

Prototipo de sistema de visión y comunicación para aplicaciones de búsqueda y rescate en escenarios de derrumbe

Vision and communication system prototype for search and rescue applications in collapse scenarios

Samuel Mora Marín¹   Luis Miguel Capacho Valbuena¹ 

¹ Facultad de Ingeniería, programa de Ingeniería Electrónica. Universidad del Quindío, Armenia, Quindío, Colombia.

Resumen

Introducción: Este artículo presenta el desarrollo e implementación de un prototipo de sistema inalámbrico de visión y comunicación de bajo costo, diseñado para integrarse en plataformas móviles de exploración en escenarios de colapso. En estas situaciones, los equipos de búsqueda requieren información visual y telemetría inmediatas sin exponerse a riesgos secundarios en áreas de difícil acceso.

Objetivo: Implementar un sistema de adquisición de video y transmisión bidireccional de datos de bajo costo para la localización de víctimas y la evaluación ambiental.

Metodología: El desarrollo del prototipo se estructuró utilizando el modelo V, empleando matrices de trazabilidad y matrices de Pugh para la selección de componentes. Se implementó una arquitectura de microcontrolador dual que se comunica mediante un bus I²C para resolver las limitaciones del puerto físico de la cámara.

Resultados: Se desarrolló con éxito un prototipo funcional con transmisión de video estable a distancias de hasta 90 m. Los modos de iluminación demostraron versatilidad en entornos oscuros, mientras que la plataforma de desplazamiento respondió adecuadamente en rampas de hasta 30° en condiciones controladas, aunque se observaron dificultades al superar obstáculos lisos.

Conclusiones: Los resultados experimentales sugieren la viabilidad técnica preliminar de la arquitectura electrónica y lógica evaluada, lo que indica que representa una arquitectura viable y de bajo costo para la adquisición de datos y la transmisión de video. Sin embargo, las limitaciones observadas en la tracción de las orugas y las dimensiones del chasis constituyen límites físicos claros del diseño actual que restringen su uso inmediato en escenarios reales de desastre.

Palabras clave: Desastres, Robótica, Sistemas embebidos, Telecomunicaciones, Labores de rescate, Vehículos operados a distancia

Abstract

Introduction: This paper presents the development and implementation of a low-cost wireless vision and communication system prototype, designed to be integrated into mobile exploration platforms for collapse scenarios. In these situations, search teams require immediate visual information and telemetry without exposing themselves to secondary risks in hard-to-reach areas.

Objective: To implement a low-cost video acquisition and bidirectional data transmission system for victim localization and environmental assessment.

Methodology: The prototype development was structured using the V Model approach, utilizing traceability matrices and Pugh matrices for component selection. A dual microcontroller architecture communicating via an I²C bus was implemented to solve the camera physical port constraints.

Results: A functional prototype was successfully developed with stable video transmission over distances up to 90 m. The lighting modes showed versatility for dark environments, while the displacement platform responded adequately on ramps up to 30° under controlled conditions, although difficulties were observed when climbing smooth obstacles.

Conclusions: The experimental results suggest the preliminary technical feasibility of the evaluated electronic and logic architecture, indicating that it represents a feasible low-cost architecture for data acquisition and video streaming. However, the limitations observed in the traction of the tracks and the dimensions of the chassis constitute clear physical boundaries of the current design that restrict its immediate use in real disaster scenarios.

Keywords: Disasters, Robotics, Embedded systems, Telecommunication, Rescue work, Remotely operated vehicles

¿Cómo citar?

Mora S, Capacho LM. Prototipo de sistema de visión y comunicación para aplicaciones de búsqueda y rescate en escenarios de derrumbe. Ingeniería y Competitividad, 2026, 28(2) e-21015746

<https://doi.org/10.25100/iyv.v28i2.15746>

Recibido: 8/04/26

Revisado: 21/05/26

Aceptado: 10/07/26

Online: 16/07/26

Correspondencia

samuel.moram@uqvirtual.edu.co



¿Por qué se realizó el estudio?

El estudio se realizó para abordar los riesgos de seguridad que enfrentan los equipos de búsqueda y rescate durante la evaluación inicial de estructuras colapsadas. Los métodos de exploración tradicionales a menudo requieren que el personal de rescate y los animales ingresen a entornos inestables, lo que aumenta su exposición a peligros secundarios. Si bien se han propuesto sistemas robóticos avanzados, sus altos costos financieros y computacionales limitan su adopción, particularmente en países en desarrollo. Por lo tanto, este estudio tuvo como objetivo diseñar, implementar y evaluar un prototipo modular de visión y telemetría inalámbrica de bajo costo, basado en componentes comerciales disponibles en el mercado.

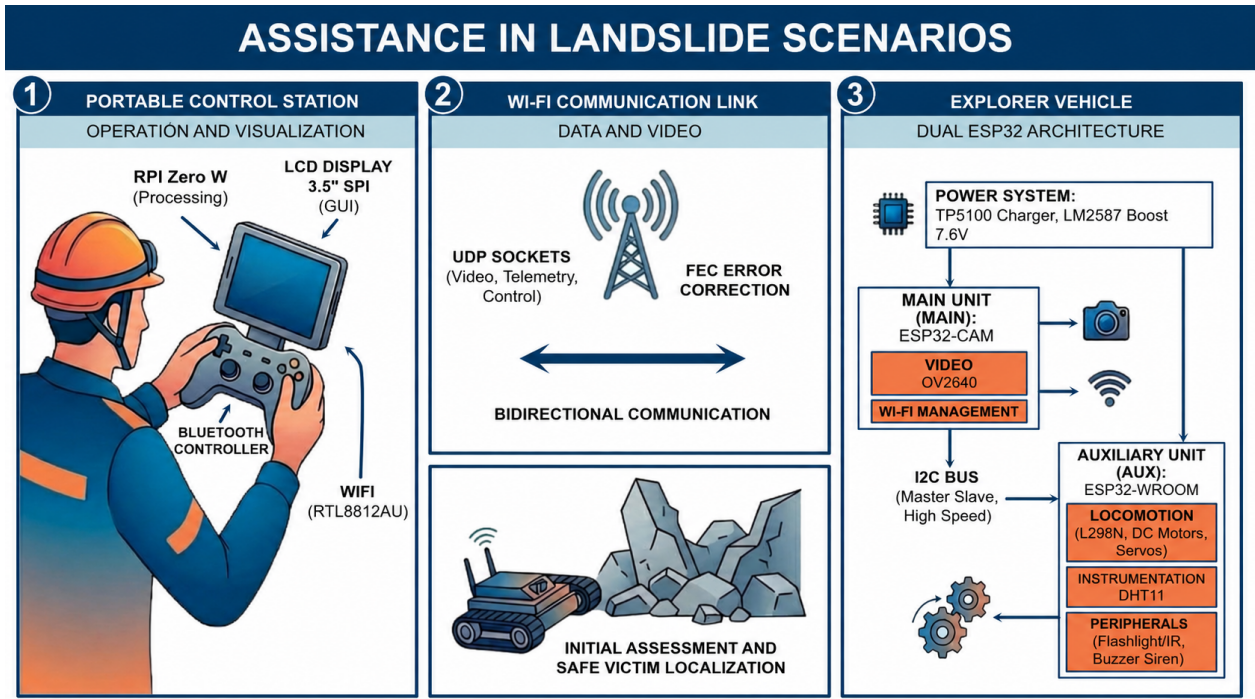
¿Cuáles fueron los hallazgos clave?

La evaluación del prototipo demostró que la arquitectura de doble microcontrolador propuesta resolvió con éxito las limitaciones de hardware asociadas con el subsistema de visión, al tiempo que proporcionó transmisión de video estable a distancias de hasta 90 m en condiciones controladas. El sistema de iluminación híbrido reveló características operativas complementarias: el flash LED visible preservó la fidelidad del color a distancias cortas con un menor consumo de energía, mientras que el iluminador infrarrojo mejoró la visibilidad de la escena en completa oscuridad a costa de un mayor consumo de corriente. Finalmente, las pruebas de locomoción revelaron claras limitaciones mecánicas: las orugas de PLA impresas en 3D lograron un 70 % de éxito en pendientes de 30°, pero mostraron una tracción limitada en obstáculos lisos y cilíndricos.

¿Qué aportan estos hallazgos?

Estos hallazgos respaldan la viabilidad técnica preliminar de una arquitectura electrónica y de software distribuida y de bajo costo para la exploración en operaciones de búsqueda y rescate. Al establecer métricas cuantitativas de rendimiento de referencia —incluidos el alcance de la comunicación inalámbrica, la latencia de la transmisión de video, el consumo de energía y el rendimiento de la locomoción—, el estudio proporciona un marco de referencia práctico para futuros desarrollos. Este marco puede servir de base para el diseño de herramientas modulares de asistencia sensorial de bajo costo, destinadas a la inspección preliminar de espacios confinados, a la vez que contribuye a reducir la exposición del personal de rescate a riesgos secundarios.

Graphical Abstract



Introducción

Tras el derrumbe de una estructura los equipos de rescate se enfrentan a un problema crítico: la falta de un método seguro y rápido para realizar una evaluación inicial de la escena. Las primeras horas tras un desastre son cruciales para la supervivencia de las víctimas, exigiendo una respuesta inmediata (1). Sin embargo, los procedimientos tradicionales de búsqueda, que se basan en la inspección visual humana, sensores acústicos, cámaras térmicas y perros de rescate, tienen limitaciones. Aunque los perros de búsqueda son efectivos gracias a su agudo sentido del olfato, y los sistemas acústicos permiten localizar a los supervivientes bajo los escombros, estos métodos requieren la entrada física de personal y animales en zonas altamente inestables (2) (3). Esta exposición directa expone a los equipos a peligros como colapsos secundarios, temperaturas extremas y la presencia de gases tóxicos, lo que no solo pone en serio riesgo su seguridad, sino que también retrasa la toma de decisiones estratégicas debido a la falta de información visual previa (4) (5).

