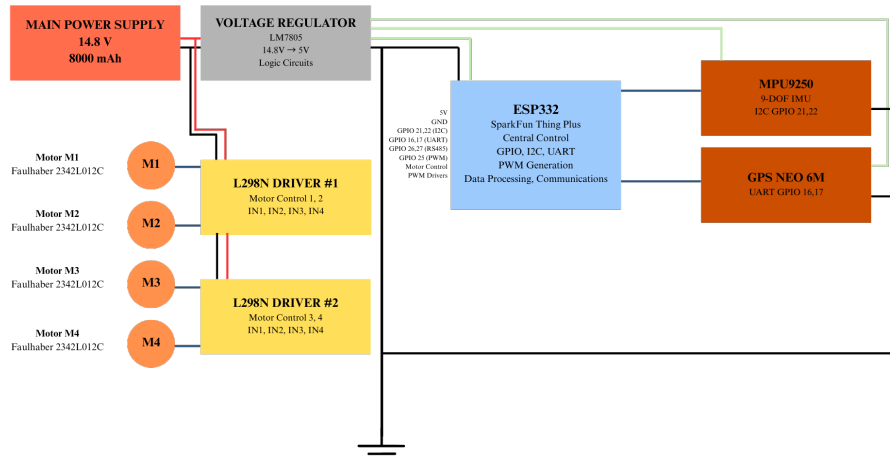



Figura 9: Diagrama de bloques de la arquitectura del sistema embebido (capa de control).

Interfaz de usuario para el control

Se desarrolló una interfaz operativa para el disparo de comandos de movimiento mediante botones táctiles (avanzar, retroceder, giro izquierda, giro derecha y detener). Cada botón se programó con eventos *TouchDown/TouchUp* para enviar un *token* al presionar y otro al liberar, lo que mejora la maniobrabilidad al permitir pulsos de velocidad controlados y respuesta inmediata.

El mapeo lógico de la interfaz a comandos se definió con códigos simples y únicos (p. ej., 8 para *avanzar_down*, 7 para *avanzar_up*; 4/3 para *izquierda_down/izquierda_up*; 6/5 para *derecha_down/derecha_up*; 2/1 para *retro_down/retro_up*; 0 para *stop*). La interfaz contempla, adicionalmente, un botón *Auto Mode* que activa una rutina de trayectoria predefinida (p. ej., desplazamientos rectilíneos y giros de 90°), cuya ejecución y lógica de control pertenecen a esta fase, mientras que su disparo externo por comunicaciones se documenta en la FASE 3.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

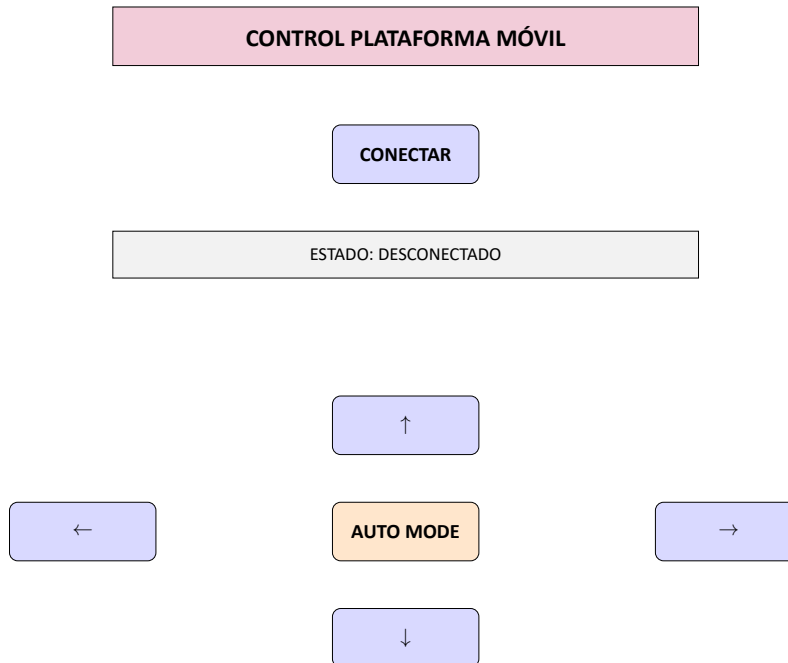



Figura 10: Wireframe funcional de la interfaz de control por botones con eventos *TouchDown/TouchUp*.

Implementación del firmware en ESP32

El firmware fue desarrollado en lenguaje C++ sobre el entorno de desarrollo de Arduino (IDE), implementando una arquitectura de software modular para garantizar la mantenibilidad y escalabilidad del código. La lógica operativa se estructuró como una **máquina de estados finitos** que gobierna las transiciones entre los modos de funcionamiento y gestiona los protocolos de seguridad. Para asegurar una alta capacidad de respuesta, el bucle de control principal se diseñó bajo un esquema de **sondeo no bloqueante** (*non-blocking polling*) para la gestión de comandos de usuario.

A continuación, se detallan los aspectos clave de la implementación:

1. **Máquina de Estados y Protocolos de Seguridad:** Se diseñó una máquina de estados finitos con tres modos principales: REPOSO, TELEOPERADO y AUTO. Las transiciones entre estados se disparan exclusivamente por eventos válidos recibidos desde la interfaz de usuario. Se implementaron rutinas de seguridad críticas, incluyendo la prioridad absoluta del comando de detención sobre cualquier otra instrucción, la anulación de comandos de giro ante órdenes simultáneas contradictorias (p. ej., izquierda y derecha al mismo tiempo) y un temporizador de vigilancia watchdog que retorna el sistema al estado tras un periodo de inactividad, previniendo movimientos descontrolados.
2. **Control de Actuadores y Modulación PWM:** La velocidad de las ruedas se controló mediante señales PWM en un rango de frecuencia de 1 a 5 kHz, intervalo seleccionado para reducir el zumbido audible en los motores y mejorar la linealidad de la respuesta del driver L298N. Se asignaron temporizadores de hardware independientes para cada canal de motor, garantizando una coherencia temporal precisa entre los lados izquierdo y derecho del robot. La magnitud de la velocidad se moduló a través del duty cycle de la señal PWM aplicada al pin Enable, mientras que la dirección de giro se gobernó con los niveles lógicos de los pines IN1 e IN2. Para la caracterización inicial de la respuesta dinámica del sistema.
3. **Rutina de Modo Autónomo (Auto Mode):** Al activarse, el sistema transita al estado AUTO y ejecuta una secuencia de navegación predefinida, basada en una lista de puntos de ruta (*waypoints*) discretos. La trayectoria combina tramos rectilíneos, cuya duración es controlada por temporizadores internos, con giros precisos de 90°, los cuales se referencian

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

con el ángulo de yaw medido por la IMU. La salida de este modo se produce de forma controlada al completarse la secuencia, al exceder un tiempo máximo de ejecución o al recibir un comando de detención de emergencia, retornando en todos los casos al estado.

