



**UNIVERSIDAD
DEL AZUAY**

**FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**Diseño e Implementación de un Sistema de Teleoperación para Robots Móviles en
Escenarios de Emergencia**

Trabajo de graduación previo a la obtención del título de:

INGENIERO ELECTRÓNICO

Autores:

**Ayavaca Pintado Erick Alexander
Caguana Quizhpi Oscar Joel**

Director:

Ing. Daniel Iturralde

CUENCA, ECUADOR

2026

DEDICATORIA

Dedico esta tesis en primer lugar y de manera muy especial, a Dios. Por ser mi mayor fuente de inspiración, por iluminar mi camino en los momentos de incertidumbre y por darme la fortaleza para continuar en este proceso hasta alcanzar uno de mis anhelos personales y profesionales más profundos. A mis padres, Nancy Pintado y Patricio Ayavaca, quienes son el pilar fundamental de mi vida. Por su amor incondicional, su incansable trabajo y cada uno de los sacrificios que han hecho a lo largo de todos estos años. Gracias a sus enseñanzas y a su constante ejemplo de perseverancia, he logrado llegar hasta este punto y convertirme en la persona que soy hoy. Es mi mayor orgullo y un verdadero privilegio ser su hijo, sin duda, son los mejores padres que la vida me pudo dar. A mi pequeña hermana Antonella, por ser una luz de alegría y una motivación constante en mis días más agotadores. A mi hermano Moisés, por ser un compañero incondicional, por estar siempre presente, acompañándome en cada paso y por brindarme ese apoyo moral y aliento que tantas veces necesité a lo largo de esta importante etapa de mi vida. A mi familia entera, que siempre ha estado a mi lado durante todo el transcurso de este desafío. Este logro es también suyo y va dedicado a todos ustedes, que nunca me dejaron solo, que supieron entender mis ausencias y que me sostuvieron con su confianza. Finalmente, de manera muy especial, agradezco a quienes confiaron en mí, me abrieron las puertas y compartieron generosamente sus conocimientos para mi formación.

Ayavaca Pintado Erick Alexander

DEDICATORIA

A Dios, por ser la luz en mi camino, darme la vida y la fortaleza necesaria para no rendirme frente a las adversidades. A María Auxiliadora y San Juan Bosco, por su intercesión y enseñarme que con fe y trabajo honesto todas las metas son posibles.

A mi padre, Nelson Caguana. Aunque la distancia nos separó, jamás sentí tu ausencia. Me enseñaste que el verdadero amor de un padre trasciende cualquier frontera. Gracias por tu comunicación constante, por estar presente en mis momentos de mayor dificultad, por escucharme y darme el aliento necesario para no rendirme ante las adversidades. Este título es también tuyo, en honor a tu sacrificio y a tu fe inquebrantable en mi carrera. A mi madre, Rita Quizhpi. Por demostrarme cada día lo que significa el verdadero amor a través de tu cuidado y tu constante preocupación por mi bienestar frente a las exigencias de mis estudios. Tu cariño inagotable ha sido mi mayor refugio, y tus palabras, la fuerza para nunca conformarme. A mis hermanos, Andrés, William y Darwin, y mis tíos y primos. Crecer y compartir la vida con ustedes es una de mis mayores bendiciones. Gracias por creer en mi capacidad incluso antes que yo. Son los mejores hermanos. Sinceramente, no sería la persona que soy hoy sin la presencia fundamental de mi gran amigo, el P. Juan Francisco Flores sdb. Gracias por ser un salesiano ejemplar, por apoyarme siempre en todo lo que estuvo a tu alcance y, sobre todo, por acompañarme incondicionalmente con tus oraciones y tu buen ejemplo. Para mi futura esposa, Sthefany. Eres el centro de mi vida y la mejor compañera que Dios pudo darme. Gracias por tu apoyo sin fin, por tu cariño incondicional y por exigirme siempre mi mejor versión, no solo como profesional, sino como ser humano. Tu amor es mi fuerza fundamental. Finalmente, para mis suegros. Agradezco de todo corazón la forma en que me acompañan siempre y queriéndome como a su propio hijo.

Caguana Quizhpi Oscar Joel

AGRADECIMIENTOS

Primero y ante todo, expresamos nuestro más sincero agradecimiento a la Universidad del Azuay. Más que un espacio académico, la institución nos brindó el entorno ideal para nuestra formación, poniéndonos al alcance laboratorios con tecnología de vanguardia que nos permitieron llevar el aprendizaje teórico a una práctica rigurosa y a cabalidad. Gracias por darnos las herramientas para materializar este proyecto con estándares de la actualidad. Hacemos extensiva nuestra más profunda gratitud a nuestro director de tesis, el Ing. Daniel Iturralde, Ph.D. Su apoyo a lo largo de este proceso trascendió con creces su labor docente. No solo nos facilitó los equipos y la guía técnica para sacar adelante este trabajo, sino que nos brindó consejos invaluable que marcaron nuestra visión. Gracias por esa preocupación genuina, por ir más allá de sus obligaciones y por impulsarnos constantemente a ser, no solo profesionales de excelencia, sino también mejores seres humanos. A nuestros profesores, quienes durante estos años compartieron generosamente su experiencia y rigor. Sus enseñanzas en cada clase cimentaron las bases de nuestro criterio profesional y de nuestra vocación. Finalmente, queremos agradecer a nuestros compañeros de carrera. Transitamos este camino en un ambiente de genuina camaradería, donde siempre primó la colaboración y el apoyo mutuo por encima de cualquier individualismo. Gracias por cada momento en el que nos tendimos la mano; esa solidaridad incondicional hizo que los retos universitarios fueran mucho más llevaderos y nos deja el mejor concepto de lo que significa el verdadero compañerismo.

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE TELEOPERACIÓN PARA ROBOTS MÓVILES EN ESCENARIOS DE EMERGENCIA

En situaciones de emergencia después de una catástrofe, el acceso al lugar de los daños expone al personal a graves peligros. Por lo tanto, este proyecto presenta el diseño e implementación de un sistema de teleoperación para manejar un robot móvil. La metodología se basa en una arquitectura de red independiente e inalámbrica. El vehículo funciona controlado por una computadora de placa única, estableciendo una red privada usando Wi-Fi Direct para operar sin depender de infraestructura externa. Para garantizar un control absoluto, la comunicación separa el tráfico de datos en dos canales. El protocolo TCP se utiliza para enviar los comandos de movimiento desde un control físico sin perder información, y el protocolo UDP para transmitir video continuo hacia una interfaz gráfica desarrollada en Python. Los resultados de las pruebas demuestran que esta configuración técnica logra un manejo fluido, una gran precisión visual, baja latencia y una larga autonomía energética.

Palabras clave: Teleoperación, Situaciones de Emergencia, Robot Móvil, Wi-Fi Direct, Protocolos TCP/UDP.

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A TELEOPERATION SYSTEM FOR MOBILE ROBOTS IN EMERGENCY SCENARIOS

In emergency situations after a catastrophe, the access to the place of the damages exposes the personnel to grave dangers. Therefore, this project presents the design and implementation of a teleoperation system to handle a mobile robot. The methodology is based on an independent and wireless network architecture. The vehicle works controlled by a single-board computer, establishing a private network using Wi-Fi Direct to operate without depending on external infrastructure. To guarantee absolute control, the communication separates the data traffic into two channels. The TCP protocol is used to send the movement commands from a physical control without losing information, and the UDP protocol to transmit continuous video towards a graphical interface developed in Python. The results of the tests demonstrate that this technical configuration achieves a fluid handling, a great visual precision, low latency and a long energy autonomy.