Las características de los escenarios de colapso imponen restricciones a cualquier operación de exploración. La literatura define estos entornos por la presencia de obstáculos tridimensionales de varios tamaños, superficies con pendientes irregulares y escalones que dificultan el progreso. El acceso físico suele estar restringido por grietas y espacios confinados que requieren perfiles de entrada reducidos, normalmente limitados a unas pocas decenas de centímetros de ancho (6) (7). Además, la presencia de agentes externos como polvo en suspensión, restos sueltos y líquidos estancados degrada los componentes mecánicos, mientras que la total ausencia de luz natural hace esencial el uso de la iluminación activa (5).

Dada la insuficiencia de los métodos tradicionales en estas condiciones adversas, la robótica de búsqueda y rescate ha evolucionado para ofrecer diversas alternativas tecnológicas (8). En cuanto a locomoción, los desarrollos van desde sistemas articulados en forma de serpiente, diseñados específicamente para penetrar y navegar por grietas y tuberías estrechas (7) (9), hasta plataformas basadas en ruedas y orugas, como mecanismos de bogies balancines o chasis de transmisión diferencial, que distribuyen el peso y maximizan el agarre para superar terrenos irregulares y escaleras (10) (11).

En el campo de la detección de víctimas y la evaluación de escenas investigaciones recientes emplean tecnologías avanzadas de visión por ordenador. Las soluciones algorítmicas basadas en redes neuronales convolucionales, como YOLOv7 y las arquitecturas de segmentación panóptica, permiten el análisis de la escena en tiempo real y la identificación de supervivientes a partir de flujos de vídeo (12) (11). Paralelamente, los enfoques de comunicación y teleoperación van desde el mapeo y localización simultáneos (4), hasta sistemas de control a larga distancia que utilizan protocolos GSM y DTMF para operar en áreas remotas sin infraestructura de red (13). Del mismo modo, el uso de sistemas multiplataforma y el Internet de las Cosas han facilitado la transmisión de telemetría a dispositivos móviles comerciales (14-17).

En el contexto de países en desarrollo como Colombia, aunque existen proyectos robóticos centrados en la exploración como la plataforma "Thunder" (18), el alto coste computacional y financiero de los sistemas autónomos avanzados limita su adopción. Existe la necesidad de

herramientas robustas, modulares y de bajo costo que puedan desplegarse rápidamente, utilizando componentes comerciales accesibles (16)(19).

Para abordar estas necesidades operativas este trabajo propone un conjunto de requisitos destinados a evaluar la viabilidad técnica y el rendimiento preliminar del prototipo propuesto. A nivel funcional, la arquitectura busca facilitar la adquisición y transmisión de un flujo de vídeo con menor latencia a una estación de control portátil, incorporando elementos de iluminación activa para mejorar la visibilidad en escenarios con restricciones de poca luz. Además, el sistema pretende establecer un enlace inalámbrico bidireccional y monitorizar variables ambientales. En cuanto a los requisitos no funcionales, el diseño está orientado al uso de componentes de bajo costo y tiempos de procesamiento limitados para no comprometer significativamente la fluidez de la operación remota.

Para evaluar el rendimiento en relación con estos parámetros la metodología se centra en el análisis de métricas cuantitativas que proporcionan datos sobre el comportamiento del enlace de datos, el alcance de la señal inalámbrica y la latencia estimada del sistema de visión bajo las condiciones específicas del entorno controlado. En este contexto, la plataforma robótica terrestre física actúa como una plataforma móvil básica.

Se reconocen las limitaciones de tracción y maniobrabilidad del chasis mecánico ante superficies con alta irregularidad, aspectos que se definen como límites del diseño actual y constituyen áreas de mejora para futuros desarrollos; esta limitación metodológica permite al estudio centrarse en la viabilidad de la arquitectura electrónica y de comunicaciones. Así, el trabajo presenta la evaluación de una herramienta de bajo costo concebida como una posible opción de apoyo sensorial para equipos de emergencia, destinada a mejorar la recogida de información inicial y contribuir a la reducción de la exposición directa del personal en las primeras etapas del reconocimiento.

Metodología

El desarrollo del prototipo se estructuró siguiendo el Modelo V (Figura 1). Este enfoque es muy adecuado para proyectos de robótica, ya que proporciona un marco para el co-diseño de hardware y software, asegurando que cada etapa conceptual esté vinculada a una fase de evaluación correspondiente.

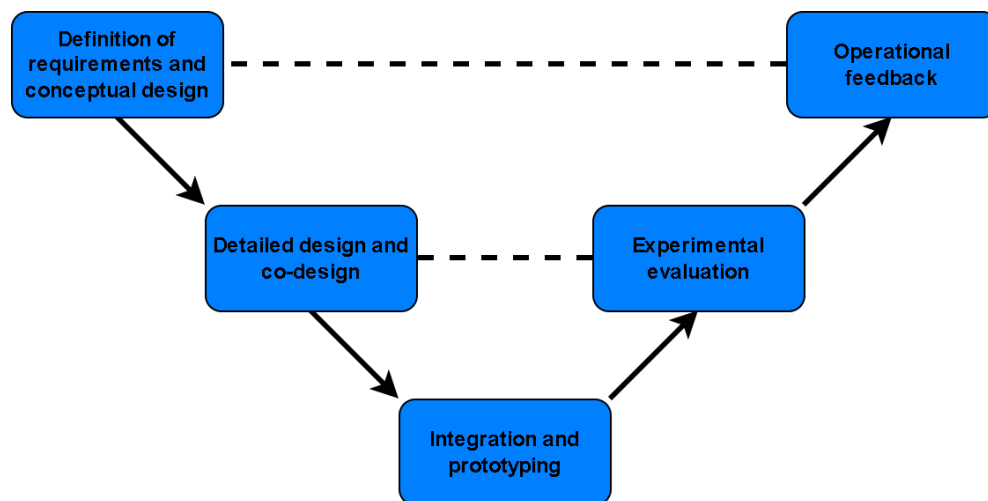


Figura 1. Metodología del modelo en V utilizada en este trabajo (Fuente: Autores)

Siguiendo esta metodología, el flujo de trabajo de desarrollo se ejecutó en la siguiente secuencia:

Definición de requisitos y diseño conceptual

Basándose en las restricciones operativas documentadas en la literatura de escenarios de rescate, se definieron los requisitos técnicos iniciales para el sistema. Estas incluían portabilidad, captura visual en condiciones de poca luz, transmisión de telemetría y rentabilidad. En función de estos parámetros, se evaluaron y seleccionaron componentes comerciales disponibles para procesamiento, gestión de energía y comunicación inalámbrica.

Diseño detallado y co-diseño

Se diseñó una arquitectura electrónica dual para distribuir la carga de procesamiento entre dos microcontroladores. Paralelamente, se estructuraba la arquitectura de software, cubriendo el desarrollo de firmware C++ para el control periférico y la programación de la interfaz para la estación portátil basada en el entorno Raspberry Pi OS.

Integración y prototipado

Esta etapa constituyó el núcleo del proceso de desarrollo e implicó el montaje físico de los subsistemas electrónicos sobre un chasis de orugas. Además, se unificó la lógica de comunicación para el bus interno y el enlace bidireccional de red, consolidando la primera versión operativa del equipo.

Evaluación experimental y retroalimentación

Se realizaron pruebas funcionales en un entorno controlado para examinar el rendimiento del sistema integrado frente a las especificaciones iniciales. Las observaciones obtenidas durante estos experimentos, como el deslizamiento de las vías plásticas al interactuar con pendientes o superficies lisas, permitieron documentar de forma práctica los límites operativos actuales del diseño. Estos resultados preliminares sirven como referencia para sugerir ajustes específicos en la tracción y la distribución del peso para futuras versiones del prototipo.

Para estructurar el desarrollo de manera coherente con los principios del Modelo V, se incorporó una matriz de trazabilidad. Esta herramienta vincula las consideraciones iniciales de diseño con los componentes seleccionados y los métodos de prueba destinados a evaluar el rendimiento global del sistema. La Tabla 1 describe esta correspondencia.

Tabla 1. Matriz de trazabilidad entre requisitos, selección y validación del sistema (Fuente: Autores)

Requisito de diseño	Tipo de requisito	Componente seleccionado o solución de diseño	Método experimental de validación
Adquisición de flujo de vídeo y teleoperación remota	Funcional	Módulo de procesamiento ESP32-CAM con antena RTL8812AU y decodificación mediante librería libjpeg-turbo	Medición de la latencia estimada de renderizado y el consumo de ancho de banda
Exploración visual en entornos con poca luz	Funcional	Destellos LED delanteros para luz visible e iluminador infrarrojo gestionados por la unidad auxiliar ESP32	Pruebas de captura de imagen en ausencia de luz natural
Adquisición y visualización de telemetría ambiental	Funcional	Sensor de temperatura y humedad DHT11 y entorno gráfico estructurado en la biblioteca ImGui	Verificación de lecturas de variables en el panel de estadísticas
Establecimiento de un enlace inalámbrico bidireccional	No funcional	Protocolo Wi-Fi en configuración de punto de acceso usando el adaptador RTL8812AU	Registro de la intensidad de la señal recibida a diferentes distancias
Viabilidad económica y uso de componentes comerciales	No funcional	Microcontroladores de la serie ESP32 con Raspberry Pi Zero	Análisis comparativo y selección de alternativas utilizando matrices de decisión de Pugh
Movimiento básico en superficies con pendientes u obstáculos	Funcional	Chasis de tracción de orugas (Rover Tracks v2) controlado por motores de corriente continua	Pruebas de transporte en rampas y sobre perfiles cilíndricos en un entorno controlado

Comparación de alternativas de diseño

Las siguientes secciones presentan diversas alternativas que satisfacen las necesidades electrónicas del proyecto.

