

Design of a modular autonomous vehicle for cost optimization in grape harvesting in agro-industrial environments

Misael Parillo-Parillo, ¹; Brayton A. Carpio-Mamani¹; Ricardo E. Pariona-Montoya¹; Brayan C. Mamani-Taparaco¹  and Alfz Huicho-Mendigure¹.

¹Universidad Tecnológica del Perú, Perú, U19212867@utp.edu.pe, U22319519@utp.edu.pe, U23256055@utp.edu.pe, U22302842@utp.edu.pe, C29911@utp.edu.pe

Abstract. *Manual transportation of agricultural products during harvest represents a critical activity that demands extensive operational time and physical effort from workers, negatively impacting productivity and increasing production costs. This challenge is particularly significant in high-value crops such as grapes, where efficient handling and transport of the harvest are essential to preserve product quality and maintain competitiveness in the agro-industrial sector. In this context, the present study proposes the development of an autonomous vehicle aimed at optimizing grape harvesting, contributing to operational efficiency, productivity improvement, and sustainability. An engineering design methodology was applied, encompassing the development, implementation, and validation of a modular and scalable prototype. The system was designed to operate safely and reliably on irregular agricultural terrains, with a load capacity of 30 kg. Its architecture integrates traction, sensing, power, communication, and mechanical subsystems, enabling future technological expansions. The primary benefits of the system include reduced transport times to sorting and packaging stages, decreased physical labor, and enhanced workplace safety. Additionally, the use of low-consumption electric energy and recyclable materials contributes to minimizing environmental impact. Finally, the low-cost design positions the prototype as a viable solution for small and medium-sized producers, promoting the adoption of automated agricultural technologies in La Joya, Arequipa.*

Keywords: *Autonomous vehicle, Agricultural automation, Harvest optimization, Agro-industrial sustainability.*

Diseño de un vehículo autónomo modular para la optimización de costos en la cosecha de uva en entornos agroindustriales

Misael Parillo-Parillo,¹ ; Brayton A. Carpio-Mamani¹ ; Ricardo E. Pariona-Montoya¹ ; Brayan C. Mamani-Taparaco¹  and Alfz Huicho-Mendigure¹ .

¹Universidad Tecnológica del Perú, Perú, U19212867@utp.edu.pe, U22319519@utp.edu.pe, U23256055@utp.edu.pe, U22302842@utp.edu.pe, C29911@utp.edu.pe

Resumen— El transporte manual de productos agrícolas durante la cosecha representa una actividad crítica que demanda elevados tiempos operativos y esfuerzo físico del trabajador, lo que impacta negativamente en la productividad, incrementa los costos de producción. Esta problemática adquiere mayor relevancia en cultivos de alto valor económico, como la uva, donde la eficiencia en la manipulación y el traslado de la cosecha resulta determinante para preservar la calidad del producto y la competitividad del sector agroindustrial. En este contexto, el presente trabajo propone el desarrollo de un vehículo autónomo orientado a optimizar la cosecha de uvas, contribuyendo la mejora, eficiencia operativa y la sostenibilidad. Se empleó una metodología de diseño de ingeniería basada en el desarrollo, implementación y validación de un prototipo modular y escalable. El sistema fue diseñado para operar de forma segura y confiable en terrenos agrícolas irregulares, con una capacidad de carga de 30 kg. La arquitectura integra subsistemas de tracción, sensado, energía, comunicación y estructura mecánica, permitiendo futuras ampliaciones tecnológicas. Los principales beneficios del sistema destacan la reducción de los tiempos de traslado a las etapas de clasificación y empaquetado, reduciendo el esfuerzo físico e incrementando la seguridad laboral. Asimismo, el uso de energía eléctrica de bajo consumo y materiales reciclables contribuye a la reducción del impacto ambiental. Finalmente, el enfoque de bajo costo del prototipo lo posiciona como una solución viable para pequeños y medianos productores, promoviendo la adopción de tecnologías de automatización agrícola en la Joya Arequipa.

Palabras clave. Vehículo autónomo, Automatización agrícola, Optimización de cosecha, Sostenibilidad agroindustrial.

I. INTRODUCCIÓN

La investigación en robótica agrícola ha experimentado un crecimiento significativo en los últimos años, impulsada por la necesidad de automatizar tareas repetitivas, mejorar la productividad y reducir la dependencia de mano de obra intensiva. En particular, los vehículos terrestres autónomos (UGV) han sido objeto de numerosos estudios enfocados en navegación autónoma, para aplicaciones en agricultura de precisión [1], [2].

En particular, los sistemas de percepción para entornos agrícolas han evolucionado hacia soluciones basadas en visión artificial y localización en fila. Brown et al. proponen un sistema de detección de árboles y localización en hilera para manejo autónomo en huertos de precisión, mejorando la navegación en cultivos estructurados [3]. Asimismo, se han

desarrollado técnicas de navegación y control en robots agrícolas basadas en control robusto y seguimiento de trayectoria [4], así como revisiones sobre evasión de obstáculos en maquinaria autónoma [5].

La planificación de rutas es importante para optimizar los recursos, como en el caso de sistemas colaborativos de siembra y logística interna optimización multi-robot [6], así como métodos geométricos avanzados de planificación y seguimiento de rutas complejas [7]. Además, la fusión de sensores visual-inerciales ha permitido mejorar la navegación en entornos sin GPS [8].