Keywords: Teleoperation, Emergency Situations, Mobile Robot, Wi-Fi Direct, TCP/UDP Protocols.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Dedicatoria	i
Dedicatoria	ii
Agradecimientos	iii
Resumen	iv
Abstract	v
Índice de Contenidos	vi
Índice de Figuras	vii
Índice de Tablas	viii
I Introducción	1
II Metodología	2
II-A Estación de Control: Cliente	3
II-B Canal de Comunicación: Enlace Wi-Fi Direct	3
a Configuración de Red y Enrutamiento Estático	4
b Arquitectura de Protocolos de Transporte	4
II-C Hardware y Sistema Robótico: Servidor	4
III Resultados	5
III-A Alcance, Latencia y Rendimiento de la Red	5
III-B Autonomía y Consumo de Batería	6
III-C Evaluación de la Experiencia de Usuario y Usabilidad	6
a Resultados Cuantitativos	6
b Análisis Cualitativo	7
IV Conclusiones	7
Referencias	8

ÍNDICE DE FIGURAS

1	Estadística Nacional	2
2	Diagrama de bloques de la teleoperación del robot móvil	3
3	Diagrama de bloques de la Estación de Control: Cliente	3
4	Direccionamiento de Canal de Comunicación	4
5	Esquema del Sistema Robótico del Servidor	4
6	Porcentaje de paquetes recibidos frente a paquetes enviados.	5
7	Tiempos de respuesta del sistema en función de la carga de video.	6
8	Curva de descarga de batería según el tipo de operación.	6
9	Comparativa de tiempos de recorrido entre los diez sujetos evaluados.	7
10	Interfaz visual de teleoperación.	7
1	Esquema Eléctrico del Robot Móvil	9
2	Diagrama de Flujo de Estación de Control	10
3	Diagrama de Flujo del Robot Móvil	11

ÍNDICE DE TABLAS

I	Rendimiento de red: Paquetes recibidos y latencia según la resolución de video y distancia.	5
II	Porcentaje de descarga de batería en diferentes escenarios y tiempos de uso.	6
III	Tiempos de recorrido y promedio por sujeto de prueba.	7
IV	Promedios de evaluación de usabilidad y porcentaje de aceptación.	7

Diseño e Implementación de un Sistema de Teleoperación para Robots Móviles en Escenarios de Emergencia

Ayavaca Pintado Erick Alexander
Ingeniería Electrónica
Universidad del Azuay
Cuenca, Ecuador
erick.ayavaca@es.uazuay.edu.ec

Caguana Quizhpi Oscar Joel
Ingeniería Electrónica
Universidad del Azuay
Cuenca, Ecuador
oscar.caguana@es.uazuay.edu.ec

Resumen—En situaciones de emergencia después de una catástrofe, el acceso al lugar de los daños expone al personal a graves peligros. Por lo tanto, este proyecto presenta el diseño e implementación de un sistema de teleoperación para manejar un robot móvil. La metodología se basa en una arquitectura de red independiente e inalámbrica. El vehículo funciona controlado por una computadora de placa única, estableciendo una red privada usando Wi-Fi Direct para operar sin depender de infraestructura externa. Para garantizar un control absoluto, la comunicación separa el tráfico de datos en dos canales. El protocolo TCP se utiliza para enviar los comandos de movimiento desde un control físico sin perder información, y el protocolo UDP para transmitir video continuo hacia una interfaz gráfica desarrollada en Python. Los resultados de las pruebas demuestran que esta configuración técnica logra un manejo fluido, una gran precisión visual, baja latencia y una larga autonomía energética.

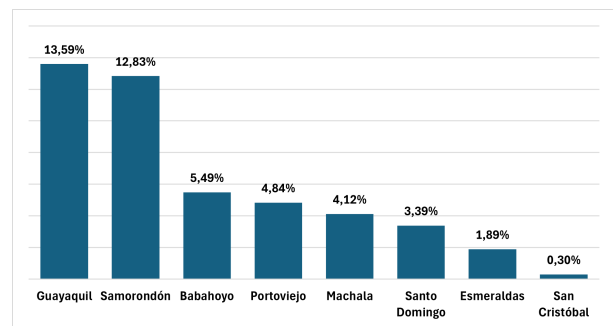
Palabras Clave—Teleoperación, Situaciones de Emergencia, Robot Móvil, Wi-Fi Direct, Protocolos TCP/UDP.

I. INTRODUCCIÓN

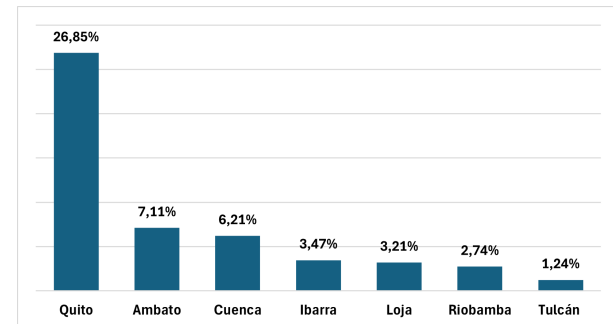
Los desastres naturales y las emergencias industriales representan un desafío creciente para la protección de vidas y bienes. A nivel global, se estima que cada año los eventos catastróficos afectan a millones de personas; por ejemplo, según [1], desastres como terremotos, inundaciones o derrumbes generan un alto riesgo de mortalidad y pérdidas económicas significativas.

En el año 2024, como se muestra en la Fig. 1 el ECU 911 coordinó la atención de 3.357.900 emergencias a escala nacional. La mayor concentración se registró en la Sierra (50.83%), seguida de la Costa-Galápagos (46,45 %) y la Amazonía (2,71%). Quito y Guayaquil fueron las ciudades con más incidentes reportados. Al analizar los tipos de emergencias, destaca que la Seguridad Ciudadana representó el 67,72% de los casos, mientras que la Gestión Sanitaria figura con 11,46%, Tránsito y Movilidad alcanzó el 11,14% , Servicios Municipales posee 5.76% y Servicio Militar 1.27%.

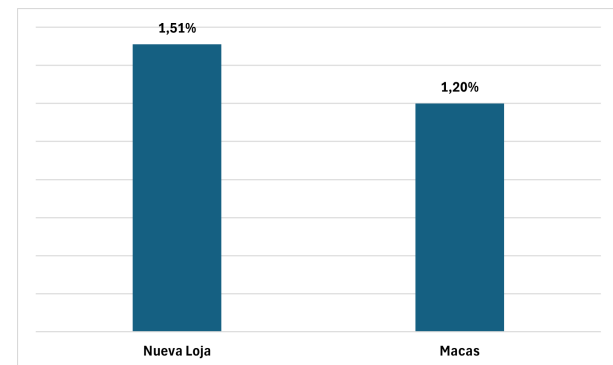
Sin embargo, servicios críticos como la Gestión de Sinistros (1,81 %), y la Gestión de Riesgos (0,83 %) evidencian la necesidad de fortalecer herramientas tecnológicas que apoyen la toma de decisiones rápidas en contextos de alta peligrosidad y acceso limitado para el personal humano [2].



(a)



(b)



(c)

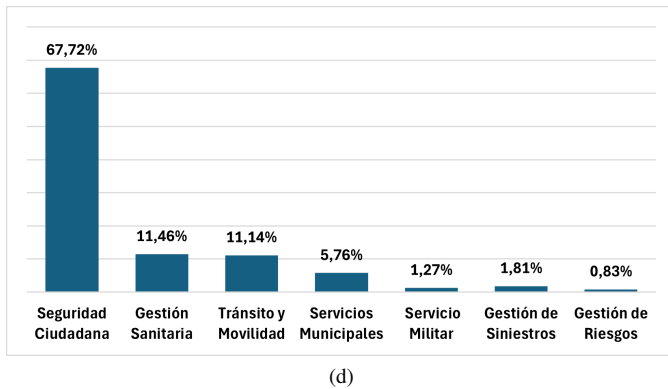


Fig. 1: Estadística Nacional

Investigaciones recientes destacan la integración de interfaces inmersivas, realidad aumentada (RA), realidad virtual (RV) y marcos de comunicación avanzados para mejorar la conciencia situacional, la eficiencia del operador y la precisión en la ejecución de tareas.