La Tabla 2 ofrece una comparación detallada de los microcontroladores más utilizados en el mercado.

Tabla 2. Comparación de microcontroladores (Fuente: Autores)

Especificaciones	Microcontroladores				
Modelo	ATMEGA328P	PIC16F877	ESP8266	Raspberry Pi Pico	ESP32
Placas de desarrollo con cámaras integradas	NO	NO	NO	NO	SÍ
Wi-Fi	NO	NO	SÍ	SÍ	SÍ
Doble núcleo	NO	NO	NO	SÍ	SÍ
Consumo actual (mA)	27	25	67	80	80

Asimismo, la Tabla 3 muestra una comparación entre los diferentes candidatos a puente H para conducir los motores de los vehículos.

Tabla 3. Comparación de H-bridge (Fuente: Autores)

Especificaciones	Puente en H		
Modelo	L298N	L9110S	L293D
Corriente máxima (A)	2	0.8	0.6
Canales	2	2	2
Rango de tensión de entrada (V)	5 - 35	2.5 - 12	5 - 35

De manera similar, la Tabla 4 muestra la comparación entre sistemas embebidos alternativos que podrían usarse para el sistema de control del operador.

Tabla 4. Comparación de sistemas embebidos (Fuente: Autores)

Especificaciones	Sistemas embebidos			
	Raspberry Pi 4 modelo B	Raspberry Pi 1 modelo B	Raspberry Pi cero w	Orange Pi cero 2w
Dimensiones (mm)	85x56	85x56	65x30	65x30
Núcleos de CPU	Quad-core	Mononúcleo	Mononúcleo	Quad-core
Consumo actual (mA)	900	550	250	350

Sin embargo, las comparaciones por sí solas no proporcionan una base suficiente para tomar decisiones sobre qué alternativas utilizar. Por lo tanto, la selección de componentes para el diseño del sistema y el control del operador se realiza utilizando matrices de Pugh.

Selección de alternativas de diseño

Las tablas Pugh presentadas a continuación (tabla 5 y 6) simplifican la selección objetiva de los componentes comparándolos con un punto de referencia, que será el componente más popular. Si el componente comparado ofrece mayores beneficios, se le asigna un signo más (+); de lo contrario, se le asigna un signo menos (-). Si la comparación da lugar a igualdad con la referencia, se le asigna un signo igual (=). Los signos positivos suman 1 al conteo total, los negativos restan 1 y los signos iguales suman cero.

Tabla 5. Matriz Pugh de microcontroladores (Fuente: Autores)

Microcontroladores					
Característica	Alternativas				
	ATMEGA328P	PIC16F877	ESP8266	Raspberry Pi Pico	ESP32
Placas de desarrollo con cámaras integradas	REF	=	=	=	+
Wi-Fi	REF	=	+	+	+
Doble núcleo	REF	=	=	+	+
Consumo actual (mA)	REF	+	-	-	-
Total		1	0	1	2

Tras analizar los resultados de los microcontroladores en la Tabla 5, se determinó que el ESP32 era la opción más adecuada para el proyecto. Esta elección se apoya en su capacidad para satisfacer

diversas necesidades del vehículo, incluyendo la disponibilidad de placas de desarrollo que lo integran con cámaras como la OV2640, como la ESP32-CAM, cuyas imágenes se procesan utilizando el gran número de pines de E/S del microcontrolador. Además, facilita la transmisión de vídeo a través de su conexión Wi-Fi integrada.

Tabla 6. Matriz de Pugh de puentes en H (Fuente: Autores)

Puente en H			
Característica	Alternativas		
	L298N	L9110S	L293D
Corriente máxima (A)	REF	-	-
Canales	REF	=	=
Rango de tensión de entrada (V)	REF	-	=
Total		-2	-1

En cuanto a la Tabla 6, la selección del puente en H más adecuado fue el L298N, gracias a su capacidad para controlar motores con un consumo de corriente y voltaje de hasta 2 amperios y 35 voltios. Tabla 7.

Tabla 7. Matriz Pugh de sistemas embebidos (Fuente: Autores)

Sistemas embebidos				
Característica	Alternativas			
	Raspberry Pi 4 modelo B	Raspberry Pi 1 modelo B	Raspberry Pi cero w	Orange Pi cero 2w
Dimensiones (mm)	REF	=	+	+
Núcleos de CPU	REF	-	-	=
Consumo actual (mA)	REF	+	+	+
Total		0	1	2

Según los datos proporcionados en la Tabla 7, que corresponden a la selección del sistema embebido para la estación de control del operador, el Orange Pi ofrece las mejores características

técnicas. Sin embargo, teniendo en cuenta que el sistema de control debe ser portátil para facilitar su despliegue en el campo y funcionar con baterías, destaca el bajo consumo del Raspberry Pi Zero W. Además, a pesar de tener menos núcleos, su trabajo se limita a recibir datos y vídeo del vehículo y enviar comandos de control, lo que no requiere una potencia de procesamiento significativa, lo que lo convierte en la opción más adecuada para este proyecto.

Los sensores que se van a utilizar en el vehículo dependen del contexto en el que se utiliza. Por esta razón, se utilizará como ejemplo el sensor de temperatura y humedad relativa DHT11; sin embargo, cualquier sensor compatible con los pines GPIO del microcontrolador y sus interfaces podía implementarse.

Para la visualización de imágenes en la estación de control, se utilizará una pequeña pantalla LCD SPI de 3,5 pulgadas compatible con el conector de pines del sistema embebido elegido para garantizar la portabilidad.

La distancia de transmisión es crucial. Sin embargo, dado que la transmisión se realiza por Wi-Fi, cualquier adaptador Wi-Fi estándar permitirá una potencia máxima de transmisión de 20 dBm. Por ejemplo, se utilizará un adaptador basado en el chip RTL8812AU.

Integración con microcontroladores duales

La implementación del sistema de control se basó en una arquitectura de microcontrolador dual para abordar una restricción física crítica del hardware de visión, como se muestra en el diagrama de bloques de comunicación (Figura 2).

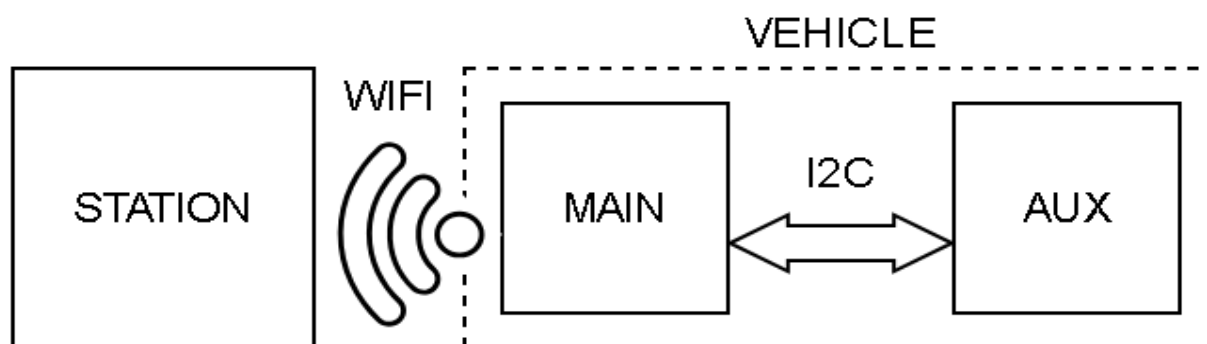


Figura 2. Diagrama de bloques de comunicación (Fuente: Autores)

Aunque el módulo ESP32-CAM ("Principal") posee suficiente potencia de procesamiento para tareas concurrentes, el bus de datos y las señales de control de la cámara OV2640 ocupan la mayoría de sus pines GPIO, impidiendo la gestión directa de actuadores. Para superar esto, se integró un ESP32 WROOM como unidad auxiliar ("Aux"). Como se detalla en el esquema electrónico (Figura 3), esta unidad funciona como un expensor de puertos inteligente responsable del control directo de elementos electromecánicos y sensores.