En el campo de percepción agrícola, se han desarrollado sistemas de detección y seguimiento de objetos en agricultura de precisión [9], junto con algoritmos de control adaptativo para navegación en entornos dinámicos [10]. También se han aplicado técnicas de robótica en poda y manejo de cultivos en frutales [11].

El uso de aprendizaje profundo ha permitido mejorar la detección de objetos en entornos agrícolas complejos [12], mientras que la fusión multisensor ha demostrado ser clave para la navegación autónoma en tareas de recolección [13].

Asimismo, se han desarrollado sistemas móviles para inspección y monitoreo agrícola [14], y comparaciones entre arquitecturas de navegación en agricultura de precisión [15].

II. IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

A pesar de los avances recientes en mecanización y automatización agrícola, el transporte interno de productos durante la cosecha continúa realizándose predominantemente de forma manual en numerosos sistemas productivos, especialmente en países en desarrollo. Esta situación genera elevados tiempos de traslado, un uso intensivo de mano de obra y altos niveles de fatiga física, lo que impacta negativamente en la productividad, la seguridad laboral y los costos de producción [16], [17].

En cultivos de alto valor comercial como la uva, la eficiencia del transporte desde el punto de cosecha hasta las zonas de acopio y clasificación es un factor crítico para preservar la calidad del producto, debe cumplir con los estándares de exportación. Estudios recientes indican que retrasos en estas etapas incrementan pérdidas poscosecha y reducen la competitividad de las empresas agroindustriales [18], [19]. Asimismo, la carga manual repetitiva de cajas

agrícolas ha sido identificada como una de las principales causas de lesiones musculoesqueléticas en trabajadores rurales [20].

Si bien existen plataformas comerciales de vehículos terrestres autónomos (UGV) aplicadas a la agricultura, estas soluciones suelen presentar altos costos de adquisición, arquitecturas cerradas y requerimientos técnicos complejos, lo que limita su adopción por pequeños y medianos productores [21]. En el contexto peruano, esta brecha tecnológica se acentúa debido a la falta de soluciones diseñadas específicamente para terrenos irregulares, surcos estrechos y presupuestos restringidos [22].

En consecuencia, se identifica la necesidad de desarrollar un vehículo asistente autónomo, modular y de bajo costo, capaz de optimizar el transporte interno de la cosecha de uva, reducir el esfuerzo humano y mejorar la eficiencia operativa, manteniendo criterios de sostenibilidad y escalabilidad tecnológica.

III. METODOLOGÍA

La investigación se desarrolló bajo un enfoque de investigación aplicada basado en diseño de ingeniería, que comprende especificaciones, diseño, implementación y validación de un prototipo funcional de vehículo agrícola autónomo. Esta metodología es consistente con trabajos recientes en robótica agrícola y vehículos autónomos de campo [23], [24].

A. Definición de requerimientos

Se analizaron las condiciones reales de operación en viñedos, definiéndose los requerimientos funcionales, técnicos y mecánicos del sistema, incluyendo capacidad de carga de hasta 30 kg, maniobrabilidad en hileras estrechas, operación segura en terrenos irregulares y autonomía energética suficiente para jornadas agrícolas típicas [25].

B. Diseño del sistema

Con base en los requerimientos definidos, se diseñó una arquitectura modular y distribuida, compuesta por subsistemas mecánico, de tracción, control, sensado, potencia y comunicación. Este enfoque modular permite futuras ampliaciones sin rediseñar la arquitectura principal, alineándose con tendencias actuales en plataformas robóticas reconfigurables [26], [27].

C. Requerimientos funcionales

El vehículo debe desplazarse de forma estable entre hileras estrechas, maniobrando en espacios reducidos mediante tracción diferencial y soportando pendientes suaves ($<15^\circ$). Su sistema de carga permite transportar hasta 30 kg distribuidos uniformemente para mantener un bajo centro de gravedad. La percepción y navegación se logra mediante cámara Pixy y sensores integrados, con seguimiento de rutas predefinidas y registro de trayectorias para supervisión remota. El control responde a comandos del usuario a través

del controlador, con tracción diferencial gestionada por el driver puente H BTS7960 y motor MY1016Z, manteniendo velocidad estable mediante PID adaptativo. El sistema incorpora medidas de seguridad para detener el vehículo ante fallas críticas o sobrecargas.

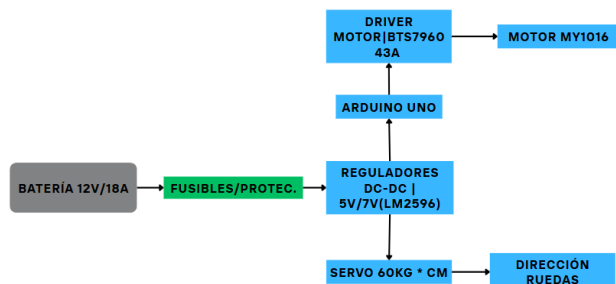


Fig. 1 Diagrama de bloques general del equipo autónomo.

