

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación**

Diseño e implementación del módulo de comunicación para el despliegue de una red conformada por drones para su uso en catástrofes

**PROYECTO INTEGRADOR**

Previo la obtención del Título de:

**Ingeniero en Telecomunicaciones**

Presentado por:

Fausto Emiliano Astudillo Idrovo

Andrés Fabricio Luna Peralta

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2023



## **DEDICATORIA**

A mis padres, José Luna Bonilla y Rosa Peralta Apunte, por acompañarme en cada paso que doy en la búsqueda de ser mejor persona y profesional. También se la dedico a mi abuela Nicolasa Apunte Mejía y mis tías Annabelle y Shirley, su amor incondicional y su aliento son vientos constantes en mi camino. A mis hermanos Alex y María José, por todo su apoyo incondicional, pese a las diferencias siempre cuento con ustedes. A mi compañero de tesis, mis mejores amigas y mis compañeros cercanos en la universidad, su amistad ha sido refugio en momentos intensos y su ayuda ha sido importante en este logro de vida. Y, ante todo, a Dios, encuentro en Ti inspiración y fortaleza. Tu amor me da confianza para superar obstáculos y perseguir sueños. Mi gratitud eterna a todos ustedes.

**ANDRÉS LUNA PERALTA**

El desarrollo exitoso de este proyecto no habría sido posible sin el invaluable apoyo de individuos a quienes deseo expresar mi más profunda gratitud. A mis padres, Jhoana Idrovo Noriego y Fausto Astudillo Heredia y hermanos José Astudillo Idrovo y Andrea Astudillo Idrovo, por su apoyo incondicional; a mis profesores tutores, por su orientación académica y técnica; a mi cliente, por confiar en mi capacidad para llevar a cabo este proyecto; y a mi reducido pero leal círculo de amigos, Jenniffer, Aileen, Dayanna y Andrés, por su apoyo moral y emocional; y a mi novia Ytati por su lealtad y esperanza en mí. La contribución de cada uno de ellos ha sido fundamental para la realización de este trabajo

**FAUSTO ASTUDILLO IDROVO**





## **AGRADECIMIENTOS**

En este momento crucial de nuestra trayectoria académica, deseamos expresar nuestro sincero reconocimiento y agradecimiento a nuestra alma mater, una institución que ha proporcionado el entorno propicio para nuestro crecimiento académico. A la respetada tutora por su dedicación inquebrantable y paciencia incansable, fundamentales en cada etapa de este proceso de investigación. Asimismo, a los distinguidos profesores y docentes, sus enseñanzas han dejado una huella perdurable en el tiempo. Con gratitud y aprecio, reconocemos su impacto significativo en el desarrollo académico y la realización de este logro.



## DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; Fausto Emiliano Astudillo Idrovo y Andrés Fabricio Luna Peralta damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”



---

**Fausto Emiliano Astudillo Idrovo**



---

**Andrés Fabricio Luna Peralta**



## **EVALUADORES**

---

**MSc. Verónica Soto Vera**  
PROFESOR DE LA MATERIA

---

**Dra. Patricia Chávez Burbano**  
PROFESOR TUTOR



## RESUMEN

Esta tesis se centra en la problemática crítica de la comunicación efectiva durante situaciones de catástrofe, donde las redes de comunicación convencionales pueden resultar insuficientes. El objetivo general del proyecto es desarrollar un módulo de comunicación que permita establecer una red alternativa y temporal basada en drones, proporcionando una solución innovadora a un problema de gran relevancia social.

El desarrollo del proyecto se ha llevado a cabo a través de un proceso riguroso de pruebas y correcciones, asegurando la funcionalidad y eficacia del módulo de comunicación. Este módulo ha demostrado ser capaz de establecer una comunicación confiable y estable en situaciones de emergencia, lo que representa una ventaja competitiva significativa en el campo de las telecomunicaciones de emergencia.

El desarrollo del proyecto se ha efectuado mediante un ciclo iterativo de pruebas y correcciones, optimizando la funcionalidad y eficacia del módulo de comunicación. Este módulo ha demostrado su capacidad para establecer una comunicación fiable y robusta en contextos de emergencia, lo que lo posiciona como una solución competitiva en el ámbito de las telecomunicaciones de emergencia.

La implementación de este sistema alternativo de comunicación tiene el potencial de mejorar significativamente la seguridad y el bienestar de la población afectada durante accidentes devastadores, destacando la importancia y el impacto de este proyecto.

**Palabras Clave:** comunicación de emergencia, redes de drones, módulo de comunicación, catástrofe, seguridad.



## ABSTRACT

*This thesis focuses on the critical issue of effective communication during disaster situations, where conventional communication networks may prove to be inadequate. The overarching goal of the project is to develop a communication module that enables the establishment of an alternative and temporary network based on drones, providing an innovative solution to a problem of significant social relevance.*

*The development of the project has been carried out through a rigorous process of testing and corrections, ensuring the functionality and efficacy of the communication module. This module has proven to be capable of establishing reliable and stable communication in emergency situations, representing a significant competitive advantage in the field of emergency telecommunications.*

*The project's development has been executed through an iterative cycle of tests and corrections, optimizing the functionality and efficacy of the communication module. This module has demonstrated its ability to establish reliable and robust communication in emergency contexts, positioning it as a competitive solution in the realm of emergency telecommunications.*

*The implementation of this alternative communication system has the potential to significantly improve the safety and well-being of the affected population during devastating accidents, highlighting the importance and impact of this project.*

**Keywords:** emergency communication, drone networks, communication module, disaster, safety.



# ÍNDICE GENERAL

<b>RESUMEN</b>	<b>i</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>iii</b>
<b>ABREVIATURAS</b>	<b>vii</b>
<b>SIMBOLOGÍA</b>	<b>ix</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>	<b>ix</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b>	<b>xi</b>
<b>1 INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
1.1 Descripción del problema . . . . .	2
1.2 Justificación del problema . . . . .	3
1.3 Objetivos . . . . .	4
1.3.1 Objetivo General . . . . .	4
1.3.2 Objetivo Específicos . . . . .	4
1.4 Marco Teórico . . . . .	5
<b>2 METODOLOGÍA</b>	<b>11</b>
2.1 Identificación del problema y propuestas de solución . . . . .	12
2.2 Selección de la mejor alternativa . . . . .	15
2.3 Diseño conceptual . . . . .	16
2.3.1 Diagrama de bloques . . . . .	16
2.3.2 Diagrama de flujo . . . . .	17
2.4 Principios técnicos y criterios de diseño . . . . .	20
2.5 Especificaciones técnicas del producto final . . . . .	21

<b>3</b>	<b>RESULTADOS Y ANÁLISIS</b>	<b>23</b>
3.1	Implementación de la red inalámbrica . . . . .	23
3.1.1	Desarrollo y pruebas . . . . .	23
3.1.1.1	Configuración del servidor . . . . .	24
3.1.1.2	Configuración del cliente . . . . .	25
3.1.2	Diseño conceptual . . . . .	26
3.2	Pruebas de parámetros de propagación . . . . .	26
3.2.1	Distancia en línea recta . . . . .	27
3.2.2	Altura con línea de vista a 10 Metros . . . . .	29
3.2.3	Altura sin línea de vista a 10 Metros . . . . .	30
3.3	Contribución académica y científica . . . . .	30
3.3.1	Innovación en la comunicación de drones . . . . .	31
3.3.2	Aplicabilidad en diversos contextos . . . . .	31
3.3.3	Base para futuras investigaciones . . . . .	31
3.3.4	Contribución al conocimiento académico . . . . .	32
<b>4</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>33</b>
4.1	Conclusiones . . . . .	33
4.2	Recomendaciones . . . . .	34
4.3	Líneas Futuras . . . . .	35
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>37</b>
	<b>APÉNDICES</b>	<b>38</b>
A	Tablas de las pruebas realizadas . . . . .	41
A.1	Distancia recta con línea de vista . . . . .	41
A.2	Distancia recta sin línea de vista . . . . .	44

## ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
ARCOTEL	Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones
CNT	Corporación Nacional de Telecomunicación
UAV	Unnamed Aerial Vehicles
FANET	Flying Ad hoc NETwork
MANET	Mobile Ad hoc NETwork
VANET	Vehicular Ad hoc NETwork
RF	Radio Frecuencia
LoS	Line of Sight
NLoS-FSOC	Non-direct Line-of-Sight Free-Space Optical Communications
DR	Reflector Difuso
OLAN	Red local óptica natural
OBS	Estación de base óptica terrestre remota
MQTT	Message Queing Telemetry Transport



## SIMBOLOGÍA

kg	Kilogramo
mg	Miligramo
g	Gramo
m	Metro
Wi-Fi	Wireless Fidelity
A	Amperio
mA	Miliamperio
$\mu$ A	Microamperio
GHz	Gigahertzio
V	Voltios
DC	Corriente Directa



## ÍNDICE DE FIGURAS

1.1	Central Telefónica destruida CNT-Portoviejo . . . . .	6
1.2	Desnivel y cuarteamientos en la base de la torre auto- soportada de telecomunicaciones, CNT-Cojimies . . . . .	6
1.3	Infraestructura de telecomunicaciones colapsada en Portoviejo . . . . .	7
2.1	Método de comunicación entre drones . . . . .	16
2.2	Proceso de implementación de pruebas y correcciones . . . . .	18
3.1	Media de los tiempos de envío en los distintos escenarios . . . . .	27
3.2	Media de la potencia en los distintos escenarios . . . . .	28



## ÍNDICE DE TABLAS

2.1	Parámetros de interés del ESP32 . . . . .	13
2.2	Parámetros de interés de la Raspberry Pi Pico W . . . . .	14
2.3	Parámetros de hardware Raspberry Pi Pico W . . . . .	21
2.4	Parámetros de consumo energético Raspberry Pi Pico W . . . . .	21
3.1	Pruebas de comunicación a 10 metros de altura con línea de vista . . . . .	29
3.2	Pruebas de comunicación a 10 metros de altura sin línea de vista . . . . .	30
1	Pruebas de comunicación a 5 metros con línea de vista . . . . .	41
2	Pruebas de comunicación a 10 metros con línea de vista . . . . .	42
3	Pruebas de comunicación a 20 metros con línea de vista . . . . .	44
4	Pruebas de comunicación a 10 metros sin línea de vista . . . . .	45
5	Pruebas de comunicación a 20 metros sin línea de vista . . . . .	46



# CAPÍTULO 1

## 1. INTRODUCCIÓN

Un desafío crítico que afecta a la población en general es la comunicación efectiva durante situaciones de catástrofe. Las redes de comunicación convencionales con frecuencia colapsan durante desastres naturales como terremotos, inundaciones o incendios de gran magnitud, lo que deja a las personas sin una forma confiable de comunicarse con los servicios de emergencia y sus seres queridos. Esto genera incertidumbre y retrasa los esfuerzos de rescate y ayuda. Se plantea la necesidad de establecer sistemas de comunicación redundantes y alternativos en caso de desastres para abordar esta cuestión. En este contexto, la utilización de drones como parte de una red de comunicación temporal permite superar las limitaciones de las infraestructuras convencionales.