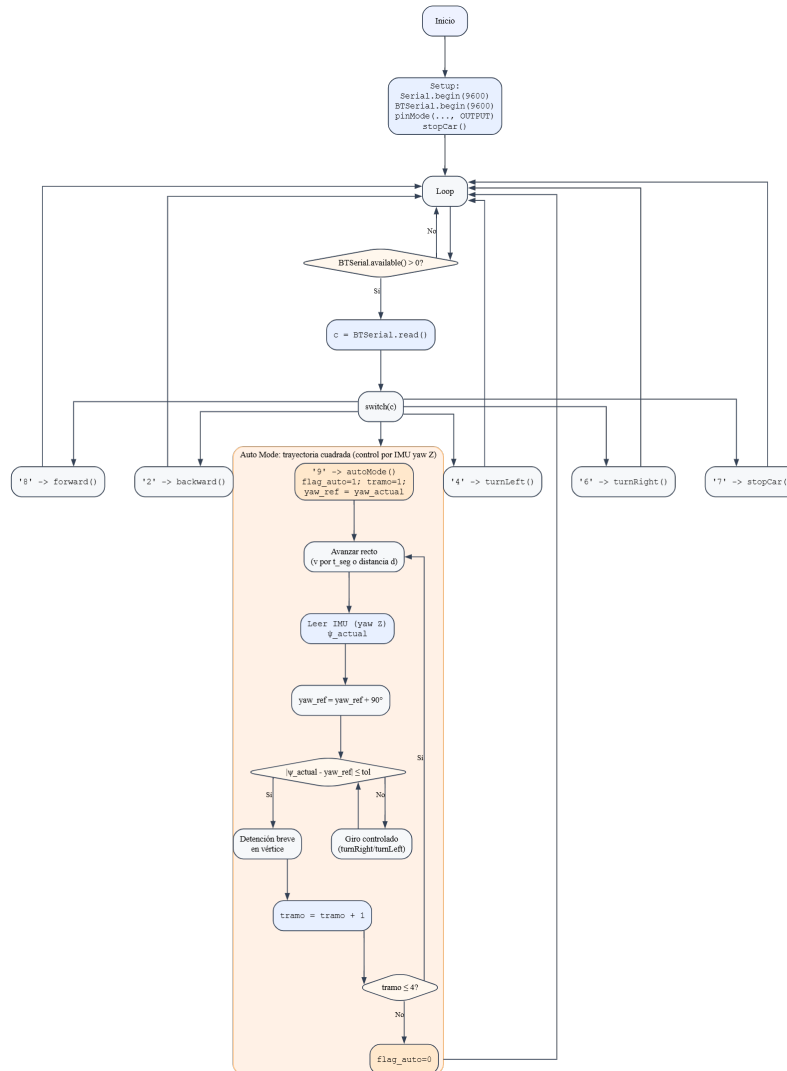



Figura 11: Diagrama de flujo del firmware de control en ESP32: captura de eventos, máquina de estados y salida PWM.

Integración y Procesamiento de Datos del Sensor Inercial

La unidad de medición inercial (IMU) es el componente clave para la estimación de la orientación de la plataforma, siendo su función principal la ejecución de giros precisos en el modo de navegación autónoma. El proceso de integración y acondicionamiento de la señal se estructuró de la siguiente manera:

1. **Ejecución de Giros Controlados en Modo Autónomo:** La funcionalidad principal de la IMU se centró en permitir giros de alta precisión para la trayectoria predefinida. Para ejecutar cada giro de 90°, el firmware implementa un algoritmo de control en lazo cerrado que consiste en:

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

- **Calibración del Punto de Giro:** Justo antes de iniciar la maniobra de rotación, el firmware ejecuta una rutina de calibración que establece la orientación actual como la referencia de cero grados. Esto anula la deriva acumulada y define un origen local para el cálculo del ángulo.
 - **Integración y Monitoreo del Yaw:** Una vez iniciada la rotación, el sistema adquiere la velocidad angular (ω_z) y la integra numéricamente en tiempo real para calcular el ángulo de guiñada (yaw) acumulado desde el punto de inicio. Para mitigar el error por deriva durante el giro, se aplica un **filtro complementario** que combina la información de alta frecuencia del giroscopio con la referencia de baja frecuencia del acelerómetro (ponderación 0.98/0.02).
 - **Condición de Parada:** El firmware monitorea continuamente el ángulo de yaw calculado y detiene la rotación de los motores en el instante en que este alcanza el valor objetivo de 90°. Este método asegura una alta repetibilidad en la ejecución de la trayectoria autónoma.
2. **Calibración General y Trabajo Futuro:** Adicionalmente, se implementó una rutina de calibración de sesgo (*offset*) en reposo que se ejecuta al encender el sistema para minimizar la deriva general del giroscopio. La calibración avanzada mediante algoritmos de múltiples posiciones no se abordó en esta fase y se plantea como trabajo futuro para el desarrollo de un sistema de navegación más robusto.

Consideraciones de alcance y estabilidad

Durante las pruebas de funcionamiento, el alcance efectivo de la comunicación Bluetooth se mantuvo en un rango aproximado de 8 a 10 metros en espacios sin obstáculos significativos. En presencia de estructuras metálicas o interferencias electromagnéticas, la conexión puede volverse inestable, lo cual es una limitante inherente al uso de tecnologías Bluetooth clásicas. Sin embargo, dado que el sistema está destinado a operar en áreas controladas como invernaderos pequeños o entornos agrícolas cercanos, este alcance es suficiente para las tareas de teleoperación previstas.

FASE 3: Implementación del sistema de comunicación Bluetooth


Esta fase documenta la capa de comunicaciones inalámbricas entre la aplicación móvil y el microcontrolador, implementada mediante el módulo Bluetooth integrado del ESP32 bajo el perfil *Serial Port Profile* (SPP). Su propósito es establecer, mantener y supervisar un canal serie confiable para la teleoperación y el disparo del modo autónomo. La lógica de control (máquina de estados, PWM y uso de IMU) se describió en la FASE 2; aquí se detalla exclusivamente el intercambio de datos y su validación básica de conectividad y alcance.