En [3] se propone un sistema de teleoperación basado en realidad aumentada (RA) que utiliza una cámara de 360° montada en un robot móvil. El sistema permite a los operadores observar todo el entorno mediante un dispositivo de visualización personal (HMD - Head-Mounted Display) que sitúa una pantalla óptica frente a ambos ojos para mostrar imágenes, datos o realidad virtual/aumentada directamente en el campo de visión del usuario, ofreciendo una experiencia inmersiva eliminando los puntos ciegos. Los elementos de RA generados a partir de datos de sensores se superponen a la escena visual para mejorar las correcciones de rutas, proporcionando un soporte crítico para la navegación en entornos complejos. Sin embargo, los autores identificaron una latencia significativa y pérdida de fotogramas debido al gran volumen de datos, lo que subraya el desafío de la transmisión en tiempo real para la teleoperación remota.

Ampliando este concepto, [4] ha desarrollado un sistema de conducción remota de vehículos diseñado para entornos de emergencia o difíciles. El sistema utiliza un enfoque de comunicación de doble canal: una línea principal para datos de gran volumen como video y audio, y una sub-línea para señales de control y emergencia de baja latencia. Al superponer objetos 3D generados a partir de datos de sensores sobre imágenes retrasadas, el operador puede controlar de manera segura el vehículo remoto a pesar de los retrasos inducidos por la red. Este enfoque resalta la importancia de mantener el control del operador y la conciencia situacional en condiciones de comunicación imperfecta, lo cual es esencial para robots móviles desplegados en emergencias.

En [5] se expone un sistema de teleoperación inmersiva basado en RV que permite la exploración en vivo de entornos mediante robots móviles. Los datos RGB-D (*Red, Green, Blue, Depth*) capturados por el robot se reconstruyen en un modelo 3D mediante localización y mapeo simultáneos (SLAM) y se transmiten a múltiples clientes remotos. Los usuarios pueden

navegar por la escena de manera independiente de la posición de la cámara del robot, logrando un mayor nivel de conciencia situacional que los enfoques tradicionales de video en primera persona. Este sistema ha sido validado en escenarios de gestión de desastres e inspección industrial, destacando cómo las interfaces inmersivas de RV pueden mejorar el rendimiento del operador en entornos desafiantes y potencialmente peligrosos.

En el ámbito de la teleoperación basada en web, [6] propone un sistema de robot en red para visitas guiadas en línea, con una interfaz de control duplicada compartida entre el operador y un guía remoto. La interfaz permite monitorear las acciones en tiempo real y coordinar el control, evitando comandos conflictivos y mejorando la experiencia del usuario. Aunque se diseñó principalmente para aplicaciones educativas y de servicios, la metodología demuestra el potencial de la teleoperación distribuida de robots móviles, que podría adaptarse a entornos industriales o de emergencia donde el control colaborativo y la conciencia situacional compartida son críticos.

En [7] se ha explorado la interacción humano-robot en misiones de emergencia y exploración, comparando interfaces basadas en escritorio y en asistente personal digital (PDA) para la teleoperación de robots móviles. Sus experimentos evaluaron la conciencia situacional del operador y establecieron políticas para la transferencia de control entre operadores. El estudio enfatiza el impacto del diseño de la interfaz en la teleoperación efectiva, especialmente en escenarios de alto riesgo como búsqueda y rescate. Los hallazgos indican que la movilidad del operador, el tipo de dispositivo y las políticas de control influyen significativamente en el rendimiento, proporcionando consideraciones de diseño para robots industriales móviles con capacidad de operación remota.

En [8] sus autores han abordado la teleoperación en entornos con múltiples robots, enfocándose en estrategias de toma de decisiones y comunicación cuando un solo operador supervisa varios robots semiautónomos. El concepto de “regiones especiales” identifica áreas peligrosas que requieren intervención. Al optimizar la comunicación y planificar las intervenciones del operador, el enfoque minimiza riesgos y asegura la realización efectiva de tareas en escenarios distribuidos y de alto riesgo. Su trabajo destaca la creciente importancia de los sistemas de asistencia al operador y soporte para la toma de decisiones en el manejo de despliegues complejos de robots móviles, especialmente en respuesta a emergencias.

II. METODOLOGÍA

Para ilustrar la propuesta planteada, en la Fig. 2 se presenta el diagrama de bloques de la arquitectura general del sistema de teleoperación. En este se describe el rol del cliente/operador mediante una interfaz gráfica de usuario (GUI), el módulo de transmisión de datos que gestiona video y comandos de control, y el canal de comunicación que permite garantizar la continuidad del enlace.

Para el desarrollo de este sistema de teleoperación, se diseñó una arquitectura distribuida que permite el control en tiempo real de un robot móvil. La metodología se dividió en tres

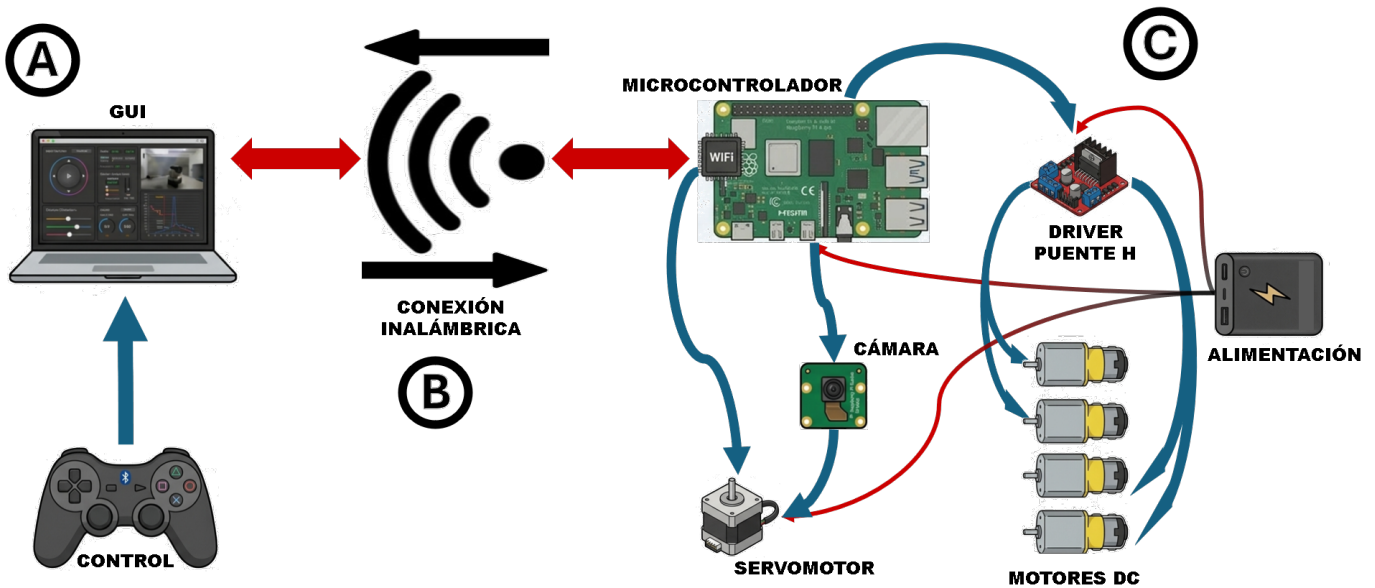


Fig. 2: Diagrama de bloques de la teleoperación del robot móvil

secciones principales de la estructura del sistema: el servidor (el robot), el canal de comunicación (red inalámbrica) y el cliente (estación de control).

A. Estación de Control: Cliente

La estación de control consiste en una aplicación desarrollada en Python sobre Windows, diseñada para ser intuitiva y rápida de operar, dicha aplicación se encuentra conectada a un mando inalámbrico que facilita el manejo y control del sistema a distancia. La sección A, Estación de Control: Cliente, se describe en la Fig 3.