El problema de mantener una comunicación redundante en circunstancias de destrucción es el centro de la investigación. Este asunto es crucial debido a la importancia de establecer una comunicación efectiva y constante en tiempos de crisis, cuando las redes convencionales suelen colapsar. La falta de comunicación confiable durante sucesos de destrucción de gran magnitud crea incertidumbre y retrasa los esfuerzos de rescate. Para reducir los efectos negativos y mejorar la capacidad de respuesta y la eficacia en operaciones de rescate, es esencial contar con un sistema de comunicación alternativo. La seguridad y el bienestar de la población afectada están directamente relacionados con la investigación propuesta. Es un problema que se ha visto en los últimos tiempos y destaca la urgencia de encontrar soluciones novedosas. El objetivo principal es establecer una comunicación redundante que facilite la coordinación y el intercambio de información en condiciones peligrosas.

## 1.1 Descripción del problema

La comunicación efectiva y constante durante casos de devastación es un problema crucial que afecta a la población en general. En acontecimientos como desastres naturales o incendios comunales, las redes de comunicación tradicionales tienden a colapsar o volverse inaccesibles, dejando a las personas afectadas sin una forma confiable de comunicarse con los servicios de emergencia y sus seres queridos. Esto genera incertidumbre y retrasa los esfuerzos de rescate y asistencia.

En el marco de este documento se plantea el desafío de establecer una comunicación redundante en caso de una catástrofe. El objetivo principal de este proyecto es desarrollar un módulo de comunicación que permita establecer una red alternativa y temporal basada en drones.

El módulo de comunicación debe cumplir con requisitos específicos. En primer lugar, debe ser capaz de establecer una conexión confiable y estable entre los drones y los dispositivos terminales utilizados por las personas afectadas y los equipos de rescate. Esto implica garantizar una cobertura amplia y constante, incluso en áreas remotas y de difícil acceso.

Además, el módulo de comunicación debe ser altamente escalable y adaptable a diferentes tipos de calamidades y entornos adversos. Debe poder soportar una gran cantidad de usuarios simultáneamente y mantener una comunicación fluida en escenarios de alta demanda.

En términos de restricciones, es importante tener en cuenta las limitaciones de energía de los drones. Durante los actos de infortunio, es probable tener dificultades para recargar o reemplazar las baterías. Por lo tanto, se requiere optimizar el consumo de energía y buscar soluciones eficientes que permitan una operación prolongada de los drones.

Las variables de interés en este proyecto incluyen la calidad y confiabilidad de la comunicación establecida, la capacidad de cobertura de la red de drones, el tiempo

de respuesta entre el envío y recepción de mensajes, la escalabilidad del sistema y el consumo de energía de los drones.

La relevancia de abordar esta problemática radica en su impacto en la seguridad y el bienestar de la población afectada por estragos. La incapacidad de mantener una comunicación efectiva durante estos estados puede tener consecuencias devastadoras, dificultando la coordinación de los esfuerzos de rescate y la obtención de ayuda, esto demuestra el requerimiento de contar con sistemas alternativos de comunicación en casos de desastres, los cuales proporcionarían una base sólida para el estudio y la implementación de soluciones innovadoras en el ámbito de la comunicación durante condiciones adversas.

## **1.2 Justificación del problema**

La presente investigación se enfoca en abordar el problema de mantener una comunicación redundante durante incidentes de catástrofe que afectan a toda la población. La importancia de este problema radica en la demanda crítica de establecer una comunicación efectiva y constante en momentos de crisis, donde las redes de comunicación tradicionales suelen colapsar o volverse inaccesibles.

Durante desolaciones como terremotos, inundaciones o incendios de gran magnitud, las personas afectadas se encuentran en una situación de vulnerabilidad extrema. La falta de una comunicación confiable y rápida con los servicios de emergencia y los seres queridos genera incertidumbre y retrasa los esfuerzos de rescate y asistencia.

Es evidente que contar con un sistema alternativo de comunicación en momentos trágicos es de vital importancia para mitigar los efectos negativos y agilizar las operaciones de rescate. Por lo tanto, la investigación propuesta tiene una relevancia directa en términos de mejorar la seguridad y el bienestar de la población afectada durante accidentes devastadores.

Además, esta problemática es actual y susceptible de observación, medición y análisis. A través de episodios reales recientes, como el terremoto en Turquía (EFE, 2023), se

ha evidenciado la urgencia de desarrollar soluciones innovadoras para establecer una comunicación redundante y confiable durante las ocasiones de emergencia.

El propósito principal es establecer una comunicación redundante que permita la coordinación y el intercambio de información entre los afectados, los equipos de rescate y los servicios de emergencia, con el fin de mejorar la capacidad de respuesta y la eficacia de las operaciones de rescate y asistencia durante contingencias.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo General**

Diseñar e implementar un módulo de comunicación para el despliegue de una red conformada por drones durante situaciones de catástrofe, empleando algoritmos de asignación de roles automática de puertas de enlace

### **1.3.2 Objetivo Específicos**

1. Realizar un análisis detallado de los requisitos de comunicación durante siniestros, identificando las necesidades clave de los afectados, los equipos de rescate y los servicios de emergencia.
2. Diseñar dispositivo electrónico que permita la interconexión y comunicación entre los drones y dispositivos terminales utilizados por los afectados y los equipos de rescate
3. Desarrollar algoritmos e implementar protocolos de comunicación que aseguren la entrega confiable y oportuna de mensajes en entornos adversos, considerando posibles interferencias y limitaciones de recursos disponibles.
4. Realizar pruebas en diferentes escenarios y evaluar los resultados.

## 1.4 Marco Teórico

Los desastres naturales han aumentado con el tiempo, lo que ha llevado a la exigencia de implementar planes de emergencia para reducir sus efectos y dar una respuesta rápida con el objetivo de salvar lo más posible de vidas. Es fundamental reactivar los servicios de telecomunicaciones, ya que son cruciales en este tipo de circunstancias. La caída de las redes de comunicación provoca que las áreas afectadas queden sin estos servicios durante días debido a diversas causas, como la falta de energía eléctrica, las antenas caídas, la infraestructura de telecomunicaciones afectada y la pérdida de enlaces, entre otras. Esto aumentó la preocupación de la comunidad al no saber el estado de sus familiares debido a la falta de comunicación. Es importante por lo tanto, crear un plan de telecomunicaciones que incluya normas y protocolos de emergencia para la alerta temprana, la mitigación y la recuperación de desastres naturales.

Dentro del contexto ecuatoriano, se encuentra cómo afectó a los sistemas de telecomunicaciones, lo sucedido en el terremoto del 16 de abril de 2016 en la provincia de Manabí. Los informes publicados por las empresas de telefonía fija y móvil, las empresas de energía eléctrica y otros organismos de control indicaron que la mayoría de los servicios básicos, como el agua potable, la energía eléctrica, la telefonía fija y móvil y otros, habían disminuido significativamente. Al día siguiente del terremoto en cuestión, la Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones (ARCOTEL) informó que las principales causas del colapso de las telecomunicaciones incluyeron interrupciones o fallas del servicio eléctrico, daños a la infraestructura, desplomes de centrales telefónicas y estaciones repetidoras donde se encuentran los equipos de telecomunicaciones, así como múltiples cortes de las redes de fibra óptica intercentrales y troncalizadas. (Carrasco Cabrera & Cepeda Vasquez, 2016).

Las Figuras 1.1, 1.2 y 1.3 ilustran cómo los desastres naturales dañan las infraestructuras de telecomunicaciones, provocando aislamiento en la zona afectada y obstaculizando el rescate y la restauración de las redes, lo que justifica la creación de una red inalámbrica temporal. (Carrasco Cabrera & Cepeda Vasquez, 2016).



Figura 1.1: Central Telefónica destruida CNT-Portoviejo [1]



Figura 1.2: Desnivel y cuarteamientos en la base de la torre auto- soportada de telecomunicaciones, CNT-Cojimies [1]



Figura 1.3: Infraestructura de telecomunicaciones colapsada en Portoviejo [1]

La vulnerabilidad de los sistemas de comunicación, incluidas las interdependencias con otras infraestructuras, es un tema que se debe analizar. La razón por la que su vulnerabilidad es tan importante es porque las redes de comunicación apoyan numerosas funciones sociales esenciales, como los servicios de llamadas de emergencia E-911, los servicios financieros y de salud. Debido a su importancia crucial, los sistemas de comunicación suelen requerir una alta disponibilidad en un orden de al menos cinco años. La interrupción del servicio durante desastres naturales es relativamente común. Sin embargo, los sistemas de comunicación suelen superar esta carencia en operación cotidiana debido a la inclusión de redundancia y el uso de técnicas de confiabilidad que suelen eliminar un solo punto de falla.

Es por esto que al levantar una red temporal para la zona del desastre, resulta crucial tener en cuenta los factores que se mencionan: poco o nulo acceso a fuentes de energía y la precisión de redundancia en la red (Kwasinski, 2010). Al analizar y considerar los factores antes mencionados, resulta óptimo que esta red sea, inalámbrica y dinámica y la mejor manera de implementarlo sería mediante drones.

Para el despliegue de drones se suelen utilizar vehículos aéreos no tripulados (UAVs: Unmanned Aerial Vehicles). Estos dispositivos se basan en redes FANET (Flying Ad hoc NETWORK), estas son redes Ad-hoc que conectan múltiples UAVs. Estas redes están formadas por nodos dispersos en el cielo, que tienen una alta movilidad, lo que implica cambios frecuentes en la topología de la red. La distancia entre cada nodo puede ser

considerable, llegando incluso a varios kilómetros de separación. Las FANET se basan en enlaces de datos entre UAVs, lo que amplía su área de cobertura operativa. Incluso si un nodo FANET no establece una conexión directa con la infraestructura, puede seguir funcionando a través de otros UAVs que forman parte de la red.

Para levantar este tipo de redes se deben considerar los factores como la adaptabilidad, escalabilidad, latencia, limitaciones de la plataforma UAV y los requisitos de ancho de banda. El diseño de las FANET debe estar enfocado en operar en entornos altamente dinámicos y ser capaz de adaptarse a cualquier cambio o falla. Durante una operación, la red FANET debe tener la capacidad de actualizar la misión, lo cual puede implicar la incorporación de datos adicionales o nueva información, lo que puede requerir una actualización del plan de vuelo.