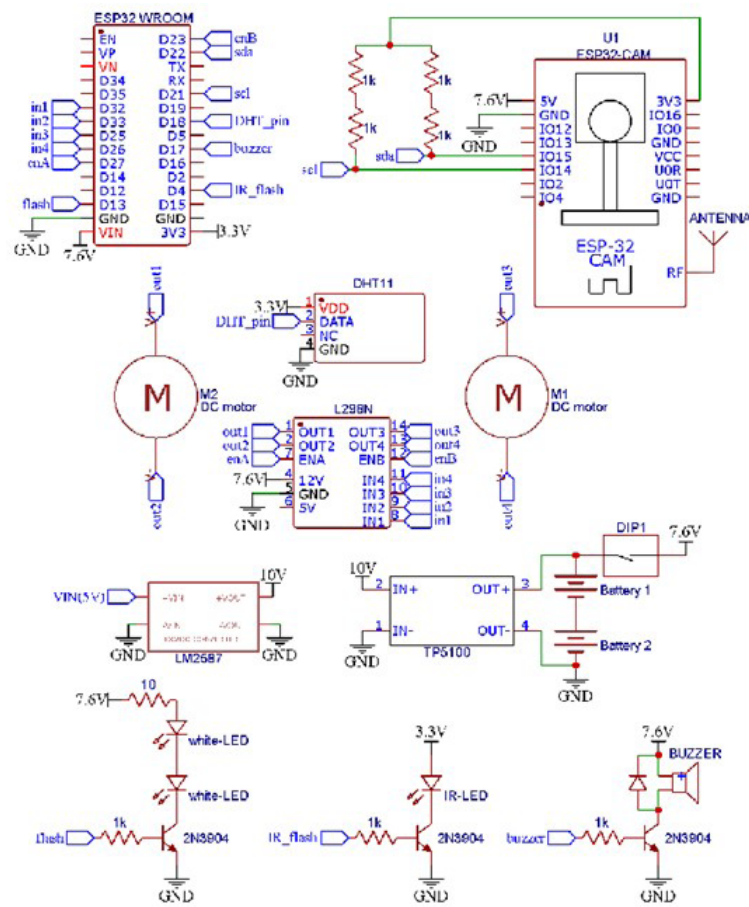


Figura 3. Esquema del vehículo (Fuente: Autores)

La comunicación entre ambas unidades se estableció a través del bus I²C, seleccionado por su alta velocidad de transferencia y la mínima carga de carga en el cabecero, factores clave para asegurar una latencia imperceptible durante la teleoperación. Bajo esta configuración, la unidad principal gestiona el enlace Wi-Fi con la estación base y la captura de vídeo, mientras que la unidad auxiliar ejecuta señales lógicas al puente H y gestiona los periféricos de navegación, incluyendo un destello LED frontal, un emisor infrarrojo para visión nocturna y un zumbador pasivo para alertas acústicas.

Sistema eléctrico y gestión

El diseño del sistema de potencia se basó en una estimación teórica del consumo nominal de los componentes activos, con el objetivo de alcanzar una autonomía objetivo de aproximadamente 10 horas para la estación de control y más de 3 horas para el vehículo de exploración.

Para la estación de control, la demanda de energía de CC se calculaba sumando el consumo nominal de sus módulos principales: la unidad de procesamiento Raspberry Pi Zero W (250 mA), la pantalla LCD de 3,5 pulgadas (150 mA) y el adaptador de red inalámbrica RTL8812AU (100 mA). Este análisis inicial arrojó un consumo teórico continuo de 500 mA. Para cumplir el objetivo de autonomía bajo esta demanda, se seleccionó un conjunto paralelo de dos celdas de iones de litio con una capacidad de 2200 mAh cada una, sumando un total de 4400 mAh. Relacionando esta capacidad con la corriente estimada, se proyectó un tiempo de funcionamiento aproximado de 8,8 horas.

En cuanto al vehículo, el diseño de la fuente de energía estaba limitado tanto por la demanda eléctrica estimada como por las restricciones de espacio físico dentro del chasis. El consumo teórico para la plataforma móvil se derivó de sus subsistemas activos: la arquitectura de microcontrolador dual ESP32 (80 mA por unidad, total de 160 mA), dos motores de corriente continua bajo condiciones medias de tracción (200 mA por motor, total de 400 mA), el sensor de telemetría de prueba (<5 mA) y el módulo de iluminación infrarroja activa (300 mA). Esto representa una demanda continua de aproximadamente 565 mA durante el tránsito estándar sin iluminación activa, y un consumo estimado máximo de 865 mA al operar todos los periféricos simultáneamente.

Debido a que el volumen dentro del chasis limitaba el tamaño y la cantidad de las celdas, se eligió una configuración compacta en serie de dos pilas de litio con una capacidad de 3000 mAh y 7,6 V. Bajo la demanda teórica máxima calculada, esta configuración ofrece un tiempo de operación esperado de 3,47 horas.

Para verificar estas estimaciones teóricas, se realizaron mediciones de corriente continua abriendo el circuito y conectando un amperímetro en serie. En la estación de control, las mediciones mostraron un consumo de corriente de 440 mA en la actividad máxima, cerca de la proyección teórica de 500 mA. En el vehículo, las mediciones registraron una demanda de 240 mA con la cámara activa en modo ralentí. Al activar el destello de luz visible, el valor subió a 315 mA; con el emisor infrarrojo, el consumo alcanzó los 550 mA; y con el timbre acústico de alerta, alcanzó los 330 mA. Durante el movimiento básico con transmisión activa de vídeo, el consumo medido era de 860 mA, mientras que el movimiento operativo simultáneamente con toda la iluminación y los periféricos de alerta alcanzó un máximo de 1,3 A.

Para facilitar la recarga usando fuentes estándar de 5 V, el vehículo incorpora un módulo de carga de la serie TP5100 asistido por un amplificador de voltaje LM2587, que eleva la tensión de entrada hasta los 10 V requeridos por el cargador. La gestión de la energía de la estación de control se basa en un módulo TP4056, optimizando la descarga utilizando el regulador de baja caída (LDO) integrado en el Raspberry Pi Zero W. Este regulador permite que la estación mantenga un funcionamiento estable con una tensión de entrada tan baja como 3,5 V, lo que permite un uso eficiente de la batería durante casi todo su ciclo de descarga sin necesidad de etapas adicionales de aumento de tensión que generen pérdidas.

Locomoción mecánica y diseño estructural

La movilidad en entornos caracterizados por escombros y superficies irregulares se abordó mediante un sistema de orugas (Figura 4-A), ideal para distribuir el peso de manera uniforme y maximizar la tracción en terrenos inestables (20). El control de los motores de corriente continua se lograba mediante un puente en H L298N, que recibía señales de modulación de ancho de pulso (PWM) de la unidad auxiliar para regular con precisión tanto la dirección como la velocidad.

El diseño mecánico y el chasis protector se fabricaron mediante impresión 3D, basados en modelos adaptados de código abierto bajo una licencia Creative Commons Attribution (CC BY). Concretamente, se integraron el sistema de tracción "Rover Tracks v2" (Figura 4-A) (21) y una versión modificada del chasis "ZeroBot Pro Tank" (Figura 4-B) (22), resultando en una estructura

compacta y robusta capaz de proteger la electrónica interna durante la exploración, como se muestra en el montaje final (Figura 4-C y Figura 4-D).

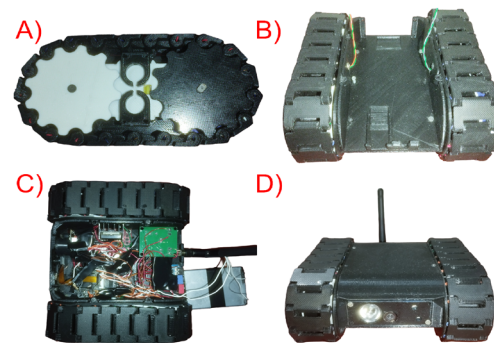


Figura 4. A) Vías B) Chasis C) Interior del vehículo D) Montaje final (fuente: autores)

Estación de control y telemetría

El sistema de control a distancia, denominado "Station", fue concebido como una unidad portátil y autónoma, priorizando la ergonomía y la eficiencia energética. Para integrar los componentes (Raspberry Pi Zero W, batería, pantalla y antena) en una única unidad portátil, se imprimió en 3D un soporte estructural basado en un modelo de código abierto bajo una licencia CC BY (Figura 5) (23). Este conjunto estaba acoplado a un controlador Bluetooth, proporcionando una interfaz para la telemetría en tiempo real.



Figura 5. Estación (Fuente: Autores)

Electrónicamente, la integración de componentes requería soluciones personalizadas para garantizar la estabilidad operativa, detalladas en el esquema de la estación (Figura 6). Como el sistema carecía de una línea estable de 5 V, se realizó un bypass manual del regulador interno de AMS1117 de la pantalla LCD de 3,5 pulgadas para alimentarlo directamente desde el raíl de 3,3 V del Raspberry Pi. De manera similar, la comunicación inalámbrica se gestionaba mediante un adaptador Wi-Fi basado en el chip RTL8812AU; para una integración compacta, las líneas de datos diferenciales se soldaron directamente a las almohadillas de prueba del puerto USB del procesador, mostrando un funcionamiento estable al voltaje nominal de la batería (3,8 V).

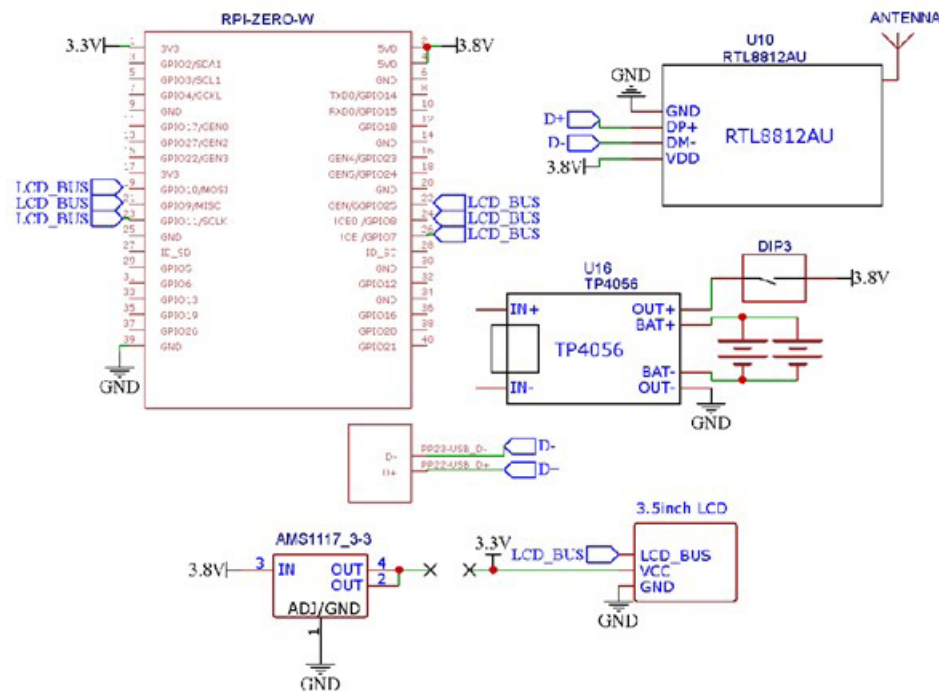


Figura 6. Esquema de la estación (Fuente: Autores)

La gestión de la energía se basaba en dos pilas de litio en paralelo controladas por un módulo TP4056 (Figura 6). Una decisión técnica crítica fue el uso del regulador integrado de baja caída (LDO) integrado en la Raspberry Pi Zero W, que permite un funcionamiento estable con una tensión de entrada de solo 3,5 V. Esta característica extendía el uso de la batería durante casi todo el ciclo de descarga sin necesidad de etapas adicionales de aumento de voltaje, superando a los reguladores lineales convencionales.