Diseño de la interfaz móvil en App Inventor (capa de comunicaciones)

La aplicación móvil desarrollada en App Inventor emplea el componente nativo `BluetoothClient` para:

- **Gestión de permisos y emparejamiento:** Solicita permisos, lista dispositivos disponibles y permite seleccionar el ESP32 para establecer el vínculo.
- **Establecimiento de conexión SPP:** Una vez emparejado, abre el canal serie y muestra visualmente el estado de conexión (conectado/no conectado).
- **Envío de tokens de control:** Los botones de la UI (avanzar, retroceder, izquierda, derecha y *stop*, así como *Auto Mode*) envían caracteres al presionarse y, cuando aplica, otro al liberarse (eventos *TouchDown/TouchUp*), manteniendo la teleoperación responsiva.

El flujo de permisos, emparejamiento y conexión se muestra en la Figura 12. El diseño de la capa de comunicaciones se limita a la apertura y supervisión del canal serie; los detalles de la lógica de movimiento se mantienen en la FASE 2.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

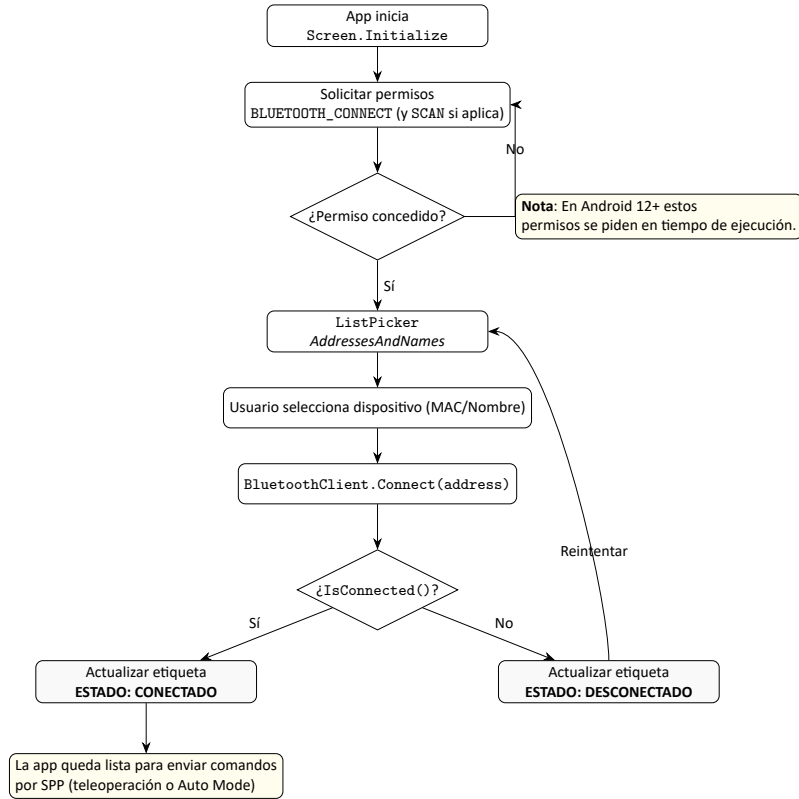


Figura 12: Flujo de permisos, emparejamiento y conexión Bluetooth (SPP) en App Inventor.


Protocolo de comandos App–Robot

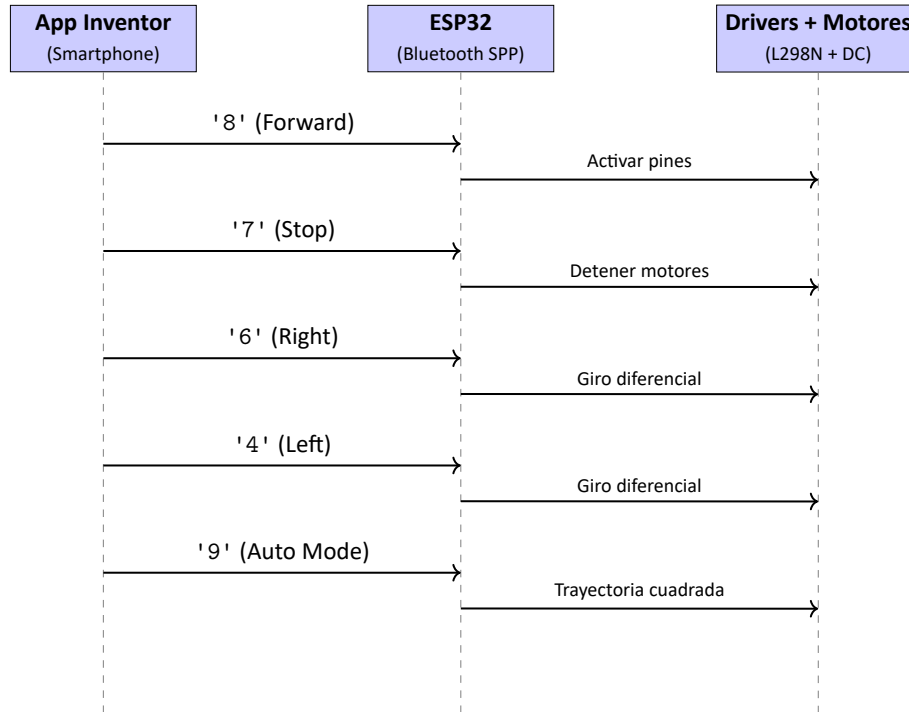
La comunicación se implementa como *serie simple* sobre SPP: la aplicación envía *tokens* de un carácter que el ESP32 recibe mediante `BTSerial.read()` y decodifica en una estructura `switch`. Cada carácter corresponde a una acción atómica definida en la FASE 2 (p. ej., avance, retroceso, giros, parada, modo autónomo).

De forma ilustrativa (según lo implementado en la interfaz y firmware):

- **Avanzar:** envía un carácter al presionar y otro al liberar (*TouchDown/TouchUp*); por ejemplo, 8 al presionar y 7 al soltar.
- **Modo autónomo:** se activa con un carácter específico, por ejemplo 9.
- **Parada segura (stop):** carácter único de mayor prioridad (señal de anulación inmediata).