La naturaleza altamente dinámica del entorno FANET está estrechamente ligada a la capa física, la capa de red y la capa de transporte, lo que significa que cualquier cambio o falla afecta directamente a estas capas. Para seleccionar una capa física adecuada, se deben considerar parámetros como la densidad, la distancia entre nodos del sistema y los cambios ambientales. Por último, para lograr un rendimiento óptimo del sistema FANET, el protocolo de enrutamiento debe adaptarse a los cambios en el enlace de comunicación.

El rendimiento desempeña un papel crucial en los sistemas multi-UAV, ya que se logra mediante la colaboración conjunta de los UAVs, a diferencia de los sistemas con un único UAV. En FANET, los protocolos se establecen para minimizar la pérdida y mejorar el rendimiento obtenido para cualquier cantidad de UAVs que se desplieguen (el mismo caso ocurre con los algoritmos). Su objetivo principal es asegurar un funcionamiento eficiente y óptimo, independientemente del número de UAVs que formen parte de la red.

En las redes FANET, la latencia es un requisito esencial que está estrechamente vinculado a la aplicación en cuestión. Su importancia se destaca especialmente en las redes FANET en tiempo real, donde los paquetes de datos deben ser entregados dentro de un límite de tiempo específico para evitar colisiones entre múltiples UAVs. Es importante tener en cuenta que cada tipo de red; como lo son la malla de nodos móviles (Mobile Ad hoc Network, MANET), FANET y las redes ad-hoc vehiculares

(Vehicular Ad-Hoc Network, VANET) requiere protocolos y algoritmos específicos, ya que los comportamientos relacionados con el retraso de paquetes son distintos en cada caso, y los protocolos diseñados para una red pueden no cumplir con los requisitos de latencia de otra red completamente diferente. Con el avance de la tecnología de sensores, se ha vuelto posible recolectar datos con una gran precisión, lo cual requiere un ancho de banda más amplio. En las aplicaciones FANET, la cooperación y coordinación de varios UAVs en un sistema multi-UAV posibilita la captura de datos del entorno y su posterior transmisión a una estación terrestre. Esto implica una mayor demanda de ancho de banda para asegurar una transmisión eficiente de los datos recopilados.

En consecuencia, resulta crucial que un protocolo FANET cumpla con los requisitos de capacidad de ancho de banda necesarios para transmitir imágenes o videos en tiempo real con una resolución alta. Esto implica tener en cuenta restricciones como la capacidad del canal de comunicación, la velocidad de los UAVs, la susceptibilidad a errores en los enlaces inalámbricos y la seguridad en la comunicación (Gutiérrez & Andrea, 2022) [2].

Las comunicaciones en respuesta para emergencias deben afrontar escenarios desafiantes no sólo en lo que a logística se refiere, el despliegue, tiempo de vida operativa, fiabilidad y ancho de banda sin factores cruciales para el correcto desempeño y utilidad de los dispositivos. Los drones representan una alternativa de gran utilidad para reemplazar redes locales en sitios donde estas hayan caído. Los trabajos existentes los utilizan en comunicaciones de Radio Frecuencia (RF) debido a que poseen como ventaja su gran robustez, no obstante, al considerar los factores como el tiempo de vuelo y el ancho de banda que RF puede ofrecer se aprecia que el alcance y la duración de operaciones de recuperación y rescate puede ver afectada su efectividad.

Para la adopción práctica de comunicaciones asistidas por drones se requiere de la innovación en el aspecto de la mejora del tiempo operativo, es por eso por lo que se ha propuesto una alternativa que adopta comunicaciones ópticas de espacio libre con línea de vista no directa (Non-direct Line-of-Sight Free-Space Optical Communications, NLoS-FSOC) como un canal óptico de transmisión que habilita la comunicación a estaciones en áreas afectadas por desastres.

NLoS-FSOC es un paradigma de comunicaciones basado en luz láser que implementa un reflector difuso (DR) como área de transmisión donde las estaciones establecen enlaces ópticos como una red local óptica natural (OLAN). En esta OLAN, las estaciones con línea de vista (LoS) a DR pueden transmitir a todas las demás estaciones o recibir una señal de estas.

En la red de drones, NLoS-FSOC se utiliza en combinación con retransmisiones entre estaciones en el área afectada y una estación de base óptica terrestre remota (OBS) que proporciona acceso a la red. La colocación de drones y la asignación de tiempo de acceso para desastres y un algoritmo para identificar la cobertura de drones y la altitud del dron son factores que se deben implementar siguiendo criterios de adaptabilidad para proporcionar servicios de retransmisión efectivos a un número óptimo de estaciones varadas. (Esubonteng & Rojas-Cessa, 2022).

# CAPÍTULO 2

## 2. METODOLOGÍA

El capítulo 2 se centró en el análisis detallado de dos escenarios de implementación para una red de drones: uno con el microcontrolador ESP32 y otro con la Raspberry Pi Pico W. Se examinaron variables como la tasa de datos, el ancho de banda, los protocolos soportados y la capacidad de procesamiento. El ESP32, con sus capacidades Wi-Fi y Bluetooth incorporadas, puede manejar la comunicación entre los drones y actuar como un gateway hacia el exterior de la red. Por otro lado, la Raspberry Pi Pico W, aunque tiene una capacidad de procesamiento inferior, es compatible con una gran cantidad de lenguajes de programación y puede ser utilizada para una gran cantidad de proyectos que requieran control de dispositivos o recolección de datos.

La selección de la mejor alternativa se basó en varios factores, incluyendo el costo, la capacidad de procesamiento, la versatilidad y la eficiencia energética. A pesar de que la capacidad de procesamiento de la Raspberry Pi Pico W es inferior a la del ESP32, fue seleccionada debido a su bajo costo y versatilidad para realizar una variedad de funciones. Además, la Raspberry Pi Pico W tiene un consumo de energía inferior al de la ESP32, lo cual es un aspecto crítico para los drones, donde la duración de la batería puede ser un factor limitante.

El diseño conceptual de la red de drones se basó en el modelo de servidor-cliente, con un dron actuando como servidor y puerta de enlace mientras que los demás drones actúan como clientes. Este modelo es flexible, pues permite que cualquier dron actúe como servidor en caso de fallo del servidor actual. Además, se eligió el protocolo MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) para el envío de datos debido a su simplicidad, ligereza y capacidad para manejar un gran número de drones con bajos recursos.

## 2.1 Identificación del problema y propuestas de solución

Para situaciones de catástrofe donde la infraestructura de comunicación convencional puede verse comprometida, se identificó inicialmente la necesidad de una red de comunicación eficiente y resistente. La idea es establecer una red de drones con módulos de comunicación de tal forma que esta sea redundante.

La elección del hardware adecuado es esencial para el éxito de la red. En este caso, se analizaron dos posibles escenarios: uno que emplea microcontroladores como ESP32 y otro que emplea la Raspberry Pi Pico W. Ambos tienen ventajas y desventajas, y la elección entre ellos dependió en gran medida de las necesidades específicas del cliente, considerando estas con las características físicas de sus circuitos constituyentes.

ESP32 es un microcontrolador poderoso y versátil que incorpora Wi-Fi y Bluetooth. Esto lo convierte en un excelente candidato para aplicaciones que requieren una comunicación inalámbrica fuerte, como redes de drones. Pero esta característica tiene un costo adicional y aumenta el consumo de energía. Por otro lado, la Raspberry Pi Pico W es una placa de desarrollo de bajo costo que ofrece una gran flexibilidad en términos de las capacidades que se pueden agregar a través de módulos externos, cabe destacar que el modelo W posee módulos de conexión inalámbrica incorporados.

La siguiente sección analizará las diferencias entre estos dos escenarios en detalle, examinando variables como la tasa de datos, el ancho de banda, los protocolos soportados y la capacidad de procesamiento.

### **Escenario 1: Implementación con microcontrolador ESP32**

El ESP32 es un microcontrolador de doble núcleo con capacidades Wi-Fi y Bluetooth incorporadas. Esto lo hace ideal para la implementación de una red de drones, ya que puede manejar la comunicación entre los drones y también puede actuar como una puerta de enlace hacia el exterior de la red.

Tabla 2.1: Parámetros de interés del ESP32 [1]

Parámetro	Rendimiento
Masa	8 g
Wi-Fi	802.11 b/g/n 2.4GHz
Bluetooth	BT v4.2 y BT LE
Consumo en reposo	10 $\mu$ A
Consumo en recepción Wi-Fi	100 mA
Consumo en transmisión Wi-Fi	200 mA (en promedio)

Como se puede apreciar en la tabla 2.1, el peso es bastante ligero para las cargas que se deben manejar en el dron (de entre 1 kg a 5 kg como máximo). Cuando el dispositivo está en reposo este consume muy poca energía, pero este incrementa diez mil veces cuando está trabajando en envío y recepción de señales.

*Tasa de datos y ancho de banda:* Soporta Wi-Fi 802.11 b/g/n, lo que significa que puede manejar tasas de datos de hasta 150 Mbps. Esto debería ser suficiente para la mayoría de las aplicaciones de drones.

*Protocolos soportados:* Admite una variedad de protocolos de red, incluyendo TCP/IP, UDP, HTTP, FTP y MQTT. Esto significa que puede manejar una variedad de tipos de tráfico de red.

*Capacidad de procesamiento:* Con su procesador de doble núcleo y su capacidad para funcionar a velocidades de hasta 240 MHz, el ESP32 tiene una capacidad de procesamiento considerable. Esto significa que puede manejar tareas de procesamiento de datos complejas y puede soportar la implementación de algoritmos de control avanzados.

## Escenario 2: Implementación con Raspberry Pi Pico W

La Raspberry Pi Pico W es una placa microcontroladora de bajo costo y alto rendimiento. Además, es compatible con una gran cantidad de lenguajes de programación, como

Tabla 2.2: Parámetros de interés de la Raspberry Pi Pico W

Parámetro	Rendimiento
Masa	7 g
Wi-Fi	802.11 b/g/n 2.4GHz
Bluetooth	BT v5.2
Consumo en reposo	10 $\mu$ A
Consumo en recepción Wi-Fi	80 mA (en promedio)
Consumo en transmisión Wi-Fi	80 mA (en promedio)

C, C++, Python, entre otros, y puede ser utilizada para una gran cantidad de proyectos que requieran control de dispositivos o recolección de datos. Lo cual la convierte en un dispositivo importante para levantar la red de drones.

