

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO



FACULTAD DE INGENIERÍA

CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

“Proyecto de investigación previo a la obtención del Título de:

Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones”

TRABAJO DE TITULACIÓN

“Análisis e implementación de protocolos de enrutamiento en una red Ad Hoc aérea (FANET) para la telegestión de UAVs”

Autor:

Jhonny Medardo Carchi Curimilma

Tutor:

Mgs. Edgar Giovanni Cuzco Silva.

Riobamba – Ecuador

Año 2022

DERECHOS DE AUTORÍA

Yo, **JHONNY MEDARDO CARCHI CURIMILMA**, con cédula de ciudadanía 190080302-2, autor del trabajo de investigación titulado: “**ANÁLISIS E IMPLEMENTACIÓN DE PROTOCOLOS DE ENRUTAMIENTO EN UNA RED AD HOC AÉREA (FANET) PARA LA TELEGESTIÓN DE UAVS**”, certifico que la producción, ideas, opiniones, criterios, contenidos y conclusiones expuestas son de mí exclusiva responsabilidad.

Asimismo, cedo a la Universidad Nacional de Chimborazo, en forma no exclusiva, los derechos para su uso, comunicación pública, distribución, divulgación y/o reproducción total o parcial, por medio físico o digital; en esta cesión se entiende que el cesionario no podrá obtener beneficios económicos. La posible reclamación de terceros respecto a los derechos de autor de la obra referida será de mi entera responsabilidad; librando a la Universidad Nacional de Chimborazo de posibles obligaciones.

En Riobamba, 21 de marzo de 2022.



Jhonny Medardo Carchi Curimilma

C.I: 190080302-2

DICTAMEN FAVORABLE DEL TUTOR Y MIEMBROS DE TRIBUNAL.

Quienes suscribimos, catedráticos designados Tutor y Miembros del Tribunal de Grado para la evaluación del trabajo de investigación Análisis e implementación de protocolos de enrutamiento en una red Ad Hoc aérea (FANET) para la telegestión de UAVs, presentado por Jhonny Medardo Carchi Curimilma, con cédula de identidad número 190080302-2, certificamos que recomendamos la APROBACIÓN de este con fines de titulación. Previamente se ha asesorado durante el desarrollo, revisado y evaluado el trabajo de investigación escrito y escuchada la sustentación por parte de su autor; no teniendo más nada que observar.

De conformidad a la normativa aplicable firmamos, en Riobamba 30 de marzo de 2022.

PhD. Paúl Ricaurte
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL DE
GRADO



Firmado electrónicamente por:
**PAUL STALIN
RICAURTE**

PhD. Luis Tello
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE
GRADO



Firmado electrónicamente por:
**LUIS PATRICIO
TELLO OQUENDO**

Msc. Daniel Haro
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE
GRADO



Firmado electrónicamente por:
**EDUARDO DANIEL
HARO MENDOZA**

Mgs. Giovanni Cuzco
TUTOR



Firmado electrónicamente por:
**EDGAR
GIOVANNY
CUZCO SILVA**

CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL

Quienes suscribimos, catedráticos designados Miembros del Tribunal de Grado para la evaluación del trabajo de investigación Análisis e implementación de protocolos de enrutamiento en una red Ad Hoc aérea (FANET) para la telegestión de UAVs, presentado por Jhonny Medardo Carchi Curimilma, con cédula de identidad número 190080302-2, bajo la tutoría de Mgs. Giovanni Cuzco; certificamos que recomendamos la APROBACIÓN de este con fines de titulación. Previamente se ha evaluado el trabajo de investigación y escuchada la sustentación por parte de su autor; no teniendo más nada que observar.

De conformidad a la normativa aplicable firmamos, en Riobamba 30 de marzo de 2022.

PhD. Paúl Ricaurte
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL DE
GRADO



Firmado electrónicamente por:
**PAUL STALIN
RICAURTE**

PhD. Luis Tello
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE
GRADO



Firmado electrónicamente por:
**LUIS PATRICIO
TELLO OQUENDO**

Msc. Daniel Haro
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE
GRADO



Firmado electrónicamente por:
**EDUARDO DANIEL
HARO MENDOZA**

Mgs. Giovanni Cuzco
TUTOR



Firmado electrónicamente por:
**EDGAR
GIOVANNY
CUZCO SILVA**

CERTIFICACIÓN

Que, **CARCHI CURIMILMA JHONNY MEDARDO** con CC: **190080302-2**, estudiante de la Carrera **ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES, NO VIGENTE**, Facultad de **INGENIERÍA**; ha trabajado bajo mi tutoría el trabajo de investigación titulado **“ANÁLISIS E IMPLEMENTACIÓN DE PROTOCOLOS DE ENRUTAMIENTO EN UNA RED AD HOC AÉREA (FANET) PARA LA TELEGESTIÓN DE UAVS”**, cumple con el 5 %, de acuerdo al reporte del sistema Anti plagio **URKUND**, porcentaje aceptado de acuerdo a la reglamentación institucional, por consiguiente autorizo continuar con el proceso.

Riobamba, 22 de marzo de 2022



Mgs. Giovanni Cuzco

TUTOR

DEDICATORIA

El presente trabajo de titulación está dedicado principalmente a Dios y a mis padres, a mi hermano Christian F. C. ya que sin ellos no lo había logrado, quienes me han apoyado para poder llegar a esta instancia de mis estudios.

También la dedico a mi hermana Flor Q. y a mi amada novia Jessy R. quien ha sido mi motivación durante toda la carrera universitaria, siendo el pilar fundamental para poder cumplir las metas trazadas, brindándome su apoyo incondicional para seguir adelante y jamás rendirme.

Jhonny Medardo Carchi Curimilma.

AGRADECIMIENTO.

A Dios, por ser el mentor de mi vida, por brindarme la inteligencia para llevar a cabo con éxito este proyecto de titulación.

A mis padres, por su apoyo permanente, esfuerzo y amor desinteresado. Esto es de ustedes, los quiero.

A Jessy por su paciencia y amor durante esta etapa de mi vida.

A mis hermanos, que han estado presentes en mi vida estudiantil con su apoyo, que me han alentado a continuar cuando se han presentado situaciones difíciles.

Al Ing. Fabian G. por su amistad y ayuda desinteresada en los problemas académicos durante la carrera universitaria.

Finalmente agradezco al Ing. Giovanni Cuzco, tutor de tesis, por su tiempo y disposición para resolver las inquietudes presentadas durante el desarrollo de este trabajo de titulación y todas las enseñanzas brindadas a lo largo de la carrera y desarrollo de esta investigación.

Jhonny Carchi.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS.....	11
ÍNDICE DE TABLAS.....	13
RESUMEN.....	14
ABSTRACT.....	15
CAPÍTULO I.....	16
1. INTRODUCCIÓN.....	16
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	18
1.1.1. Problema y Justificación.....	18
1.2. OBJETIVOS:.....	20
1.2.1. General.....	20
1.2.2. Específicos.....	20
CAPITULO II.....	21
2. ESTADO DEL ARTE Y MARCO TEÓRICO.....	21
2.1. ESTADO DEL ARTE.....	21
2.2. REDES INALÁMBRICAS.....	23
2.3. REDES AD HOC.....	24
2.4. TIPOS DE REDES AD HOC.....	25
2.4.1. Redes Vanet (Vehicular Ad Hoc Network).....	25
2.4.2. Redes Ad Hoc Aéreas (Flying Ad Hoc Network, Fanet).....	26
2.5. REDES FANET (FLYING AD HOC NETWORK).....	26
2.5.1. Consideraciones para el diseño de una red FANET.....	26
2.5.2. Arquitecturas de comunicación FANET.....	27
2.5.3. Protocolos de enrutamiento Ad Hoc.....	30
2.5.4. Tipos de protocolos de enrutamiento.....	31

2.5.5. Protocolos de enrutamiento para redes FANET.	32
CAPÍTULO III.....	34
3. METODOLOGÍA.....	34
3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN.	34
3.2. MÉTODO DE INVESTIGACIÓN.	34
3.3. FUENTES DE INFORMACIÓN.....	34
3.4. INSTRUMENTOS DE INVESTIGACIÓN.....	34
3.5. OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES.....	35
3.6. PROCEDIMIENTO Y ANÁLISIS.	35
3.6.1. Elección de los protocolos de enrutamiento.	36
3.6.2. Simulación de la red Ad Hoc Aérea (FANET).....	37
3.6.3. Implementación del protocolo Ad Hoc en la red FANET.	39
3.6.4. Sistema de comunicación.....	41
CAPITULO IV	43
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.	43
4.1. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE SIMULACIÓN.	43
4.1.1. Análisis del Throughput.....	44
4.1.2. Análisis de la tasa de entrega de paquetes (<i>Packet Delivery Ratio</i> , PDR).	45
4.1.3. Análisis del retardo extremo a extremo.	47
4.2. IMPLEMENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS EN PRUEBAS FÍSICAS REALIZADAS.	48
4.2.1. Escenarios implementados y evaluados.....	49
4.3. DISCUSIÓN.....	57
CAPÍTULO V.....	60
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	60
5.1. Conclusiones.	60
5.2. Recomendaciones.....	61

BIBLIOGRAFÍA.....	62
ANEXOS.....	68

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.- Clasificación de las redes MANET.....	25
Figura 2.- Diferentes tipos de UAVs.	26
Figura 3.- Comunicación Directa de UAVs.....	28
Figura 4.- Comunicación a través de la red celular.	28
Figura 5.- Comunicación a través de la red satelital.....	29
Figura 6.- Comunicación a través de la red Ad Hoc.....	30
Figura 7.- Procedimiento para el análisis y obtención de datos.....	38
Figura 8. - Raspberry Pi 3 modelo B+	39
Figura 9 - Proceso de implementación de la red FANET.....	40
Figura 10. - Diagrama general del sistema de comunicación.	41
Figura 11. - Etapa de transmisión del sistema de comunicación.	42
Figura 12. - Gráfica de evaluación del Throughput. (a)Protocolo de enrutamiento AODV, (b)Protocolo de enrutamiento DSDV, (c)Protocolo de enrutamiento OLSR.	45
Figura 13. - Evaluación del Porcentaje de entrega de paquetes. (a)Protocolo de enrutamiento AODV, (b)Protocolo de enrutamiento DSDV, (c)Protocolo de enrutamiento OLSR.....	46
Figura 14. - Retardo extremo a extremo. (a)Protocolo de enrutamiento AODV, (b)Protocolo de enrutamiento DSDV, (c)Protocolo de enrutamiento OLSR	48
Figura 15. - Ventana de ejecución de OLSR.	50
Figura 16. - Escenario 1.....	50
Figura 17. - Prueba 1 realizada. (a)Gráfica del funcionamiento del protocolo OLSR, (b) Verificación de comunicación, (c) Transmisión de información a través de la red.	51
Figura 18. - Escenario 2.....	51
Figura 19. - Prueba 2 realizada. (a) Gráfica del funcionamiento del protocolo OLSR, y (b) Verificación de comunicación.	52
Figura 20. - Escenario 3.....	53
Figura 21. - Prueba 3 realizada. (a) Gráfica del funcionamiento del protocolo OLSR, (b) Verificación de comunicación, y (c) Transmisión de datos a través de la red.....	54
Figura 22. - Escenario 4.....	54
Figura 23. - Verificación de las rutas establecidas en la red de tipo malla.....	55
Figura 24. - Rutas establecidas.	56
Figura 25. - Captura de paquetes realizado con Wireshark. (a) Datos recibidos en el Terminal, (b) y (c) Datos capturados con Wireshark.	57

Figura 26. – Resultados obtenidos. (a) Resultados de pruebas físicas escenarios 1,2,3. (b) Resultados de simulación escenarios 1,2,3.	58
Figura 27. - Comparativa de resultados en el escenario 4.	59
Figura 28. - Ubicación de los nodos para el escenario 3 – Distancia entre el Nodo A y D 75m aproximadamente.	72
Figura 29. - Configuración en WLAN1 para el nodo B.	73
Figura 30. - Configuración en WLAN1 para el nodo C.	73
Figura 31.- Nodo D. (a) Funcionamiento de OLSR, (b) y (c) Configuración en WLAN1 para el nodo.....	75

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.- Operacionalización de variables.....	35
Tabla 2. - Parámetros de configuración para las simulaciones realizadas.....	43
Tabla 3. - Direcciones IP asignadas a los nodos de red.	49
Tabla 4. - Comparativa entre protocolos de enrutamiento para redes Ad Hoc.	71

RESUMEN.

Actualmente con los avances tecnológicos se está desarrollando sistemas de múltiples UAVs capaces de realizar misiones de manera conjunta que mejoren la eficiencia de los sistemas de un solo UAV. Este nuevo diseño de operación requiere el desarrollo de nuevas tecnologías de conexión para redes entre drones y la estación terrestre. La red entre drones se conoce como red Ad Hoc aérea y es un tipo de red derivada de MANET. Esta nueva clase de red presenta algunos inconvenientes que deben tratarse antes del despliegue para que la red proporcione estabilidad y confiabilidad en las conexiones. En el presente trabajo de titulación se utiliza el software Network Simulator versión 3 (Ns-3) para simular una red FANET con el propósito de analizar la eficiencia que presentan los protocolos de enrutamiento para redes móviles Ad Hoc, modificando la densidad de nodos y el área de simulación. Las métricas que determinan la eficacia de la red son: retardo extremo a extremo, Throughput, y PDR (Packet Delivery Ratio). En la implementación de la red física FANET se aplicó el protocolo de enrutamiento Optimized Link State Routing (OLSR), ya que ofrece un mejor funcionamiento en la red de acuerdo a los resultados obtenidos.

Palabras claves: Red Ad Hoc Aérea, Protocolo de enrutamiento, Drone, OLSR.

ABSTRACT.

With the technological advances, multiple UAV systems capable of performing missions together are being developed to improve the efficiency of single UAV systems. This new operation design requires the development of new connection technologies for networks between drones and the ground station. The drone-to-drone network is an airborne Ad Hoc network and is a type of network derived from MANET. This new kind of network presents some drawbacks that need to be addressed before deployment for the network to provide stability and reliability in the connections. In this degree work, Network Simulator version 3 (Ns-3) software is used to simulate a FANET network to analyze the efficiency of routing protocols for mobile Ad Hoc networks, modifying the density of nodes and the simulation area. The metrics that determine the efficiency of the network are end-to-end delay, Throughput, and PDR (Packet Delivery Ratio). In implementing the physical FANET network, the Optimized Link State Routing (OLSR) routing protocol was applied since it offers a better performance in the network according to the results obtained.