Arquitectura lógica y desarrollo de software

El desarrollo de software se estructuraba en dos bloques: firmware de bajo nivel para los microcontroladores del vehículo y una aplicación de alto nivel para la estación de control. Todo el firmware del vehículo se desarrolló en C++ utilizando el marco oficial ESP-IDF, elegido por su control de hardware granular y su eficiente gestión de la memoria.

Firmware del vehículo (unidades principales y auxiliares)

El funcionamiento de la unidad principal se basaba en la gestión de tareas, tal y como se detalla en su diagrama de flujo (Figura 7). Tras configurar la red Wi-Fi, se establecieron dos sockets independientes: uno para vídeo y otro para telemetría y control, evitando que el tráfico de imagen saturara el canal de comandos. El sistema capturaba tramas JPEG directamente del sensor para optimizar los ciclos de la CPU. Antes de la transmisión, el chasis se fragmentaba y se aplicaba la Corrección de Errores Directa (FEC), limitando la tasa a 10 FPS para asegurar la estabilidad del enlace. Además, esta unidad actuaba como puente I²C, transmitiendo órdenes a la unidad auxiliar y gestionando la telemetría de forma autónoma.

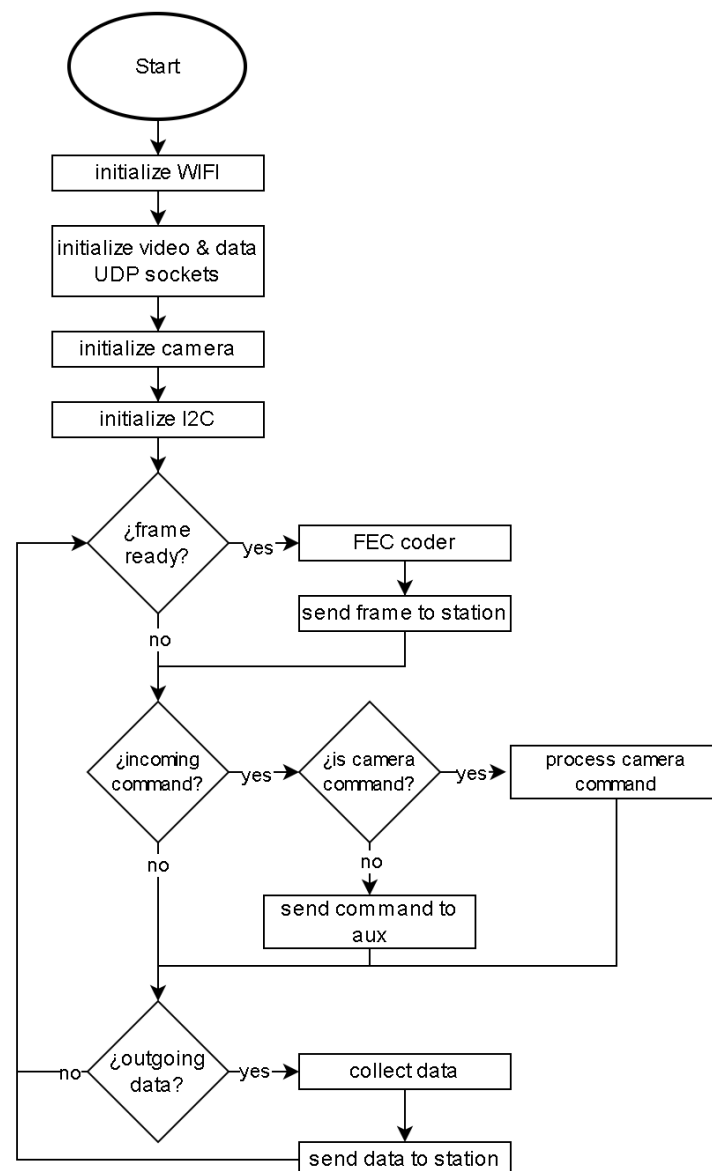


Figura 7. Diagrama de flujo de la unidad principal (Fuente: Autores)

La unidad auxiliar estaba configurada como esclava I²C (Figura 8). Su lógica de software priorizaba la velocidad de respuesta mediante una estrategia intermedia de almacenamiento en búfer para los

sensores. Este método permitía una respuesta inmediata cuando la unidad maestra solicitaba una transacción I²C, entregando datos prepreparados sin bloquear al procesador ni afectar el tiempo general del sistema.

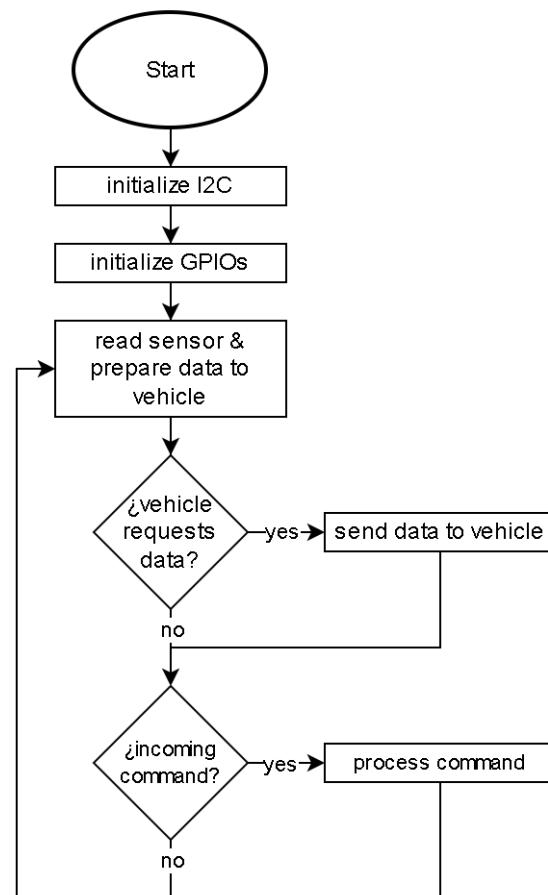


Figura 8. Diagrama de flujo de unidades auxiliares (Fuente: Autores)

Aplicación en la estación de control

La emisora funcionaba con Raspberry Pi OS Lite, configurado para iniciar automáticamente la aplicación de control al iniciar. La secuencia lógica (Figura 9) comenzó con la sincronización del controlador Bluetooth y la creación del punto de acceso Wi-Fi. La interfaz gráfica de usuario se basaba en las bibliotecas SDL, OpenGL e ImGui para la gestión de eventos e interfaces.

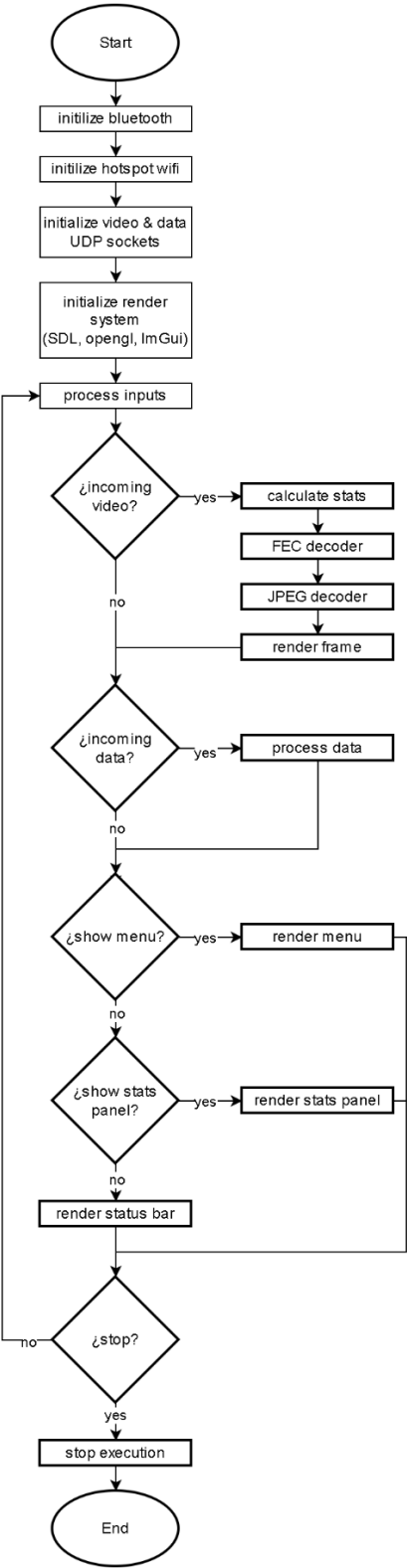


Figura 9. Diagrama de flujo de la estación (Fuente: Autores)

El manejo de vídeo en la estación era una tarea crítica que integraba el algoritmo de reconstrucción FEC para recuperar la información perdida debido a las caídas de paquetes. Tras la reconstrucción, los fotogramas se decodificaban usando la biblioteca libjpeg-turbo y se renderizaban mediante aceleración por hardware (GPU). Una interfaz gráfica de usuario (Figura 10) se superpuso a esta

señal, mostrando una barra de estado con FPS, calidad de señal (RSSI) y lecturas en tiempo real de sensores. Finalmente, se implementó una rutina de apagado controlada para garantizar la integridad del sistema de archivos del sistema operativo.