Como se puede apreciar en la tabla 2.2, el peso es un gramo menor respecto al ESP32. Cuando el dispositivo está en reposo este consume muy poca energía e incrementa en menor medida cuando está trabajando en envío y recepción de señales si se lo compara con el otro microcontrolador .

*Tasa de datos y ancho de banda:* Soporta Wi-Fi 802.11 b/g/n, lo que significa que puede manejar tasas de datos de hasta 150 Mbps. Esto debería ser suficiente para la mayoría de las aplicaciones de drones.

*Protocolos soportados:* La Raspberry Pi Pico W admite varios protocolos de comunicación, como TCP, UDP, HTTP, HTTPS, I2C, UART, SPI y LoRaWAN, lo que la hace versátil en términos de conectividad. También es compatible con MQTT, permitiendo la configuración de un servicio de broker MQTT en la propia placa utilizando el software Mosquitto.

*Capacidad de procesamiento:* Con su procesador de doble núcleo y su capacidad para funcionar a velocidades de hasta 133 MHz, la capacidad de procesamiento es inferior a la de un ESP32. Sin embargo es muy capaz y estable para ser la primera versión de este dispositivo y con esto sí se puede implementar algoritmos de control avanzados.

## 2.2 Selección de la mejor alternativa

Se seleccionó el escenario que involucra la Raspberry Pi Pico W como el módulo de comunicación para los drones debido a su asequibilidad, potencia de procesamiento y versatilidad en la ejecución de diversas tareas. Aunque el ESP32 podría ofrecer un rendimiento ligeramente superior, estas diferencias de procesamiento no son relevantes para la aplicación prevista del dispositivo.

En el desarrollo de una red de drones inalámbrica, la elección del módulo de comunicaciones es un aspecto crítico que puede influir significativamente en la eficacia y eficiencia del sistema. En este estudio, se ha optado por utilizar la Raspberry Pi Pico W en lugar de la ESP32, a pesar de que esta última puede ofrecer una gama más amplia de características y capacidades. Esta decisión se basa en una serie de factores clave que se discuten a continuación.

En primer lugar, el costo energético emerge como un factor esencial a sopesar en cualquier proyecto de desarrollo. La Raspberry Pi Pico W ostenta una ventaja considerable en este aspecto, al demostrar ser significativamente más eficiente (como se puede apreciar en las tablas 2.1 y 2.2) desde el punto de vista energético que la ESP32. Esto la posiciona como una elección sumamente atractiva para despliegues a gran escala, como es el caso de una red de drones.

En segundo lugar, la disponibilidad de la Raspberry Pi Pico W se erige como una variable esencial en el contexto. El cliente ha provisto este dispositivo, lo que reviste de significativa ventaja a nuestra labor, al permitirnos su incorporación en el preexistente sistema emplazado en el microcontrolador, el cual se fundamenta en el lenguaje de programación Python.

En tercer lugar, la Raspberry Pi Pico W cuenta con el respaldo de una amplia comunidad de desarrolladores. Esto se traduce en una abundancia de documentación y tutoriales, lo que puede facilitar la implementación y la solución de problemas. Además, la posibilidad de programar el dispositivo en C/C++ o MicroPython ofrece una flexibilidad que puede ser beneficiosa dependiendo de las habilidades de programación del equipo de desarrollo.

Por último, el consumo de energía de la Raspberry Pi Pico W es inferior al de la ESP32. Este es un aspecto crítico para los drones, donde la duración de la batería puede ser un factor limitante. Aunque la ESP32 puede ofrecer más características, no siempre es necesario contar con el dispositivo más potente para una aplicación en particular. En este caso, la Raspberry Pi Pico W, a pesar de ser un dispositivo menos potente, es capaz de cumplir con los requisitos del sistema y ofrece ventajas en términos de costo, disponibilidad, soporte de la comunidad y consumo de energía. Por lo tanto, se considera que es la opción más adecuada para este proyecto.

## 2.3 Diseño conceptual

El modelo de servidor-cliente es la base del diseño de redes inalámbricas de drones, en el que un dron actúa como servidor y puerta de enlace mientras que los demás drones actúan como clientes. Este modelo es flexible porque permite que cualquier dron actúe como servidor en caso de fallo del servidor actual mediante la implementación de un algoritmo adecuado para la realización de esta actividad.

### 2.3.1 Diagrama de bloques

El protocolo de envío de datos que se escogió es MQTT, un protocolo de mensajería ligero basado en el patrón de publicación-suscripción. Fue diseñado para conexiones con un ancho de banda limitado, alta latencia o redes poco confiables, lo que lo hace ideal para el Internet de las Cosas (IoT).

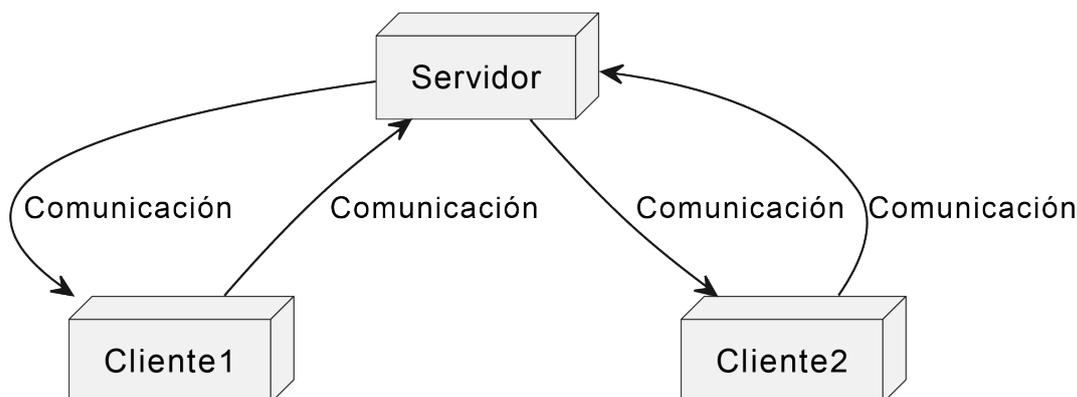


Figura 2.1: Método de comunicación entre drones

A continuación se describe el método de comunicación entre drones mostrado en la Figura 2.1:

- **Conexión:** Un dispositivo (cliente) se conecta a un servidor MQTT, también conocido como broker. Durante esta conexión, el cliente puede especificar opciones como el "last will and testament", que es un mensaje que el broker enviará a todos los suscriptores si el cliente se desconecta inesperadamente.
- **Suscripción:** Una vez conectado, el cliente puede suscribirse a uno o más temas (topics). Los temas son cadenas de texto que actúan como filtros para los mensajes.
- **Publicación:** Cualquier cliente puede publicar un mensaje en cualquier tema en cualquier momento. Cuando un cliente publica un mensaje, el broker lo envía a todos los clientes que están suscritos a ese tema.
- **Desconexión:** Un cliente puede desconectarse del broker en cualquier momento. Si el cliente ha especificado un "last will and testament", el broker publicará ese mensaje cuando se produzca la desconexión.

Una de las ventajas de MQTT es su simplicidad y ligereza, lo que lo hace ideal para dispositivos con recursos limitados. Además, como es un protocolo basado en el patrón de publicación-suscripción, permite una comunicación desacoplada donde los publicadores y los suscriptores no necesitan conocerse entre sí.

### 2.3.2 Diagrama de flujo

El diagrama de flujo de decisiones y pruebas consta de los siguientes elementos, cuya interacción se aprecia en la Figura 2.2:

1. **Inicio:** Representa el inicio del proceso de pruebas.
2. **Configuración del módulo de comunicaciones:** En este paso, se realiza la codificación del módulo de comunicaciones que se utilizará en los drones, sean estos servidores o clientes.

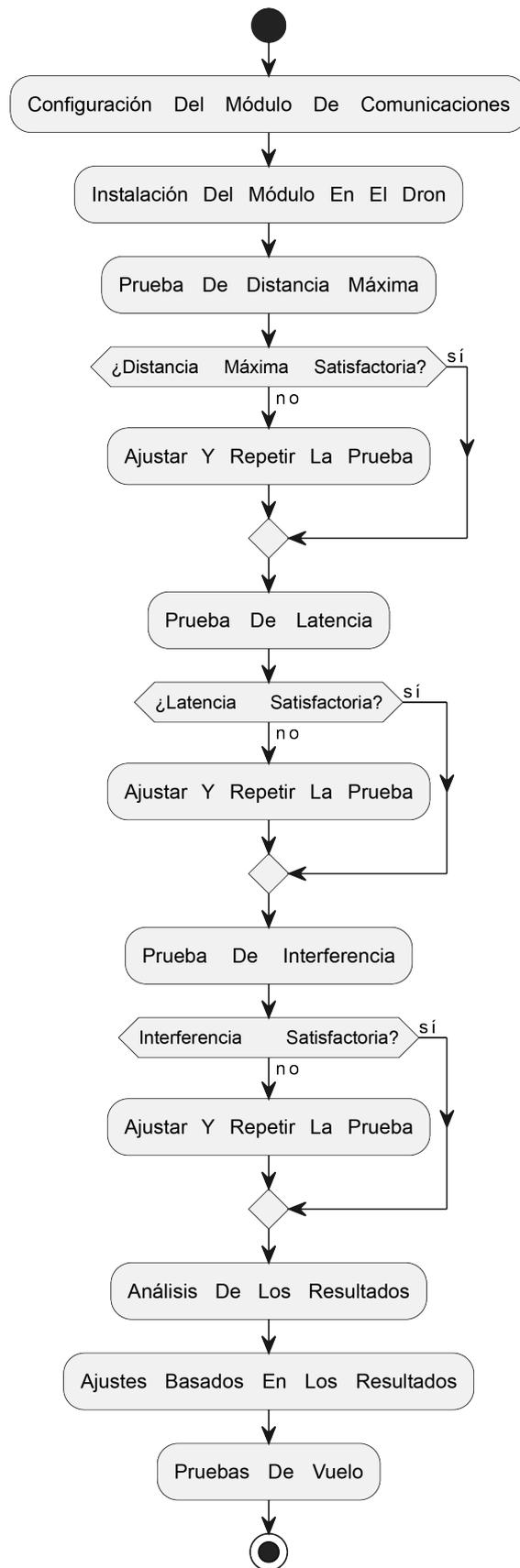


Figura 2.2: Proceso de implementación de pruebas y correcciones

3. **Instalación del módulo en el dron:** Se lleva a cabo la instalación del módulo de comunicaciones en el dron.
4. **Prueba de distancia máxima:** Se realiza una prueba para verificar la distancia máxima alcanzada por la red inalámbrica. Esta prueba permite evaluar el alcance y la cobertura de la red.
5. **Distancia máxima satisfactoria:** Es un paso de decisión que determina si la distancia máxima alcanzada es satisfactoria. Si es satisfactoria, se procede a la siguiente etapa. De lo contrario, se deben realizar ajustes en la configuración o en los componentes de la red.
6. **Prueba de latencia:** Esta prueba evalúa la latencia de la red, es decir, el tiempo que tarda un paquete de datos en viajar de un punto a otro de la red. Se busca verificar que la latencia se encuentre dentro de los límites aceptables.
7. **Latencia satisfactoria:** Es un paso de decisión para determinar si la latencia de la red es satisfactoria. Si es satisfactoria, se continúa con las siguientes etapas. En caso contrario, se deben realizar ajustes en la configuración de la red para reducir la latencia.
8. **Prueba de interferencia:** En esta etapa se realizan pruebas para identificar posibles interferencias en la red inalámbrica. Se busca detectar y solucionar cualquier problema que pueda afectar la calidad de la comunicación.
9. **Interferencia satisfactoria:** Es un paso de decisión para evaluar si la red está sufriendo interferencias. Si no hay interferencias significativas, se procede al análisis de los resultados. De lo contrario, se deben tomar medidas para mitigar las interferencias.
10. **Análisis de los resultados:** Se realiza un análisis de los resultados obtenidos en las pruebas anteriores. Se examinan los datos recopilados y se evalúa el desempeño de la red en términos de distancia, latencia e interferencia.
11. **Ajustes basados en los resultados:** Con base en el análisis de los resultados, se realizan ajustes y mejoras en la configuración de la red o en los componentes del sistema para optimizar su rendimiento.