En la fig. 1. Se observa las consideraciones mínimas a considerar para que el equipo autónomo funcione cumpliendo las especificaciones.

D. Requerimientos técnicos y eléctricos

El motor MY1016Z se alimenta a 12 V y 18 Ah, con driver BTS7960 y fusible principal de 40–45 A. Servos y Arduino reciben voltajes regulados mediante LM2596 y fusibles individuales para protección. La electrónica se organiza en una caja metálica separando circuitos de alta y baja corriente, utilizando conectores adecuados. Se asegura estabilidad de voltaje durante picos de corriente y la integración de sensores como cámara Pixy, con posibilidad futura de LiDAR o GPS [28].

E. Requerimientos mecánicos

El chasis se construye en aluminio 3030 con tapas de ABS, soportando hasta 30 kg de carga adicional sin deformación significativa. Las ruedas de 2.5–4 pulgadas soportan 120 kg por rueda y giran mediante servo de 60 kg·cm, optimizando maniobrabilidad en hileras de 1.5–2 m. La transmisión por cadena de doble fila asegura tracción confiable, y las dimensiones compactas del vehículo (70 × 40 cm) permiten desplazamiento ágil en viñedos.

F. Restricciones

El diseño considera limitaciones de espacio, permitiendo pasar bajo follaje y estructuras del viñedo, así como desplazarse entre hileras sin colisión. La energía disponible debe cubrir 2–3 horas de operación continua, optimizando el consumo de motor y servos. Los materiales son resistentes a corrosión, vibración, polvo y humedad, priorizando ligereza y durabilidad, mientras que la selección de componentes estándar y de bajo costo facilita mantenimiento y reparación.

G. Implementación e integración

Se construye el prototipo físico e integraron los subsistemas mecánicos y electrónicos. Se desarrolló el

firmware para el control de tracción y dirección mediante señales PWM, así como para la lectura de sensores y comunicación inalámbrica [29].

El sistema se diseñó según el diagrama de bloques de la figura 1.

H. Descripción de los Módulos del Sistema

El vehículo agrícola asistente modular se estructura a partir de una arquitectura distribuida, donde cada módulo cumple una función específica, pero opera de manera coordinada con el resto del sistema, garantizando estabilidad, eficiencia energética y robustez en entornos agrícolas.

El sistema de potencia es responsable de suministrar energía estable y proteger los componentes electrónicos. Está basado en una batería Gel o de Litio de 12 V y 18 Ah, capaz de soportar picos de corriente generados durante la operación del sistema de tracción. La regulación de voltaje se realiza mediante convertidores DC-DC LM2596, proporcionando niveles de 5 V y 7 V para el microcontrolador y el servo de dirección, respectivamente. Adicionalmente, se incorpora una llave de desconexión general y un indicador de nivel de carga, facilitando la operación segura y el monitoreo energético del sistema.

El sistema de control constituye el núcleo lógico del vehículo. Utiliza un microcontrolador Arduino Uno o Mega, encargado de procesar la información proveniente de los sensores, generar señales PWM para el control de motores y servo, y coordinar las funciones básicas de navegación. La cámara Pixy se integra directamente al microcontrolador, permitiendo la detección de obstáculos y el seguimiento de referencias visuales, como se observa en las pruebas funcionales y de reconocimiento mostradas en las Figuras correspondientes.

El sistema de tracción permite el desplazamiento controlado del vehículo sobre superficies irregulares propias del entorno agrícola. Está conformado por un motor DC MY1016Z con caja reductora, controlado mediante un driver BTS7960 de 43 A, lo que asegura un alto torque a bajas velocidades. La potencia se transmite a las ruedas mediante un sistema de piñón y cadena doble fila, acoplado a ruedas neumáticas de 2.5–4 pulgadas, cada una con capacidad de carga de hasta 120 kg, proporcionando estabilidad y adherencia al terreno.

El sistema de sensado se encarga de monitorear tanto el entorno como el estado interno del vehículo. Incluye la cámara Pixy para detección de obstáculos y seguimiento de color, sensores de corriente y voltaje para supervisión del consumo energético, y sensores de temperatura para proteger los controladores de potencia. De manera opcional, el sistema admite la integración de una IMU para estimar orientación y estabilidad, ampliando las capacidades de navegación.

El sistema de comunicación permite la interacción entre los distintos módulos y con el usuario. La comunicación interna se realiza mediante interfaces seriales, mientras que el control local se efectúa a través de Bluetooth. Para supervisión

remota y telemetría, el sistema es compatible con comunicación Wi-Fi, facilitando futuras ampliaciones funcionales.

Finalmente, el sistema mecánico proporciona soporte estructural, movilidad y protección a todos los componentes. El chasis está construido con perfiles de aluminio 3030 T-slot y ángulos ranurados, lo que aporta ligereza, rigidez y modularidad. Los componentes electrónicos se alojan en una caja metálica de 20×20 cm, protegida contra polvo y vibraciones. El diseño incorpora montantes y soportes de motor, ejes con soportes SK16 y una plataforma de carga capaz de transportar hasta 30 kg de producto, permitiendo velocidades bajas con alto torque y un desplazamiento estable sobre superficies de tierra.