La Figura 13 resume el mapeo de eventos de la App a *tokens* y la secuencia de recepción en el ESP32. La generación de PWM y la máquina de estados asociadas a cada *token* están documentadas en la FASE 2.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27



Botón	Carácter	Función	Acción en el robot
Adelante	'8'	Avanzar	Todos los motores hacia adelante
Atrás	'2'	Retroceder	Todos los motores hacia atrás
Derecha	'6'	Girar derecha	MD: adelante, MI: atrás
Izquierda	'4'	Girar izquierda	MD: atrás, MI: adelante
Stop	'7'	Detener	Desactivar todos los motores
Auto Mode	'9'	Modo automático	Ejecutar trayectoria cuadrada


Nota: MD = Motor Derecho, MI = Motor Izquierdo

Figura 13: Protocolo de comandos: eventos de la App, envío de *tokens* y decodificación serie en el ESP32.

Configuración del módulo Bluetooth SPP en ESP32

El ESP32 utiliza su Bluetooth integrado configurado bajo el perfil SPP para establecer un puerto serie virtual. El flujo en firmware comprende:

1. **Inicialización del servicio SPP** y exposición del dispositivo para emparejamiento.
2. **Aceptación de conexión** desde la App y verificación de canal activo.
3. **Bucle de lectura no bloqueante** mediante `BTSerial.read()` para capturar caracteres entrantes.
4. **Despacho de comandos** a la máquina de estados de control (FASE 2), priorizando *stop* y resolviendo conflictos de órdenes.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

La separación de responsabilidades garantiza que la capa SPP solo gestione transporte y entrega de *tokens*, mientras que la interpretación y acción sobre actuadores corresponden a la lógica de control descrita previamente.

Validación de conectividad y alcance

Durante las pruebas, el alcance efectivo de la comunicación Bluetooth se mantuvo aproximadamente entre 8 y 10 m en espacios sin obstáculos significativos. En presencia de estructuras metálicas o interferencias electromagnéticas se observaron pérdidas de estabilidad de la conexión, propias de la tecnología Bluetooth clásica. Considerando el uso previsto en invernaderos pequeños o entornos agrícolas cercanos, este alcance resultó suficiente para las tareas de teleoperación planteadas.

En síntesis, la FASE 3 dejó operativa la comunicación serie sobre SPP entre la aplicación y el ESP32, con emparejamiento y supervisión de estado de enlace desde la interfaz móvil, transmisión de *tokens* de control y recepción confiable en el microcontrolador. La evaluación integral del desempeño de la plataforma se presenta en la FASE 4.

FASE 4: Evaluación del rendimiento en pruebas de campo

Objetivo y alcance

El propósito de esta fase es **definir y ejecutar el protocolo de evaluación** del desempeño de la plataforma en terreno representativo, abarcando movilidad, estabilidad y teleoperación. La evaluación se realiza con base en **criterios cualitativos** (supera/no supera) y registro estructurado. *Las evidencias, conteos y su análisis se presentan en la sección de Resultados y Discusión.*

Diseño del protocolo experimental

Se establecieron dos modalidades de prueba, complementarias entre sí:

- **Entorno controlado:** obstáculos estandarizados para reproducibilidad:
 - Tubería de PVC con **diámetro 4 cm**.
 - Tubería de PVC con **diámetro 8.76 cm**.
 - **Rampa** con **altura 14.7 cm**, equivalente a **28.13°** de inclinación.
- **Terreno natural:** superficie sin intervención en el **campus Parque I del ITM (Medellín)**, caracterizada por **césped, lodo, piedras irregulares, zonas de baja compactación y pendientes naturales**, emulando condiciones típicas de cultivo en ladera.


Configuración de escenarios y aparejos de prueba

En el *entorno controlado*, los obstáculos de PVC y la rampa se dispusieron para evaluar: (i) superación de obstáculos cilíndricos con diámetros definidos y (ii) ascenso por plano inclinado con altura e inclinación conocidas. En el *terreno natural*, se seleccionaron tramos con césped, zonas húmedas con lodo, presencia de piedras y pendientes suaves. *Nota: Los esquemas de montaje de cada ensayo pueden incluirse aquí como figuras técnicas. Las fotografías de ejecución se mantienen en Resultados y Discusión.*

Procedimiento experimental

Las pruebas se ejecutaron en **modo teleoperado** empleando la **aplicación móvil en App Inventor** y el **módulo Bluetooth integrado del ESP32**. Para garantizar comparabilidad:

- No se realizaron **ajustes de firmware ni hardware** entre pruebas.
- Se consideró el **rango operativo práctico** de la teleoperación por Bluetooth en **8–10 m** en espacios sin obstáculos significativos.
- Se efectuaron **intentos repetidos por condición** a fin de discriminar desempeño consistente frente a eventos fortuitos.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

Criterios de evaluación y variables a registrar

Una prueba se considera **exitosa** si la plataforma **supera el obstáculo o tramo en dos intentos consecutivos** sin presentar:


1. Pérdida de estabilidad (inclinación lateral crítica o vuelco).
2. Atascamiento parcial o total.
3. Fallos en el sistema de tracción o suspensión.
4. Interrupciones de la comunicación con el módulo Bluetooth.

Para cada intento se registraron, de forma cualitativa, las siguientes **variables de observación**:

- Tipo de sustrato/condición (*césped, lodo, piedra, pendiente*).
- Geometría del obstáculo (tubo \varnothing 4 cm, tubo \varnothing 8.76 cm, rampa 14.7 cm a 28.13°).
- Tracción y continuidad del movimiento (*patinaje, correcciones, detenciones*).
- Estabilidad (*amenaza de vuelco, oscilaciones perceptibles*).
- Condición de teleoperación (*dentro/fuera del rango efectivo de 8–10 m*).

Limitaciones y consideraciones

La evaluación es **cualitativa**; **no** se midieron tiempos ni magnitudes continuas. La **IMU** *no* se empleó para navegación durante estas pruebas de campo. El **alcance de Bluetooth** depende del entorno, con desempeño práctico observado en **8–10 m**. Estas condiciones delimitan el nivel de inferencia a conclusiones de movilidad y estabilidad **bajo los escenarios definidos**. *Los resultados obtenidos, fotografías, conteos por escenario y su discusión técnica comparada con la literatura se presentan en la sección de Resultados y Discusión.*

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Evaluación del sistema en pruebas de campo

En este capítulo se reportan los **hallazgos de desempeño** de la plataforma en pruebas de campo. El *protocolo, escenarios, criterios de éxito y montaje de ensayos* se documentan en la FASE 4 (Metodología); por tanto, aquí se presentan únicamente los **resultados observados** y su **análisis técnico**. Todos los ensayos se realizaron en modo teleoperado, sin modificaciones de firmware ni hardware entre pruebas.