Keywords: Air Ad Hoc Network, Routing protocol, Drone, OLSR.



Firmado electrónicamente por:

SONIA
LLAQUELLI
N GRANIZO
LARA

Reviewed by:

Mgs. Sonia Granizo Lara.

ENGLISH PROFESSOR.

c.c. 0602088890

CAPÍTULO I.

1. INTRODUCCIÓN.

Los vehículos aéreos no tripulados (*Unmanned Aerial Vehicle*, UAVs), o también conocidos como drones, son robots voladores que pueden operar a kilómetros de manera autónoma, también podemos encontrar pequeños drones que vuelan en espacios confinados. Los nuevos avances tecnológicos en la fabricación, navegación, capacidades de comunicación y sistemas de almacenamiento de energía hacen posible el desarrollo de una amplia gama de drones que se pueden utilizar en diversas situaciones donde la presencia de humanos es difícil, imposible o peligrosa [1]. Los escenarios de aplicación de los UAVs han ido creciendo constantemente, desde aplicaciones militares, hasta el dominio civil. En los últimos años las redes de UAVs que se despliegan usando redes Ad Hoc han ganado importancia científica [2].

Una red móvil Ad Hoc (*Mobile Ad hoc Network*, MANET) consiste en la agrupación de nodos móviles que se conectan entre sí a través de un medio inalámbrico. Este grupo de nodos pueden autoorganizarse de forma libre y dinámica, formando nuevas topologías de red que permiten a los dispositivos mantener la conexión dentro de una determinada área de cobertura; este tipo de red no depende de una infraestructura de comunicación preexistente como enrutadores en caso de redes cableadas o de puntos de acceso en redes inalámbricas [3].

La posibilidad de extender la cobertura inalámbrica, mejorar la capacidad general y permitir la autoconfiguración de la red sin soporte de infraestructura, ha generado nuevas ideas de redes inalámbricas de múltiples saltos. Las redes MANET proporcionan una infraestructura escalable y, al aplicarla en vehículos aéreos no tripulados da como resultado el desarrollo de redes Ad Hoc aéreas (*Flying Ad Hoc Network*, FANET). Una red Ad Hoc aérea o FANET por sus siglas en inglés es un nuevo tipo de red Ad Hoc móvil, donde los nodos de comunicación son UAVs. En una red Ad Hoc aérea no necesariamente todos los UAVs deben comunicarse con la estación de control en tierra, solo uno de los drones es el que se vincula directamente a la infraestructura, mientras que el resto de los drones en el enjambre mantienen una comunicación de múltiples saltos en la que cada uno actúa como un nodo de retransmisión de datos [2], [4].

Los protocolos de enrutamiento son uno de los componentes principales en los diferentes tipos de redes ya sean inalámbricas o cableadas. Esto se debe a que son los encargados de encaminar el tráfico por cada nodo que pertenece a la red. En contraste con las redes basadas en infraestructura, en las redes MANET, los nodos son móviles y pueden ser enlazados dinámicamente de manera arbitraria. Los nodos de una red Ad Hoc pueden actuar como

enrutadores, pueden manejar el descubrimiento y el mantenimiento de caminos en la red. La topología de la red es en general dinámica debido a que la conectividad entre los nodos puede variar en el tiempo por el movimiento de los nodos. Por lo tanto, existe la necesidad de establecer protocolos de enrutamiento eficientes que permitan a los nodos comunicarse a través de caminos de múltiples saltos.

En las redes FANET altamente dinámicas, la constante movilidad de un nodo puede llevar fácilmente a interrupciones de ruta; esto desencadena actualizaciones constantes de enrutamiento generando una gran cantidad de sobrecarga de control en la red, aumentando el retraso de reenvío de datos e incrementando la tasa de pérdida de paquetes; incluso el protocolo de enrutamiento podría llegar a fallar dejando sin conectividad a la red. Para realizar una red confiable y efectiva de nodos altamente dinámicos, los protocolos de enrutamiento son uno de los problemas clave que deben resolverse en redes FANET.

Actualmente las redes FANET no cuentan con un protocolo de enrutamiento patentado, por lo tanto, se emplean protocolos de enrutamiento de MANET [5]. Los protocolos de las redes MANET se pueden clasificar de acuerdo con la estrategia de descubrimiento de ruta. Se dividen en: a) *Protocolo de enrutamiento reactivo*: Funciona bajo un algoritmo que solicita el descubrimiento de la ruta bajo demanda, en otras palabras, cuando el nodo de origen necesita comunicarse. Por lo tanto, mantiene las rutas mientras se necesitan o hasta que caduquen; una característica importante es que no existe sobrecarga debido a que no necesita mantener la información de enrutamiento de todos sus nodos vecinos [6]; b) *Protocolo de enrutamiento proactivo*: Se basa en tablas de enrutamiento, donde la información de direccionamiento entre los nodos la mantiene actualizada. Por tal motivo, este protocolo de enrutamiento tiene la ventaja de contar con las rutas en cualquier momento que se las requiera [7]; c) *Enrutamiento híbrido*: Es una combinación de protocolos de enrutamiento proactivos y reactivos, que tiene el objetivo de unir las ventajas de los protocolos anteriores [6],[7].

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

1.1.1. PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN.

En los últimos años se ha presenciado un avance tecnológico a pasos agigantados, donde las nuevas tecnologías informáticas, sensores, redes, miniaturización de dispositivos y la reducción de costos han permitido el uso y desarrollo de UAVs en nuevas áreas de aplicación como: operaciones de búsqueda y rescate, monitoreo de áreas, aplicaciones militares, comunicaciones, entre otras [8]. Además del área militar, los UAVs actualmente se encuentran muy involucrados en el área de aplicación civil. Los sistemas de múltiples UAVs pueden realizar trabajos de forma más económica y eficiente en comparación con los sistemas de un solo UAV.

La red de datos entre UAVs se conoce como FANET y es una subclase de red derivada de MANET [9]. Para obtener una red FANET confiable y estable es necesario resolver algunos inconvenientes recientes que han encontrado diferentes investigadores y desarrolladores, uno de los principales problemas presentes en este nuevo tipo de red es la conectividad. La conectividad tiene una característica principal que es la capacidad de entregar los datos generados en el nodo de origen al nodo de destino [10].

Un distintivo más de las redes FANET es el desplazamiento que realizan los UAVs; dependiendo de su aplicación pueden moverse a una velocidad mayor o menor; a diferencia de otras redes, la movilidad que poseen los UAVs provocan un cambio rápido en la topología haciendo que se destruyan los enlaces ya establecidos para generar nuevas rutas de comunicación [11]. En el trabajo [12] hace énfasis en los problemas presentes en las redes formada por varios drones, presentando desafíos con respecto al diseño y la comunicación debido a que cada nodo debería contar con un hardware que permita realizar la comunicación.

Conociendo la aplicabilidad que presentan las redes UAV es necesario resolver los problemas encontrados recientemente en este nuevo tipo de red como son los problemas de comunicación debido a factores como el cambio constante de topología. Por tal motivo una red FANET requiere contar con un protocolo de enrutamiento que tenga un rendimiento adecuado; además, este protocolo debe ser capaz de manejar diversos escenarios y condiciones [13]. Dentro de los protocolos usados por las redes FANET tenemos los proactivos, reactivos, e híbridos que se pueden evaluar a través de simulaciones por computador.

Dentro de estos protocolos, recientes investigaciones han considerado que AODV (*Ad Hoc On demand Distance Vector*) como OLSR (*Optimized Link State Routing*), tienen mejor

desempeño que otros protocolos analizados a través de simulaciones [10], [12]; estos protocolos son utilizados en otros tipos de redes; sin embargo, se requiere evaluar y determinar el protocolo de enrutamiento que mejor se adapte a la infraestructura de red planteada y contrastar los estudios previos realizados. El trabajo de modelación planteado además permitirá implementar otros protocolos para su respectiva prueba y evaluación.

Los parámetros que se consideran evaluar son: *a) Porcentaje de entrega de paquetes*, también conocido como (*Packet Delivery Ratio, PDR*): Es la proporción de paquetes enviados con respecto a los entregados; *b) Throughput o Rendimiento*: Son los paquetes entregados con éxito a través de un canal de comunicación en un determinado tiempo y *c) Latencia*: Es el tiempo que tardan en llegar los paquetes desde el origen hacia el nodo destino. Se considera evaluar estos parámetros debido a que nos indicarán la eficiencia y calidad de la red, lo cual permitirá determinar qué protocolo es más eficiente para implementarlo en nuestra red física [12], [14].

Este proceso de simulación proporciona varias ventajas para el análisis, como por ejemplo la capacidad de poder modificar parámetros específicos lo cual hará que se construyan diferentes escenarios y se evalúen situaciones distintas para la red FANET. El escenario considerado operará dentro de la línea de vista en distancias inferiores a 500 metros donde se realizará las diferentes condiciones de cambio de topología de la red.

1.2. OBJETIVOS:

1.2.1. GENERAL.

Analizar e implementar protocolos de enrutamiento en una red Ad Hoc aérea (FANET) para la telegestión de UAVs.

1.2.2. ESPECÍFICOS.

- Modelar una red FANET que permita evaluar los protocolos de enrutamiento OLSR y AODV para determinar el que mejor se adapte a los requerimientos de la red FANET con múltiples UAVs.
- Implementar una red física FANET basada en un protocolo de enrutamiento eficiente para la operación y gestión de datos en una formación de 3 UAVs.
- Evaluar los resultados de simulación en una red FANET y contrastar con los datos obtenidos del despliegue de una red de UAVs.

CAPÍTULO II

2. ESTADO DEL ARTE Y MARCO TEÓRICO.

2.1. ESTADO DEL ARTE.

Diferentes autores han realizado estudios sobre los requerimientos para el despliegue de redes FANET. Los estudios [8] y [40] coinciden en que el desarrollo tecnológico en los sistemas electrónicos, embebidos, robóticos, tecnologías de redes y la miniaturización de la electrónica hace posible desarrollar vehículos aéreos no tripulados a precios muy accesibles para la mayoría de las personas. Hoy en día el enfoque de estos aparatos robóticos está cambiando de usar un solo UAV a varios UAV los cuales cuentan con equipos que permiten la coordinación entre ellos permitiendo alcanzar objetivos de alto nivel.

La cooperación y coordinación de múltiples drones pueden crear un sistema que presenta una mayor capacidad de trabajo que la de un solo UAV. Por tal motivo se resumen las ventajas de los sistemas multi-UAV de la siguiente manera:

- Costo: Los UAVs más pequeños en comparación con un UAV grande presentan costos de adquisición y mantenimiento más bajos.
- Escalabilidad: El uso de UAVs grandes permite solo una cantidad limitada de cobertura, mientras que los sistemas multi-UAV pueden extender la cobertura de operación fácilmente.
- Permanencia: En los sistemas de un solo UAV el trabajo realizado por el mismo puede darse por terminado en cualquier momento debido a un fallo. Sin embargo, la ventaja con la que se dispone en un sistema multi-UAV es la de poder continuar en caso de fallos ya que la operación puede mantenerse con los otros UAV.

Aunque se puede obtener algunas ventajas de los sistemas multi-UAV en comparación con los sistemas de un solo UAV, también presenta desafíos únicos como la comunicación, esto se debe a que los UAVs no pueden mantener su enlace de comunicación por las condiciones ambientales dinámicas, los movimientos de los nodos y las estructuras del terreno.

También se hace un análisis comparativo entre las redes Ad Hoc móviles (MANET), las redes vehiculares Ad Hoc (VANET) y las redes Ad Hoc aéreas (FANET) en términos de movilidad, densidad de nodos, cambios de topologías, y otros. Una forma de realizar investigaciones es a través de simulaciones, con algoritmos que asemejan la realidad de un sistema multi-UAV que puede admitir redes Ad Hoc. Finalmente, el autor [40] llega a identificar los desafíos presentes

en el uso de vehículos aéreos no tripulados como nodos de retransmisión, modelos de red para UAVs y presenta los problemas de investigación abiertos. Las características de diseño de FANET también se describen, entre ellas la adaptabilidad, escalabilidad y latencia, proporcionando una revisión exhaustiva de la literatura reciente sobre FANET.

El artículo “*Applying Static Mobility Model in Relaying Network Organization in Mini-UAVs Based FANET*” habla sobre el concepto de una red FANET, que es una subcategoría de Mobile Ad Hoc Network (MANET), la cual se encuentra formada por nodos que son vehículos aéreos no tripulados [45]. Los drones al desplazarse en una misión de vuelo ya sea asistida o autónoma generan modelos de movilidad, los cuales pueden ser recreados en entornos de simulación para abordar un estudio más profundo. Este artículo aborda el modelo de movilidad estática que describe la infraestructura de comunicación de los UAV en una red de retransmisión debido a que los vehículos aéreos no tripulados permanecerán en un determinado lugar brindando la conectividad a una determinada zona. El rendimiento de la red se evaluó a través de las métricas tasa de entrega de paquetes y el retraso de los paquetes.

El problema de diseño más importante para los sistemas de vehículos aéreos no tripulados se encuentra en la comunicación. Los métodos desarrollados para resolver este problema entre UAVs son las redes FANET. Una red FANET es una red inalámbrica la cual hace posible la comunicación entre nodos sin necesidad de una infraestructura compleja usando redes de tipo Ad Hoc. Según [42] la eficacia es mayor en una red FANET debido a que no se limita el alcance de la estación terrestre con el UAV, sino también puede hacerse una comunicación con la estación terrestre a través de UAVs

En [10] los autores realizaron pruebas en el software de simulación de red Ns-2, aplicando el modelo de movilidad Random Waypoint model (RWP) y en sus características se especifica el uso de los protocolos de enrutamiento AODV y OLSR. Se analiza la red FANET en cuanto a la densidad de nodos, demostrando experimentalmente que el factor que afecta al rendimiento de la red Ad Hoc aérea es el número de nodos que se distribuyen en un área y también el rango de comunicación [10]. Finalmente, los autores mencionan que es necesario reelaborar el modelo de simulación para acercarlo más a la red real.

En otros trabajos desarrollados como [43] plantean un esquema de control en tiempo real de múltiples UAV estableciendo como base las redes FANET para el control de drones que llegan a salir del alcance de comunicación del sistema de control de tierra. También se propone una metodología de recuperación rápida con información de ubicación de vecinos en redes

altamente dinámicas. Como trabajo futuro, se plantea desarrollar un banco de pruebas para la implementación de otros protocolos de enrutamiento MANET, con el objetivo de evaluar el rendimiento de los protocolos para la entrega exitosa de mensajes y el control de múltiples drones en una red FANET.