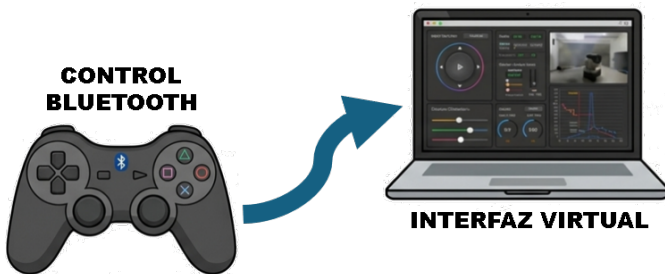


Fig. 3: Diagrama de bloques de la Estación de Control: Cliente

La GUI se divide en dos secciones principales: un área de visualización, donde se proyecta el flujo de video en tiempo real desde el robot móvil, y un panel de control, que refleja el estado y movimiento de los joysticks y botones accionados.

La configuración del sistema de comunicación y de la GUI se describe de manera detallada en los apartados que se presentan a continuación.

- **Interfaz Gráfica:** Se utilizó la librería *customtkinter* para crear una interfaz visual moderna. El programa muestra dos radares virtuales: uno para el movimiento del

vehículo y otro dedicado exclusivamente al control del ángulo de la cámara.

- **Dispositivo de Entrada:** En lugar de usar el teclado, el control se realiza mediante un *gamepad* conectado por Bluetooth. Gracias a la librería *pygame*, el software captura los movimientos de la palanca analógica y de los botones en tiempo real.
- **Procesamiento de Señal:** Para mejorar la precisión, se implementó una "zona muerta" que equivale a un 10% del rango máximo del movimiento de la palanca en el código. Esto evita que el robot se mueva por error si las palancas del mando no regresan exactamente al centro. La interfaz actualiza la posición de los controles cada 15 ms, permitiendo que el operador vea exactamente qué comandos está enviando antes de que se ejecuten físicamente en el robot.
- **Diagrama de Flujo de la Estación de Control:** El programa de la PC inicia configurando la interfaz gráfica y la red para luego lanzar tareas concurrentes. Por un lado, mantiene un ciclo constante encargado de recibir, procesar y guardar las imágenes de video entrantes; pero también, su ciclo principal evalúa las acciones del usuario en el mando para generar y enviar las órdenes de movimiento al robot, actualizando la pantalla continuamente hasta que se decide finalizar el programa. En el Anexo 2 se ilustra el diagrama de flujo correspondiente al cliente o estación de control.

B. Canal de Comunicación: Enlace Wi-Fi Direct

Para que el sistema sea útil en escenarios de emergencia donde no hay infraestructura de red, se configuró la Raspberry Pi 4 como un Punto de Acceso (Access Point). Esto genera una red inalámbrica privada a la que la computadora de control se conecta directamente.

Esta configuración de Wi-Fi Direct elimina la necesidad de routers externos y ayuda a reducir la latencia en la transmisión de datos. El objetivo es que el tiempo transcurrido desde que el operador mueve el control hasta que el robot reacciona sea mínimo, garantizando una operación fluida y segura en diversos entornos.

1) *Configuración de Red y Enrutamiento Estático*: Para maximizar la seguridad y la estabilidad del enlace, se implementó un esquema de enrutamiento estático bajo la subred 192.168.1.0/30. El uso de una máscara de subred de 30 bits limita deliberadamente el número de direcciones IP disponibles a solo dos direcciones útiles:

- Servidor (Raspberry Pi 4): 192.168.1.1, actuando como el gateway del sistema.
- Cliente (PC de Control): 192.168.1.2.

Esta restricción asegura que únicamente la computadora de control pueda conectarse al robot, evitando interferencias o accesos no autorizados de otros dispositivos durante la misión.

2) *Arquitectura de Protocolos de Transporte*: Como se observa en la Fig. 4, la comunicación se divide en los canales especializados según la criticidad y el tipo de dato:

a. **Canal de Control (TCP - Puerto 5005 y 5006)** Estos canales se encarga de los comandos de movimiento (motores de tracción - 5005 y servomotor - 5006). Se utiliza el protocolo TCP (Transmisión Control Protocol) debido a su naturaleza orientada a la conexión, lo que garantiza que cada comando llegue íntegro y en el orden correcto.

- En el Cliente: Un ciclo de 30 Hz captura las pulsaciones del operador. Al detectar un cambio, el comando (ej. "ADELANTE") se envía de forma garantizada.
- En el Servidor: Un hilo dedicado escucha el puerto 5005 y otro el puerto 5006, y traduce los comandos en señales eléctricas hacia los pines GPIO. Como medida de seguridad (Failsafe), si la conexión TCP se interrumpe, el robot detiene automáticamente todos sus motores.

b. **Canal de Video (UDP - Puerto 5000)** Para el flujo visual de la cámara (Raspberry Pi Camera Module 3 Wide), se utiliza el protocolo UDP (User Datagram Protocol). A diferencia de TCP, UDP prioriza la velocidad sobre la confirmación de entrega, lo cual es vital para el telecontrol en tiempo real.

- Transmisión: La Raspberry Pi captura, redimensiona y comprime los fotogramas en formato JPEG, "disparándolos" a la red sin esperar confirmaciones. Esto minimiza el retraso visual (lag).
- Recepción: La PC recibe estos paquetes, los decodifica y actualiza la interfaz gráfica instantáneamente, permitiendo al operador reaccionar a los obstáculos en tiempo real.



Fig. 4: Direccionamiento de Canal de Comunicación

C. Hardware y Sistema Robótico: Servidor

El componente central del robot es una Raspberry Pi 4, la cual se encarga de procesar los comandos y gestionar los actuadores. El hardware y los actuadores de se encuentra descritos en la Fig 5.

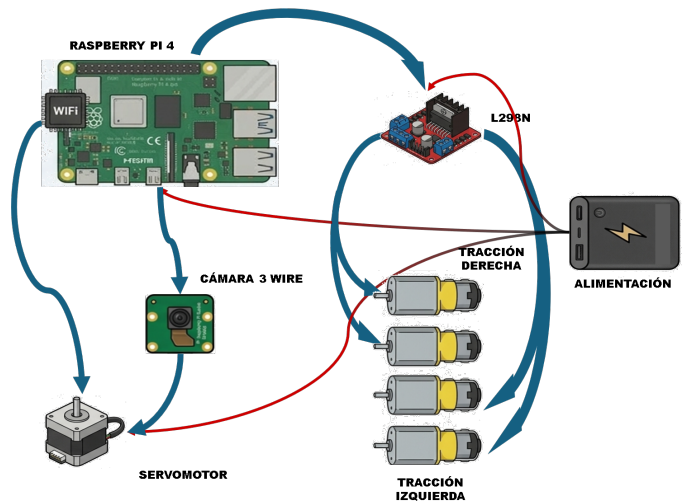


Fig. 5: Esquema del Sistema Robótico del Servidor

El diseño del esquema eléctrico y la planificación de las conexiones se realizaron utilizando el software *Altium Designer*, lo que permitió asegurar una distribución de señales limpia y eficiente descrito en el Anexo 1.