Resultados obtenidos

En todas las configuraciones de prueba la plataforma **superó** los obstáculos evaluados y mantuvo desplazamiento estable en terreno natural, sin fallos estructurales ni electrónicos y con conectividad robusta dentro del rango práctico de 8–10 m. La Tabla 4 sintetiza el resultado cualitativo de cada ensayo conforme a los criterios definidos en Metodología.

Tabla 4: Resumen de pruebas realizadas y resultados cualitativos.

Prueba realizada	Resultado
Tubería PVC – Diámetro 4 cm	Superada
Tubería PVC – Diámetro 8.76 cm	Superada
Rampa inclinada 28.13° – Altura 14.7 cm	Superada
Rampa + tubo de 8.76 cm (prueba combinada)	Superada
Terreno natural: césped, piedras, lodo (pendiente suave)	Superada

Para aportar mayor trazabilidad respecto de los **criterios de éxito**, se presenta un consolidado por ensayo indicando el cumplimiento de las condiciones de estabilidad, tracción y conectividad (Tabla 5). En ningún caso se observaron: (i) pérdida de estabilidad con amenaza de vuelco, (ii) atascamiento persistente, (iii) fallos del tren de tracción/suspensión o (iv) interrupciones de comunicación dentro del rango operativo.


Tabla 5: Consolidado de criterios de éxito por ensayo (cualitativo).

Ensayo	Estabilidad	Sin atascos	Tracción	Conectividad
PVC Ø 4 cm	Cumple	Cumple	Adecuada	Dentro 8–10 m
PVC Ø 8.76 cm	Cumple	Cumple	Adecuada	Dentro 8–10 m
Rampa 14.7 cm (28.13°)	Cumple	Cumple	Adecuada	Dentro 8–10 m
Rampa + Ø 8.76 cm	Cumple	Cumple	Adecuada	Dentro 8–10 m
Terreno natural mixto	Cumple	Cumple	Adecuada	Dentro 8–10 m

Discusión técnica

Movilidad y estabilidad frente a obstáculos y pendientes

Los resultados confirman que la configuración *Rocker–Bogie* mantiene el **contacto continuo de ruedas** y una **distribución de cargas** favorable al superar obstáculos cilíndricos y planos inclinados con pendiente pronunciada. La superación de 28.13° en condiciones reales es *consistente* con la literatura que reporta buen desempeño de esta arquitectura en pendientes

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

elevadas bajo escenarios controlados (Cosenza et al., 2023; Sandbhor et al., 2024). En el prototipo, no se observaron oscilaciones laterales críticas ni pérdidas de apoyo durante el ascenso, lo que sugiere un **centro de gravedad** suficientemente bajo y una geometría de bogies adecuada (ver FASE 1).

Tracción en superficies blandas y mixtas

En césped y zonas con lodo, la plataforma mantuvo **tracción adecuada** sin patinajes sostenidos. Este comportamiento se alinea con el **diseño de llantas en TPU con entramado hexagonal**, que provee *amortiguación pasiva* y mayor área de contacto efectiva, y con el **bajo peso total** (5.461 kg) que reduce compactación y hundimiento locales. La ausencia de neumáticos inflables no penalizó el desempeño observado, coherente con lo documentado en la fase de diseño sobre *NPT* y patrones hexagonales (véase Metodología).

Correspondencia con el dimensionamiento previo

El avance en obstáculos y rampa ocurrió sin indicios de saturación de par en las ruedas. Esto es consistente con el **margen de par** estimado en Metodología: $T_{total,rueda} \approx 1.296$ Nm frente a $T_{motor} \approx 1.72$ Nm (considerando el reductor y el radio de rueda definidos). Aunque las pruebas fueron cualitativas, la *ausencia de detenciones por falta de par* y la continuidad del movimiento apoyan la validez práctica de dicho dimensionamiento.

Teleoperación y estabilidad del enlace

La **conectividad Bluetooth** se mantuvo *estable* dentro de 8–10 m en espacios sin obstáculos significativos, sin cortes durante la ejecución de maniobras. Este comportamiento coincide con reportes de campo sobre *Bluetooth clásico* como tecnología de *control de corto alcance* (Behera et al., 2018). Para entornos con interferencias o mayor cobertura, se sugiere evaluar antenas externas o protocolos alternativos (trabajo futuro).

Comparación con trabajos relacionados

Frente a propuestas basadas en microcontroladores de menor capacidad y sensado mínimo para tareas agrícolas (Panneerselvam et al., 2021), la integración **ESP32 + aplicación móvil + llanta TPU** representa un **salto en integración y escalabilidad**: permite telemetría y control más flexibles, y prepara el terreno para estabilización con IMU, fusión sensorial o navegación asistida. Los resultados cualitativos obtenidos son concordantes con las tendencias reportadas de *Rocker–Bogie* en pendientes y obstáculos (Cosenza et al., 2023; Sandbhor et al., 2024).


Fortalezas y limitaciones del desempeño observado

Fortalezas.

- Superación consistente de obstáculos cilíndricos (≥ 8 cm) y rampa de 28.13° sin pérdida de estabilidad.
- Tracción adecuada en superficies blandas/húmedas; continuidad de movimiento en condiciones mixtas.
- Ausencia de fallos estructurales o electrónicos durante las pruebas; operación sin ajustes entre ensayos.
- Conectividad estable en rango 8–10 m, suficiente para teleoperación en espacios controlados.

Limitaciones.

- Evaluación *cualitativa*: no se registraron métricas continuas (tiempos, velocidades, ángulos medidos).
- La IMU no se empleó para navegación/estabilización en estas pruebas; no se cuantificó deriva.


 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

- El terreno natural no incluyó zanjas profundas ni vegetación densa; extrapolación a estos casos debe hacerse con cautela.
- Alcance de Bluetooth dependiente del entorno; potencial degradación ante obstáculos metálicos o interferencia.