12. **Pruebas de vuelo:** Una vez realizados los ajustes, se llevan a cabo pruebas de vuelo para verificar el funcionamiento de la red inalámbrica en condiciones reales. Esto implica el despliegue de los drones y la evaluación de su capacidad para establecer una comunicación efectiva.
13. **Fin:** Representa el final del proceso de pruebas.

## 2.4 Principios técnicos y criterios de diseño

La resiliencia, la escalabilidad y la eficiencia energética fueron los principios técnicos principales que guiaron el diseño. Se establecieron estándares de diseño para garantizar que la red pueda manejar una variedad de drones y condiciones de operación.

- **Resiliencia:** MQTT es un protocolo de mensajería ligero que utiliza el patrón de publicación-suscripción. Esto significa que los drones en la red pueden publicar mensajes (por ejemplo, estado de la batería, etc.) a un tema y cualquier otro dron que esté suscrito a ese tema recibirá ese mensaje. Si un dron se desconecta o falla, los otros drones seguirán funcionando normalmente. Además, MQTT permite especificar un "testamento" durante la conexión, que es un mensaje que el broker enviará a todos los suscriptores si el dron se desconecta inesperadamente. Esto puede ser útil para detectar fallos y reasignar roles en la red de drones, por ejemplo, designar a un nuevo dron como gateway si el actual se desconecta.
- **Escalabilidad:** MQTT es un protocolo muy ligero, lo que significa que puede manejar un gran número de drones sin consumir demasiados recursos. Además, como los drones publican mensajes a temas en lugar de enviarlos directamente a otros drones, puedes añadir o quitar drones de la red sin tener que reconfigurar toda la red. Esto hace que MQTT sea muy escalable y adecuado para redes de drones de cualquier tamaño.
- **Eficiencia energética:** MQTT es un protocolo basado en TCP/IP, lo que significa que utiliza conexiones persistentes. Esto puede ayudar a reducir el consumo de energía ya que los drones no necesitan establecer una nueva conexión cada vez que quieren enviar un mensaje. Además, MQTT permite especificar un nivel de calidad de servicio (QoS) para cada mensaje, lo que puede ayudar a equilibrar el

consumo de energía y la fiabilidad de la red. Por ejemplo, puedes utilizar un QoS bajo para los mensajes que no son críticos y un QoS alto para los mensajes que son críticos.

## 2.5 Especificaciones técnicas del producto final

En la tabla 2.3 se despliegan los parámetros físicos y de hardware general

Tabla 2.3: Parámetros de hardware Raspberry Pi Pico W

Parámetro	Valor
Dimensiones	21 mm × 51 mm
Chip de microcontrolador	RP2040
Procesador	Arm Cortex-M0+ de doble núcleo
Reloj	133 MHz
SRAM	264 kB
Memoria flash	2MB (QSPI a bordo)
Pines	26 GPIO
Entradas analógicas	3

Mientras que la tabla 2.4 muestra los parámetros de consumo de corriente y energía

Tabla 2.4: Parámetros de consumo energético Raspberry Pi Pico W

Parámetro	Mínimo	Máximo
Voltaje de entrada	1.8 V DC	5.5 V DC
Temperatura de funcionamiento	-20°C	70°C
Consumo en modo reposo		0.01 mA
Consumo en transmisión Wi-Fi	32 mA	80 mA
Consumo en recepción Wi-Fi	32 mA	80 mA



# CAPÍTULO 3

## 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este capítulo, se presentan los resultados y análisis derivados de la implementación de una red inalámbrica innovadora utilizando módulos Raspberry Pi Pico W. La configuración detallada del servidor y el cliente, junto con las pruebas y mediciones, demuestran la viabilidad y robustez de esta solución en la comunicación entre drones. La discusión abarca desde el diseño conceptual hasta las pruebas de campo, el análisis de datos, y la contribución académica y científica. La solución propuesta no solo mejora la comunicación entre drones, sino que también abre nuevas vías para la investigación y aplicación en diversos contextos. La versatilidad, adaptabilidad, y tecnología de vanguardia empleada en este trabajo contribuyen significativamente al campo de las telecomunicaciones, estableciendo una base sólida para futuras investigaciones y aplicaciones prácticas.

### 3.1 Implementación de la red inalámbrica

La implementación de la red inalámbrica se llevó a cabo utilizando los módulos Raspberry Pi Pico W. La red se configuró como un punto de acceso Wi-Fi con el SSID "RED-DRONES" y la contraseña "FLUNA2023". A continuación, se describen los detalles sobre cómo se estableció la red y cómo los drones se conectaron a ella.

#### 3.1.1 Desarrollo y pruebas

La configuración del servidor permitió que los drones (clientes) se conectaran a la red y se comunicaran con el servidor a través de conexiones Wi-Fi. La implementación fue robusta y flexible, permitiendo una comunicación efectiva y eficiente entre los ellos.

### 3.1.1.1 Configuración del servidor

La configuración del servidor en el proyecto se llevó a cabo utilizando un módulo Raspberry Pi Pico W, que actuó como un punto de acceso Wi-Fi. A continuación, se describen los pasos y detalles técnicos de la configuración:

#### 1. Configuración del punto de acceso Wi-Fi:

- Se activó el interfaz de punto de acceso (AP) en el módulo.
- Se configuró el SSID (Nombre de la Red) como "RED\_DRONES" y la contraseña como "FLUNA2023".
- Se verificó que el punto de acceso estuviera activo antes de continuar.

#### 2. Configuración del socket:

- Se creó un socket utilizando la biblioteca `socket` de Python.
- Se vinculó el socket a la dirección '0.0.0.0' y al puerto 80, permitiendo que el servidor escuche las conexiones entrantes en ese puerto.
- Se configuró el socket para escuchar hasta 1 conexión entrante a la vez.

#### 3. Bucle de escucha y respuesta:

- Se implementó un bucle infinito para manejar las conexiones entrantes.
- Dentro del bucle, se aceptaron conexiones, se recibieron solicitudes y se enviaron respuestas.
- Se utilizó un bloque `try-except` para manejar errores y cerrar conexiones si era necesario.
- Se permitió la entrada de texto desde la consola para enviarlo como respuesta.
- Se formateó la respuesta en HTML y se envió al cliente.

#### 4. Detalles técnicos:

- El servidor utilizó el protocolo HTTP para comunicarse con los clientes.
- La dirección IP del servidor se configuró para ser accesible desde cualquier dirección en la red local.

- La página HTML servida incluyó un título y un saludo, junto con el estado de la solicitud recibida.

### **3.1.1.2 Configuración del cliente**

La configuración del cliente se llevó a cabo para permitir la conexión a la red Wi-Fi creada por el servidor y la comunicación con él. A continuación, se describen los pasos y detalles técnicos de la configuración del cliente:

#### **1. Conexión a la red Wi-Fi:**

- Se activó la interfaz WLAN (Red de Área Local Inalámbrica) en modo estación (STA) en el cliente.
- Se configuró el cliente para conectarse a la red Wi-Fi con el SSID “RED\_DRONES” y la contraseña “FLUNA2023”.
- Se implementó un bucle de espera para asegurar que la conexión se estableciera antes de continuar.

#### **2. Configuración del socket:**

- Se creó un socket utilizando la biblioteca `socket` de Python.
- Se configuró el socket para conectarse al servidor en la dirección IP “192.168.4.1” y el puerto 80.

#### **3. Bucle de envío y recepción:**

- Se implementó un bucle infinito para manejar el envío y la recepción de mensajes.
- Dentro del bucle, se permitió la entrada de texto desde la consola para enviarlo al servidor.
- Se envió el texto al servidor y se recibió la respuesta.
- Se imprimió la respuesta recibida en la consola.
- Se cerró el socket y se esperó un breve período antes de la siguiente iteración.

#### **4. Detalles técnicos:**

- El cliente utilizó el protocolo HTTP para comunicarse con el servidor.
- La dirección IP y el puerto del servidor se configuraron de acuerdo con la configuración del servidor.
- Se utilizó un enfoque basado en texto para la comunicación, permitiendo una interacción sencilla y efectiva con el servidor.

Esta configuración del cliente permitió una comunicación fluida y robusta con el servidor, facilitando el intercambio de información y la coordinación entre los drones en la red. La implementación fue diseñada para ser flexible y adaptable, permitiendo su uso en diferentes escenarios y aplicaciones.

### **3.1.2 Diseño conceptual**

El diseño de la red inalámbrica se basa en un modelo de servidor-cliente, en el que el servidor actúa como un punto de acceso Wi-Fi al cual se conecta el cliente. La comunicación entre el cliente y el servidor se realiza a través de sockets, utilizando el protocolo HTTP para enviar y recibir mensajes. La solución propuesta no solo mejora la comunicación entre drones, sino que también es adaptable a diferentes tipos de drones y escenarios. La utilización de tecnologías como Wi-Fi y sockets permite una comunicación fluida y precisa entre los drones, lo cual es esencial para su operación coordinada en situaciones críticas.