Realizada esta revisión de trabajos acerca las redes FANET se puede decir que en algunos trabajos hacen una recopilación de conceptos, propuestas de modelos de movilidad según la aplicación [44], generando propuestas y pautas para realizar futuras investigaciones. En un gran número de trabajos que se han realizado de forma experimental, se encuentran múltiples simulaciones de varios protocolos de enrutamiento llegando a diferentes conclusiones donde realiza la propuesta de distintos protocolos para su uso en estas redes.

2.2. REDES INALÁMBRICAS.

Una red inalámbrica permite mantener diferentes dispositivos conectados a la red sin la necesidad de usar cables. La red inalámbrica utiliza señales de radiofrecuencia entre los nodos para la comunicación, la tecnología más usada para este tipo de redes es conocida como Wi-Fi (Wireless Fidelity) que utiliza el estándar IEEE 802.11 [15].

El estándar IEEE 802.11 es la agrupación de normativas inalámbricas desarrollado por el IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers). El estándar 802.11 o 802.11 legacy fue publicado por primera vez en 1997. Ofrece una velocidad de transmisión de datos 1 y 2 Mbps en la banda de 2.4 GHz, actualmente está comprendido por algunas versiones con diferentes características:

- IEEE 802.11a. Es una versión desarrollada en 1999 con base del estándar 802.11, alcanzó una velocidad de transmisión de 54 Mbps en la banda de 5 GHz y con modulación OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing).
- IEEE 802.11b. Es una extensión de 802.11 y ofrece una tasa de transmisión máxima de 11 Mbps con modulación DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) utilizando la banda de 2.4 GHz.
- IEEE 802.11g. Fue desarrollado en 2003 con el propósito de mejorar la transmisión de datos, logrando alcanzar velocidades entre 20 y 54 Mbps con las modulaciones DSSS y OFDM, utiliza el mismo ancho de banda de 2.4 GHz que usa el estándar 802.11b.
- IEEE 802.11n. Es una propuesta que modificó los estándares anteriores en 2009, opera dentro de las bandas de 2.4GHz y 5 GHz. Esta nueva versión permite alcanzar

velocidades de 600 Mbps con modulación OFDM; ofrece mejor rendimiento en la banda de 5 GHz [16].

El origen de las redes inalámbricas se da por la necesidad de obtener una mayor flexibilidad de la red, la principal característica que destaca es la facilidad de movilidad de los dispositivos inalámbricos. Las principales ventajas que ofrecen son:

- Facilidad de configuración e instalación.
- Capacidad de penetrar barreras físicas.
- Compatibilidad con redes existentes y bajos costos de instalación.

Así como sucede con otro tipo de redes, las redes inalámbricas presentan algunas desventajas como, un menor rendimiento en comparación con una red cableada, problemas de seguridad, ruido e interferencias debido a que se trabaja en la banda de uso libre.

2.3. REDES AD HOC.

Una red Ad Hoc móvil es una red inalámbrica que no cuenta con una infraestructura existente para sostener la red. Este tipo de red no requiere ninguna administración central por lo que los dispositivos no solicitan conectarse a un punto de acceso ni a un enrutador para establecer una conexión con los demás dispositivos, son los mismos nodos quienes sirven de enrutadores y anfitriones, pueden realizar la transmisión de paquetes en nombre de otros nodos y a su vez ejecutar aplicaciones que ha definido el usuario [17].

Con el creciente aumento que ha tenido el sector tecnológico y el aumento de dispositivos ligeros, así como las nuevas tecnologías inalámbricas, las redes Ad Hoc están teniendo un mayor alcance con el aumento de aplicaciones. Las redes inalámbricas Ad Hoc debido a su arquitectura se pueden implementar en cualquier lugar con infraestructura limitada o sin la necesidad de esta [17][9].

VENTAJAS.

- No requieren un sistema de administración central, por lo cual genera menores costos de administración.
- Escalabilidad de la red, permiten la inserción de nuevos nodos durante la operación de la red.
- Permite que la red sea flexible gracias a la movilidad.
- Los nodos actúan como enrutadores de red permitiendo que la red sea auto reparable en cualquier momento [18].

DESVENTAJAS.

- El rendimiento se ve afectado a medida que incremente la cantidad de dispositivos en una configuración Ad Hoc.
- Los dispositivos no pueden acceder a internet a menos que uno de ellos establezca una puerta de enlace que permita la conexión con esta red. En caso de que un dispositivo acceda a internet el rendimiento se verá comprometido, aún más si la red cuenta con un gran número de usuarios [19].

2.4. TIPOS DE REDES AD HOC.

Una red Ad Hoc está comprendida por más de dos nodos que se encuentran comunicados entre sí, su principal ventaja es su portabilidad o movilidad. En el estudio [20], se evidencia que debido a las amplias aplicaciones de las redes móviles se han establecido diferentes tipos de redes Ad Hoc, como las redes Ad Hoc Vehiculares (VANET) y las redes Ad Hoc Aéreas (FANET). Por lo general, estas redes poseen constantes cambios de topología como consecuencia de la alta movilidad en comparación con las MANET. En una red VANET, su mayoría de nodos está conformada por vehículos, mientras que las redes FANET por UAVs [17][9].

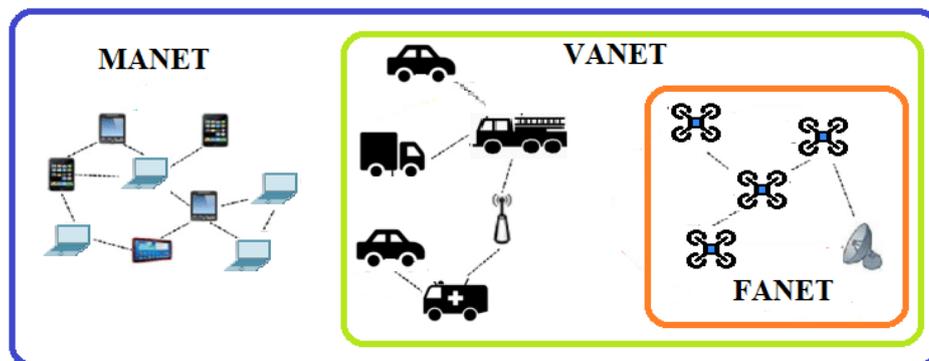


Figura 1.- Clasificación de las redes MANET.

Fuente: (Autor)

2.4.1. REDES VANET (VEHICULAR AD HOC NETWORK).

Estas redes son capaces de establecer una comunicación vehículo a vehículo, en algunos casos se da una comunicación entre automóviles e infraestructuras fijas. El objetivo de su desarrollo es mejorar la seguridad del tráfico y la reducción de accidentes [17]. Estas redes móviles para mantenerse en constante operación dependen de vehículos y debido a que estos poseen una movilidad restringida por diferentes factores físicos hacen que la red se vea afectada en algunas características como la topología, cambios de rutas, y mantenimiento de la red [21].

2.4.2. REDES AD HOC AÉREAS (FLYING AD HOC NETWORK, FANET).

Una red FANET es un tipo de red Ad Hoc móvil que posee cierta similitud con de las redes VANET, ya que al igual usa vehículos, pero además son capaces de realizar vuelos, a estos dispositivos se los denomina UAV. La palabra UAV proviene de las siglas Unmanned Aerial Vehicles, es decir, vehículos aéreos no tripulados; en gran parte del mundo la mayoría de las personas los conocen como drones. Aunque estas dos definiciones suelen emplearse indistintamente en realidad en algunos ámbitos no tienen el mismo significado, hay quienes lo diferencian empleando la palabra UAV para referirse a los drones de aplicaciones militares, mientras que a los drones de uso civil los llaman drones [17].

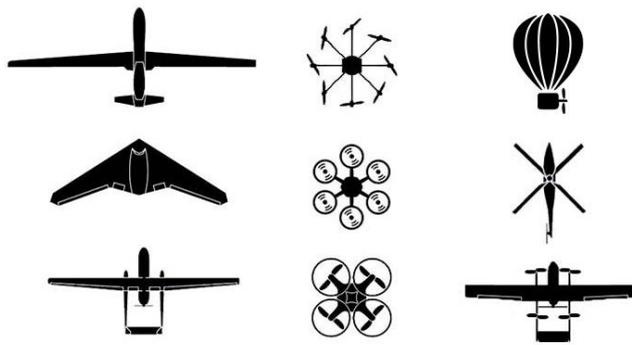


Figura 2.- Diferentes tipos de UAVs.

Fuente: Tomada de [22].

2.5. REDES FANET (FLYING AD HOC NETWORK).

2.5.1. CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO DE UNA RED FANET.

Escalabilidad. - Un sistema multi-UAV puede mejorar la eficiencia en comparación con un sistema de un solo UAV. En la práctica, la mejora de la eficacia está estrictamente relacionada con el número de drones. Por ejemplo, en operaciones de búsqueda y rescate se lograría cubrir grandes áreas de manera más rápida [41]. Los protocolos y algoritmos FANET deben desarrollarse de modo que cualquier número de UAV pueda operar a la vez que el rendimiento se vea afectado en lo más mínimo [9].

Adaptabilidad. - Una red FANET presenta varios parámetros que pueden hacer que el funcionamiento del sistema cambie, por ejemplo, el movimiento de los UAVs provoca que las rutas cambien constantemente, otro factor que puede afectar son los posibles fallos de las aeronaves, haciendo que el operador de red inserte nuevos UAVs para mantener operativa la red provocado cambios en los parámetros de FANET [9].

El diseño de FANET debe desarrollarse para que pueda adaptarse a cualquier cambio o falla. El mantenimiento de rutas en una red Ad Hoc está relacionado con los cambios de topología. Por lo tanto, el rendimiento del sistema depende del protocolo de enrutamiento para adaptarse a los cambios de enlace [9].

Latencia. - La latencia es el principal problema en el diseño de todo tipo de redes, y FANET no es una excepción. Sin embargo, la latencia para redes FANET depende completamente de la aplicación. Especialmente para aplicaciones en tiempo real, como el monitoreo militar, los paquetes de datos deben entregarse dentro de un cierto límite de tiempo, por lo que algunos protocolos y algoritmos no pueden satisfacer las necesidades de FANET [9].

Restricciones de la plataforma UAV. - Los UAVs usados en redes FANET deben contar con un hardware adicional de comunicación, alterando la carga útil de la aeronave, por ello el rendimiento del UAV se ve reflejado en la autonomía de vuelo. La restricción de espacio es otra limitante, especialmente para el hardware de comunicación que debe instalarse en la plataforma UAV [9].

2.5.2. ARQUITECTURAS DE COMUNICACIÓN FANET.

En este trabajo de tesis, la comunicación entre drones será fundamental para el desarrollo y operatividad de este proyecto. Para que una red de UAVs tenga un buen desempeño es fundamental definir un método de comunicación confiable [9].

La arquitectura de comunicación determina las reglas y mecanismos que establecen cómo fluyen los paquetes de datos entre la estación terrestre (Ground Control system, GCS) y múltiples UAV o entre vehículos aéreos no tripulados [9]. A continuación, se describen algunas de las arquitecturas de comunicación para redes FANET y los protocolos de enrutamiento considerados para el desarrollo de esta red.

2.5.2.1. COMUNICACIÓN DIRECTA DE UAV.

Este tipo de comunicación presenta un enlace directo entre la estación terrestre y cada UAV, como se muestra en la Figura 3. Esta es la arquitectura es sencilla, en la que el GCS actúa como un nodo central a la que se vinculan todos los vehículos aéreos no tripulados. En esta arquitectura no es posible la comunicación directa entre UAVs debido a que proporciona un sistema centralizado, por lo tanto, no es recomendable utilizarlo en escenarios dinámicos y comunicaciones sin línea de vista. La principal desventaja que presenta es la falta de resistencia a fallos, si llegase a caer el GCS toda la red se perderá [9].

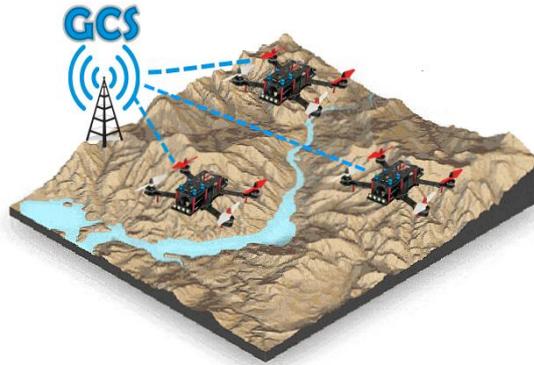


Figura 3.- Comunicación Directa de UAVs.

Fuente: (Autor)

2.5.2.2. COMUNICACIÓN UAV A TRAVÉS LA RED CELULAR.

En la actualidad y en la mayoría de las regiones las redes celulares son las más usadas para sistemas de comunicación. La base de su estructura es una topología centralizada, consiste en dividir la superficie de cobertura en áreas más pequeñas llamadas células donde cada una está cubierta por una estación base. Toda la información que se transmite pasa por este punto central que tiene como objetivo encaminarla a su destino. A diferencia de las redes satelitales, estos sistemas usan transmisores de baja potencia por lo que puede ser una opción para redes de UAVs [9].



Figura 4.- Comunicación a través de la red celular.

Fuente: (Autor)

Si bien es factible hacer uso de este tipo de redes, los gastos que se generan al usar esta comunicación no son despreciables, incluso con la instalación de una nueva infraestructura. Además, es complicado cubrir todas las áreas y mantener esta infraestructura segura en algunos casos, como por ejemplo después de los desastres naturales [9].

2.5.2.3. COMUNICACIÓN UAV A TRAVÉS LA RED SATELITAL.

Los sistemas de comunicación satelitales son de gran ayuda para entornos donde es imposible tener una infraestructura fija, las comunicaciones por satélite son la mejor solución cuando se trata de áreas muy grandes, como se muestra en la Figura 5. En una red FANET los satélites pueden facilitar una comunicación entre la GCS y el UAV, de la misma manera podría proveer una comunicación entre UAVs. [9]

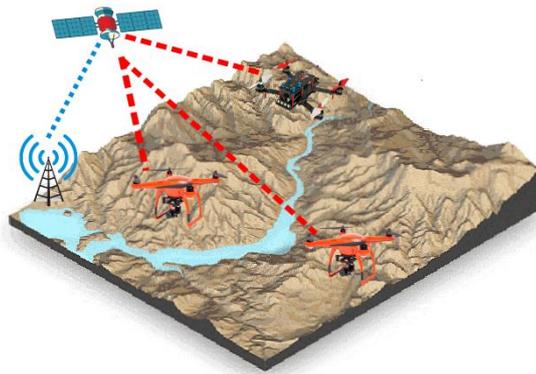


Figura 5.- Comunicación a través de la red satelital.