Implicaciones y trabajo futuro

Los resultados respaldan la **viabilidad operacional** del prototipo en movilidad básica sobre terrenos agrícolas irregulares. Como líneas de mejora:

1. **Instrumentación cuantitativa:** incorporar encoder/IMU en registro para derivar métricas de velocidad, ángulo y patinaje; validar autonomía en campo con perfiles de carga.
2. **Robustez de comunicaciones:** evaluar BLE de largo alcance, antenas externas o relés para superar 10 m y mitigar interferencias.
3. **Optimización de locomoción:** explorar variaciones de patrón/dureza de TPU y redistribución de masa para superficies más exigentes.
4. **Navegación asistida:** integrar yaw de IMU en giros y estabilización, con filtros complementarios o fusión sensorial.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27


5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

Conclusiones

1. Se demuestra que la plataforma robótica móvil de bajo costo, con sistema de suspensión tipo Rocker–Bogie, opera de manera estable en superficies irregulares propias del contexto agrícola. La solución integra teleoperación por Bluetooth y un algoritmo embebido modular que permite control confiable de tracción y giro. El desarrollo presenta como fortalezas el bajo costo de fabricación, la simplicidad de mantenimiento y la reproducibilidad. El proyecto aporta a los ODS 2, 9 y 15 al fomentar mecanización asequible, innovación y prácticas más sostenibles.
2. El diseño basado en el sistema de suspensión Rocker–Bogie mantiene el contacto rueda–suelo y distribuye cargas entre ejes, lo que se traduce en tracción continua y estabilidad en pendientes y obstáculos. Los materiales y procesos seleccionados equilibran rigidez específica, masa y costo, cumpliendo el criterio de plataforma económica y reparable.
3. El código en C++ sobre ESP32 interpreta en tiempo real los caracteres recibidos por Bluetooth ('8', '2', '6', '4', '7' y '9'), ejecuta funciones modulares (`forward()`, `backward()`, `turnLeft()`, `turnRight()`, `stop()`) y estructura un modo automático que encadena desplazamientos rectilíneos y giros controlados. La organización por funciones simplifica depuración y escalabilidad del firmware.
4. La aplicación móvil desarrollada en App Inventor, basada en eventos *TouchDown/TouchUp*, permite un control fino al enviar un carácter en la pulsación y otro en la liberación. El uso del cliente Bluetooth nativo habilita emparejamiento sencillo y retroalimentación visual del estado de enlace, logrando teleoperación estable en entornos de prueba.
5. Las pruebas dinámicas en entorno controlado y en terreno evidencian que la plataforma cumple con los requerimientos de movilidad planteados para un prototipo de exploración agrícola: se desplaza con regularidad, ejecuta giros sobre su eje y completa trayectorias predefinidas, sin fallos estructurales ni eléctricos. La evidencia obtenida sustenta la idoneidad del sistema para tareas de monitoreo y apoyo logístico de proximidad.


Recomendaciones

- **Instrumentación de pruebas.** Incorporar medición de variables (velocidad, corriente por canal, temperatura de drivers) y registro de datos para análisis cuantitativo de desempeño y consumo.
- **Gestión de potencia y control.** Implementar rampas de aceleración y perfiles PWM para reducir picos de corriente; evaluar puentes H basados en MOSFET de baja caída como alternativa al L298N.
- **Confiabilidad en campo.** Mejorar sellado y guiado de cables, así como protección de articulaciones y caja electrónica frente a polvo, lodo y humedad; añadir *E-Stop* físico y lógico.
- **Interfaz y usabilidad.** Mostrar en la app indicadores de estado (batería, enlace, fallos) y telemetría básica; considerar modos de sensibilidad del joystick/botones para distintos suelos.
- **Ensayos con carga útil.** Repetir la validación con herramientas o sensores embarcados para caracterizar el efecto de la masa adicional en tracción, estabilidad y autonomía.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27


Trabajo futuro

- **Autonomía de navegación.** Integrar odometría por encoders y fusión con IMU para seguimiento de trayectorias, cierre de giro a 90° por *yaw* con tolerancia, y planeación simple basada en *waypoints*.
- **Comunicaciones ampliadas.** Explorar Wi-Fi para telemetría rica en rangos cortos y LoRa para monitoreo a larga distancia en parcelas extensas, manteniendo Bluetooth para teleoperación local.
- **Arquitectura de potencia.** Migrar a drivers con medición de corriente por canal para diagnóstico y control de tracción; estudiar estrategias de control diferencial de velocidad.
- **Optimización mecánica.** Evaluar alternativas de materiales y geometrías para mejorar tracción y amortiguamiento sin penalizar masa.
- **Aplicaciones en agro.** Adaptar la plataforma a misiones de monitoreo ambiental, conteo de plantas y aplicación localizada de insumos, cuantificando impacto en uso de agua, eficiencia operativa y conservación del suelo.
- **Escalabilidad y transferencia.** Publicar lista de materiales, planos y guías de ensamblaje para facilitar replicación; analizar costos y estrategias de manufactura local, así como lineamientos de seguridad funcional en campo.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