En conjunto, la integración de estos módulos permite generar un movimiento controlado, seguro y eficiente, adecuado para operaciones de transporte agrícola en viñedos, cumpliendo con los requerimientos funcionales y mecánicos establecidos para el sistema.

IV DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN

A. Diseño electrónico

El diseño electrónico del vehículo autónomo se desarrolló con un enfoque en robustez, eficiencia energética y modularidad, garantizando la integración confiable de los subsistemas de tracción, dirección, sensado y comunicación bajo condiciones propias del entorno agrícola. La arquitectura electrónica fue concebida para operar de manera estable ante vibraciones, polvo y variaciones de carga, permitiendo una operación continua y segura.

TABLA I
CRITERIOS DE SELECCIÓN DE EQUIPAMIENTO ELÉCTRICO PARA LAS SUB
ETAPAS DEL PROTOTIPO

Componente	Función	Modelo / Tipo	Ventajas principales	Limitaciones
Microcontrolador	Control de motores y sensores	Arduino Uno / Mega	Fácil programación, modularidad	Capacidad limitada de procesamiento
Driver de motor	Control de motor DC	BTS7960 43 A	Soporta alta corriente, PWM preciso	Requiere disipador térmico
Motor DC	Tracción del vehículo	MY1016Z	Alto torque, compatible con transmisión por cadena	Peso considerable
Servo	Dirección de ruedas	60 kg·cm	Preciso, alta fuerza para dirección	Consumo elevado momentáneamente
Cámara	Visión y detección de obstáculos	Pixy	Implementación con IA, reconocimiento de color	Limitada a detección visual simple
Regulador DC-DC	Alimentación estable	LM2596 3 A	Ajustable, compacto	Limitado a 3 A
Sensores de monitoreo	Corriente, voltaje, temperatura	Varios	Protección del sistema, retroalimentación	Necesitan calibración
Comunicación	Telemetría y control remoto	Wi-Fi / Bluetooth	Control inalámbrico, flexible	Alcance limitado según entorno

La arquitectura del sistema electrónico se organiza en módulos. La fuente de alimentación está basada en una batería de 12 V y 18 Ah, complementada con reguladores DC-DC LM2596 que suministran 7 V al servo de dirección y 5 V al microcontrolador y sensores. El sistema incorpora fusibles, protección contra inversión de polaridad y una llave de desconexión general, asegurando protección eléctrica y facilidad de operación.

El sistema de control, implementado mediante un microcontrolador Arduino, centraliza la lectura de sensores de voltaje, corriente, temperatura y visión artificial, además de generar señales PWM para el control del motor de tracción y del sistema de dirección. Se implementan algoritmos básicos de navegación asistida, como seguimiento de color o línea, adecuados para desplazamientos estructurados en viñedos.

El sistema de tracción emplea un motor DC MY1016Z con transmisión por piñón y cadena, controlado mediante un driver BTS7960 de 43 A. Esta configuración permite regular la velocidad y el sentido de giro, proporcionando el torque necesario para transportar hasta 30 kg de carga, e incorpora protección ante sobrecorrientes y temperatura alta. El sistema de dirección del prototipo utiliza un servo de 60 kg·cm montado en el eje delantero, en las pruebas requiere un espacio considerable para ejecutar el giro, lo recomendable sería, el uso de un sistema de tracción diferencial.

El sistema de sensado integra sensores eléctricos para monitoreo energético y térmico, junto con una cámara Pixy para detección de obstáculos y seguimiento de referencias visuales. El sistema de comunicación permite control local mediante Bluetooth y contempla la expansión futura a Wi-Fi para telemetría y supervisión remota.

El flujo de energía se distribuye desde la batería hacia los subsistemas a través de reguladores y protecciones, mientras que las señales de control y monitoreo son gestionadas por el microcontrolador, garantizando una operación coordinada y estable. Todos los componentes electrónicos se alojan en una caja metálica de 20 × 20 cm, que proporciona protección mecánica, separación térmica y organización modular para mantenimiento y futuras ampliaciones.

B. Diseño mecánico

El diseño mecánico del vehículo se orientó a maximizar la resistencia estructural, la modularidad y la capacidad de carga, manteniendo dimensiones compactas para su operación en viñedos. La estructura principal está construida con perfiles de aluminio 3030 T-slot, reforzados con ángulos ranurados, lo que proporciona una elevada relación resistencia-peso y facilidad de modificación. Los extremos del chasis incorporan tapas de ABS para protección y acabado, mientras que la electrónica se resguarda en una caja metálica integrada.

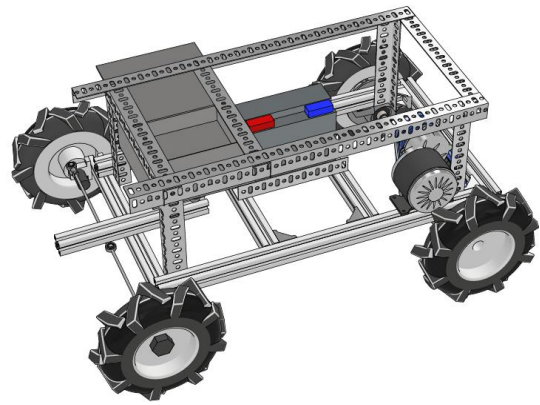


Fig. 2 Plano del vehículo autónomo propuesto.