Fuente: (Autor)

La principal desventaja que posee esta arquitectura de comunicación es la elevada latencia en la transmisión de datos y los costos de alquiler del satélite. Además, la eficiencia de estos sistemas tiene relación con el sistema de transmisión terrestre por lo que sería una desventaja para la mayoría de los drones comerciales [9].

2.5.2.4. COMUNICACIÓN UAV A TRAVÉS DE REDES AD-HOC.

Esta arquitectura de red es parte de MANET donde los nodos son UAVs, la comunicación entre ellos se realiza sin una infraestructura central. Por otro lado, no todos los sistemas multiUAV forman una red FANET. Los enlaces entre UAVs deben hacerse con la ayuda de una red Ad Hoc. Por lo tanto, si la red está basada completamente en enlaces UAV a su GCS, no puede clasificarse como una red FANET [9] [40].

Este tipo de red posee un nivel alto de movilidad haciendo que su topología cambie constantemente debido a la facilidad de desplazamiento que presentan los vehículos aéreos no tripulados. Mantener los enlaces de comunicación entre los UAVs es una tarea exigente por lo que el protocolo de enrutamiento asume una tarea muy importante al momento de realizar el desplazamiento de estas redes, pues debe ser capaz de actualizar las rutas constantemente en el menor tiempo posible [20]. A pesar de las múltiples ventajas que presenta una red FANET, el enrutamiento sigue siendo un problema desafiante debido al cambio dinámico de la topología

de la red. Para satisfacer esas necesidades, se han propuesto algunos protocolos de enrutamiento para redes FANET [9]. En la siguiente sección, presentamos los protocolos de enrutamiento FANET utilizados para este estudio.

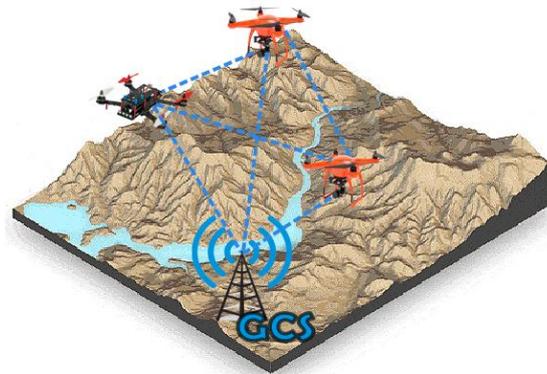


Figura 6.- Comunicación a través de la red Ad Hoc.

Fuente: (Autor)

2.5.3. PROTOCOLOS DE ENRUTAMIENTO ADHOC.

Según [9], debido a que las redes FANET se derivan de MANET concuerda con distintos investigadores y considera adecuado probar los protocolos utilizados en estas redes para su posible implementación en redes de UAVs, aunque algunos de ellos no se pueden aplicar directamente es posible modificarlos para cumplir con los requisitos de FANET.

2.5.3.1. CARACTERÍSTICAS DE LOS PROTOCOLOS DE ENRUTAMIENTO.

En el análisis realizado por [23] se describe las características que son relevantes al momento de seleccionar un protocolo de enrutamiento Ad Hoc, entre las cuales se encuentran:

- ❖ **Métrica de enrutamiento:** Es un valor cuantificable que permite determinar la mejor ruta.
- ❖ **Algoritmo de enrutamiento:** Es el encargado de establecer la mejor ruta, con un coste mínimo por el cual se va a realizar el envío de paquetes hasta llegar a su destino.
- ❖ **Libre de lazos:** Determina si el protocolo es adecuado para impedir los lazos en la red.
- ❖ **Escalabilidad:** Especifica si el protocolo accede a la introducción de un nuevo nodo sin verse afectado el rendimiento de red.
- ❖ **Confiabilidad:** Indica si la entrega de la información hacia el destino es exitosa.
- ❖ **Balance de carga:** Hace posible la evasión de sobrecarga en la red distribuyendo la carga y el tráfico.

- ❖ **Control de congestión:** Corresponde a un conjunto de técnicas que permiten detectar y corregir los errores presentados en una red.
- ❖ **Implementación:** Software que permite el desarrollo y programación de los protocolos de enrutamiento.

2.5.4. TIPOS DE PROTOCOLOS DE ENRUTAMIENTO.

En los trabajos realizados por [24] y [25] se proponen diferentes protocolos de enrutamiento para redes Ad Hoc, como el enrutamiento bajo demanda, enrutamiento de origen dinámico, enrutamiento de inundación, entre otros. Estos protocolos se clasifican en las siguientes categorías:

- ❖ Protocolos de enrutamiento estáticos.
- ❖ Protocolos de enrutamiento proactivo.
- ❖ Protocolos de enrutamiento reactivo.
- ❖ Protocolos de enrutamiento híbridos.
- ❖ Protocolos de enrutamiento geográficos.

Para el desarrollo de este trabajo de tesis nos enfocaremos en los protocolos de enrutamiento proactivos y reactivos, debido a que son los más comunes en el estudio de redes FANET.

2.5.4.1. PROTOCOLO DE ENRUTAMIENTO PROACTIVO.

El método empleado por este protocolo para direccionar los datos es mediante el uso de tablas de enrutamiento. Estas tablas almacenan la información de encaminamiento que es renovada constantemente y se comparten entre los nodos. La principal ventaja de este tipo de enrutamiento es que contiene la información de las rutas actualizadas, por lo que se mantiene una idea real del estado de red. La desventaja principal es que debido al manejo de mecanismos de propagación de mensajes para mantener actualizadas estas tablas genera un mayor consumo de ancho de banda [9], [2].

2.5.4.2. PROTOCOLO DE ENRUTAMIENTO REACTIVO.

Los protocolos de enrutamiento reactivo o bajo demanda no cuentan con tablas de enrutamiento actualizadas, este protocolo realiza el proceso de establecimiento de conexión en función de las necesidades que se presenten en la red. Estos protocolos de enrutamiento no tienen la necesidad de intercambiar información de encaminamiento constantemente, ya que no es necesario [26].

2.5.5. PROTOCOLOS DE ENRUTAMIENTO PARA REDES FANET.

Las redes FANET son un nuevo tipo de red inalámbrica que ha recibido un mayor interés por diferentes sectores de la industria debido a las aplicaciones que pueden tener. El principal elemento de este tipo de redes es el protocolo de enrutamiento, siendo objeto de estudio para muchos investigadores [5].

Una red Ad Hoc aéreas debe contar con un protocolo de red que sea confiable y ofrezca un alto rendimiento para el correcto funcionamiento; sin embargo, todavía se considera el uso de protocolos para redes MANET debido a que las redes FANET no cuentan con un protocolo de red establecido. [5].

2.5.5.1. DESTINATION SEQUENCE DISTANCE VECTOR (DSDV).

Este es un protocolo de red Ad Hoc móvil, se encuentra dentro de los protocolos proactivos, su funcionamiento está basado en tablas de enrutamiento. Para establecer la mejor ruta utiliza el método conocido como vector de distancia que utiliza el algoritmo de Bellman Ford para calcular las rutas. Cada nodo de red actualiza las tablas aplicando el método de camino mínimo a menor costo, dependiendo del número de secuencia, mientras mayor sea el número de secuencia se considera más fiable el camino, si dos rutas tienen un igual número de secuencia se verifica el de menor coste que dependerá del número de saltos.[27], [23].

2.5.5.2. OPTIMIZED LINK STATE ROUTING PROTOCOL (OLSR).

OLSR es un protocolo proactivo que genera una ruta para transmitir paquetes basándose en tablas de enrutamiento de cada nodo. Este protocolo se fundamenta en la optimización de los protocolos clásicos Link-State, basados en estado de enlace.

Las tablas de enrutamiento se realizan con la información de cada nodo, esta información se transmite utilizando paquetes de control de topología (TC). Al generar estos mensajes de gestión se sobrecarga la red, por lo que OLSR implementa la técnica de propagación de información parcial del estado de red usando un conjunto de nodos especiales (Multipoint Relay, MPR), estos nodos para mitigar la sobrecarga de red reducen el número de retransmisiones de paquetes de control.

El mecanismo aplicado por OLSR para el descubrimiento de nuevos vecinos es a través de la propagación de mensajes hello, estos mensajes descubren todos los nodos presentes a una distancia de uno o dos saltos de red [27], [28].

2.5.5.3. AD HOC ON-DEMAND DISTANCE VECTOR (AODV).

AODV es un protocolo de enrutamiento reactivo y pertenece al conjunto de protocolos que aplican el algoritmo vector distancia. Se denomina protocolo de enrutamiento bajo demanda debido a que la información de estado de los enlaces no se mantiene actualizada, por lo que la ruta se establece cada vez que hay un requisito. Utiliza el mecanismo de número de secuencia para asegurar una red sin bucles (loop) [12]. El proceso de descubrimiento de rutas lo realiza utilizando los mensajes:

- ❖ Route Request (RREQ) se transmite a través de Broadcast cuando el nodo de origen necesita comunicarse con un nuevo nodo. Si el mensaje RREQ alcanza el destino o un nodo intermedio posee un camino al destino se determina como ruta.
- ❖ Route Reply (RREP) es un mensaje unicast generado por el nodo destino o cualquier nodo que tenga una ruta nueva hacia el destino, dirigido al nodo que generó el mensaje RREQ.

CAPÍTULO III

3. METODOLOGÍA

3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN.

El presente trabajo desarrollado se basa en una investigación de tipo experimental e investigativa, debido a que se parte de investigaciones previas en las cuales se determinan las características y requerimientos de las redes Ad Hoc en sistemas UAV. Por lo que en este trabajo para el análisis realizado se procura utilizar parámetros y características similares a lo que sería una red FANET real.

3.2. MÉTODO DE INVESTIGACIÓN.

En el presente proyecto se utilizaron los métodos deductivo y experimental para el diseño estructural del código de simulación de una red FANET, sistemas de transmisión y recepción necesarios para la implementación de la red, los cuales se basan en el análisis y utilización de protocolos de red Ad Hoc.

3.3. FUENTES DE INFORMACIÓN.

Previamente y durante el desarrollo de este trabajo se ha ejecutado una revisión sistemática de documentaciones de diferentes bases de datos y comunidades científicas como ScienceDirect, ResearchGate, IEEE, publicaciones científicas orientadas al análisis de los protocolos de enrutamiento para redes Ad Hoc. También se ha consultado en registros y estudios con resultados que respalden la posibilidad de ejecución del proyecto, aportando información importante de los dispositivos electrónicos y de red que soporten la implementación de protocolos de enrutamiento Ad Hoc en redes aéreas, más conocidas como redes FANET.

3.4. INSTRUMENTOS DE INVESTIGACIÓN.

El desarrollo del presente documento tiene como instrumento principal el simulador de red de eventos discretos para sistemas de Internet Ns-3, que es un software gratuito de código abierto con licencia GNU, desarrollado por investigadores de diferentes partes del mundo [37]. También se hace uso de las siguientes técnicas de investigación:

- ❖ Observación directa: consiste en la selección explícita de un objeto de estudio que se desea analizar por medio de la visualización a detalle de una o más situaciones en particular que permitan llegar a cumplir los objetivos propuestos inicialmente.
- ❖ Análisis de documentos: son en su mayoría publicaciones científicas, papers, y manuales de dispositivos electrónicos, a fin de fundamentar la viabilidad de proyecto.

- ❖ Procedimiento experimental: Ns-3 empleado para la simulación y evaluación de una red FANET con protocolos de enrutamiento Ad Hoc, además se utilizó para realizar una comparativa con la implementación de una red física, usando como dispositivo principal la Raspberry Pi, también se hace uso de la herramienta Wireshark para el monitoreo del funcionamiento de la red.

3.5. OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES.

VARIABLES	CONCEPTO	INDICADORES	INSTRUMENTO
Independiente: Topología de la red Ad Hoc aérea (FANET)	Las redes Flying Ad-Hoc Network (FANET) son un nuevo tipo de red ad-hoc móvil debido a que sus nodos de conexión se encuentran en UAVs.	<ul style="list-style-type: none"> • Número de nodos implementados. • Número de escenarios testeados. 	<ul style="list-style-type: none"> • Simulación y determinación de valores por software. • Experimentación Directa.
Dependiente: Rendimiento de la red en la telegestión de redes UAV.	La búsqueda de la ruta entre los nodos de una red FANET es una de las principales tareas, es por eso que la elección del protocolo de enrutamiento juega un papel importante en el rendimiento de la red que se puede lograr evaluar o valorar a través del PDR, latencia, y otros.	<ul style="list-style-type: none"> • Throughput. • Latencia (< 100 ms). • Packet Delivery Ratio (>90%) 	<ul style="list-style-type: none"> • Herramientas de simulación. • Medición directa.

Tabla 1.- Operacionalización de variables.

Fuente:(Autor)

3.6. PROCEDIMIENTO Y ANÁLISIS.

En esta sección se explica el proceso de análisis e implementación de una red FANET, se describe el procedimiento que se seguirá para el análisis de los protocolos de enrutamiento Ad Hoc, así como el proceso de implementación.

En la primera etapa se recopiló información, para dominar el tema en torno a los simuladores de red aplicados en este tipo de estudios, además se realizó un estudio previo sobre protocolos de enrutamiento que actualmente se podrían emplear en redes Ad Hoc aéreas. Para la elección de los protocolos de enrutamiento a simular se procedió a comparar las características que presentan cada uno de ellos.

En segundo lugar, se determina la configuración del código de simulación. En este punto se ha determinado usar el software de simulación Network Simulator(Ns-3) debido a que sus características muestran mayor confiabilidad en comparación con otros simuladores y cuenta con un analizador de red que monitorea el flujo de paquetes permitiendo obtener resultados de evaluación instantáneos para determinar el protocolo de red más adecuado [29]. Es importante recalcar que el script empleado para la elaboración del presente proyecto está basado en el código third.cc y wifi-example-sim.cc, mismos que se encuentran en el repositorio de Ns-3. Este código es modificado en distintos puntos de su estructura, lo que permite cumplir con uno de los objetivos planteados.