- Sistema de Tracción: Se utiliza un chasis de cuatro motores de corriente continua controlados por un módulo Puente H L298N. Para optimizar el hardware, los motores se conectaron en paralelo: las salidas OUT1 y OUT2 del driver manejan el par izquierdo, mientras que OUT3 y OUT4 manejan el par derecho.
- Alimentación General: Para evitar reinicios de la Raspberry Pi por el ruido eléctrico o caídas de tensión de los motores, se implementó un sistema de energía donde la Raspberry Pi y el controlador o driver funciona con un sistema de alimentación por medio de una batería de polímero de litio de tres celdas de 11.4V y tres reguladores de voltaje independientes, que permite cargas rápidas y transferencia de alta potencia, entregando una alimentación estable de 5V y 9V a 3A y 2A asegurando la estabilidad de potencia.
- Lógica de Movimiento: El control se programó en Python usando la librería *gpiozero*. Se definieron los pines GPIO

para el par de motores izquierdo y derecho. El sistema permite un giro diferencial tipo "tanque", donde el robot puede rotar sobre su propio eje e igualmente un modo combinado, donde el robot gira hacia un lado mientras avanza o retrocede. Además, se ha previsto la integración de un módulo cámara Raspberry Pi 3 Wide, sobre un servomotor, lo que permitirá un mayor espectro de visibilidad desde el cliente con un control de movimiento giratorio preciso.

- Diagrama de Flujo del Robot Móvil: El programa del robot arranca inicializando sus componentes físicos y de red para desplegar sus propias tareas de fondo. Una de estas tareas se dedica exclusivamente a escuchar y procesar las órdenes de la PC para traducirlas en la activación de los motores, contando con un mecanismo de seguridad que detiene el vehículo si se pierde la comunicación. Al mismo tiempo, otra tarea paralela captura ininterrumpidamente el video de la cámara, ajustando y comprimiendo cada imagen para enviarla de vuelta a la PC con la mayor velocidad posible. De esta forma, se establece una transición constante donde el control fluye hacia el vehículo y el video retorna al usuario, comprendiendo un proceso continuo cuya lógicas se encuentra explicado en el Anexo 3.

La arquitectura general del sistema robótico, en la interacción bidireccional entre la estación de mando y el vehículo a través de una red inalámbrica. El proceso se inicia en la computadora central, donde una interfaz gráfica de usuario procesa las instrucciones dictadas por un mando de control físico para enviarlas de forma remota hacia el microcontrolador principal del vehículo, una Raspberry Pi.

Al recibir estos comandos, la información es procesada y la distribuye hacia los diferentes actuadores físicos mediante señales de control. Se comunica con un driver puente H para accionar los motores DC encargados de la tracción del vehículo, y con un servomotor destinado a mover la cámara para poder inspeccionar el lugar. Simultáneamente, esta cámara captura el entorno en tiempo real y transmite el video de regreso hacia la interfaz en la computadora, permitiendo al usuario ver por dónde navega el robot.

Finalmente, las etapas de potencia, se encuentran energizadas de manera unificada por una fuente de alimentación portátil, la cual garantiza la autonomía eléctrica y el correcto funcionamiento continuo de todo el sistema en conjunto.

III. RESULTADOS

A. Alcance, Latencia y Rendimiento de la Red

La seguridad en la teleoperación depende directamente de que las órdenes de control y el flujo de video lleguen sin interrupciones. Para validar este aspecto, se evaluó la eficiencia de la conexión Wi-Fi Direct mediante el envío de bloques de 100 paquetes de datos a distancias de 0, 6, 12 y 15 metros, probando diversas calidades de imagen. Para la medición de los paquetes y del tiempo de respuesta detallados en la Tabla I.

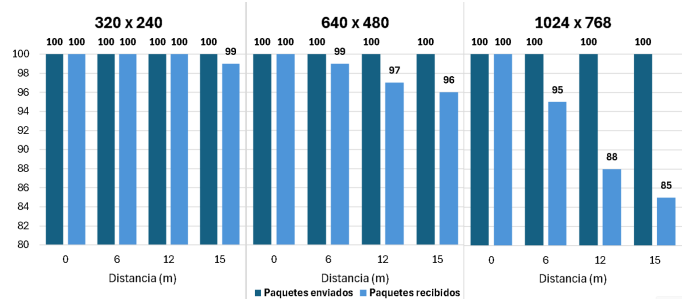


Fig. 6: Porcentaje de paquetes recibidos frente a paquetes enviados.

TABLA I: Rendimiento de red: Paquetes recibidos y latencia según la resolución de video y distancia.

Resolución	Distancia (m)	Paquetes Enviados	Paquetes Recibidos	Latencia Media (ms)
320 x 240	0	100	100	4
	6	100	100	9
	12	100	100	19
	15	100	99	25
640 x 480	0	100	100	10
	6	100	99	22
	12	100	97	111
	15	100	96	137
1024 x 768	0	100	100	10
	6	100	95	127
	12	100	88	200
	15	100	85	305

Como ilustra en las barras de la Fig. 6, el sistema alcanzó una fiabilidad del 100% en la resolución de 320 x 240 hasta los 12 metros de distancia. Incluso al llegar al límite de los 15 metros, la tasa de éxito en la recepción de paquetes fue del 99%, con un tiempo de respuesta de apenas 25 milisegundos. Si bien esta fluidez es ideal para la red, es importante destacar que a esta baja resolución la imagen no se muestra con total claridad, lo que puede dificultar la identificación de detalles pequeños en el entorno durante la conducción.

A medida que se aumenta la resolución, la calidad visual y la nitidez de la cámara mejoran de manera notable, otorgando al operador una visión mucho más clara del entorno. Sin embargo, esto conlleva un aumento en la carga de datos. Al incrementar la exigencia a una resolución de 640 x 480, la Tabla I muestra que la red mantuvo una eficiencia superior al 96% en todo el rango de prueba. El tiempo de respuesta, visible en la línea de crecimiento de la Fig. 7, aumentó de manera gradual hasta alcanzar los 137 milisegundos en el punto más alejado a 15 metros, lo cual sigue siendo manejable para mantener un control preciso.

Por el contrario, al buscar la máxima claridad gráfica en la resolución de 1024 x 768, los datos reflejan una saturación evidente. La eficiencia comenzó a disminuir de forma temprana, recibiendo 95 paquetes a los 6 metros y bajando a 88

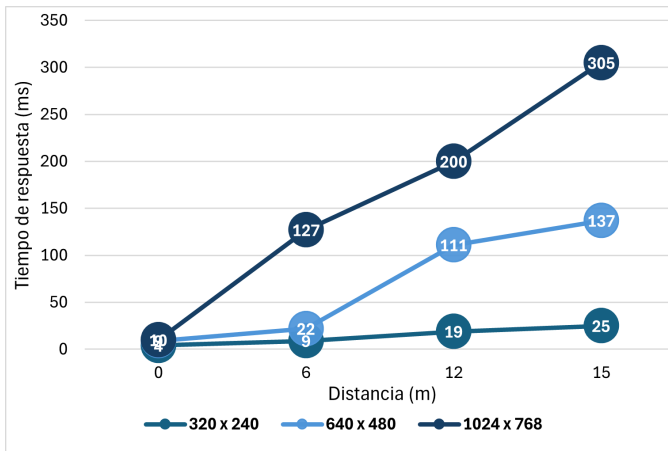


Fig. 7: Tiempos de respuesta del sistema en función de la carga de video.

paquetes a los 12 metros. Al alcanzar los 15 metros, el sistema solo logró recibir 85 paquetes, que refleja un 85% de éxito, generando un retraso crítico de 305 milisegundos que degrada significativamente la experiencia de manejo al presentar un video entrecortado.

Finalmente, se realizó una prueba en alta resolución Full HD de 1920 x 1080. En este escenario, el sistema registró una eficiencia del 0%, dado que el ancho de banda resultó ser insuficiente para transmitir video o comandos de control. Estos resultados demuestran que existe una relación directa entre la calidad visual y el rendimiento de la red.

B. Autonomía y Consumo de Batería

El análisis de autonomía permite determinar la viabilidad operativa del robot en misiones prolongadas. Para ello, se monitoreó el nivel de descarga durante 30 minutos bajo tres modalidades de uso distintas. Los datos registrados en la Tabla II y graficados en la Fig. 8, confirman una administración de energía altamente eficiente en todos los escenarios.

TABLA II: Porcentaje de descarga de batería en diferentes escenarios y tiempos de uso.