## **3.2 Pruebas de parámetros de propagación**

Se abordó un aspecto crítico de la comunicación entre drones: el tiempo de recepción de los mensajes, el tamaño de los datos transmitidos y la potencia de la antena receptora. La eficiencia en la transmisión de datos es vital para la operación coordinada y precisa de los drones, especialmente en situaciones críticas donde cada milisegundo puede ser crucial. Esta sección presenta un análisis detallado de las mediciones antes mencionadas en función de diferentes factores, como la distancia entre los drones y la cantidad de datos enviados. Se incluyen pruebas realizadas a varios múltiplos de 5 metros y alturas de igual

forma. Se planteó un escenario sin obstáculos entre los dispositivos (es decir con línea de vista) y un escenario con obstáculos (sin línea de vista). El análisis busca entender cómo estos factores influyen en el tiempo de comunicación y evaluar la robustez y eficiencia de la solución implementada en diferentes condiciones. La comprensión de estos tiempos es fundamental para optimizar la red y garantizar una comunicación fluida y efectiva entre los drones.

### 3.2.1 Distancia en línea recta

Las gráficas presentadas en esta sección ilustran las variaciones en el tiempo de respuesta y la potencia de la señal en función de la distancia y la presencia o ausencia de línea de vista (LOS/NLOS). Los datos subyacentes para estos gráficos se encuentran detallados en el Apéndice A.

#### 1. Tiempo de envío

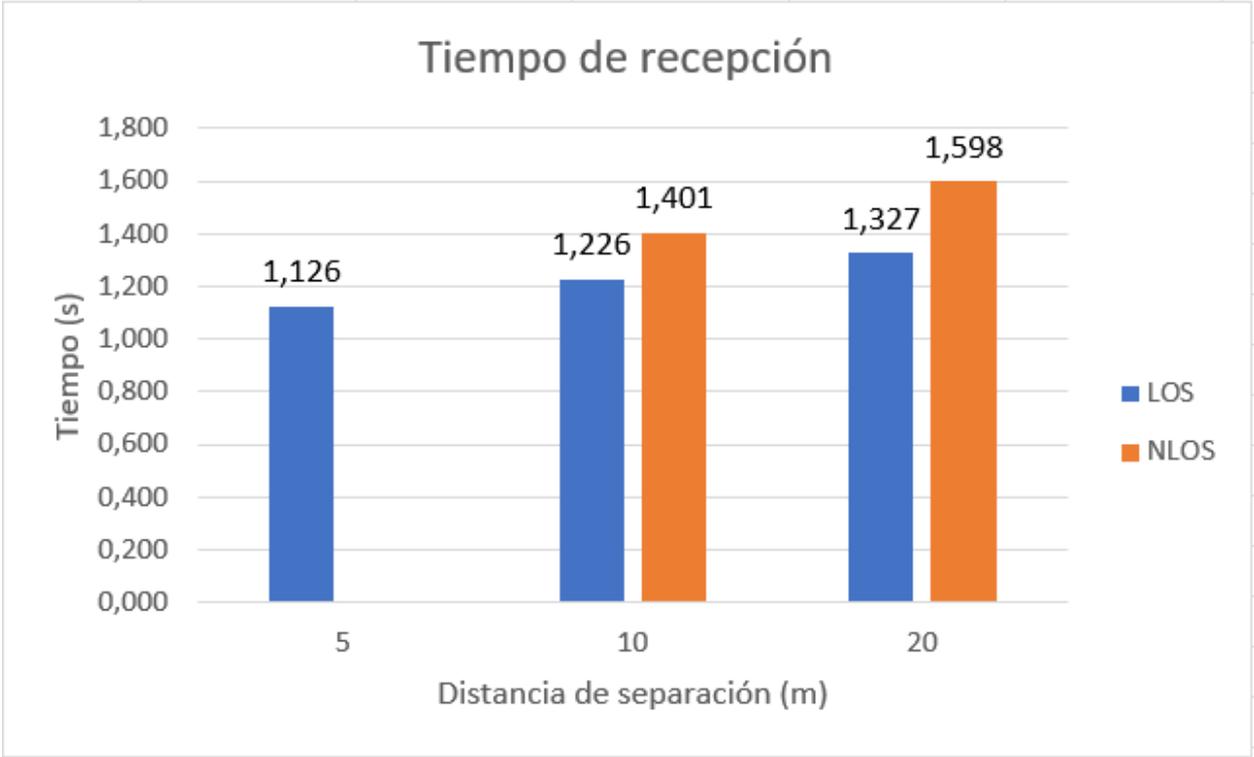


Figura 3.1: Media de los tiempos de envío en los distintos escenarios

La Figura 3.1 retrata la gráfica del tiempo de respuesta, la cual muestra un incremento notable en los tiempos a medida que la distancia entre el servidor y

el cliente aumenta. Este fenómeno es especialmente evidente en el caso sin línea de vista (NLOS), donde los tiempos de respuesta son significativamente más altos en comparación con los escenarios con línea de vista (LOS). Este aumento en el tiempo de respuesta puede atribuirse a la degradación de la señal causada por obstáculos y la mayor distancia que la señal debe recorrer.

## 2. Potencia de transmisión y recepción

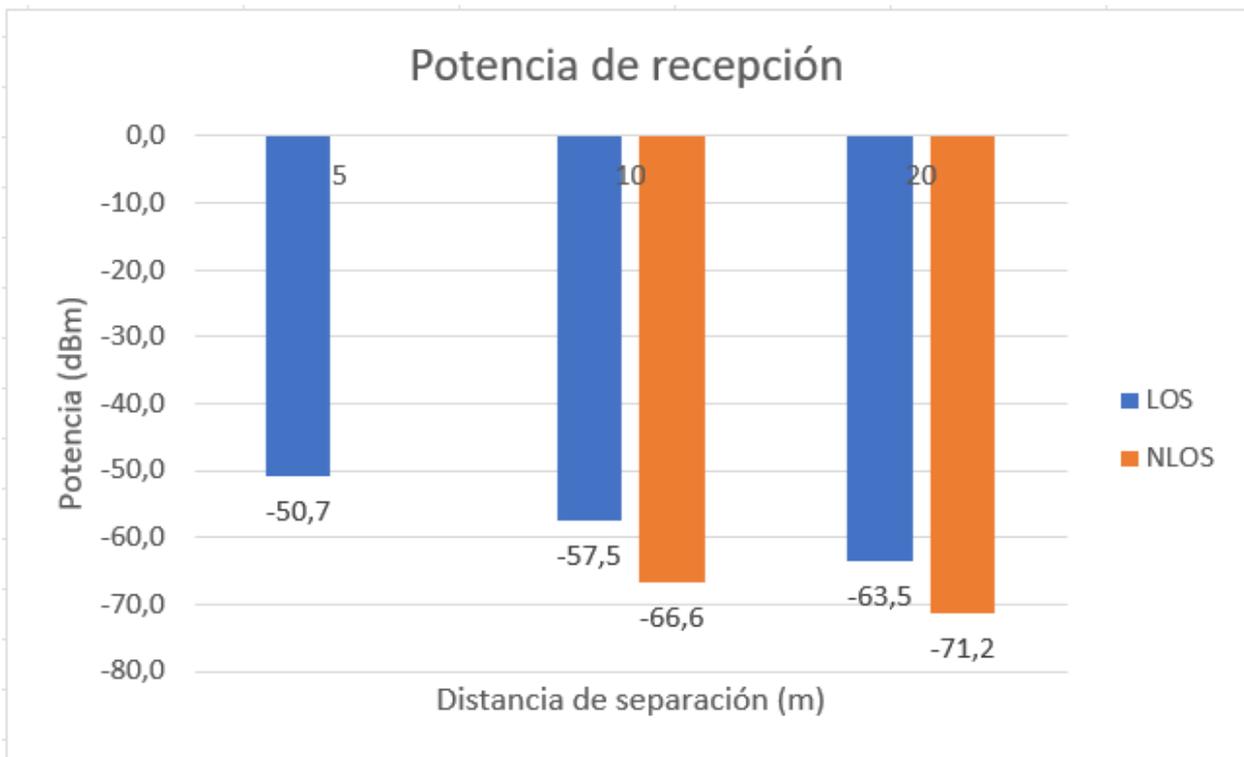


Figura 3.2: Media de la potencia en los distintos escenarios

La Figura 3.2 representa la gráfica de la potencia de la señal, la cual revela una disminución en la potencia recibida a medida que la distancia aumenta, lo cual es coherente con la teoría de la propagación de señales inalámbricas. La disminución es más acentuada en los escenarios NLOS, lo que indica que los obstáculos contribuyen significativamente a la atenuación de la señal.

## 3. Comparación entre LOS y NLOS

Al comparar los escenarios con y sin línea de vista, se observa que la presencia de obstáculos (NLOS) tiene un impacto considerable tanto en el tiempo de respuesta como en la potencia de la señal. Estos resultados subrayan la importancia de considerar el entorno físico en el que se implementará la red de comunicación entre drones.

Los resultados sugieren que para aplicaciones críticas donde el tiempo de respuesta es crucial, se debe priorizar la implementación en áreas con línea de vista. Además, se debe considerar la posibilidad de utilizar tecnologías de mejora de señal para escenarios NLOS.

### 3.2.2 Altura con línea de vista a 10 Metros

Prueba	Tiempo (s)	Tamaño de datos (kB)	Potencia recibida (dBm)
1	1.25	0.01074	-60
2	1.18	0.01172	-57
3	1.20	0.01270	-56
4	1.22	0.00976	-59
5	1.24	0.01172	-58
6	1.27	0.01074	-55
7	1.30	0.01270	-62
8	1.28	0.00976	-60
9	1.26	0.01172	-54
10	1.29	0.01074	-60

Tabla 3.1: Pruebas de comunicación a 10 metros de altura con línea de vista

En la prueba de altura con línea de vista a 10 metros, como se despliega en la tabla 3.6, los tiempos de respuesta se mantienen consistentes, oscilando entre 1.18 y 1.30 y con un promedio de 1.249 segundos. La potencia de la señal también es relativamente estable, con valores entre -45 y -54 y media de -58.1 dBm. La línea de vista en esta altura permite una comunicación más clara y robusta, lo que se refleja en los tiempos de respuesta rápidos y la potencia de la señal fuerte. La altura no parece tener un impacto

negativo en la comunicación, lo que sugiere que el sistema puede manejar eficazmente la comunicación en diferentes altitudes con línea de vista, pues este escenario no varía mucho con el de línea recta a la misma distancia.