Finalmente se llevó a cabo el análisis de resultados obtenidos mediante las simulaciones para elegir el protocolo de enrutamiento más eficiente en la red FANET que se desarrolló en este proyecto de investigación. Seguidamente, la implementación de la red física se la realizó utilizando componentes electrónicos de bajo costo con capacidad de funcionamiento en modo de red Ad Hoc. El despliegue se llevó a cabo con un máximo de cuatro nodos, evaluando la eficiencia de la red y contrastando resultados con la simulación de la misma.

3.6.1. ELECCIÓN DE LOS PROTOCOLOS DE ENRUTAMIENTO.

Para establecer los protocolos de enrutamiento a utilizar durante el desarrollo de este trabajo se efectúa una comparativa entre ellos utilizando las características principales descritas en el capítulo anterior, la comparativa realizada se muestra en el Anexo 2. Este proceso se realiza con el objetivo de determinar los protocolos de enrutamiento que son adaptables a las redes móviles Ad Hoc [38].

En la Tabla 4 del Anexo 2 se puede observar que dentro de los protocolos de enrutamiento proactivos OLSR posee mejores características y en el estudio realizado por [12] los resultados muestran que OLSR es el segundo mejor protocolo para redes FANET en términos de rendimiento general en comparación con HWMP, DSDV y AODV, en algunos casos los costes generales son mejores en comparación con HWMP. En el trabajo realizado por [30] se analiza el rendimiento de los protocolos AODV y OLSR, se le atribuye a OLSR como el mejor para este tipo de redes.

En la categoría de los protocolos de enrutamiento reactivo el protocolo AODV ofrece mejores características en comparación con otros protocolos del mismo tipo, también siendo óptimo para redes Ad Hoc. AODV es un protocolo que busca la ruta más corta y rápida para la

transmisión de paquetes. Por otra parte, en el estudio de [31] se determina que AODV cuenta con mejor rendimiento en una FANET.

Realizado este análisis se eligieron los siguientes protocolos de enrutamiento para desarrollo de este trabajo de investigación: el protocolo AODV de tipo reactivo y OLSR de tipo proactivo, siendo estos los más utilizados en estudios, debido a que cuentan con una certificación RFC (*Request for Comments*). El protocolo DSDV también se elige con el propósito de ampliar su estudio ya que presenta características técnicas muy buenas y posee similitudes con el protocolo AODV [31].

3.6.2. SIMULACIÓN DE LA RED AD HOC AÉREA (FANET).

3.6.2.1. DESCRIPCIÓN DEL ESCENARIO DE PRUEBA.

Para efectuar el análisis de los protocolos de enrutamiento de redes Ad Hoc aéreas, se realizaron pruebas en diferentes escenarios con relación al número de nodos y tamaño del área de simulación. En cada uno de los escenarios se evalúa las métricas descritas más adelante, siendo estos de gran importancia para determinar que una red tenga un desempeño eficiente y confiable. En las redes móviles Ad Hoc es necesario establecer un modelo de movilidad para los nodos, en el trabajo realizado por [12] proponen diferentes modelos de movilidad los cuales fueron analizados previamente a la elaboración de este trabajo; en el siguiente apartado se encuentra la descripción del modelo de movilidad usado para la evaluación de la red FANET.

3.6.2.1.1. MODELO DE MOVILIDAD.

El modelo de movilidad seleccionado es el de Gauss-Markov Mobility Model debido a que presenta características realistas a los UAVs, facilitando la elaboración de este trabajo. Entre las principales características encontramos la movilidad en tres dimensiones lo que hace posible asemejar el movimiento de un UAV, otra característica importante que debemos destacar es el cambio de movimiento que lo realiza utilizando la dirección y velocidad anterior, haciendo que los nodos se muevan en distintas trayectorias [39]. Al ser un modelo tridimensional es importante establecer la altura de operación de los UAVs, la misma que se determinó basándonos en el reglamento de la Dirección General de Aviación Civil Ecuatoriana, quien establece que la altura máxima de operación es de 122 metros sobre el suelo [46].

3.6.2.2. ESTRUCTURA DE CÓDIGO DE SIMULACIÓN.

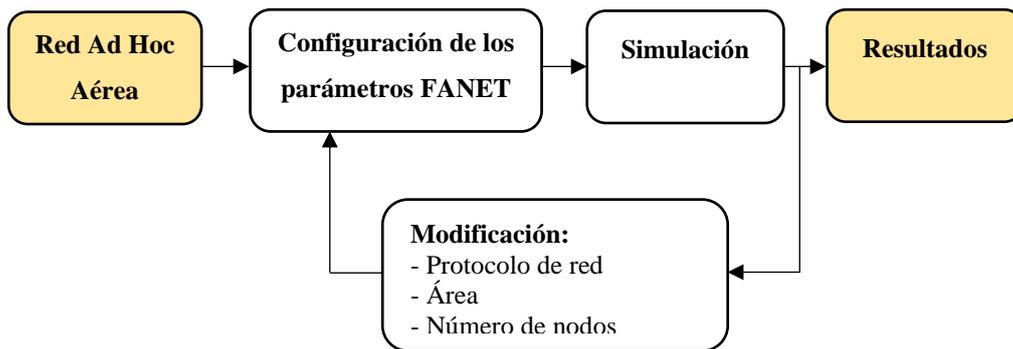


Figura 7.- Procedimiento para el análisis y obtención de datos.

Fuente: (Autor)

El proceso de simulación de una red Ad Hoc aérea, se desarrolló siguiendo el diagrama de bloques que se muestra en la Figura 7. El código completo desarrollado se encuentra en el Anexo 1.

3.6.2.3. MÉTRICAS POR EVALUARSE.

El proceso de análisis se realiza considerando diferentes métricas cuantitativas, ciertas métricas influyen directamente en el desempeño de la red permitiendo hacer un estudio comparativo de estos protocolos de enrutamiento mediante simulación. A continuación, se describen cada una de las métricas a evaluarse.

Throughput. - Se define como la cantidad de paquetes que el receptor recibe exitosamente desde el emisor en un período de tiempo [32]. También se puede definir la cantidad total de datos que el receptor recibe efectivamente desde el remitente dividido por el tiempo en que tarda el receptor en obtener el último paquete, se mide en bits por segundo.

A continuación, se muestra la fórmula para el cálculo del throughput:

$$\text{Throughput} = \frac{\text{Paquetes entregados exitosamente}}{\text{Tiempo de la transmisión}} \text{ [bps]}$$

Tasa de entrega de paquetes (Packet Delivery Ratio, PDR). - Es la relación entre la cantidad de paquetes de datos enviados y los paquetes de datos realmente recibidos [32]; normalmente esta medida es representada en porcentaje. Cuanto mayor sea el PDR mejor es el desempeño de la red. La fórmula para el cálculo de la tasa de entrega de paquetes es:

$$\text{Tasa de entrega de paquetes} = \frac{\text{Paquetes recibidos}}{\text{Paquetes perdidos}} \times 100$$

Retardo extremo a extremo. - Esta métrica representa la demora promedio de un extremo a otro e indica cuánto tiempo tardó un paquete en viajar desde el origen hasta el destino [32]; su unidad se expresa en segundos.

A continuación, se muestra la fórmula para el cálculo del Retardo extremo a extremo:

$$\text{Retardo extremo a extremo} = \text{tiempo de recepción} - \text{tiempo de envío. [seg]}$$

El retardo en un sistema de comunicación es una métrica que se debe tener muy en cuenta, debido a que un retardo elevado se puede apreciar como un rendimiento bajo de la red en general.

3.6.3. IMPLEMENTACIÓN DEL PROTOCOLO AD HOC EN LA RED FANET.

3.6.3.1. ESPECIFICACIONES DE LOS COMPONENTES.

La implementación de la red Ad Hoc FANET consta de dos elementos fundamentales, entre ellos la Raspberry Pi, siendo el principal componente debido a su tamaño, características y funcionalidades que presenta.

Raspberry Pi 3

La Raspberry Pi es un dispositivo de placa única (Single Board Computer, SBC) de bajo costo, fue desarrollado desde 2006 por voluntarios, académicos de tecnología y miembros de la Fundación Raspberry Pi en el Reino Unido, con el objetivo de enseñar informática a nivel mundial. El desarrollo de Raspberry Pi es muy rápido y ya cuenta con varias versiones [33].



Figura 8. -Raspberry Pi 3 modelo B+

Autor: Tomada de [34]

La Raspberry Pi 3 que se puede ver en la Figura 8 corresponde a la utilizada en este estudio, es la tercera generación [35]. Este dispositivo se usa para la ejecución del protocolo de enrutamiento, además se hace uso de los puertos USB y GPIO donde se instala el dispositivo de red y los módulos de adquisición de datos respectivamente.

El sistema operativo instalado la Raspberry Pi para el desarrollo de este trabajo es Raspberry Pi OS, que es una distribución basada en Linux. La principal ventaja de usar estos sistemas operativos es que son de código abierto, lo cual permite una gran capacidad de adaptación con nuevos sistemas y compatibilidad con otros dispositivos.

Dispositivo USB Wi-Fi.

Aunque la Raspberry Pi cuenta con una interfaz inalámbrica de red incorporada, para el desarrollo de este trabajo de tesis se utilizó un módulo de red externo con el fin de mejorar la calidad del enlace. El dispositivo utilizado es el módulo Wi-Fi Dongle USB que está construido con el chip MediaTek RT5370 con una interfaz USB 2.0 la cual admite conectarse a la Raspberry Pi. Otra característica importante del dispositivo de red es la capacidad de trabajar con el estándar IEEE 802.11, permitiéndole trabajar en modo Ad Hoc [36].

3.6.3.2. PROCESO DE IMPLEMENTACIÓN.

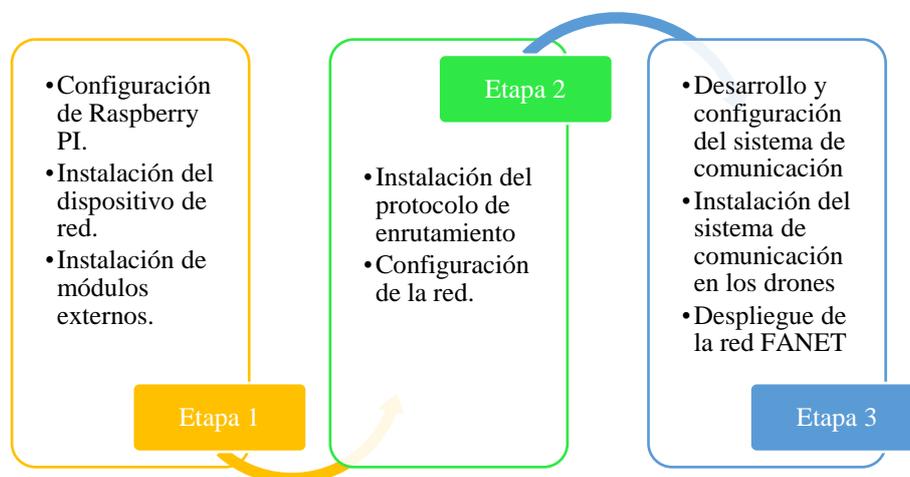


Figura 9 - Proceso de implementación de la red FANET.

Fuente: (Autor)

En la Figura 9 se visualiza el procedimiento a seguir para la implementación de la red FANET, en la etapa 1 se realiza las configuraciones necesarias de la Raspberry Pi, misma que funcionará como un nodo de enrutamiento y como dispositivo de adquisición de datos, por lo que se realiza la instalación del dispositivo de red seleccionado y los módulos necesarios para la captura de información.

En la etapa 2 se realiza la implementación del mejor protocolo de enrutamiento según los resultados del análisis planteado, también se realiza las configuraciones respectivas de la red para que trabaje en modo Ad Hoc, por último, en la etapa 3 se realiza el despliegue de la red FANET utilizando el sistema de comunicación desarrollado que se muestra a continuación.

3.6.4. SISTEMA DE COMUNICACIÓN

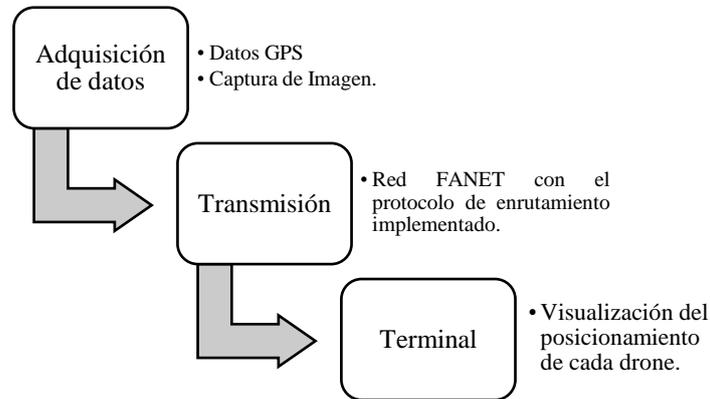


Figura 10. - Diagrama general del sistema de comunicación.

Fuente: (Autor)

En la Figura 10, se presenta el diagrama de bloques del sistema de comunicación el cual consta de tres bloques, el primer bloque adquiere los datos generados por el GPS mediante la programación que se ha realizado en la Raspberry Pi, en uno de los nodos también se ha incorporado una cámara con la que se realiza la captura de imagen para transmitirla por la red. Posteriormente en el segundo bloque para transmitir la información hacia la estación base se utiliza la red Ad Hoc aérea, la cual está ejecutándose dentro de la Raspberry Pi convirtiéndola en un nodo de red, la frecuencia de trabajo que se ha establecido es la de 2.4 GHz. Finalmente, en el bloque 3 del sistema de comunicación se tiene la visualización de información recibida.

En la Figura 11, se presenta la gráfica de la etapa de transmisión del sistema de comunicación, donde la Raspberry Pi realiza la captura de información usando los módulos incorporados a la misma, posteriormente se genera una red Ad Hoc con el protocolo de enrutamiento establecido, la topología puede variar dependiendo de la ubicación de los nodos de red. Los datos se envían a través de la comunicación establecida por los nodos utilizando el protocolo TCP que permite la transmisión de información segura de datos, todos estos procesos dan como resultado un sistema capaz de enviar y recibir datos, la estación base posee su respectiva interfaz de visualización.