Tipo de uso	Tiempo de uso (min)	Porcentaje de carga (%)
Reposo + Video	0	100
	10	97
	20	94
	30	91
Movimiento	0	100
	10	96
	20	91
	30	87
Movimiento + Video	0	100
	10	94
	20	88
	30	82

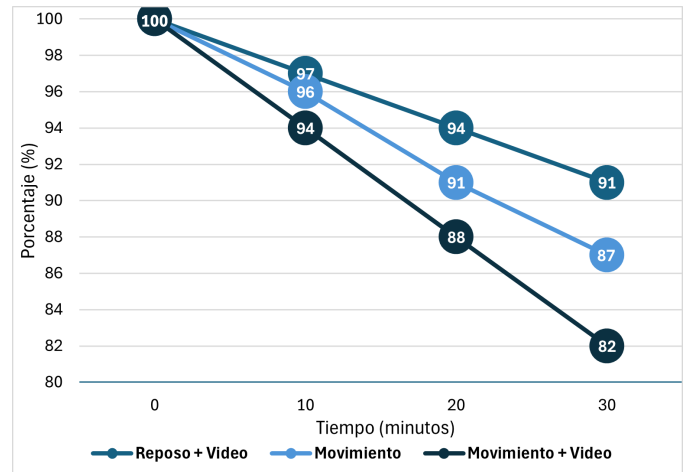


Fig. 8: Curva de descarga de batería según el tipo de operación.

Bajo condiciones de trabajo riguroso, combinando movimiento constante por parte de los motores y transmisión de video simultánea, el sistema consumió un 18% de su carga total en media hora bajando del 100% al 82%. Esto permite proyectar una autonomía operativa total de 1 hora y 20 minutos de uso ininterrumpido.

Al aislar las funciones, los consumos disminuyen proporcionalmente. Como se evidencia en la Tabla II, en el escenario intermedio donde el robot se mueve por el entorno pero mantiene la cámara apagada, el desgaste energético fue del 13% en los 30 minutos establecidos cayendo al 87% de capacidad. En contraste, cuando el robot permanece inmóvil y se utiliza únicamente como estación de vigilancia enviando video, la eficiencia energética alcanza su punto máximo consumiendo solo un 9% de batería. Esta tasa de descarga proyecta una duración superior a las 2 horas y 40 minutos continuas, lo que posiciona al prototipo como una herramienta excepcionalmente útil para tareas de monitoreo extendido.

C. Evaluación de la Experiencia de Usuario y Usabilidad

La facilidad de manejo es un pilar fundamental del proyecto. Para evaluarla, se contó con la participación de diez sujetos de prueba, divididos equitativamente entre usuarios con experiencia previa en controles remotos y usuarios principiantes. El objetivo fue medir el tiempo exacto que tardaba cada persona en completar un circuito establecido y, posteriormente, recopilar su nivel de satisfacción con el sistema.

Como se observa detalladamente en la Tabla III y en el diagrama de barras de la Fig. 9, el tiempo promedio general para finalizar el recorrido fue de 52,5 segundos. Es importante resaltar los extremos de estas pruebas. El tiempo mínimo registrado fue de 17 segundos, mientras que el tiempo máximo fue de 85 segundos.

1) *Resultados Cuantitativos:* Los resultados numéricos, plasmados en la Tabla IV. El parámetro mejor valorado fue el tiempo de respuesta del sistema, el cual obtuvo un promedio de 4,6 puntos sobre 5. Esto se traduce en un índice de aceptación

TABLA III: Tiempos de recorrido y promedio por sujeto de prueba.

Sujeto de Prueba	Tiempo de recorrido (s)	Promedio de recorrido (s)
Sujeto 1	24	52,5
Sujeto 2	35	52,5
Sujeto 3	17	52,5
Sujeto 4	59	52,5
Sujeto 5	31	52,5
Sujeto 6	50	52,5
Sujeto 7	74	52,5
Sujeto 8	71	52,5
Sujeto 9	79	52,5
Sujeto 10	85	52,5

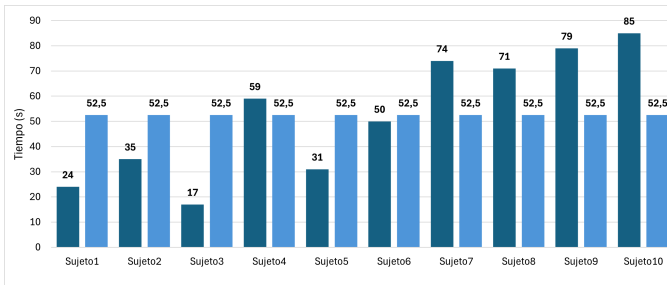


Fig. 9: Comparativa de tiempos de recorrido entre los diez sujetos evaluados.

del 92%, validando técnicamente que los comandos enviados por la red Wi-Fi Direct se ejecutan casi al instante.

Los siguientes tres parámetros evaluados en la Tabla IV fueron la facilidad de uso, la calidad del video transmitido y la satisfacción general. Estos tres factores lograron un promedio idéntico de 4,4 puntos, alcanzando un nivel de eficiencia del 88%. Finalmente, la precisión del control, que suele ser el aspecto más complejo de dominar debido a la sensibilidad de la tracción, logró una destacable calificación de 4,2 puntos equivalentes a un 84% de aprobación.

TABLA IV: Promedios de evaluación de usabilidad y porcentaje de aceptación.

Parámetro Evaluado	Promedio (1-5)	Nivel de Aceptación
Tiempo de respuesta	4,6	92%
Facilidad de uso	4,4	88%
Calidad de video	4,4	88%
Satisfacción general	4,4	88%
Precisión de control	4,2	84%

2) *Análisis Cualitativo:* La retroalimentación obtenida a través de las preguntas abiertas proporcionó datos técnicos adicionales que refuerzan los resultados numéricos de las tablas. Un hallazgo fundamental fue que la totalidad de los evaluadores, es decir el 100% de la muestra, reportó una experiencia fluida sin experimentar congelamientos de imagen ni desconexiones repentinas. Además, la decisión de incorporar

un mando físico ergonómico tipo gamepad fue identificada unánimemente como el mayor acierto para facilitar la conducción.

Otro factor determinante que contribuyó a los altos niveles de satisfacción fue el diseño de la interfaz gráfica de usuario (GUI). Como se muestra en la Fig. 10, la estación de control en la computadora centraliza la transmisión de video en tiempo real y la operación del vehículo en una sola ventana.



Fig. 10: Interfaz visual de teleoperación.

Durante las pruebas, los usuarios destacaron que la disposición estructurada de la pantalla reduce la carga cognitiva. Al evitar la saturación de elementos gráficos complejos, los operadores lograron mantener su atención enfocada exclusivamente en el flujo de video y en el entorno.

No obstante, el estudio también sirvió para revelar una limitación mecánica importante centrada en el sistema de visión. El 80% de los participantes, lo que representa a 8 de los 10 sujetos, reportó dificultades e incomodidad debido al ángulo fijo en el que está montada la cámara. Según los testimonios, esta posición vertical estática genera zonas oscuras o puntos ciegos, complicando al momento de realizar maniobras o giros cerrados.

IV. CONCLUSIONES

La arquitectura de red inalámbrica dividida en tres canales independientes demostró ser una solución técnica robusta para el control del vehículo. El sistema alcanzó su punto de equilibrio óptimo utilizando una resolución de video de 640×480 píxeles, logrando recibir más del 96% de los datos con un retraso mínimo de 137 milisegundos a 15 metros de distancia. Para evitar pérdidas de conexión en trayectos más largos, se recomienda programar el software para que reduzca automáticamente la calidad del video a una resolución menor si el vehículo supera esta distancia operativa.

El diseño de la interfaz gráfica desarrollada en Python permite una administración eficiente de la teleoperación al centralizar el flujo visual y el estado de los controles en una sola ventana.