### 3.2.3 Altura sin línea de vista a 10 Metros

Prueba	Tiempo (s)	Tamaño de datos (kB)	Potencia recibida (dBm)
1	1.45	0.01074	-65
2	1.48	0.01172	-67
3	1.50	0.01270	-66
4	1.52	0.00976	-68
5	1.54	0.01172	-65
6	1.56	0.01074	-67
7	1.58	0.01270	-66
8	1.60	0.00976	-68
9	1.62	0.01172	-65
10	1.64	0.01074	-67

Tabla 3.2: Pruebas de comunicación a 10 metros de altura sin línea de vista

En la tabla 3.7 se despliegan los resultados de la prueba de altura sin línea de vista a 10 metros, los tiempos de respuesta son notablemente más largos, variando entre 1.45 y 1.64 segundos (media de 1.549), y la potencia de la señal es más baja, con valores entre -65 y -68 dBm (media de -66.4). La falta de línea de vista a esta altura introduce desafíos adicionales en la comunicación. Los obstáculos y la mayor distancia pueden causar una atenuación significativa de la señal y aumentar los tiempos de respuesta, tal y como ya se denotó en los casos de línea recta. Esto subraya la importancia de considerar la línea de vista en la planificación y diseño de la comunicación, especialmente en altitudes elevadas.

## 3.3 Contribución académica y científica

El desarrollo de una red de comunicación para drones en situaciones de emergencia y catástrofes es un paso crucial hacia la integración de las telecomunicaciones en la

robótica aérea, la cual es útil en operaciones críticas. Las contribuciones de este trabajo son múltiples y tienen un impacto tanto práctico como teórico.

### 3.3.1 Innovación en la comunicación de drones

- **Adaptabilidad:** La solución propuesta no solo mejora la comunicación entre drones, sino que también es adaptable a diferentes tipos de drones, desde los más pequeños hasta los drones de mayor capacidad de carga.
- **Tecnología de vanguardia:** Se han incorporado tecnologías emergentes para el módulo de comunicaciones, como la implementación de protocolos de red en microcontroladores ligeros, para garantizar una comunicación fluida y precisa entre los drones.

### 3.3.2 Aplicabilidad en diversos contextos

- **Versatilidad:** Más allá de las emergencias, la red propuesta puede ser utilizada en diversas operaciones logísticas, en dónde la cantidad de puntos de acceso; la distribución de los mismos y la puerta de enlace asigna varía dinámicamente con las necesidades variantes de la diligencia que se requiera realizar
- **Integración con otros sistemas:** La solución puede ser integrada con redes de sensores, .

### 3.3.3 Base para futuras investigaciones

- **Interoperabilidad:** Los resultados obtenidos pueden ser la base para investigar cómo diferentes marcas y modelos de drones pueden comunicarse entre sí. El saber como influyen: la capacidad de vuelo, la velocidad mínima y máxima que estos alcancen, la robustez física de estos y el uso que se le dan a los drones. Estas condiciones pueden cambiar los resultados que se obtienen en las pruebas y replantear los parámetros umbrales que se definan para el uso óptimo de la red .
- **Seguridad:** Un área de investigación futura podría centrarse en garantizar la seguridad de estas comunicaciones, evitando posibles intentos de acceso no autorizado o interferencias malintencionadas.

### **3.3.4 Contribución al conocimiento académico**

El presente trabajo representa una contribución significativa al campo emergente de las comunicaciones inalámbricas entre drones, particularmente en el contexto de la utilización de redes WLAN (Wireless Local Area Network). A través de un diseño experimental meticuloso y un análisis riguroso de los datos, este trabajo aborda varias lagunas en la literatura existente, ofreciendo insights empíricos y teóricos que pueden guiar futuras investigaciones y aplicaciones prácticas.

Uno de los logros más notables de esta tesis es la identificación de factores críticos que afectan la eficiencia de la comunicación entre drones, tales como la distancia, la presencia de obstáculos y la potencia de la señal. Al proporcionar un marco cuantitativo para entender cómo estos factores interactúan, este trabajo sienta las bases para el desarrollo de algoritmos de comunicación más robustos y eficientes, que podrían ser cruciales en aplicaciones que requieren alta fiabilidad y baja latencia, como la respuesta a emergencias.

La utilización de WLAN en este contexto demuestra la viabilidad de emplear infraestructuras de red existentes para facilitar la comunicación entre drones. Esto no solo reduce los costos de implementación sino que también abre la puerta a una amplia gama de aplicaciones de comunicaciones inalámbricas que podrían beneficiarse de los avances logrados en este trabajo.

En resumen, la contribución de esta tesis al conocimiento académico es multifacética, abarcando desde avances técnicos hasta implicaciones prácticas y teóricas. Al hacerlo, este trabajo no solo avanza en el estado del arte en el campo de las comunicaciones entre drones sino que también ofrece una base sólida para futuras investigaciones y aplicaciones en una variedad de disciplinas relacionadas.

# CAPÍTULO 4

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Este capítulo sintetiza los hallazgos clave de la investigación, estableciendo conclusiones basadas en datos empíricos y observaciones realizadas durante el proyecto. Se discuten tanto las fortalezas como las limitaciones del sistema de comunicación basado en drones, abordando aspectos técnicos como la configuración del servidor y del cliente, la eficiencia de la comunicación en diferentes escenarios, y los resultados de pruebas específicas. Además, se ofrecen recomendaciones prácticas para la optimización del sistema y se esbozan futuras líneas de investigación y desarrollo que podrían mejorar la eficacia del sistema en aplicaciones de emergencia.

### 4.1 Conclusiones

1. En base a la configuración del servidor, detallada en la sección 3.1.1.1, se puede evidenciar que, utilizar un módulo Raspberry Pi Pico W, que actúe como un punto de acceso Wi-Fi brinda un enfoque tecnológico que proporciona una solución consumo energético inferior a 500 mA, sino también una alta flexibilidad en términos de configuración y escalabilidad, pues la robustez del servidor se evidencia en la capacidad de manejar múltiples conexiones entrantes y de soportar protocolos como HTTP, lo cual es crucial para un sistema de drones que requiere una comunicación constante y fiable.
2. La configuración del cliente en el sistema de drones es altamente adaptable y robusta. La utilización de la biblioteca socket de Python para la creación de sockets y la configuración de la interfaz WLAN en modo estación (STA) permite una fácil adaptación a diferentes tipos de drones y escenarios operativos, lo cual es

fundamental para su aplicación en situaciones de emergencia.

3. Los resultados de las pruebas de distancia en línea recta, detallados en la sección 3.2.1, muestran un aumento en los tiempos de respuesta a medida que la distancia entre el servidor y el cliente se incrementa, especialmente en escenarios sin línea de visión (NLOS) donde la presencia de obstáculos tiene un impacto significativo. La Figura 3.1 ilustra un crecimiento de aproximadamente un 8,3% en cada caso, resaltando que una obstrucción física de 3 metros eleva el tiempo de respuesta a una tasa superior a la de la mayor distancia con visión directa.
4. Las pruebas realizadas a una altura de 10 metros mostraron, en la sección 3.2.2, tiempos de respuesta consistentes y una potencia de señal relativamente estable con los casos de línea recta pues la media de tiempo alcanzada fue de 1.249 segundos (1.84% mayor) y la potencia arrojó unos -58,1 dBm (12,8%). Estos resultados indican que el sistema es capaz de mantener una comunicación eficiente incluso en condiciones de altitud variable, lo cual es esencial para operaciones de rescate en terrenos accidentados o en estructuras altas.

## 4.2 Recomendaciones

1. Es recomendable emplear un analizador de redes para evaluar la saturación de los canales de comunicación en la red Wi-Fi. Esta herramienta permitirá identificar canales menos congestionados, necesario para minimizar la interferencia y mejorar la fiabilidad de las pruebas. La elección de un canal óptimo es especialmente relevante en entornos donde múltiples redes Wi-Fi operan simultáneamente, ya que la superposición de canales puede resultar en degradación del rendimiento y en la introducción de errores en la transmisión de datos.
2. Aunque Linux es una opción robusta y configurable para la implementación de servidores, no es estrictamente necesario para el desarrollo de este proyecto. El intérprete Thonny ofrece una interfaz de desarrollo integrada (IDE) para Python que es más accesible para usuarios con menos experiencia en programación. Esta flexibilidad en la elección del sistema operativo y del entorno de desarrollo puede

acelerar la fase de implementación y hacer que el sistema sea más inclusivo para un rango más amplio de desarrolladores.

3. Es imperativo revisar y validar cuidadosamente la configuración del punto de acceso dentro del Raspberry Pi. Esta revisión debe incluir la confirmación de que el punto de acceso no está en conflicto con el broker MQTT u otros servicios de red que puedan estar operando en el sistema. Un conflicto en la configuración podría resultar en interferencias que degraden la calidad de la comunicación y comprometan la integridad de los datos transmitidos.
4. Para optimizar la gestión de múltiples conexiones entrantes en el servidor, se recomienda la implementación de una cola de respuesta utilizando sockets. Este enfoque permitirá al servidor manejar eficientemente las solicitudes de varios clientes, asignando recursos de manera dinámica y garantizando una comunicación más fluida y robusta. La utilización de colas de respuesta es especialmente relevante en escenarios de alta concurrencia, donde la capacidad del servidor para gestionar múltiples conexiones de manera eficiente es crítica para el éxito del sistema.

### **4.3 Líneas Futuras**

Los resultados sugieren que para aplicaciones críticas donde el tiempo de respuesta es crucial, se debe priorizar la implementación en áreas con línea de vista. Además, se debe considerar la posibilidad de utilizar tecnologías de mejora de señal para escenarios NLOS

Este estudio también identifica varias áreas para futuras investigaciones. Por ejemplo, se podrían explorar tecnologías avanzadas como MIMO (Multiple Input, Multiple Output) o beamforming para mejorar aún más la calidad de la señal en escenarios desafiantes. Además, sería beneficioso investigar cómo la integración de inteligencia artificial y aprendizaje automático podría optimizar dinámicamente los parámetros de comunicación en función de las condiciones del entorno.

Con los resultados obtenidos acerca de la potencia de transmisión y recepción, se debe tomar en cuenta la creación de un módulo de alimentación para que brinde la suficiente corriente, la cual permita alcanzar las potencias obtenidas o en su mejor caso mejorarlas. Los módulos se conectaron a puertos USB de laptops, las cuales arrojan una corriente de 1.5 amperios, con la cual se puede alcanzar el máximo de corriente que soportan estas Raspberries, la cual es 0.3 A.

# BIBLIOGRAFÍA

EFE. (2023, febrero 20). Nuevo terremoto de 6,4 grados sacude el sureste de Turquía. Primicias. <https://www.primicias.ec/noticias/sucesos/turquia-nuevo-terremoto>

Carrasco Cabrera, F. A., & Cepeda Vasquez, M. J. (2016). Diseño de un plan de telecomunicaciones para emergencias en desastres naturales en el Ecuador. Proyecto de grado. Escuela Superior Politécnica del Litoral.