El sistema de movilidad está compuesto por cuatro ruedas neumáticas de 2.5–4 pulgadas, con capacidad de hasta 120 kg cada una, montadas sobre soportes SK16 de alta resistencia. La transmisión mecánica, basada en piñón y cadena doble fila acoplada a un eje de 57 cm, asegura una transferencia de potencia eficiente y confiable sobre terrenos irregulares. El sistema de dirección, accionado por un servo de alto torque, proporciona un radio de giro adecuado para maniobras precisas entre hileras de cultivo.

La plataforma de carga presenta una superficie plana y robusta, diseñada para soportar hasta 30 kg de producto agrícola. Su configuración modular permite la integración futura de accesorios, como brazos robóticos o sensores adicionales, sin comprometer la estructura principal.

C. Desarrollo del software de control

El software del vehículo fue desarrollado bajo un enfoque escalable, facilitando la integración de sensores y actuadores y permitiendo una evolución progresiva del sistema. El control de tracción y dirección se realiza mediante señales PWM generadas por el microcontrolador, lo que garantiza transiciones suaves y un control preciso del torque y la orientación del vehículo.

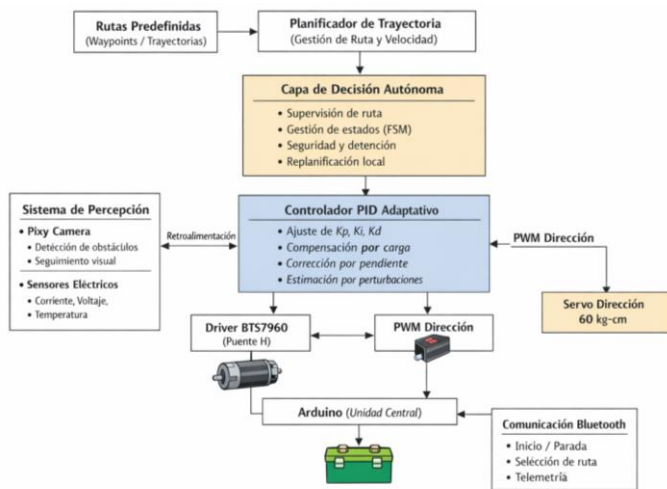


Fig. 3 Diagrama de flujo del firmware propuesto.



Fig. 4 Vista de equipo integrado tanto el hardware y software, junto a los sub etapas.

En la figura 3, No se incluye el desarrollo de la lógica, ya que se pretende generar patente, que limita la divulgación previa.

El sistema de sensado se ejecuta de forma continua, permitiendo el monitoreo del estado energético y la navegación asistida mediante visión artificial. La comunicación se establece principalmente a través de Bluetooth para control local, con la arquitectura preparada para futuras implementaciones de telemetría inalámbrica. La estructura modular del software permite la incorporación de nuevas funcionalidades, como GPS, IMU o técnicas avanzadas de localización y mapeo, sin requerir modificaciones sustanciales en la arquitectura base.

D. Integración del sistema

La integración del vehículo agrícola asistente modular se realizó siguiendo el ensamble modular, garantizando la compatibilidad y correcta interacción entre subsistemas. En primer lugar, se llevó a cabo la integración mecánica y motriz, acoplando el motor DC al sistema de transmisión mediante piñón, cadena y eje, y montando el servo de dirección en el eje delantero mediante soportes estructurales, asegurando alineación, rigidez y respuesta precisa.

Posteriormente, se efectuó la integración electrónica, conectando el driver BTS7960 al motor de tracción y alimentándolo mediante reguladores DC-DC, mientras que el microcontrolador Arduino fue interconectado con el servo, los sensores de monitoreo y el módulo de comunicación Bluetooth. La integración del sistema de sensado incluyó la conexión y calibración inicial de la cámara Pixy y los sensores eléctricos, asegurando lecturas confiables. Finalmente, se realizaron pruebas de compatibilidad para verificar la correcta generación de señales PWM, la estabilidad de la adquisición de datos y el monitoreo térmico y energético, ajustando los niveles de voltaje para una operación estable bajo distintas condiciones de carga.

E. Verificación funcional

La verificación funcional permitió validar el cumplimiento de los requerimientos del sistema, evaluando el desempeño integrado de los subsistemas de tracción, dirección, sensado y comunicación. Los resultados se muestran en la tabla 1., demostrando la robustez del diseño y su preparación para pruebas de campo en entornos agrícolas reales.

TABLA II
RESULTADO DE PRUEBAS FUNCIONALES DE DIFERENTES ETAPAS

Prueba	Objetivo	Resultado esperado
Motor y tracción	Confirmar desplazamiento con carga de hasta 30 kg	Velocidad y torque adecuados, sin sobrecalentamiento
Servo de dirección	Giro de ruedas con respuesta precisa	Dirección estable, maniobrabilidad completa
Sensores de monitoreo	Lectura de corriente, voltaje y temperatura	Valores dentro de rangos nominales
Cámara Pixy	Detección de color y obstáculos	Seguimiento confiable de referencias
Comunicación Bluetooth	Control remoto	Recepción de comandos sin interferencias
Integración general	Coordinación de todos los módulos	Funcionamiento seguro y estable del vehículo

V. PRUEBAS Y RESULTADOS

La validación del vehículo agrícola asistente modular se llevó a cabo mediante una metodología experimental estructurada, que incluyó pruebas funcionales, operativas y de rendimiento. Estas evaluaciones tuvieron como objetivo verificar la robustez del sistema, su precisión de control, la

capacidad de carga y la estabilidad operativa bajo condiciones representativas del entorno agrícola.