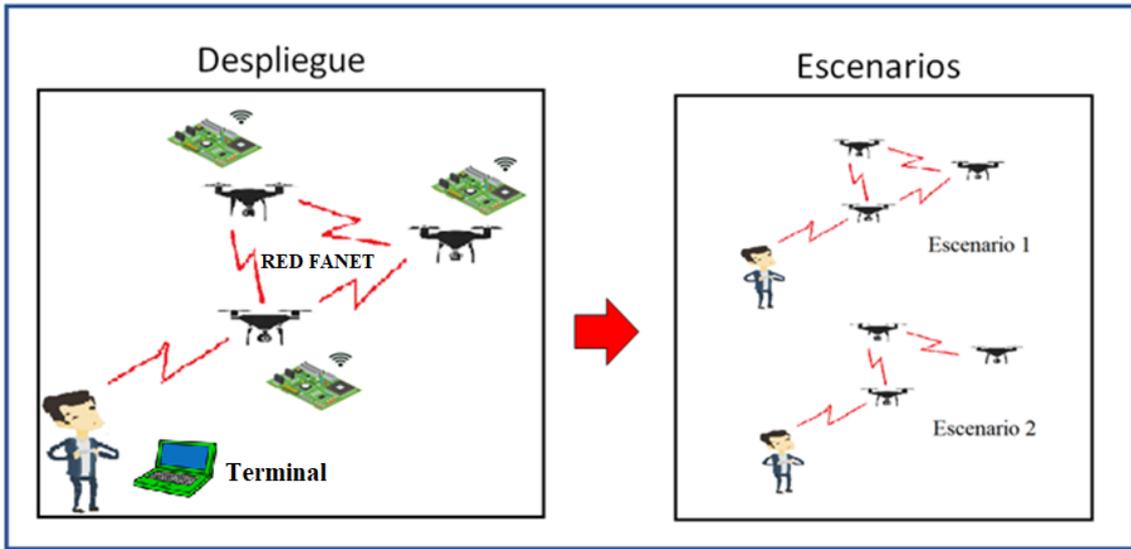


Figura 11. - Etapa de transmisión del sistema de comunicación.

Fuente: (Autor)

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

Para desarrollar el análisis de los resultados de cada uno de los protocolos de enrutamiento para redes FANET, se realizaron ensayos basándose en diferentes escenarios con respecto al número de nodos y área de simulación. En cada escenario se evalúa 3 parámetros: tasa de entrega de paquetes, retardo y throughput, los mismos que han sido seleccionados con fundamento de estudios anteriores, siendo estos de gran importancia, para determinar que una red sea eficiente y confiable.

La configuración de los parámetros para cada uno de los estudios ejecutados se puede observar en la Tabla 2, donde se puede ver que el análisis se realizó con respecto al número de nodos y área de simulación.

<i>Parámetros de Simulación</i>	<i>Escenario 1</i>	<i>Escenario 2</i>	<i>Escenario 3</i>	<i>Escenario 4</i>
<i>Área de Simulación</i>	<i>100m x 100m</i> <i>Altura= 120m</i>	<i>250m x 250m</i> <i>Altura= 120m</i>	<i>300m x 300m</i> <i>Altura= 120m</i>	<i>400m x 400m</i> <i>Altura= 120m</i>
<i>Simulador</i>	<i>Ns-3 (versión 2.35)</i>			
<i>Tipo de Canal</i>	<i>Inalámbrico</i>			
<i>Protocolo</i>	<i>AODV, DSDV, OLSR</i>			
<i>Protocolo de capa MAC</i>	<i>802.11b</i>			
<i>Número de nodos</i>	<i>10, 20, 30, 40</i>			
<i>Velocidad de los nodos</i>	<i>10 m/sec</i>			
<i>Modelo de movilidad</i>	<i>Gauss-Markov</i>			

Tabla 2. - *Parámetros de configuración para las simulaciones realizadas.*

Fuente:(Autor)

4.1. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE SIMULACIÓN.

En esta sección se trata sobre los estudios realizados con los protocolos de enrutamiento establecidos anteriormente para diferentes densidades de nodos. En total se analizaron cuatro escenarios que estarán conformados por distintas áreas de simulación.

La razón por la cual se efectúan estas simulaciones es para evaluar la eficiencia que presentan los protocolos de enrutamiento seleccionados en una red Ad Hoc aérea. Esto nos permitirá elaborar una comparativa de la eficiencia que presentan cada uno de los protocolos, la

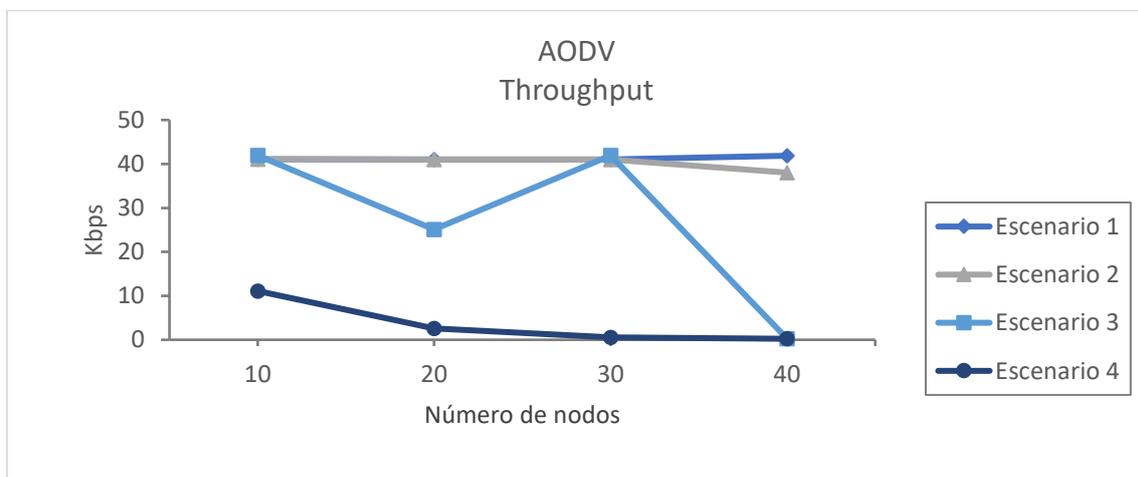
información obtenida es el resultado de cada una de las simulaciones realizadas con la variación de los parámetros antes mencionados.

4.1.1. ANÁLISIS DEL THROUGHPUT.

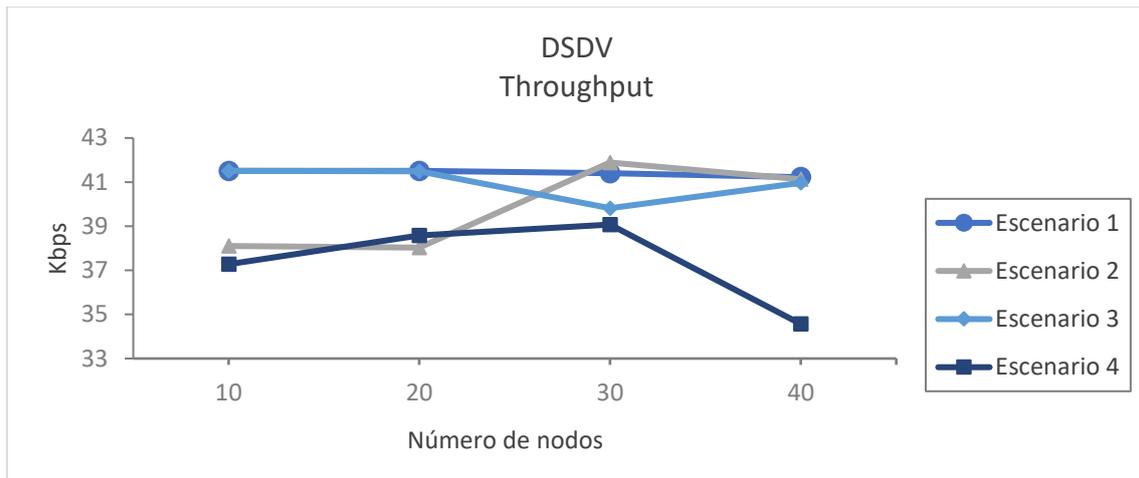
En la Figura 12-(a) correspondiente al protocolo AODV, se observa que en áreas inferiores a 300 metros cuadrados el throughput es superior, también se aprecian resultados similares para cada una de las densidades de nodos; esto se demuestra al incrementar el área de simulación donde se aprecia una caída en el rendimiento de la red. A pesar de que el rendimiento de red disminuye al incrementar la densidad de los nodos y el área de simulación, en un área pequeña se sigue obteniendo un mayor valor de throughput en comparación del obtenido al aumentar la densidad de nodos en un área mayor a la mencionada.

En la gráfica de los resultados obtenidos para el protocolo de enrutamiento DSDV que se muestra en la Figura 12-(b), se puede determinar ciertas similitudes con el protocolo anteriormente analizado. El throughput se mantiene con un valor alto en un área de 100 metros cuadrados. Sin embargo, para el caso de las áreas de tamaño superior se puede observar una variación del throughput donde se ve una disminución de su valor mostrando un comportamiento similar al protocolo AODV.

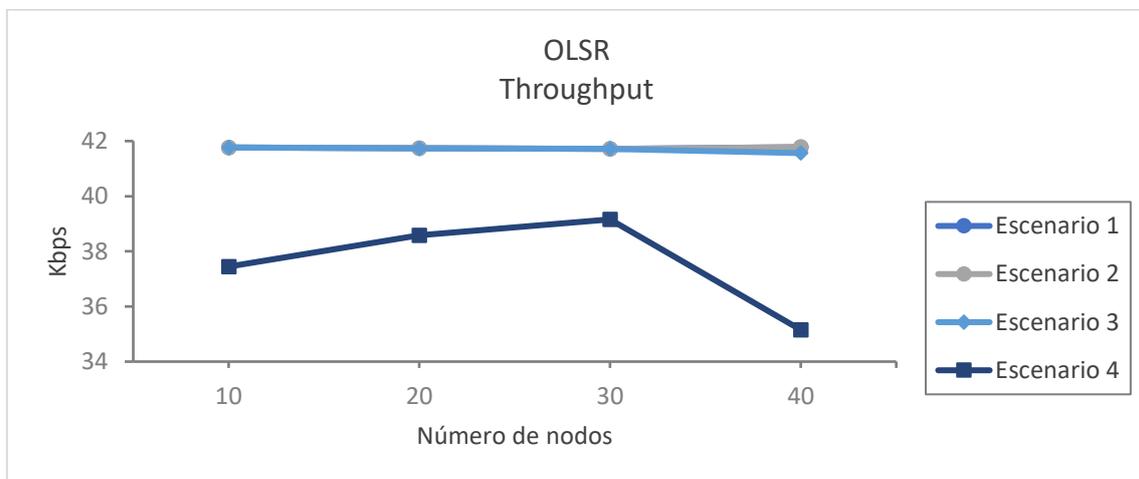
En el caso de la Figura 12-(c), se puede observar mejores resultados en los mismos escenarios de evaluación. En este caso se puede evidenciar que el protocolo de enrutamiento OLSR mantiene el valor del throughput, viéndose poco afectado por las diferentes densidades de nodos y por el tamaño del área de pruebas. De forma general el protocolo de enrutamiento OLSR presenta un mejor comportamiento ante el incremento del número de nodos y el área de simulación, es decir facilita la escalabilidad de la red.



(a)



(b)



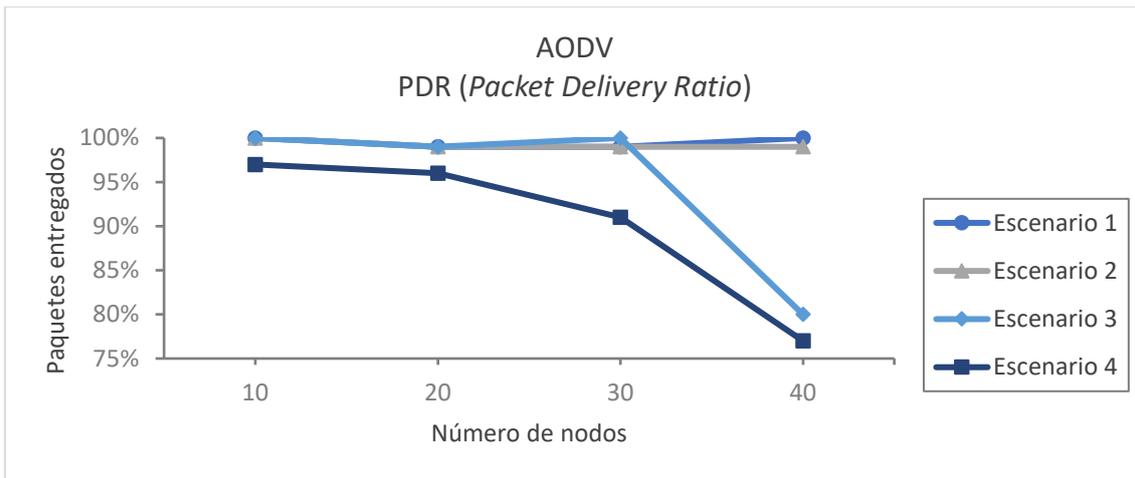
(c)

Figura 12. - Gráfica de evaluación del Throughput. (a) Protocolo de enrutamiento AODV, (b) Protocolo de enrutamiento DSDV, (c) Protocolo de enrutamiento OLSR.