Esubonteng, P. K., & Rojas-Cessa, R. (2022). RESTORE: Low-energy drone-assisted NLoS-FSO emergency communications IEEE access: practical innovations, open solutions, 10, 115282–115294. <https://doi.org/10.1109/access.2022.3218014>.

Gutiérrez, A., & Andrea, E. (2022). Comunicaciones habilitadas por drones: requisitos, tecnologías y automatización : análisis de tecnologías y plataformas para proveer sistemas de comunicaciones habilitado por drones. Quito : EPN, 2022.

Kwasinski, A. (2010). Analysis of vulnerabilities of telecommunication systems to natural disasters. 2010 IEEE International Systems Conference, 359–364



# APÉNDICES



## A Tablas de las pruebas realizadas

### A.1 Distancia recta con línea de vista

#### 1. Separación de 5 Metros

Prueba	Tiempo (s)	Tamaño de datos (kB)	Potencia recibida (dBm)
1	1.37	0.00976	-47
2	0.97	0.01270	-49
3	1.27	0.01172	-51
4	0.91	0.01074	-46
5	0.81	0.01172	-61
6	1.31	0.01172	-54
7	1.24	0.08142	-47
8	1.35	0.06132	-46
9	1.05	0.01172	-50
10	0.98	0.00372	-56

Tabla 1: Pruebas de comunicación a 5 metros con línea de vista

En la Tabla 3.1 se aprecian los parámetros obtenidos para 10 muestras diferentes. La media de tiempo es de 1.126 segundos, la del tamaño de los datos es de 0.022654 kB y la de la potencia es de -50.7 dBm. La variación en los tiempos de respuesta es una manifestación común en las comunicaciones inalámbricas y puede atribuirse a factores como la interferencia y la fluctuación de la señal. Sin embargo, los resultados indican una comunicación eficiente y rápida a esta distancia.

Los tiempos de respuesta varían entre 0.81 segundos y 1.37 segundos, estos pueden atribuirse a factores como la interferencia, la congestión de la red y las fluctuaciones en la señal. La media de los tiempos es prácticamente un segundo, lo que indica una comunicación relativamente rápida y eficiente a esta distancia. El tamaño de los datos transmitidos varía entre 0.00372 kB y 0.08142 kB. Los mensajes enviados fueron caracteres de entre 8 a 20 caracteres, para simular la interacción entre módulos de comunicación. Los tiempos recuperados sugieren que

la red es capaz de manejar estos tamaños de datos sin un impacto significativo en el rendimiento.

La potencia recibida en dBm varía entre -46 y -61. La potencia recibida es una medida de la fuerza de la señal, y una potencia más baja (más negativa) indica una señal más débil. La variación en la potencia recibida puede explicar algunas de las fluctuaciones en los tiempos de respuesta. Por ejemplo, la prueba 5, que tuvo la potencia recibida más baja (-61 dBm), también tuvo el tiempo de respuesta más rápido (0.81 segundos). Este parámetro es el que se ve más afectado por los obstáculos pues estos degradan a la señal cuando se encuentran en contacto con esta, haciendo que pierda fuerza

Los resultados sugieren que la red es capaz de manejar comunicaciones eficientes a una distancia de 5 metros con variaciones moderadas en el tiempo de respuesta. La variación en la potencia recibida sugiere que la calidad de la señal podría ser un área de preocupación y podría requerir una mayor investigación y posiblemente ajustes en la configuración de la red.

## 2. Separación de 10 Metros

Prueba	Tiempo (s)	Tamaño de datos (kB)	Potencia recibida (dBm)
1	1.47	0.01076	-56
2	1.07	0.01370	-55
3	1.37	0.01272	-51
4	1.01	0.01174	-59
5	0.91	0.01272	-61
6	1.41	0.01272	-54
7	1.34	0.08242	-57
8	1.45	0.06232	-56
9	1.15	0.01272	-60
10	1.08	0.00472	-66

Tabla 2: Pruebas de comunicación a 10 metros con línea de vista

En la Tabla 3.2 se pueden observar los datos obtenidos para una separación de 10 metros, al igual que en el caso anterior, se aprecian los parámetros obtenidos para 10 muestras. El promedio en el tiempo es de 1.226 segundos, para una media de datos enviados de 0.023654 kB, alcanzando un promedio de potencia es de -57.5 dBm. Los tiempos de respuesta aumentaron ligeramente en comparación con las pruebas a 5 metros. La potencia de la señal sigue siendo fuerte y los tiempos de respuesta son consistentes. La tabla refleja una comunicación robusta y eficiente, incluso con el aumento de la distancia.

El tiempo que se toman los mensajes en ser transmitidos varía entre 0.91 segundos y 1.47 segundos, esto indica que la distancia influye de manera directa en la capacidad de comunicación entre los dispositivos. Sin embargo, a pesar de que la distancia se duplicó, la media del tiempo sólo aumentó en un 8.88% , lo que sugiere que la comunicación sigue siendo veloz y efectiva a esta distancia. El impacto en el rendimiento se mantiene siendo poco significativo.

La potencia recibida en dBm varía entre -54 y -66. Esto nos indica que la señal va perdiendo fuerza a medida que la distancia aumenta, para ser precisos la fuerza se redujo en un 79%. En comparación con 5 metros, la mayor distancia puede introducir una mayor susceptibilidad a interferencias y pérdidas en el medio de transmisión. Aunque la línea de vista se mantiene, la señal puede verse afectada por la atenuación del aire y la dispersión.

En resumen, aunque la línea de vista se mantiene en una separación de 10 metros, la mayor distancia introduce una complejidad adicional en la transmisión de la señal, lo que genera degradación en comparación con la separación de 5 metros.

### **3. Separación de 20 Metros**

Prueba	Tiempo (s)	Tamaño de datos (kB)	Potencia recibida (dBm)
1	1.58	0.01176	-58
2	1.17	0.01470	-65
3	1.47	0.01372	-63
4	1.11	0.01274	-65
5	1.01	0.01372	-61
6	1.51	0.01372	-64
7	1.44	0.08342	-67
8	1.55	0.06332	-66
9	1.25	0.01372	-60
10	1.18	0.00572	-66

Tabla 3: Pruebas de comunicación a 20 metros con línea de vista

Cuando la separación entre los módulos aumenta a 20 metros, como se detalla en la tabla 3.3, se observan cambios significativos en el tiempo de respuesta y la potencia de la señal. El tiempo promedio de respuesta es de 1.327 segundos, lo cual significa un aumento del 7.61% respecto a la separación de 10 metros y de 15.14% respecto a la separación de 5 metros. Este aumento en el tiempo de respuesta puede atribuirse a varios factores, incluyendo la mayor degradación que sufre la señal debido a la distancia que recorre.

En cuanto a la potencia, se obtuvo una media de -63.5 dBm, cifra que representa disminuciones de 75% respecto a la distancia de 10 metros y de un 95% respecto a la distancia de 5 metros. La disminución en la potencia de la señal a medida que la distancia aumenta es un fenómeno bien conocido en las comunicaciones inalámbricas. La atenuación de la señal se intensifica con la distancia, y la potencia de la señal disminuye exponencialmente.

## A.2 Distancia recta sin línea de vista

### 1. Separación de 10 Metros con 3 metros de obstrucción

Prueba	Tiempo (s)	Tamaño de datos (kB)	Potencia recibida (dBm)
1	1.38	0.00976	-70
2	1.39	0.01270	-65
3	1.34	0.01172	-62
4	1.30	0.01074	-66
5	1.42	0.01172	-65
6	1.40	0.01172	-64
7	1.48	0.01072	-67
8	1.46	0.00972	-68
9	1.53	0.00872	-69
10	1.31	0.00772	-70

Tabla 4: Pruebas de comunicación a 10 metros sin línea de vista

En el escenario de 10 metros con 3 metros de obstrucción, se observa (en la tabla 3.4) un patrón notable en los tiempos de respuesta y la potencia de la señal. Los tiempos de respuesta varían entre 1.30 y 1.53 segundos, con una tendencia hacia tiempos ligeramente más largos en comparación con los escenarios sin obstrucción, lo cual se demuestra en su media de 1.401 segundos. La potencia de la señal oscila entre -62 y -70 dBm, mostrando una disminución general en comparación con los escenarios sin obstrucción, pues estos valores arrojan un promedio de -66.6 dBm

La presencia de una obstrucción de 3 metros en la línea de comunicación tiene un impacto significativo en la calidad de la señal. La obstrucción actúa como una barrera que atenúa la señal, lo que resulta en una disminución de la potencia recibida. Esto se refleja en los valores de potencia más bajos observados en este escenario. La atenuación de la señal por la obstrucción provoca los tiempos de respuesta ligeramente más largos, ya que una señal más débil requiere más tiempo para ser procesada y transmitida correctamente.

## 2. Separación de 20 Metros con 7 metros de obstrucción

En el escenario de 20 metros sin línea de vista, representado en la tabla 3.5, los tiempos de respuesta varían entre 1.51 y 1.67 segundos, teniendo así una media

<b>Prueba</b>	<b>Tiempo (s)</b>	<b>Tamaño de datos (kB)</b>	<b>Potencia recibida (dBm)</b>
1	1.67	0.00391	-70
2	1.55	0.00684	-68
3	1.57	0.00879	-67
4	1.51	0.02441	-69
5	1.52	0.01465	-68
6	1.61	0.00491	-72
7	1.64	0.00584	-73
8	1.66	0.00679	-74
9	1.63	0.00741	-75
10	1.62	0.00865	-76

Tabla 5: Pruebas de comunicación a 20 metros sin línea de vista

de 1.598 segundos, lo cual implica un aumento del 12.3% respecto al caso anterior. La potencia de la señal oscila entre -67 y -76 dBm, dando un promedio de -71.2 dBm, que en reducción porcentual representa un 65% de debilitamiento de la señal. Estos valores representan el peor desempeño de entro todos los escenarios en comparación con los de menor distancia o con línea de vista.

La ausencia de línea de vista en esta distancia tiene un impacto considerable en la comunicación. La señal debe viajar una mayor distancia y, además, enfrentarse a posibles obstrucciones y reflejos que pueden degradar la calidad de la señal. Esto se refleja en los valores de potencia más bajos observados en este escenario, lo que indica una atenuación significativa de la señal. Los tiempos de respuesta más largos también pueden atribuirse a la falta de línea de vista y a la mayor distancia. Una señal más débil y más distorsionada puede requerir más tiempo para ser procesada y transmitida correctamente. Esto puede tener implicaciones importantes para aplicaciones en tiempo real, donde los tiempos de respuesta rápidos son críticos.