El uso de un mando de control externo inalámbrico resultó ser mucho mejor que el manejo mediante el teclado de una computadora, proporcionando una respuesta más natural para el operador.

Para optimizar la precisión, fue fundamental implementar en el código una zona muerta del 10% en los *joysticks*, eliminando así el *drift* o movimientos involuntarios de los sensores analógicos.

La estabilidad eléctrica es indispensable para el correcto funcionamiento de la Raspberry Pi 4, por lo cual se concluye que el sistema requiere un regulador de voltaje y corriente constante que proporcione los niveles sugeridos por el fabricante. Debido a que la demanda energética de los motores y la placa es alta, se optó por una batería de LiPo con reguladores independientes para asegurar que no existan caídas de tensión. Se recomienda que todos los componentes como cables y conectores cumplan con los requisitos técnicos de voltaje y corriente para evitar sobrecalentamientos durante misiones extendidas donde el consumo alcanza el 18% cada 30 minutos.

A pesar de la fluidez lograda, el 80% de los evaluadores reportó incomodidad al manejar debido a los puntos ciegos que genera el ángulo vertical fijo de la cámara. Por esta razón, se recomienda incorporar un servomotor adicional que permita el movimiento vertical del lente, complementando el giro horizontal que ya posee el prototipo. Esta mejora mecánica permitirá que el operador observe directamente el suelo y esquive obstáculos bajos, elevando el nivel de satisfacción general que actualmente se sitúa en un 88% para la calidad visual.

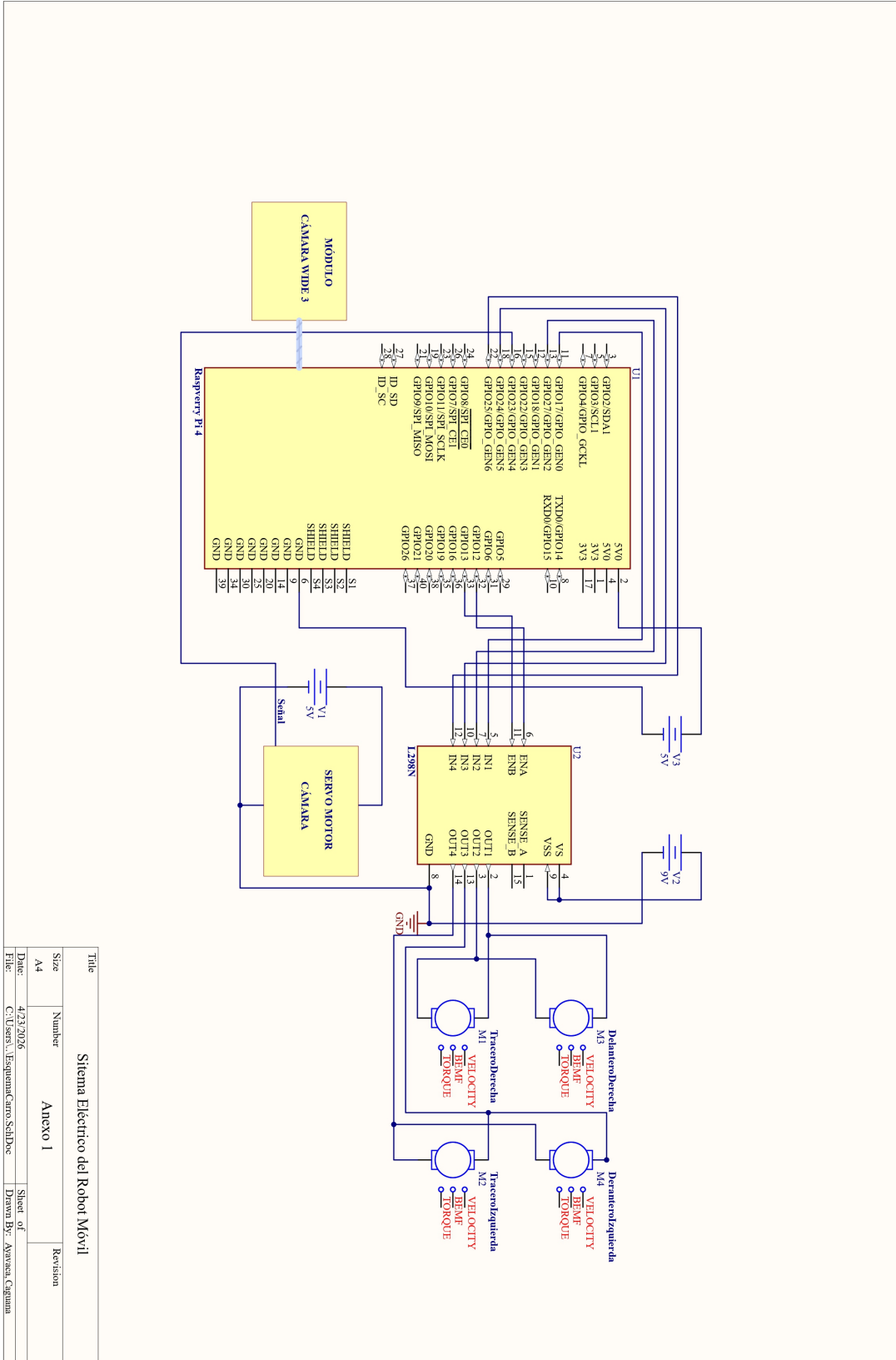
La implementación de una red Wi-Fi Direct con una máscara de subred de 30 bits aseguró el sistema contra accesos no autorizados al limitar la comunicación estrictamente a dos direcciones IP. Esta configuración garantiza que la teleoperación sea independiente de cualquier infraestructura externa, lo cual es vital en zonas de desastre. Se recomienda conservar esta topología de red cerrada, considerando el uso de antenas de mayor ganancia para expandir el rango de cobertura sin comprometer la seguridad o la estabilidad del enlace inalámbrico.