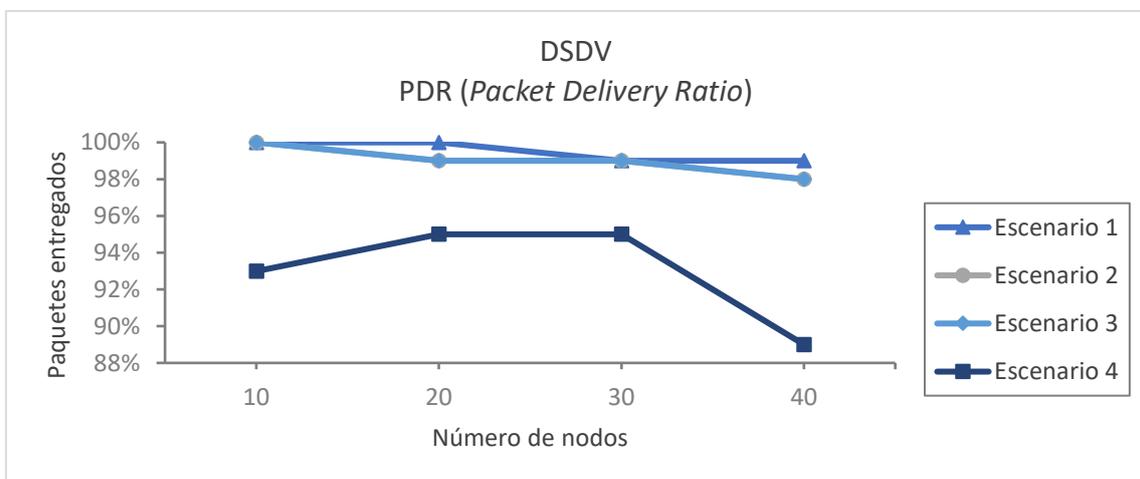
Fuente:(Autor)

4.1.2. ANÁLISIS DE LA TASA DE ENTREGA DE PAQUETES (*PACKET DELIVERY RATIO, PDR*).

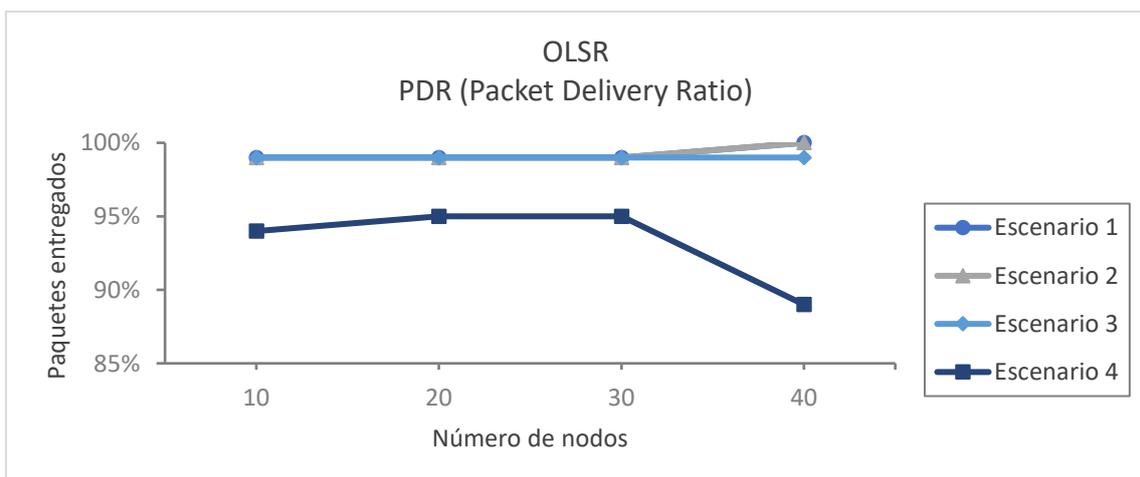
De igual forma como sucede en la métrica anteriormente analizada se puede evidenciar en la Figura 13-(a) y Figura 13-(b) que corresponden a los protocolos de enrutamiento AODV y DSDV que la tasa de entrega de paquetes en áreas inferiores a 300 metros cuadrados es mayor en comparación con lo obtenido en el escenario 4. Al igual que la figura anterior si bien la tasa de entrega de paquetes disminuye a medida que se aumenta el área y la densidad de los nodos, para el caso del protocolo OLSR que se muestra en la Figura 13-(c) se puede evidenciar que el PDR es mayor en todos los escenarios con respecto a las gráficas de los protocolos DSDV y AODV, lo cual garantiza la confiabilidad en la comunicación que debe existir entre nodos.



(a)



(b)



(c)

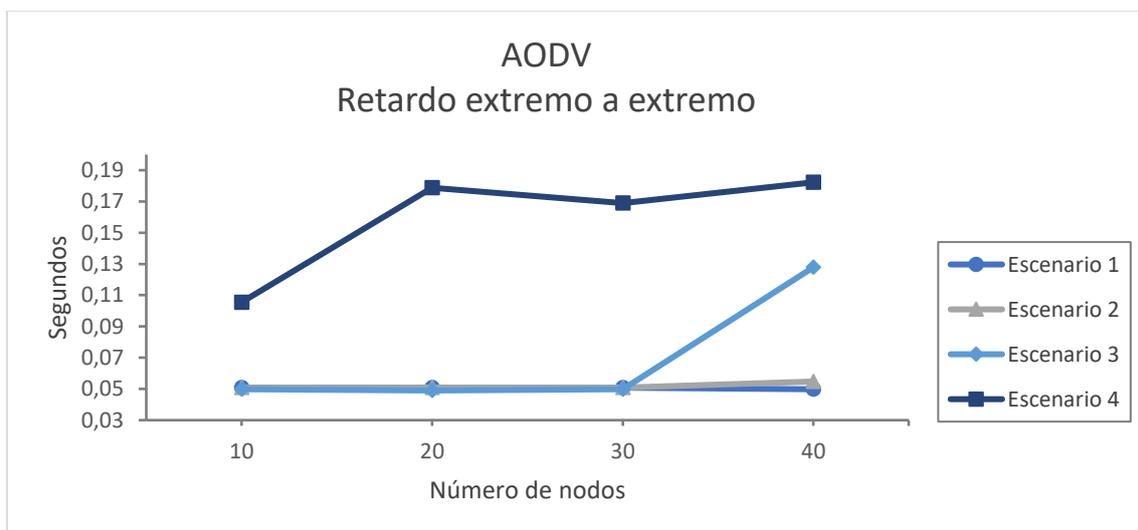
Figura 13. - Evaluación del Porcentaje de entrega de paquetes. (a) Protocolo de enrutamiento AODV, (b) Protocolo de enrutamiento DSDV, (c) Protocolo de enrutamiento OLSR.

Fuente: (Autor)

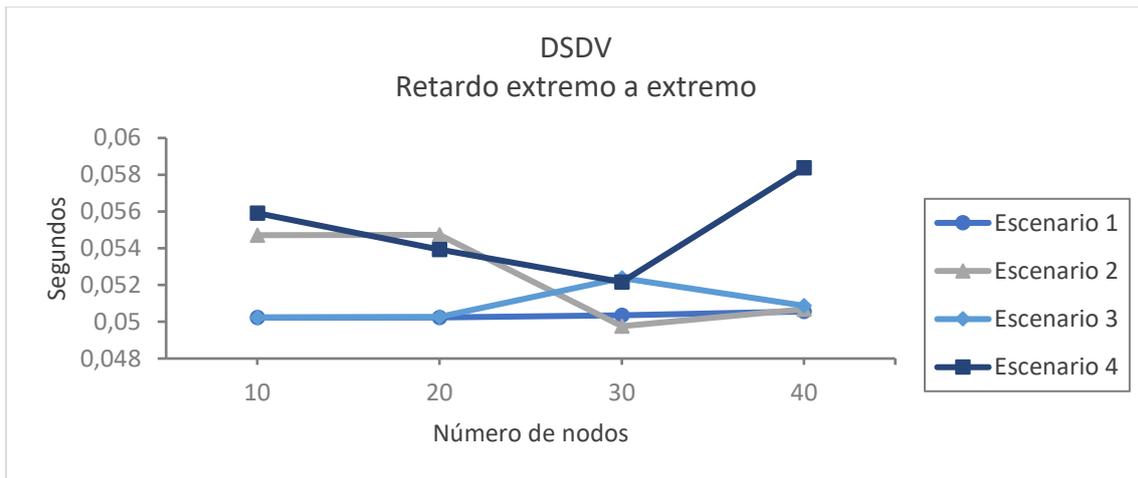
4.1.3. ANÁLISIS DEL RETARDO EXTREMO A EXTREMO.

En este análisis comenzaremos con el protocolo de enrutamiento DSDV, debido a la variación de resultados en cada uno de los escenarios. Como se puede apreciar en la Figura 14-(b) el protocolo DSDV para el área más pequeña mantiene los resultados del retardo extremo a extremo de forma lineal aún con la variación del número de nodos, caso contrario a lo que ocurre con los demás escenarios.

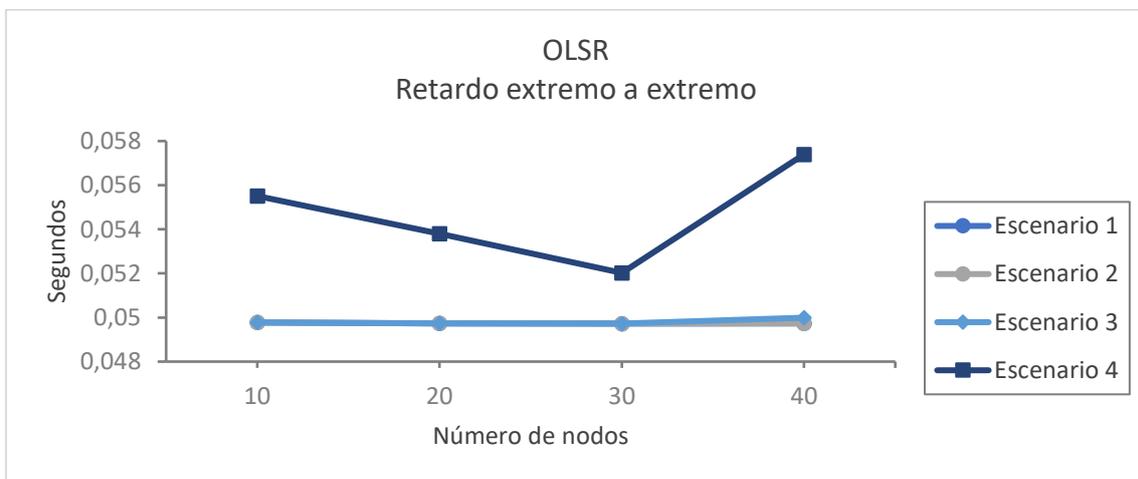
En la Figura 14-(a) y Figura 14-(c) se visualiza un comportamiento similar entre los protocolos de enrutamiento AODV y OLSR. En ambos casos se visualiza un aumento en el valor de esta métrica al incrementar el número de nodos, esto es lógico debido a que los paquetes deben pasar por más nodos para llegar a su destino. Sin embargo, en la Figura 14-(c), se evidencia que el retardo existente es similar en los tres primeros escenarios, esto nos indica que el protocolo de enrutamiento OLSR tiene un mayor desempeño ante el incremento de nodos en la red con áreas de hasta 300 metros. La curva correspondiente al escenario 4 indica la reducción del retardo en la red mientras se incrementan los nodos, esto tiene sentido ya que en un medio de comunicación inalámbrico las conexiones pueden tardar por fallos de red al tener distancias mayores entre los nodos, el incremento de nodos reduciría estas distancias. En el escenario de 40 nodos el retardo tiende a subir significativamente, esto se debe a que los protocolos de enrutamiento analizados con este número de nodos y áreas como la del escenario 4 comienzan a presentar inconvenientes en las transmisiones de paquetes.



(a)



(b)



(c)

Figura 14. -Retardo extremo a extremo. (a)Protocolo de enrutamiento AODV, (b)Protocolo de enrutamiento DSDV, (c)Protocolo de enrutamiento OLSR

Fuente: (Autor)

4.2. IMPLEMENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS EN PRUEBAS FÍSICAS REALIZADAS.

En las secciones anteriores se evaluaron tres métricas, donde se comprobó que el protocolo de enrutamiento OLSR presenta una mejor eficacia en una red FANET. A través del Throughput, uno de los indicadores del rendimiento de una red, se evidencio que OLSR presenta mayor capacidad para el envío de información valida a través de la red, viéndose poco afectado por el incremento de nodos y el área de simulación. Otro de los parámetros que determinan como mejor protocolo a OLSR es el retardo extremo a extremo, en el análisis realizado se evidencio que los valores de esta métrica se mantienen por debajo de los demás protocolos estudiados, indicándonos la entrega de paquetes validos en un menor tiempo. Finalmente, el porcentaje de entrega de paquetes para OLSR se mantiene por encima del 99% garantizando una

comunicación exitosa en la mayoría de las transmisiones. Dicho esto, en este apartado de pruebas se busca comparar los resultados del despliegue de una red FANET utilizando el protocolo OLSR en diferentes escenarios.

El sistema de comunicación está compuesto por cuatro nodos inalámbricos, cada dispositivo cuenta con una identificación única a través de una dirección IP como se muestra en la Tabla 3.

Nombre del nodo	Dirección IP
Nodo A (Terminal)	192.168.10.5
Nodo B – UAV 1	192.168.10.3
Nodo C – Nodo Complementario	192.168.10.7
Nodo D – UAV 2	192.168.10.6

Tabla 3. - Direcciones IP asignadas a los nodos de red.

Fuente: (Autor)

Las pruebas del funcionamiento del sistema se realizaron utilizando 4 escenarios. A continuación, se muestra el diagrama de los escenarios y las pruebas realizadas.

4.2.1. ESCENARIOS IMPLEMENTADOS Y EVALUADOS.

Para el desarrollo de este proceso de evaluación se implementa un sistema de red inalámbrica Ad Hoc utilizando el protocolo de enrutamiento OLSR. La ejecución de este protocolo se inicia a través del terminal de la Raspberry Pi, donde se puede visualizar una ventana como la Figura 15, la que permite observar los enlaces establecidos con los nodos vecinos, además de mostrar los nodos con los que no se establece una comunicación directa (máximo 2 saltos).

1) Indica los nodos vecinos.

2) Muestra los nodos que se encuentran a 2 saltos y el nodo intermedio.

Figura 15. - Ventana de ejecución de OLSR.

Fuente: (Autor)

4.2.1.1. ESCENARIO Y PRUEBA 1.

Primero se realiza una comunicación entre dos nodos, Nodo A y Nodo D como se muestra en la Figura 16.



Figura 16. - Escenario 1.