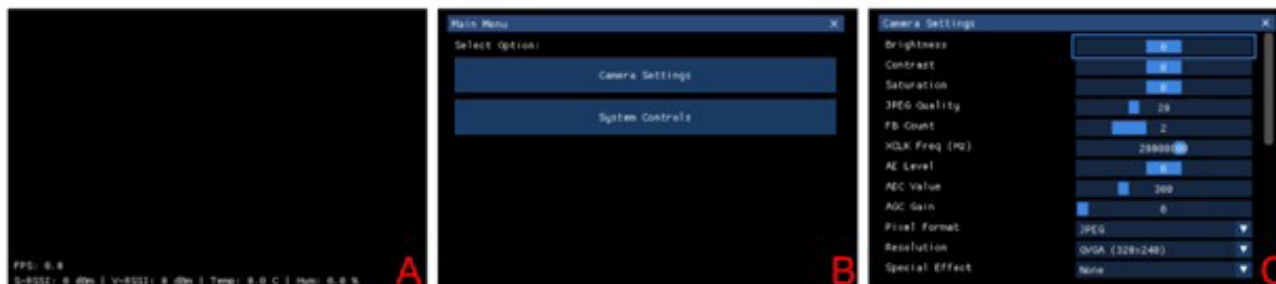


Figura 10. A) Pantalla principal y barra de estado B) Menú principal C) Menú de configuración de cámara (Fuente: Autores)

Diseño experimental

Para verificar el rendimiento del prototipo y sus límites operativos preliminares, se realizaron pruebas para evaluar la calidad de los subsistemas de telecomunicaciones y adquisición visual. Primero, el enlace de datos se caracterizó mediante pruebas de pérdida de trayectoria. La variable medida era el Indicador de Intensidad de Señal Recibida (RSSI), en dBm, registrado directamente desde el controlador RTL8812AU adaptador Wi-Fi en la estación de control. La distancia se incrementaba en intervalos fijos de 5 metros en línea de visión directa bajo condiciones meteorológicas suaves. Se tomaron dos mediciones independientes en cada uno de los 35 puntos de distancia ($n=2$). Se calcularon la media e incertidumbre asociada para cada punto, definida como la semidiferencia entre mediciones ($|x_1 - x_2|/2$); los resultados se informan en la Tabla 8.

En segundo lugar, se evaluó la respuesta del sistema de visión en condiciones de poca luz utilizando los modos de iluminación integrados. Finalmente, para verificar la estabilidad general del prototipo durante el movimiento, se realizaron pruebas básicas de locomoción en escenarios controlados utilizando diversos obstáculos; Estas pruebas se centraron en corroborar la integración funcional del firmware de control motor y no pretenden emular la fricción extrema o la irregularidad de un escenario real de colapso.

Tabla 8. Datos de intensidad de señal (RSSI), promedio e incertidumbre según la distancia. (Fuente: Autores)

Distancia (m)	Prueba 1 (dBm)	Prueba 2 (dBm)	Promedio (dBm)	Incertidumbre (dBm)
0	-19	-13	-16	±3
5	-31	-29	-30	±1
10	-34	-32	-33	±1
15	-48	-38	-43	±5
20	-50	-47	-48.5	±1,5
25	-50	-48	-49	±1
30	-55	-53	-54	±1
35	-55	-51	-53	±2
40	-57	-52	-54.5	±2.5
45	-60	-56	-58	±2
50	-62	-60	-61	±1
55	-56	-52	-54	±2
60	-55	-51	-53	±2
65	-57	-52	-54.5	±2.5
70	-62	-57	-59.5	±2.5
75	-60	-55	-57.5	±2.5
80	-58	-58	-58	±0
85	-59	-54	-56.5	±2.5
90	-70	-60	-65	±5
95	-60	-58	-59	±1
100	-67	-58	-62.5	±4.5
105	-60	-55	-57.5	±2.5
110	-61	-59	-60	±1
115	-65	-68	-66.5	±1,5
120	-69	-65	-67	±2
125	-72	-69	-70.5	±1,5
130	-71	-60	-65.5	±5.5
135	-66	-62	-64	±2
140	-64	-61	-62.5	±1,5
145	-72	-69	-70.5	±1,5
150	-65	-65	-65	±0
155	-63	-60	-61.5	±1,5
160	-65	-62	-63.5	±1,5
165	-62	-60	-61	±1
170	-69	-66	-67.5	±1,5

Resultados y discusión

Rendimiento del enlace de datos y telemetría

La validación operativa del sistema se dividió en dos fases: evaluación estática de estabilidad y análisis de alcance de señal en campo abierto. En la primera etapa, con el material estacionario del vehículo a una distancia fija de 5 metros, las métricas internas de rendimiento del software se verificaban mediante el panel de estadísticas personalizadas.

Como se muestra en la Figura 11, el sistema registró una latencia media de procesamiento de 0,5 ms. Este valor refleja el tiempo que la estación de control requiere para decodificar y renderizar cada fotograma, confirmando que la Raspberry Pi Zero W posee suficiente potencia para evitar retrasos perceptibles causados por la carga computacional. Simultáneamente, el análisis del flujo de datos reveló una tasa de bits de aproximadamente 400 kbps. Este consumo moderado de ancho de banda, combinado con una tasa de recepción sostenida de 10 FPS, valida que la estrategia de compresión y transmisión elegida es efectiva, logrando un vídeo fluido sin saturar el canal inalámbrico.

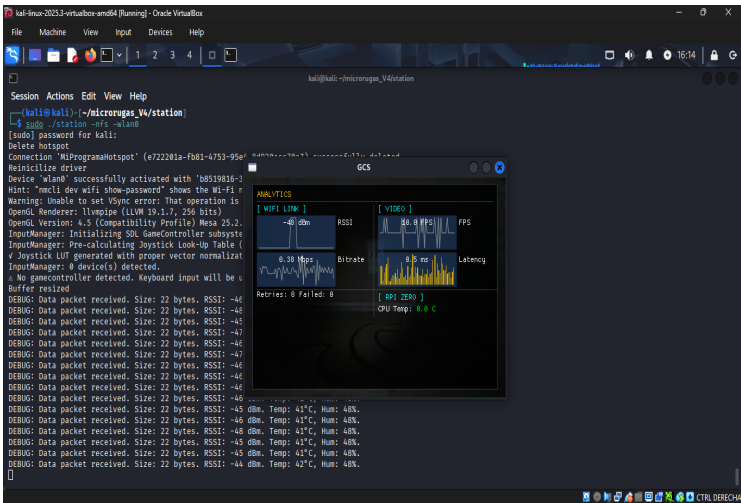


Figura 11. Panel de estadísticas (Fuente: Autores)

En la segunda etapa, la degradación de la señal se evaluó en relación con la distancia registrando el RSSI a intervalos de 5 metros usando dos repeticiones independientes por punto (n=2; Tabla 8). El análisis de datos (Figura 12) sugiere un comportamiento de enlace dentro de rangos de operación adecuados para este diseño preliminar, partiendo de un RSSI medio de $-16,0 \pm 3,0$ dBm en el punto de origen. Tras la atenuación inicial debida a la propagación en el espacio libre, los niveles medios fluctuaron principalmente entre -53 y -62 dBm, con incertidumbres típicas de ± 1 a $\pm 2,5$ dBm, hasta 85 metros. A 90 metros, el RSSI medio era de $-65,0 \pm 5,0$ dBm, el punto en el que el flujo de vídeo mostró las primeras interrupciones debidas a la pérdida de paquetes. A medida que la distancia se acercaba a los 110 metros ($-60,0 \pm 1,0$ dBm), se producían fallos intermitentes en la recepción de comandos. La transmisión persistió de forma discontinua hasta la interrupción total de 170 metros ($-67,5 \pm 1,5$ dBm), identificando esta distancia como el límite operativo estimado bajo las condiciones evaluadas de línea de visión.

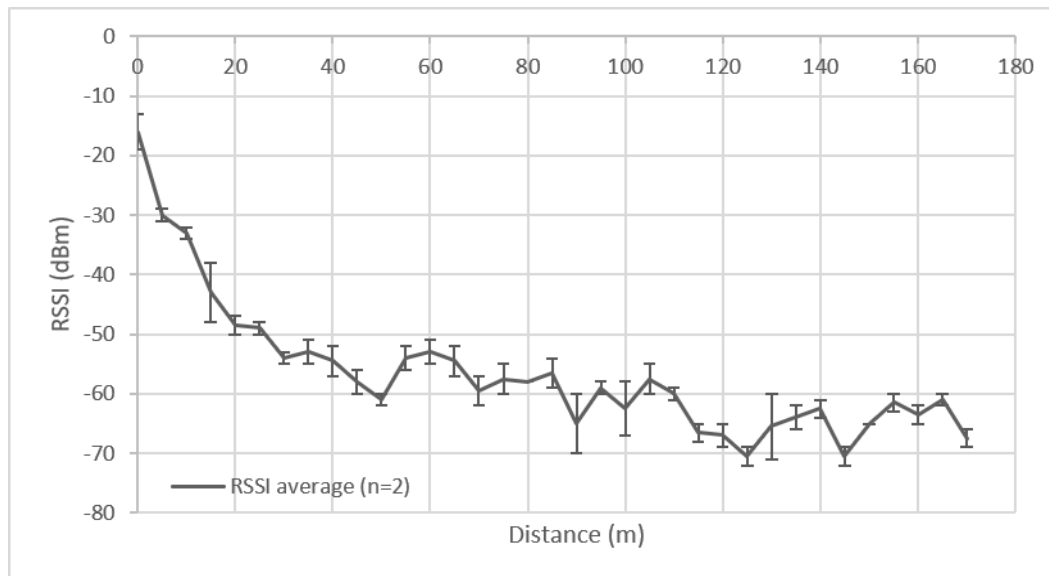


Figura 12. RSSI vs Distancia (Fuente: Autores)

Evaluación del sistema de visión y consumo energético

El rendimiento del subsistema de vídeo se evaluó estableciendo una resolución operativa de QVGA (320x240 píxeles). Esta elección de diseño aborda una restricción crítica: resoluciones más altas aumentan exponencialmente la carga de procesamiento sobre el ESP32 y el volumen de datos, saturando el búfer de salida y desestabilizando la red Wi-Fi. Por lo tanto, se priorizó la baja latencia sobre la alta definición, un factor vital para la teleoperación en tiempo real.