A. Plan de pruebas

El plan de pruebas se organizó en cuatro etapas progresivas. En primer lugar, se realizaron pruebas preliminares de laboratorio, orientadas a la verificación de niveles de tensión, corriente y correcto funcionamiento eléctrico, así como pruebas aisladas de motor, servo y sensores, incluyendo la validación de las comunicaciones Bluetooth y la lectura de la cámara Pixy. Posteriormente, se ejecutaron pruebas de integración de subsistemas, evaluando la interacción conjunta entre el microcontrolador, los sistemas de tracción, dirección y sensado, además de la consistencia de las señales PWM bajo diferentes cargas.

Las pruebas de campo controlado se desarrollaron sobre superficies de tierra, grava y pasto, permitiendo evaluar la maniobrabilidad del vehículo con y sin carga, así como el seguimiento de objetivos mediante detección visual. Finalmente, se realizaron pruebas de operación real, simulando tareas agrícolas típicas, como el transporte de productos, la navegación entre hileras y la detención segura, junto con la evaluación de la autonomía bajo distintos perfiles de uso.

B. Resultados de pruebas de hardware

Las pruebas de hardware evidenciaron una elevada robustez mecánica y confiabilidad energética. El sistema de tracción fue evaluado con cargas de 0, 15 y 30 kg sobre distintos tipos de terreno, mostrando que el motor MY1016Z mantuvo torque suficiente incluso en pendientes leves ($<5\%$), mientras que el driver BTS7960 operó dentro de rangos térmicos seguros ($45\text{--}65\text{ }^{\circ}\text{C}$). La transmisión por cadena presentó un comportamiento estable, sin desalineaciones ni pérdidas de eficiencia.



Fig. 5 Vista final del prototipo terminado.

El sistema de dirección mostró una respuesta angular estable durante maniobras repetitivas de 20 minutos, sin sobrecalentamiento significativo (máx. $48\text{ }^{\circ}\text{C}$) y con una precisión de retorno al punto cero de $\pm 2^{\circ}$. Las pruebas estructurales, que incluyeron vibración y carga estática de hasta 32 kg (10 % por encima del valor nominal), no evidenciaron deformaciones permanentes, confirmando la

rigidez del chasis de aluminio 3030. En términos energéticos, el consumo promedio del sistema se situó entre 2.1 y 3.4 A, permitiendo una autonomía estimada de 4 a 6 horas con batería de 18 Ah.

C. Resultados de software y control

Las pruebas de software demostraron una alta estabilidad del firmware, sin reinicios ni fallos de comunicación durante ejecuciones continuas de dos horas. El control de tracción presentó una relación lineal del 92 % entre la señal PWM y la velocidad real del motor, con transiciones suaves y sin vibraciones en el arranque. El control de dirección, mediante algoritmos de suavizado, permitió eliminar movimientos bruscos y reducir el desgaste mecánico.

El procesamiento de sensores evidenció un desempeño confiable, con la cámara Pixy alcanzando una efectividad del 95 % en la detección de referencias de color en entornos controlados, mientras que las lecturas de corriente, voltaje y temperatura se mantuvieron estables. El sistema de comunicación Bluetooth operó de forma consistente en rangos de 8 a 12 m, con una latencia promedio de 58 ms.

D. Análisis de resultados

El análisis comparativo con los requerimientos iniciales confirma que el prototipo no solo cumple, sino que supera varias de las especificaciones planteadas en la etapa de diseño, validando su capacidad operativa, robustez estructural, eficiencia energética y fiabilidad del sistema de control para aplicaciones agrícolas reales.

TABLA III
RESULTADOS DE PRUEBAS DEL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA
IMPLEMENTADO

Parámetro	Requisitos	Resultados	Cumplimiento
Carga máxima	30 kg	32 kg	Superior
Autonomía	$\geq 3\text{h}$	4-6 horas	Superior
Estabilidad direccional	$\pm 5^{\circ}$	$\pm 2^{\circ}$	Superior
Navegación asistida	Detección simple	95% de precisión	Superior
Control remoto	5-10 m	12 m	Superior

VI. DISCUSIÓN

El desarrollo del vehículo agrícola asistente modular evidencia un diseño robusto, eficiente y adaptable a tareas de agricultura de precisión. Las pruebas de laboratorio y de campo confirmaron que los subsistemas electrónicos, mecánicos y de control cumplen con los requerimientos funcionales establecidos, garantizando estabilidad, precisión y capacidad de carga de hasta 30 kg incluso en terrenos

irregulares. La integración jerárquica y modular de la electrónica permitió un control eficiente de tracción y dirección, con respuesta confiable ante variaciones de carga, mientras que los algoritmos de navegación basados en sensores Pixy demostraron una efectividad del 95 % en seguimiento de color, evidenciando un desempeño sólido del software de control.