REFERENCIAS

- Abdul Manap, N. M., & Ismail, N. W. (2019). FOOD SECURITY AND ECONOMIC GROWTH. *International Journal of Modern Trends in Social Sciences*, 3(3), 108-118. <https://doi.org/10.35631/IJMTSS.280011>
- Akwara, U. C. (2021). The Rigid Kinetic Energy (RKE) Concept for Deflective Suspended Mobile Robot in Energy Workspace. *World Journal of Advanced Engineering Technology and Sciences*, 2(1), 001-010. <https://doi.org/10.30574/wjaets.2021.2.1.0019>
- Amazon. (2024). Zeez batería LiPo RC de 14.8V 100C 8000mAh 4S RC con enchufe EC5, paquete de 2 baterías con 1 bolsa segura LiPo bolsa ignífuga a prueba de explosiones para carga de almacenamiento [Consultado el 28 de abril de 2025]. <https://www.amazon.com/-/es/Bater%C3%ADa-bater%C3%ADas-ign%C3%ADfuga-explosiones-almacenamiento/dp/BOCSSGB8FD>
- Andreasson, H., Grisetti, G., Stoyanov, T., & Pretto, A. (2023). Sensors for mobile robots. En *Encyclopedia of Robotics* (pp. 1-22). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-41610-1_159-1
- Andriya, N., Dutta, V., & Vani, V. V. (2022). Study on 3D printed auxetic structure-based non-pneumatic tyres (NPTs). *Materials and Manufacturing Processes*, 37(11), 1280-1297. <https://doi.org/10.1080/10426914.2022.2039692>
- Arias, C. (2025). Certificación tipo marca de conformidad (Esquema 5) otorgada a CILES SAS por el organismo de certificación QCERT [Certificado No. CAJAS-1744-002, 5 pp.]. C:/Users/USUARIO/.../Certificado-CAJAS-1744-002.pdf
- Aula, A., & Tanjungpura, U. (2024). Utilizing the all-terrain capable Mars rover as robotic platform for field application in tech-based smart agriculture [Consultado el 28 de abril de 2025]. *Jurnal Ilmiah XYZ*, 18(2), 47-51.
- Baidybekova, S. K., Sauranbay, S. B., & Yermekbayeva, D. D. (2022). Agricultural sector of the economy as the basis of the country's food security. *Bulletin of Turan University*, 4(4), 11-25. <https://doi.org/10.46914/1562-2959-2022-1-4-11-25>
- Bayar, G., Koku, A. B., & Konukseven, E. I. (2015). Dynamic modeling and parameter estimation for traction, rolling, and lateral wheel forces to enhance mobile robot trajectory tracking. *Robotica*, 33(10), 2204-2220. <https://doi.org/10.1017/S0263574714001386>
- Behera, S., Panigrahi, B., Rath, H. K., & Pal, A. (2018). Wireless characteristics study for indoor multi-robot communication system. *Proceedings of the 1st Workshop on Complex Networked Systems for Smart Infrastructure*, 1-6. <https://doi.org/10.1145/3265997.3265999>
- Bruzzone, L., Nodehi, S. E., & Fanghella, P. (2022). Tracked Locomotion Systems for Ground Mobile Robots: A Review. *Machines*, 10(8). <https://doi.org/10.3390/machines10080648>
- Califano, F., Cosenza, C., Niola, V., & Savino, S. (2022). Multibody Model for the Design of a Rover for Agricultural Applications: A Preliminary Study. *Machines*, 10(4). <https://doi.org/10.3390/machines10040235>
- Centro Provisional de Gestión Agroempresarial. (2019). *Inventario de instrumentos de política del Estado para el desarrollo empresarial rural*.
- Chen, D., Yang, X., Zhong, M., Chen, C., Wang, L., Wang, J., Weng, X., Li, Y., & Chang, Z. (2022). Inspired by tree frog: Bionic design of tread pattern and its wet friction properties. *Journal of Bionic Engineering*, 19(4), 1064-1076. <https://doi.org/10.1007/s42235-022-00184-2>
- Chokshi, R. (2012). MPU-6000 and MPU-6050 Register Map and Descriptions. Revision 4.0 [Consultado el 28 de abril de 2025]. <https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Accelerometers/RM-MPU-6000A.pdf>
- Coppola, B., Cappetti, N., Di Maio, L., Scarfato, P., & Incarnato, L. (2018). 3D printing of PLA/clay nanocomposites: Influence of printing temperature on printed samples properties. *Materials*, 11(10), 1947. <https://doi.org/10.3390/ma11101947>
- Cosenza, C., Niola, V., Pagano, S., & Savino, S. (2023). Theoretical Study on a Modified Rocker-Bogie Suspension for Robotic Rovers. *Robotica*, 41(10), 2915-2940. <https://doi.org/10.1017/S0263574723000656>
- Cullingworth, J. (2015). Agricultural Productivity and Food Security in the Developing World [file:///F:/Spec2/TrafficDelayModel.pdf]. *AgEcon Search*.
- dos Santos, F. J., Hernandez, B. A., Santos, R., Machado, M., Souza, M., Capello Sousa, E. A., & Andrade, A. (2023). Bioabsorbable polymeric stent for the treatment of coarctation of the aorta (CoA) in children: A methodology to evaluate the design and mechanical properties of PLA polymer. *Materials*, 16(12), 4403. <https://doi.org/10.3390/ma16124403>

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

- Droukas, L., Doulgeri, Z., Tsakiridis, N. L., Triantafyllou, D., Kleitsiotis, I., Mariolis, I., Giakoumis, D., Tzovaras, D., Kateris, D., & Bochtis, D. (2023). A Survey of Robotic Harvesting Systems and Enabling Technologies. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 107(2), 21. <https://doi.org/10.1007/s10846-022-01793-z>
- Dziopa, Z. J. (2024). Modelling the Dynamics of a Mobile Land Robot. *Problems of Mechatronics Armament Aviation Safety Engineering*, 15(2), 83-100. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0054.6156>
- Enayati, A. A. (2021). A Study on Application of Polyvinylchloride (PVC) Waste and Sawdust in Wood-Plastic Composite. *Research & Development in Material Science*, 15(2), 1662-1666. <https://doi.org/10.31031/RDMS.2021.15.000856>
- Fan, Z., Qiu, Q., & Meng, Z. (2017). Implementation of a four-wheel drive agricultural mobile robot for crop/soil information collection on the open field. *2017 32nd Youth Academic Annual Conference of Chinese Association of Automation (YAC)*, 408-412. <https://doi.org/10.1109/YAC.2017.7967443>
- González, A. A. (2014). Tecnología e innovación: una apuesta para desarrollar el agro colombiano [<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8739278>]. *Revista Colombiana de Investigaciones Agroindustriales*, 5(2).
- Hoo Fatt, M. S., Vedire, A. R., & Pakala, A. K. (2024). Effect of temperature on the mechanical behavior of PVC foams. *Journal of Cellular Plastics*, 60(5), 261-281. <https://doi.org/10.1177/0021955X241281878>
- Hotchkiss, J. H. (1992). Pesticide Residue Controls to Ensure Food Safety. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 31(3), 191-203. <https://doi.org/10.1080/10408399209527568>
- Jana, A. K. (2019). Modeling and analysis of a rocker-bogie system to improve its performance. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 7(10), 714-721. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2019.10110>
- Kexin. (s.f.). *MP1484: SMD type integrated circuit* [Consultado el 28 de abril de 2025]. Kexin Electronics.
- Kim, G., Chung, H., & Cho, B.-K. (2024). MOBINN: Stair-Climbing Mobile Robot With Novel Flexible Wheels. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 71(8), 9182-9191. <https://doi.org/10.1109/TIE.2023.3319739>
- Krimsky, E., & Collins, S. H. (2024). Elastic energy-recycling actuators for efficient robots. *Science Robotics*, 9(88), 1-10. <https://doi.org/10.1126/scirobotics.adj7246>
- Lee, C., Ju, J., & Kim, D.-M. (2012). Vibration Analysis of Non-Pneumatic Tires With Hexagonal Lattice Spokes. *Volume 6: 1st Biennial International Conference on Dynamics for Design; 14th International Conference on Advanced Vehicle Technologies*, 483-490. <https://doi.org/10.1115/DETC2012-70538>
- Levshun, D., Chechulin, A., & Kotenko, I. (2021). Design of secure microcontroller-based systems: Application to mobile robots for perimeter monitoring. *Sensors*, 21(24), 8451. <https://doi.org/10.3390/s21248451>
- Lytridis, C., Kaburlasos, V. G., Pachidis, T., Manios, M., Vrochidou, E., Kalampokas, T., & Chatzistamatis, S. (2021). An Overview of Cooperative Robotics in Agriculture. *Agronomy*, 11(9), 1818. <https://doi.org/10.3390/agronomy11091818>
- Mao, C., Ma, Y., Li, J., & Chen, C. (2019). Study on Wet-Skid Resistance of Tire Tread Compound with Bionic Coupling. En *Proceedings of the 5th International Conference on Computer and Communication Systems* (pp. 901-908). https://doi.org/10.1007/978-3-030-15740-1_117
- McEntee, P. J., Bennett, S. J., & Belford, R. K. (2020). Mapping the spatial and temporal stability of production in mixed farming systems: an index that integrates crop and pasture productivity to assist in the management of variability. *Precision Agriculture*, 21(1), 77-106. <https://doi.org/10.1007/s11119-019-09658-6>
- Miller, D. P., & Lee, T.-L. (2002). High-speed traversal of rough terrain using a rocker-bogie mobility system. *Space 2002 and Robotics 2002*, 428-434. [https://doi.org/10.1061/40625\(203\)54](https://doi.org/10.1061/40625(203)54)
- Organización de las Naciones Unidas (ONU). (2020). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2019). *Ventajas y problemas de la agricultura por contrato*.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2020). *Estado Mundial de la Agricultura y la Alimentación: Superar los desafíos relacionados con el agua en la agricultura* (Vol. 32).
- Panneerselvam, S., Bhoopesh, D., Akhileshwaran, K., Charan, B., & Aravindhan, N. (2021). Design and Fabrication of Rocker-Bogie Pesti-Bot Using Rotary Mechanism. *2021 7th International Conference on Advanced Computing and Communication Systems (ICACCS)*, 683-688. <https://doi.org/10.1109/ICACCS51430.2021.9441751>
- Podlubne, A., Mey, J., Schone, R., Abmann, U., & Gohringer, D. (2021). Model-based approach for automatic generation of hardware architectures for robotics. *IEEE Access*, 9, 140921-140937. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3119061>