Bajo esta configuración, se realizó un análisis comparativo entre los dos sistemas de iluminación a bordo: luz visible (flash LED) e infrarrojo (IR). Los resultados, resumidos en el diagrama de radar de la Figura 13, evalúan el rendimiento en cuanto a nitidez, fidelidad de color, alcance visual y eficiencia energética. En cuanto a la nitidez, ambos sistemas obtuvieron una puntuación moderada e idéntica, demostrando que la definición de bordes está limitada por la resolución y la compresión JPEG más que por la fuente de luz. Por el contrario, el modo Flash alcanzó la puntuación máxima en color, mientras que el modo IR obtuvo la puntuación mínima debido a la producción de imágenes monocromáticas.

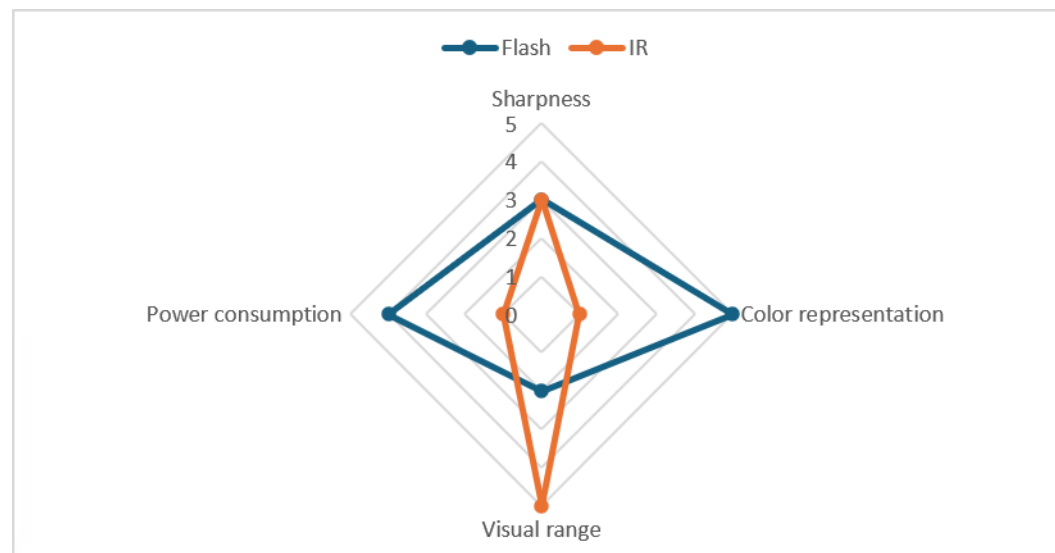


Figura 13. Flash vs IR (Fuente: Autores)

Las pruebas revelaron un intercambio técnico inverso entre rango y consumo. El sistema IR demostraba una penetración visual superior pero penalizaba la eficiencia al exigir 300 mA a 3,3 V. En cambio, el Flash (dos LEDs SMT de 7 V) consumía solo 150 mA, ofreciendo alcance limitado pero mayor eficiencia energética para la autonomía del vehículo. La validación de estos datos se observa en las capturas de la Figura 14-A, B y C. En ausencia de luz (A), la operabilidad es inexistente; con Flash (B), la información de color se recupera a corta distancia; y con IR (C), se confirma su alta potencia, aunque a cortas distancias provoca una sobreexposición que oculta detalles. Esto sugiere que el Flash es ideal para una inspección cercana, reservando el modo IR para la navegación en espacios profundos.



Figura 14. A) Sin iluminación B) Linterna C) Iluminación IR (Fuente: Autores)

Capacidad de tracción y espacio libre de obstáculos

Los límites operativos del sistema de tracción se evaluaron en tres escenarios diferentes mediante una serie de 10 intentos, consolidando las tasas de éxito y fallo en la Figura 15.

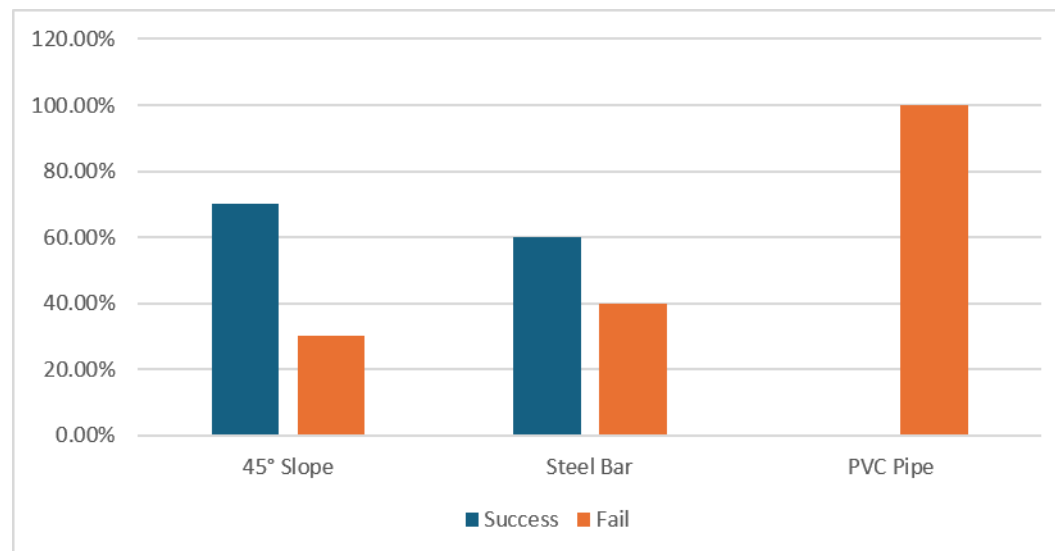


Figura 15. Tasa de éxito en pruebas de locomoción (Fuente: Autores)

El primer escenario analizó el rendimiento en una pendiente de 30 grados, obteniendo una tasa de éxito del 70%. Durante las pruebas, era evidente que el vehículo ascendía con dificultad debido al constante deslizamiento. La discusión sobre estos fallos indica que no fueron causados por la falta de par motor motor, sino por la insuficiente fricción de las vías lisas de PLA impresas en 3D, que impedían una transferencia efectiva de potencia al suelo.

Posteriormente, se evaluó la superación de perfiles cilíndricos (Figura 16). Al enfrentarse a una barra de acero de 15 mm, el sistema registró una tasa de éxito del 60%. El análisis reveló que el vehículo necesitaba impulso para superar el obstáculo; a bajas velocidades, el plástico rígido resbalaba sobre el acero. Por el contrario, el desafío de la tubería de PVC de 26 mm resultó insuperable (fallo del 100%). Este resultado puso de manifiesto una limitación crítica en el diseño mecánico: aunque la altura libre al suelo del vehículo (7 cm) es mayor que el obstáculo, su longitud total (15,5 cm) es insuficiente. La oruga delantera logró escalar la tubería, pero la baja fricción del PVC combinada con el corto paso de la vía hizo que el vehículo perdiera tracción trasera antes de cambiar su centro de gravedad, dejándolo suspendido. En general, las pruebas mostraron que la principal limitación del sistema radica en la falta de fricción de las orugas de plástico rígido, un factor que debe abordarse incorporando recubrimientos o elementos de goma para mejorar el agarre.



Figura 16. Prueba de obstáculos (Fuente: Autores)

Para sintetizar el comportamiento general observado durante la fase de evaluación experimental, la Tabla 9 resume los resultados de las principales variables operativas estimadas y medidas.

Tabla 9. Resumen de las métricas de rendimiento del sistema (Fuente: Autores)

Métrica	Resultado obtenido	Condición / Variabilidad
Distribución	~90 m con corriente continua; Límite operativo de 170 m	RSSI promedio – 65,0 ±
		5,0 dBm a 90 m; – 67,5 ± 1,5 dBm a 170 m
Latencia	0,5 ms de decodificación/renderizado medio por fotograma	Medida en la estación, a una distancia fija de 5 m
Pendiente	Pendiente de 30° superada con un 70% de éxito	Limitado por la fricción de la vía de PLA
Autonomía	Vehículo: 3,47 h teórico (consumo máximo medido 1,3 A); Estación: 8,8 h teóricas (consumo medido 440 mA)	Estimado a partir de mediciones de corriente continua

Conclusiones

El desarrollo y la evaluación preliminar de este prototipo de sistema inalámbrico de visión y comunicación de bajo coste sugieren la viabilidad técnica de la arquitectura propuesta para proporcionar un canal de transmisión de datos en aplicaciones de exploración. La arquitectura de hardware distribuida funcionaba funcionalmente bajo condiciones de entorno de prueba, registrando un flujo continuo de telemetría y vídeo hasta una distancia estimada de 90 metros; Estas observaciones iniciales apuntan a la posible utilidad de este sistema electrónico como alternativa de extensión sensorial para la exploración preliminar de zonas de acceso restringido.