El análisis de consumo energético y autonomía revela que el prototipo opera con eficiencia, consumiendo entre 2.1–3.4 A y manteniendo una autonomía de 4–6 horas por carga completa. Esto, junto con un costo operativo mensual inferior a S/ 3.5, confirma la viabilidad de su implementación en entornos agrícolas, con un impacto ambiental mínimo. La utilización de componentes eléctricos y materiales reciclables, la ausencia de combustibles fósiles y el bajo peso del vehículo (<20 kg sin carga) contribuyen a prácticas agrícolas sostenibles, reduciendo emisiones y evitando la compactación del suelo.

El desempeño mecánico, sustentado en un chasis de aluminio 3030 T-slot y transmisión por cadena doble fila, evidenció resistencia estructural incluso con cargas superiores al rango nominal y sin deformaciones permanentes. La modularidad mecánica y electrónica facilita el mantenimiento, la actualización de sensores y la expansión funcional, ofreciendo ventajas significativas frente a robots importados de alto costo y menor adaptabilidad. El firmware mostró estabilidad durante periodos de operación prolongados, con linealidad del 92 % en control PWM y transiciones suaves en dirección y tracción, reforzando la confiabilidad del sistema.

El análisis económico indica que la inversión inicial para construir un prototipo funcional fue de S/ 2,261, con un margen de costos operativos y de mantenimiento extremadamente bajo (S/ 60–100 anuales). Comparado con robots importados (S/ 15,000–45,000), el vehículo es altamente competitivo, especialmente para micro y pequeños agricultores, cooperativas y centros educativos en Perú. La posibilidad de fabricación con proveedores locales y el margen de ganancia estimado de 30–40 % confirman la viabilidad comercial, consolidando la opción de producción a pequeña escala como una solución tecnológica asequible y sostenible.

En términos científicos y tecnológicos, el proyecto constituye un aporte relevante al desarrollo de soluciones de agricultura de precisión en contextos locales, demostrando que la integración de sistemas modulares y económicos permite automatizar tareas agrícolas con eficiencia y sostenibilidad. La arquitectura modular y escalable abre oportunidades para investigaciones futuras en navegación autónoma avanzada, integración de energía solar, visión artificial mejorada y manipulación robótica de productos agrícolas, consolidando una plataforma adaptable a distintos cultivos y condiciones de terreno.

En síntesis, los resultados obtenidos confirman que el vehículo agrícola asistente modular no solo cumple los objetivos iniciales del proyecto, sino que excede varias especificaciones en desempeño, eficiencia energética y

viabilidad económica. Su diseño integrado, modular y sustentable representa un modelo replicable de innovación tecnológica para la agricultura moderna, alineado con la demanda de soluciones automatizadas, accesibles y ambientalmente responsables.

CONCLUSIONES.

El presente trabajo demostró que es técnicamente viable el desarrollo de un vehículo agrícola autónomo modular y de bajo costo para el transporte interno de cosecha en viñedos, capaz de operar de manera estable y confiable en terrenos irregulares. La integración de una arquitectura modular permite coordinar de forma eficiente los subsistemas de tracción, dirección, sensado, energía y comunicación, garantizando un desempeño robusto bajo condiciones reales de operación.

Desde el punto de vista mecánico, el chasis construido en perfiles de aluminio 3030 T-slot, junto con un sistema de transmisión por cadena de doble fila, evidenció una elevada resistencia estructural, soportando cargas superiores al valor nominal (hasta 32 kg) sin deformaciones. Este comportamiento confirma la idoneidad del diseño para aplicaciones agrícolas donde se presentan vibraciones, irregularidades del terreno y variaciones de carga.

En términos de control y desempeño dinámico, el sistema de tracción basado en un motor DC MY1016Z y un driver BTS7960 mostró una respuesta estable y predecible, con una linealidad del 92 % entre la señal PWM y la velocidad real del vehículo. El sistema de dirección, accionado mediante un servo de alto torque, permitió maniobras precisas en hileras estrechas, adecuado para cultivos de alta densidad como los viñedos.

Desde el punto de vista energético, el vehículo presentó un consumo promedio entre 2.1 y 3.4 A, alcanzando una autonomía operativa de 4 a 6 horas con una batería de 12 V/18Ah. Estos resultados evidencian una alta eficiencia energética y permiten una operación continua durante jornadas agrícolas típicas, con un costo operativo mensual inferior a S/ 3.5, lo que representa una ventaja significativa frente a soluciones comerciales de mayor complejidad y consumo.

Desde una perspectiva científica, este trabajo aporta evidencia experimental de que arquitecturas robóticas modulares, basadas en componentes comerciales estándar y controladores de bajo costo, pueden alcanzar niveles de desempeño comparables a plataformas de mayor precio en tareas específicas de logística agrícola. El enfoque propuesto contribuye al estado del arte en robótica agrícola aplicada, particularmente en contextos de economías emergentes y cultivos de hileras estrechas.

Finalmente, la plataforma desarrollada constituye una base escalable para investigaciones futuras en navegación autónoma avanzada, fusión sensorial, integración de energías

renovables y manipulación robótica de productos agrícolas. Estas líneas de trabajo permitirán ampliar las capacidades del sistema hacia mayores niveles de autonomía, consolidando su potencial como solución sostenible y replicable para la agricultura de precisión.