- Rajan, K. P., Al-Ghamdi, A., Ramesh, P., & Nando, G. B. (2012). Blends of thermoplastic polyurethane (TPU) and polydimethyl siloxane rubber (PDMS), Part I: Assessment of compatibility from torque rheometry and mechanical properties. *Journal of Polymer Research*, 19(5), 9872. <https://doi.org/10.1007/s10965-012-9872-y>
- Rivellini, P. (2000). Mars Rover Mechanisms. *NASA Technical Reports*.
- Rubio, F., Valero, F., & Llopis-Albert, C. (2019). A review of mobile robots: Concepts, methods, theoretical framework, and applications. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 16(2), 1-22. <https://doi.org/10.1177/1729881419839596>
- Sandbhor, R., Kachale, S., Bhosale, A., Kshirsagar, K., & Sharma, P. (2024). Design and Development of an Autonomous Rover Application Using a Rocker-Bogie Mechanism in Agriculture. *International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology*, N/A, 562-572. <https://doi.org/10.48175/IJARST-18487>
- Sharma, S. (2023). Precision Agriculture: Reviewing the Advancements, Technologies, and Applications in Precision Agriculture for Improved Crop Productivity and Resource Management. *Reviews In Food And Agriculture*, 4(2), 45-49. <https://doi.org/10.26480/rfna.02.2023.45.49>
- STMicroelectronics. (2000). *L298: Dual full bridge driver* [Consultado el 28 de abril de 2025]. STMicroelectronics. <https://www.st.com/en/motor-drivers/l298.html>
- Systems, E. (2023). ESP32-WROOM-32E ESP32-WROOM-32UE datasheet [Consultado el 28 de abril de 2025]. https://espressif.com/documentation/esp32-wroom-32e_esp32-wroom-32ue_datasheet_en.pdf
- Tarolli, P., & Straffellini, E. (2020). Agriculture in Hilly and Mountainous Landscapes: Threats, Monitoring and Sustainable Management. *Geography and Sustainability*, 1(1), 70-76. <https://doi.org/10.1016/j.geosus.2020.03.003>
- Unidad de Planificación Rural Agropecuaria (UPRA). (2023). En las zonas rurales se generaron 119.000 nuevos empleos en febrero de 2023.
- Velásquez, J. C. (2018). Ingeniería Agrícola [<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5432227>]. *Dialnet*.
- Vibhute, A. S., Tate Deshmukh, K. R., Hindule, R. S., & Sonawane, S. M. (2021). Pest Management System Using Agriculture Robot. En *Techno-Societal 2020* (pp. 829-837, Vol. 2). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-69925-3_79
- Vidoni, R., Bietresato, M., Gasparetto, A., & Mazzetto, F. (2015). Evaluation and stability comparison of different vehicle configurations for robotic agricultural operations on side-slopes. *Biosystems Engineering*, 129, 197-211. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.10.003>
- Vidoni, R., Bietresato, M., Gasparetto, A., Mazzetto, F., Aula, A., Santos, L., Ferraz, N., Neves Dos Santos, F., Mendes, J., Morais, R., Costa, P., & Reis, R. (2018). Path planning aware of soil compaction for steep slope vineyards [Consultado el 28 de abril de 2025]. *2018 IEEE International Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions (ICARSC)*, 113-118. <https://doi.org/10.1109/ICARSC.2018.8374191>
- Yu, Z., Iocchi, L., Tan, J. T. C., Zhou, H., Yang, C., & Lu, H. (2024). Editorial: Vision, learning, and robotics: AI for plants in the 2020s. *Frontiers in Plant Science*, 15(December), 1-3. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1539626>
- Zhao, X., Yang, J., Zhong, Y., Zhang, C., & Gao, Y. (2024). Study on Chassis Leveling Control of a Three-Wheeled Agricultural Robot. *Agronomy*, 14(8), 1765. <https://doi.org/10.3390/agronomy14081765>



INFORME FINAL DE
TRABAJO DE GRADO

Código	FDE 089
Versión	03
Fecha	2015-01-27

FIRMA ESTUDIANTES

FIRMA ASESOR

FECHA ENTREGA 6/10/2025

FIRMA COMITÉ TRABAJO DE GRADO DE LA FACULTAD _____


RECHAZADO ___

ACEPTADO ___

ACEPTADO CON MODIFICACIONES ___

ACTA NO. _____

FECHA ENTREGA: _____

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

FIRMA CONSEJO DE FACULTAD _____

ACTA NO. _____

FECHA ENTREGA: _____