REFERENCIAS

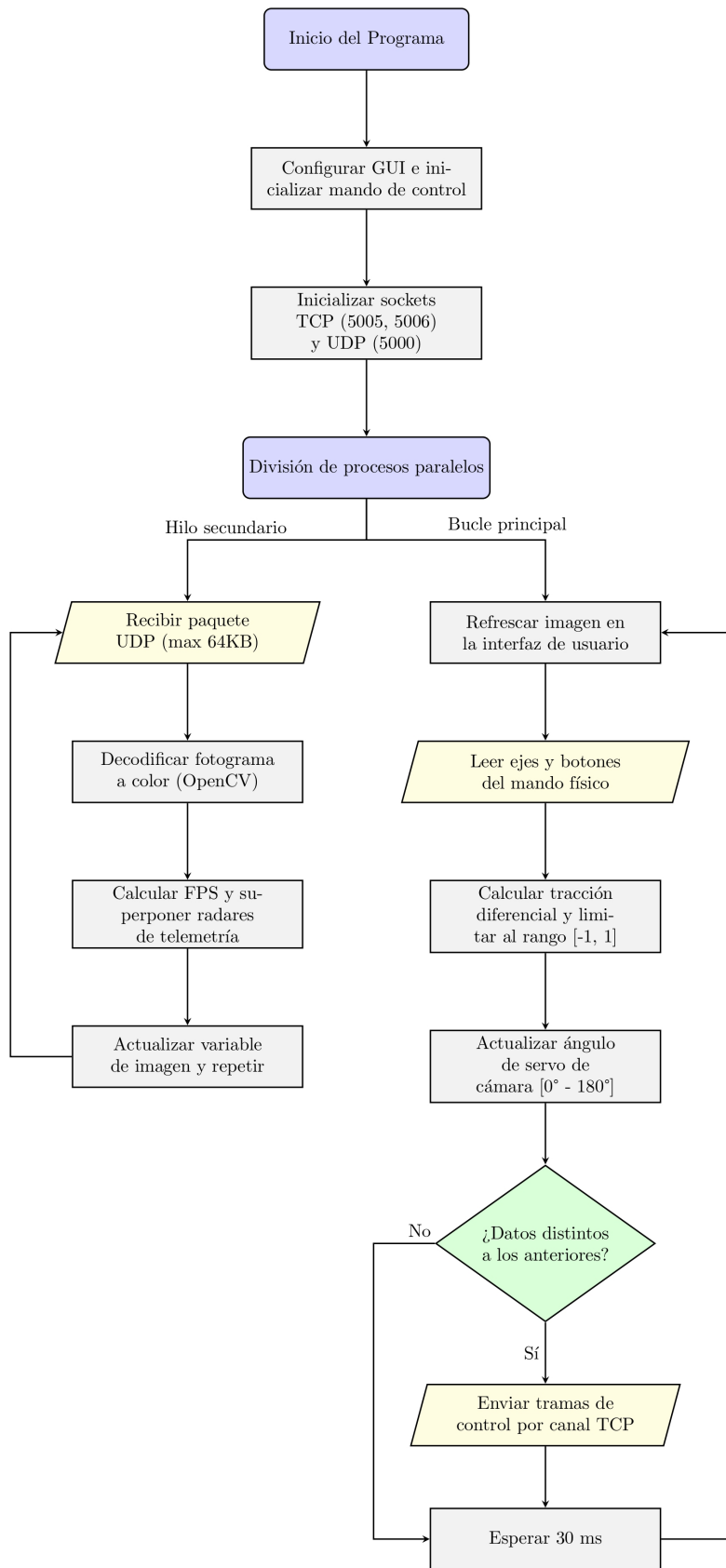
- [1] M. Wu, "Robotics applications in natural hazards," in *2023*, vol. 43. MSMEE, pp. 273–279. [Online]. Available: <https://surl.li/uroeqc>
- [2] ECU911. El ECU 911 coordinó la atención de más de 3 millones de emergencias en 2024. [Online]. Available: <https://www.ecu911.gob.ec/el-ecu-911-coordino-la-atencion-de-mas-de-3-millones-de-emergencias-en-2024/>
- [3] K. Doki, K. Suzuki, A. Torii, S. Mototani, Y. Funabora, and S. Doki, "Application of augmented reality based on sensing data to teleoperation system for operator support," in *2021 22nd IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*. IEEE, pp. 19–24. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9453619/>
- [4] K. Doki, K. Suzuki, Y. Yano, Y. Funabora, and S. Doki, "AR image presentation based on sensor data for operator support in remote car driving : -aiming for remote car driving-," in *2021 IEEE 10th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE)*. IEEE, pp. 774–776. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9622070/>
- [5] P. Stotko, S. Krumpfen, M. Schwarz, C. Lenz, S. Behnke, R. Klein, and M. Weinmann, "A VR system for immersive teleoperation and live exploration with a mobile robot," in *2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. IEEE, pp. 3630–3637. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8968598/>
- [6] S. Suzuki and T. Fukunaga, "Development of a web-based teleoperation system of mobile robot with duplicated control interface for guided online visit service," in *2015 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII)*. IEEE, pp. 656–661. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7405057/>

- [7] A. Valero, G. Randelli, F. Botta, C. Saracini, and D. Nardi, "Give me the control, i can see the robot!" in *2009 IEEE International Workshop on Safety, Security & Rescue Robotics (SSRR 2009)*. IEEE, pp. 1–6. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5424157/>
- [8] J. Nickerson and S. Skiena, "Attention and communication: Decision scenarios for teleoperating robots," in *Proceedings of the 38th Annual Hawaii International Conference on System Sciences*. IEEE, pp. 295c–295c. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1385848/>

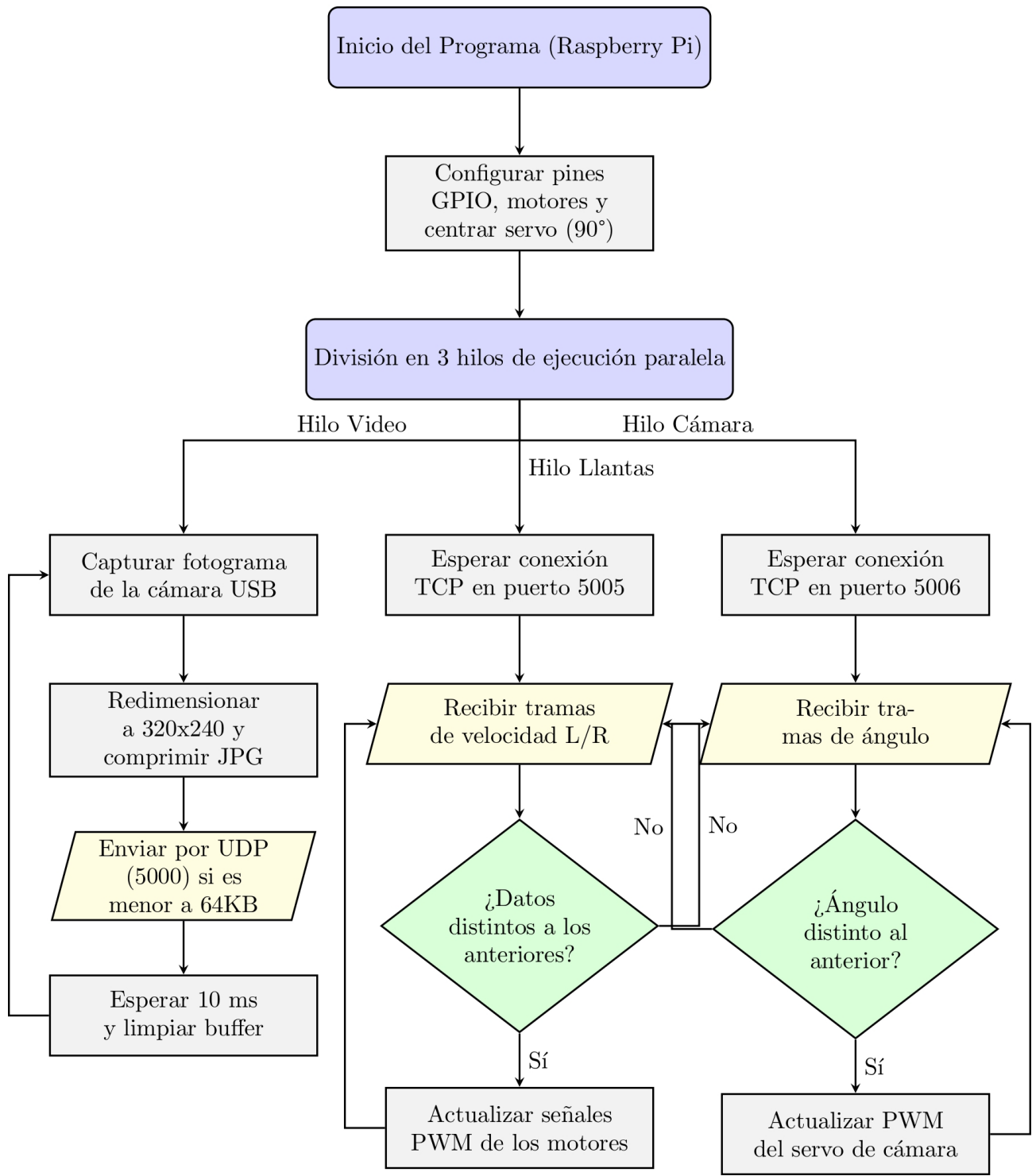
ANEXOS FOTOGRÁFICOS, DIAGRAMAS Y ESQUEMAS ADICIONALES



Anexo 1: Esquema Elctrico del Robot Mvil



Anexo 2: Diagrama de Flujo de Estación de Control



Anexo 3: Diagrama de Flujo del Robot Móvil