AGRADECIMIENTO/RECONOCIMIENTO

Los autores agradecemos a la Universidad Tecnológica del Perú, por el apoyo institucional brindado para el desarrollo de la presente investigación. reconoce la disponibilidad de infraestructura académica, laboratorios y recursos técnicos que hicieron posible el diseño, implementación y validación experimental del vehículo agrícola asistente modular. Asimismo, se valora el acompañamiento académico que contribuyó al fortalecimiento del enfoque científico y tecnológico del trabajo.

REFERENCES

- [1] Q. Yang, X. Du, Z. Wang, Z. Meng, Z. Ma, and Q. Zhang, "A review of core agricultural robot technologies for crop productions," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 206, p. 107701, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.107701>.
- [2] G. Ronga *et al.*, "Mobile robots for automated crop inspection and monitoring: challenges and solutions," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 216, 2022.
- [3] J. Brown, A. Paudel, D. Biehler, A. Thompson, M. Karkee, C. Grimm, and J. R. Davidson, "Tree detection and in-row localization for autonomous precision orchard management," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 227, p. 109454, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109454>.
- [4] J. He *et al.*, "Fixed-time generalized super-twisting control for path tracking of autonomous agricultural vehicles," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 227, 2023.
- [5] Z. Chen *et al.*, "A comprehensive review of obstacle avoidance for autonomous agricultural machinery in multi-operational environments," *Artificial Intelligence in Agriculture*, vol. 16, pp. 139–163, 2025.
- [6] "Optimizing multi-machine path planning for crop precision seeding with Lovebird Algorithm," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 235, p. 110207, 2025.
- [7] "Double spiraliform path planning and tracking for agricultural mobile robotics: A modeling and simulation study," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 237, p. 110715, 2025.
- [8] Z. Wang *et al.*, "Field-validated VIO-MPC fusion for autonomous headland turning in GNSS-denied orchards," *Smart Agricultural Technology*, vol. 12, p. 101373, 2025.
- [9] S. Ariza-Sentís *et al.*, "Object detection and tracking in precision farming," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 219, 2024.
- [10] R. Ambuj and R. Machavaram, "Intelligent path planning for autonomous ground vehicles in dynamic environments utilizing adaptive neuro-fuzzy control," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 121, 2025.
- [11] A. Navone *et al.*, "Autonomous robotic pruning in orchards and vineyards: a review," *Computers and Electronics in Agriculture*, 2025.
- [12] D. Li *et al.*, "Deep learning-based object detection for agricultural field robots in complex environments," *Computers and Electronics in Agriculture*, 2024.
- [13] M. J. Delgado *et al.*, "Assessment of multisensor fusion for autonomous navigation in robotic fruit picking," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 227, 2024.
- [14] K. Singh and S. Waghmare, "Comparative analysis of autonomous navigation frameworks for agricultural robots in precision agriculture," *Computers and Electronics in Agriculture*, 2025.
- [15] R. Ambuj and R. Machavaram, "Scalable architectures for autonomous ground vehicles," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2025.
- [16] R. Ronga *et al.*, "Mobile robots for agricultural operations: A review," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 216, 2022.
- [17] D. Li *et al.*, "Efficiency analysis of manual and assisted transport in agriculture," *Biosystems Engineering*, vol. 223, 2023.
- [18] A. Navone *et al.*, "Robotic systems in vineyard operations," *Computers and Electronics in Agriculture*, 2025.
- [19] J. He *et al.*, "Impact of internal logistics on fruit quality," *Postharvest Biology and Technology*, vol. 208, 2023.
- [20] M. Delgado *et al.*, "Ergonomic risks in agricultural harvesting," *Safety Science*, vol. 172, 2024.
- [21] K. Singh *et al.*, "Economic barriers to adoption of agricultural robots," *Smart Agricultural Technology*, 2024.
- [22] G. R. Pérez *et al.*, "Automation challenges in Latin American agriculture," *Computers and Electronics in Agriculture*, 2023.
- [23] Z. Wang *et al.*, "Design methodologies for agricultural UGVs," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2024.
- [24] H. Hernández *et al.*, "Experimental platforms for autonomous field robots," *Robotics and Autonomous Systems*, 2023.
- [25] S. Ariza-Sentís *et al.*, "Navigation of autonomous robots in row crops," *Computers and Electronics in Agriculture*, 2024.
- [26] Modular robotic architectures for agriculture," *Biosystems Engineering*, 2025.
- [27] K. Singh and S. Waghmare, "Low-cost autonomous agricultural vehicles," *Computers and Electronics in Agriculture*, 2025.
- [28] D. Li *et al.*, "Deep learning-based object detection for agricultural field robots in complex environments," *Computers and Electronics in Agriculture*, 2024.
- [29] R. Ambroziak *et al.*, "Field validation of autonomous agricultural robots," *Computers and Electronics in Agriculture*, 2023.
- [30] Z. Chen *et al.*, "Performance evaluation of UGVs in unstructured environments," *Artificial Intelligence in Agriculture*, 2025.