Además, la caracterización del subsistema de adquisición visual indica que la resolución QVGA representa una opción de diseño viable para microcontroladores con capacidad de cálculo limitada, equilibrando la demanda de procesamiento y la velocidad de transmisión requerida para la teleoperación. Además, el rendimiento del esquema de iluminación híbrido sugiere una complementariedad funcional entre ambos modos, proporcionando información cromática a corta distancia mediante el destello LED y capacidad de visualización en entornos de poca o nula luz mediante el canal infrarrojo, que define parámetros base para futuras fases de caracterización en escenarios más complejos.

En cuanto al desplazamiento físico, las pruebas en entornos controlados permitieron caracterizar el comportamiento básico de la plataforma. Aunque el chasis basado en modelos de código abierto mostró estabilidad para transportar la electrónica en pendientes moderadas, también mostró limitaciones de tracción y restricciones geométricas inherentes a los materiales rígidos y a las dimensiones originales del diseño. Estas observaciones indican que, aunque la locomoción mecánica cumple su función de prueba de concepto para el sistema electrónico, la integración en vehículos de despliegue real requerirá plataformas motoras más avanzadas adaptadas a condiciones de terreno adversas.

Finalmente, este trabajo propone una alternativa práctica para el diseño de sistemas de transmisión de vídeo y telemetría de bajo coste utilizando componentes comerciales fácilmente accesibles. La naturaleza modular de la arquitectura electrónica presentada permite considerar la posibilidad de incorporar, en etapas posteriores de desarrollo, sensores adicionales para variables físicas o detección de gases. De este modo, el prototipo se presenta como un enfoque inicial para explorar herramientas tecnológicas de bajo coste que puedan complementar las tareas de los equipos de búsqueda y rescate.

Declaración de contribución de autoría de CreditT

Conceptualización - Ideas: Samuel Mora Marín. **Curación de datos:** Samuel Mora Marín. **Análisis formal:** Samuel Mora Marín. **Investigación:** Samuel Mora Marín. **Metodología:** Yadira Aracely Fuentes-Rubio. **Dirección de Proyecto:** Luis Miguel Capacho Valbuena. **Recursos:** Luis Miguel Capacho Valbuena. **Supervisión:** Luis Miguel Capacho Valbuena. **Validación:** Samuel Mora Marín. **Redacción - borrador original - Elaboración:** Luis Miguel Capacho Valbuena, Samuel Mora Marín. **Redacción - revisión y edición -Elaboración:** Luis Miguel Capacho Valbuena, Samuel Mora Marín.

Financiación: no declara.

Conflicto de intereses: no declara. **Aspecto ético:** no declara.

Referencias

1. S.-Y. Chou y D. Chen, "Emergent disaster rescue methods and prevention management," Disaster Prev. Manag., 2013,

<https://doi.org/10.1108/DPM-07-2012-0073>



2. M. Szücs, M. Betus, M. Koncek, M. Sofranko, y A. Sofranková, "Methods for Rescuing People Using Climbing Equipment in Abandoned Mines to Be Carried Out by Rescue Units of the Integrated Rescue System," Sep. 2025
<https://doi.org/10.3390/safety11030083>
3. S. A. Akgun, M. Ghafurian, M. Crowley, y K. Dautenhahn, "Using Affect as a Communication Modality to Improve Human-Robot Communication in Robot-Assisted Search and Rescue Scenarios," IEEE Trans. Affect. Comput., vol. 14, n.º 4, Oct. 2023.
<https://doi.org/10.1109/TAFFC.2022.3221922>
4. A. Kleiner y C. Dornhege, "Real-time localization and elevation mapping within urban search and rescue scenarios," J. Field Robot., vol. 24, Aug.-Sep. 2007.
<https://doi.org/10.1002/rob.20208>
5. H. Surmann et al., "Lessons from robot-assisted disaster response deployments by the German Rescue Robotics Center task force," J. Field Robot., vol. 41, n.º 3, May 2024.
<https://doi.org/10.1002/rob.22275>
6. S. Tadokoro et al., "The World robot summit disaster robotics category - achievements of the 2018 preliminary competition," Advanced Robotics, vol. 33, n.º 17, Sep. 2019,
<https://doi.org/10.1080/01691864.2019.1627244>
7. R. Nakamoto, S. Shimizu, T. Takamura, A. Carfi and F. Mastrogiovanni, "Sidewinder: Snake Robot's Stereo Vision System for Rescue in Collapsed Debris at Disaster Sites," IECON 2022 - 48th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Brussels, Belgium, 2022.
<https://doi.org/10.1109/IECON49645.2022.9969091>
8. Q. Hu, K. Tomoko, K. Sakiko, T. Yu, y Y. Jiang, "The Shifting Paradigms of Disaster Robotics Three Decades of Research," J. Field Robot., vol. 43, no. 4, abr. 2026.
<https://doi.org/10.1002/rob.70223>
9. K. Zhang, J. Wang, H. Zhang, J. Jiang, X. Dou and W. Zhao, "Cable: Design of a Transmission-Type Snake Rescue Robot," 2024 International Symposium on Intelligent Robotics and Systems (ISoIRS), Changsha, China, 2024.
<https://doi.org/10.1109/ISoIRS63136.2024.00029>
10. J. F. López-Prieto et al., "Diseño y prototipado de un robot explorador que soporte las actividades de los bomberos," Memorias, Dic. 2015.
https://metarevistas.org/Record/metarevistapublica_eia_memorias_2_article_825/Similar
11. M. -A. Chung et al., "A Six-wheeled Rescue Robot Dog based on YOLOv7," 2024 International Conference on Consumer Electronics - Taiwan (ICCE-Taiwan), Taichung, Taiwan, 2024.
<https://doi.org/10.1109/ICCE-Taiwan62264.2024.10674600>
12. R. Giri, G. RamKumar and L. Kirthana, "ARES -Advanced Robot for Extraction and Survey," 2021 International Conference on Innovative Computing, Intelligent Communication and Smart Electrical Systems (ICSES), Chennai, India, 2021.
<https://doi.org/10.1109/ICSES52305.2021.9633900>
13. P. Kuruba, A. Arjun, S. Aravind Kumar, A. L. Santosh Kumar and M. Prakash, "Surveillance Rover for Remote Areas," 2018 8th International Conference on Cloud Computing, Data Science & Engineering (Confluence), Noida, India, 2018.





<https://doi.org/10.1109/CONFLUENCE.2018.8442787>

14. P. J. Narayana Raju, V. Gaurav Pampana, V. Pandalaneni, G. Gugapriya and C. Baskar, "Design and implementation of a rescue and surveillance robot using cross-platform application," 2022 International Conference on Inventive Computation Technologies (ICICT), Nepal, 2022.

<https://doi.org/10.1109/ICICT54344.2022.9850646>

15. P. Monica, M. A. Kumar and S. Vemulapalli, "ESP32 CAM-based Car Security System via Telegram Integration," 2023 3rd International Conference on Innovative Mechanisms for Industry Applications (ICIMIA), Bengaluru, India, 2023,

<https://doi.org/10.1109/ICIMIA60377.2023.10425967>

16. S. S. Saha, A. Islam, R. Biswas and S. Siddique, "MATRO: A robust, low-cost rescue robot designed for rapid deployment in developing countries," 2021 18th International Conference on Ubiquitous Robots (UR), Gangneung, Korea (South), 2021,

<https://doi.org/10.1109/UR52253.2021.9494643>

17. N. Shanmugapriya, D. Divya, M. P. Maharajan, M. V, S. Arun and R. Krishnamoorthy, "Revolutionizing Innovation Design and Development of Human Detection and Rescue Robot Based on Internet of Things Association," 2024 5th International Conference on Electronics and Sustainable Communication Systems (ICESC), Coimbatore, India, 2024, doi:

<https://doi.org/10.1109/ICESC60852.2024.10690141>

18. G. E. Castañeda, D. J. Monroy, J. A. Aponte and O. F. Avilés, "Design and construction of a mobile type rover robotics platform," IX Latin American Robotics Symposium and IEEE Colombian Conference on Automatic Control, 2011 IEEE, Bogota, Colombia, 2011.

<https://doi.org/10.1109/LARC.2011.6086796>

19. H. Peng, M. Wu, H. Lu, J. Xiao, C. Cheng and J. Li, "Stability Control for Medical Rescue Robot in Unconstructed Environment," 2020 5th International Conference on Advanced Robotics and Mechatronics (ICARM), Shenzhen, China, 2020.

<https://doi.org/10.1109/ICARM49381.2020.9195272>

20. R. González, F. Rodríguez, y J. L. Guzmán, "Robots Móviles con Orugas Historia, Modelado, Localización y Control", Rev. iberoam. autom. inform. ind., vol. 12, n.º 1, pp. 3-12, ene. 2015.

<https://doi.org/10.1016/j.riai.2014.11.001>

21. Nahueltaibo. Rover Tracks v2 [Internet]. Thingiverse. [Consultado 5 abril 2026]. Disponible en:

<https://www.thingiverse.com/thing:3112734>

22. BlackoutConcepts. ZeroBot Pro Tank [Internet]. Thingiverse. [Consultado 5 abril 2026]. Disponible en:

<https://www.thingiverse.com/thing:4041063>

23. MakerVerse Designs. Smartphone mount for PS4 controller (DUALSHOCK 4) [Internet]. MakerWorld. [Consultado 5 abril 2026]. Disponible en:

<https://makerworld.com/es/models/218736>