Fuente: (Autor)

Los resultados de evaluación para este escenario se observan en la Figura 17. La Figura 17-(a) comprende al funcionamiento de la red con el protocolo OLSR, se puede observar la existencia de un solo nodo vecino, la dirección IP que se visualiza corresponde al Nodo D. En la gráfica Figura 17-(b) se puede evidenciar la existencia de comunicación entre el Nodo A (Terminal) y el Nodo D. Finalmente tenemos la gráfica Figura 17-(c) que corresponde a la transmisión del posicionamiento GPS del Nodo D hacia el terminal.

```
pi@raspberrypi: ~/Desktop/shell_scripts
Archivo Editar Pestañas Ayuda
*** olsr.org - 0.6.6.2-git_0909090-hash_5766aabdb0b373cac97adf6c44c91f32
(2014-06-14 06:27:56 on bm-wb-04) ***
--- 11:26:27.994341 ----- LINKS
IP address      hyst      LQ      ETX
192.168.10.6    0.000    0.662/1.000  1.509
--- 11:26:27.994381 ----- NEIGHBORS
IP address  LQ  NLQ  SYM  MPR  MPRS  will
192.168.10.6  0.000  YES  NO  NO  3
--- 11:26:27.994404 ----- TWO-HOP NEIGHBORS
IP addr (2-hop) IP addr (1-hop) Total cost
```

(a)

```

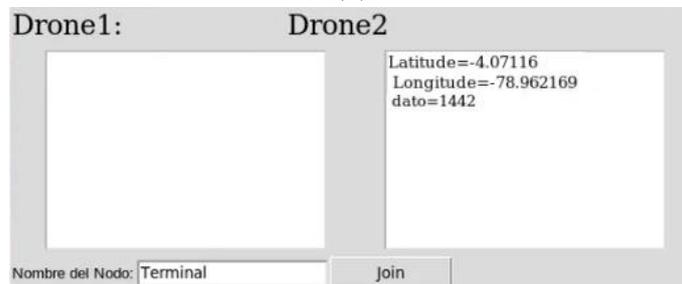
pi@raspberrypi: ~/Desktop/shell_scripts
Archivo Editar Pestañas Ayuda
* pi@raspbe... X pi@raspberr... X

--- 192.168.10.6 ping statistics ---
10 packets transmitted, 10 received, 0% packet loss, time 23ms
rtt min/avg/max/mdev = 1.294/2.174/3.840/0.721 ms
pi@raspberrypi:~/Desktop/shell_scripts $ ping -c 10 192.168.10.6
PING 192.168.10.6 (192.168.10.6) 56(84) bytes of data:
64 bytes from 192.168.10.6: icmp_seq=1 ttl=64 time=2.90 ms
64 bytes from 192.168.10.6: icmp_seq=2 ttl=64 time=1.89 ms
64 bytes from 192.168.10.6: icmp_seq=3 ttl=64 time=1.99 ms
64 bytes from 192.168.10.6: icmp_seq=4 ttl=64 time=1.90 ms
64 bytes from 192.168.10.6: icmp_seq=5 ttl=64 time=1.87 ms
64 bytes from 192.168.10.6: icmp_seq=6 ttl=64 time=1.56 ms
64 bytes from 192.168.10.6: icmp_seq=7 ttl=64 time=5.59 ms
64 bytes from 192.168.10.6: icmp_seq=8 ttl=64 time=2.09 ms
64 bytes from 192.168.10.6: icmp_seq=9 ttl=64 time=6.70 ms
64 bytes from 192.168.10.6: icmp_seq=10 ttl=64 time=1.94 ms

--- 192.168.10.6 ping statistics ---
10 packets transmitted, 10 received, 0% packet loss, time 21ms
rtt min/avg/max/mdev = 1.559/2.843/6.699/1.701 ms
pi@raspberrypi:~/Desktop/Resultados PING $ traceroute 192.168.10.6
traceroute to 192.168.10.6 (192.168.10.6), 30 hops max, 60 byte packets
 1 192.168.10.6 (192.168.10.6) 4.417 ms 10.334 ms 10.388 ms
pi@raspberrypi:~/Desktop/Resultados PING $

```

(b)



(c)

Figura 17. - Prueba 1 realizada. (a) Gráfica del funcionamiento del protocolo OLSR, (b) Verificación de comunicación, (c) Transmisión de información a través de la red.

Fuente: (Autor)

4.2.1.2. ESCENARIO Y PRUEBA 2

En segundo lugar, al Nodo D se lo desplaza de tal forma que pierda la comunicación existente para a su vez introducir un nuevo nodo como en la Figura 18.

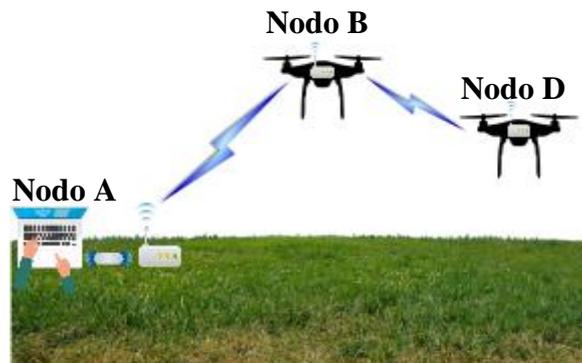


Figura 18. - Escenario 2.

Fuente: (Autor)

Los resultados de evaluación para este escenario se observan en la Figura 19. En la gráfica 19-(a) se puede observar el enlace directo con la IP 192.168.10.3 correspondiente al Nodo B.

También se puede comprobar la existencia de un tercer nodo que se encuentra conectado a través del Nodo B, la dirección IP 192.168.10.6 correspondiente al Nodo D. En la Figura 19-(b) se observa el ping realizado para la comprobación del funcionamiento de la red, también se muestra el traceroute realizado mostrando el camino que han establecido los enrutadores para llegar al Nodo D, como se puede ver existe una comunicación de 2 saltos lo que se contrasta con la gráfica Figura 19-(a).

```

pi@raspberrypi: ~/Desktop/shell_scripts
Archivo Editar Pestañas Ayuda
pi@raspberr... x pi@raspberr... x
*** olsr.org - 0.6.6.2-git_0000000-hash_5766aabdb0b373c
ac97adf6c44c91f32 (2014-06-14 06:27:56 on bm-wb-04) ***
--- 18:35:05.245774 -----
----- LINKS
IP address      hyst      LQ      ETX
192.168.10.3    0.000    0.788/0.886  1.431
--- 18:35:05.245822 -----
----- NEIGHBORS
      IP address  LQ      NLQ     SYM     MPR     MPRS  will
192.168.10.3    0.000  YES    YES    NO      3
--- 18:35:05.245851 ----- TWO-HOP NEIGHBORS
IP addr (2-hop) IP addr (1-hop) Total cost
192.168.10.6    192.168.10.3  2.718

```

(a)

```

pi@raspberrypi: ~/Desktop/Resultados PING
Archivo Editar Pestañas Ayuda
pi@raspberr... x pi@raspberr... x
1008 bytes from 192.168.10.6: icmp_seq=6 ttl=62 time=53.6 ms
1008 bytes from 192.168.10.6: icmp_seq=7 ttl=62 time=15.3 ms
1008 bytes from 192.168.10.6: icmp_seq=8 ttl=62 time=47.8 ms
1008 bytes from 192.168.10.6: icmp_seq=9 ttl=62 time=22.8 ms
1008 bytes from 192.168.10.6: icmp_seq=10 ttl=62 time=55.6 ms
1008 bytes from 192.168.10.6: icmp_seq=11 ttl=62 time=24.1 ms
1008 bytes from 192.168.10.6: icmp_seq=12 ttl=62 time=23.2 ms
1008 bytes from 192.168.10.6: icmp_seq=13 ttl=62 time=16.5 ms
1008 bytes from 192.168.10.6: icmp_seq=14 ttl=62 time=20.7 ms
1008 bytes from 192.168.10.6: icmp_seq=15 ttl=62 time=17.5 ms
--- 192.168.10.6 ping statistics ---
15 packets transmitted, 15 received, 0% packet loss, time 28ms
rtt min/avg/max/mdev = 15.329/41.369/88.172/24.934 ms
pi@raspberrypi:~/Desktop/Resultados PING $ traceroute 192.168.10.6
traceroute to 192.168.10.6 (192.168.10.6), 30 hops max, 60 byte packets
 1 192.168.10.3 (192.168.10.3) 13.818 ms 39.153 ms *
 2 192.168.10.6 (192.168.10.6) 79.944 ms * *
pi@raspberrypi:~/Desktop/Resultados PING $

```

(b)

Figura 19. - Prueba 2 realizada. (a) Gráfica del funcionamiento del protocolo OLSR, y (b) Verificación de comunicación.

Fuente: (Autor)

4.2.1.3. ESCENARIO Y PRUEBA 3

Para este escenario se incluye un nodo al escenario anterior, creando una topología lineal con múltiples saltos como se muestra en la Figura 20.

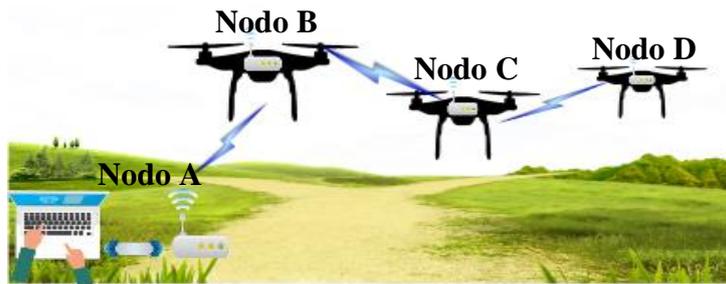


Figura 20. - Escenario 3.

Fuente: (Autor)

Los resultados de evaluación para este escenario se observan a continuación en la siguiente gráfica. En la Figura 21-(a) se observa la existencia de una conexión directa entre el terminal y el Nodo B identificado con la dirección IP 192.168.10.3. Además, en la parte inferior de la gráfica se observa la dirección IP 192.168.10.7 que corresponde al Nodo C, lo cual indica una comunicación de 2 saltos por medio del Nodo B.

Como se visualizó en la Figura 21-(a) el nodo terminal no registra una conexión directa o por medio de dos saltos con la dirección IP 192.168.10.6 que corresponde al Nodo D. Sin embargo, en la gráfica Figura 21-(b) se realizó una prueba de comunicación entre el Nodo A y D utilizando el comando ping, dando como resultado una comunicación exitosa, adicionalmente se utilizó el comando traceroute para visualizar la ruta establecida para llegar al Nodo D dando como resultado un total de 3 saltos. Finalmente, en la gráfica 21-(c) tenemos la transmisión de las coordenadas geográficas de los nodos A y D.

```

pi@raspberrypi: ~/Desktop/shell_scripts
Archivo Editar Pestañas Ayuda
pi@raspberr... x pi@raspberr... x
*** olsr.org - 0.6.6.2-git_0000000-hash_5766aabdb0b373c
ac97adf6c44c91f32 (2014-06-14 06:27:56 on bm-wb-04) ***
--- 18:10:53.956564 -----
----- LINKS
IP address      hyst      LQ      ETX
192.168.10.3    0.000    1.000/1.000  1.000
--- 18:10:53.956651 -----
----- NEIGHBORS
IP address      LQ      NLQ     SYM     MPR     MPRS  will
192.168.10.3    0.000  YES     YES     NO      3
--- 18:10:53.956707 -----
----- TWO-HOP NEIGHBORS
IP addr (2-hop) IP addr (1-hop) Total cost
192.168.10.7    192.168.10.3  2.191

```

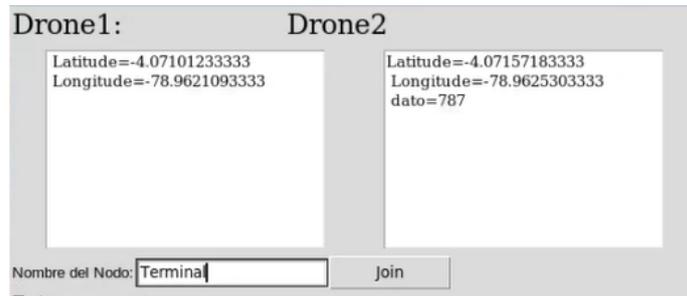
(a)

```

pi@raspberrypi: ~/Desktop/Resultados PING
Archivo Editar Pestañas Ayuda
3 192.168.10.6 (192.168.10.6) 58.996 ms 65.452 ms 74.050 ms
pi@raspberrypi:~/Desktop/Resultados PING $ traceroute 192.168.10.6
traceroute to 192.168.10.6 (192.168.10.6), 30 hops max, 60 byte packets
 1 192.168.10.3 (192.168.10.3) 1.950 ms 6.427 ms 6.593 ms
 2 192.168.10.7 (192.168.10.7) 15.066 ms 21.566 ms 35.496 ms
 3 192.168.10.6 (192.168.10.6) 36.563 ms 47.458 ms *
pi@raspberrypi:~/Desktop/Resultados PING $ ping -s 1000 -c 15 192.168.10.6
PING 192.168.10.6 (192.168.10.6) 1000(1028) bytes of data.
1000 bytes from 192.168.10.6: icmp_seq=1 ttl=62 time=53.9 ms
1000 bytes from 192.168.10.6: icmp_seq=4 ttl=62 time=41.7 ms
1000 bytes from 192.168.10.6: icmp_seq=5 ttl=62 time=27.8 ms
1000 bytes from 192.168.10.6: icmp_seq=6 ttl=62 time=39.10 ms
1000 bytes from 192.168.10.6: icmp_seq=7 ttl=62 time=33.4 ms
1000 bytes from 192.168.10.6: icmp_seq=8 ttl=62 time=22.6 ms
1000 bytes from 192.168.10.6: icmp_seq=9 ttl=62 time=41.5 ms
1000 bytes from 192.168.10.6: icmp_seq=10 ttl=62 time=22.8 ms
1000 bytes from 192.168.10.6: icmp_seq=11 ttl=62 time=53.1 ms
1000 bytes from 192.168.10.6: icmp_seq=12 ttl=62 time=57.8 ms
1000 bytes from 192.168.10.6: icmp_seq=13 ttl=62 time=22.4 ms
1000 bytes from 192.168.10.6: icmp_seq=14 ttl=62 time=22.4 ms
1000 bytes from 192.168.10.6: icmp_seq=15 ttl=62 time=25.1 ms

```

(b)



(c)

Figura 21. - Prueba 3 realizada. (a) Gráfica del funcionamiento del protocolo OLSR, (b) Verificación de comunicación, y (c) Transmisión de datos a través de la red.

Fuente: (Autor)

4.2.1.4. ESCENARIO Y PRUEBA 4.

La última prueba realizada se realizó con un total de 4 nodos que se encuentran enlazados entre sí, permitiendo una comunicación entre todos los nodos, a este tipo de comunicación se la conoce como redes malladas.

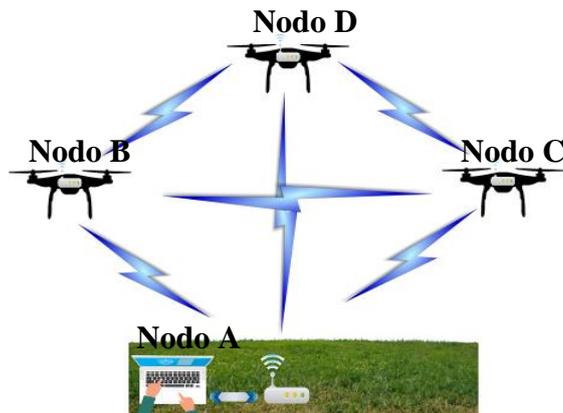
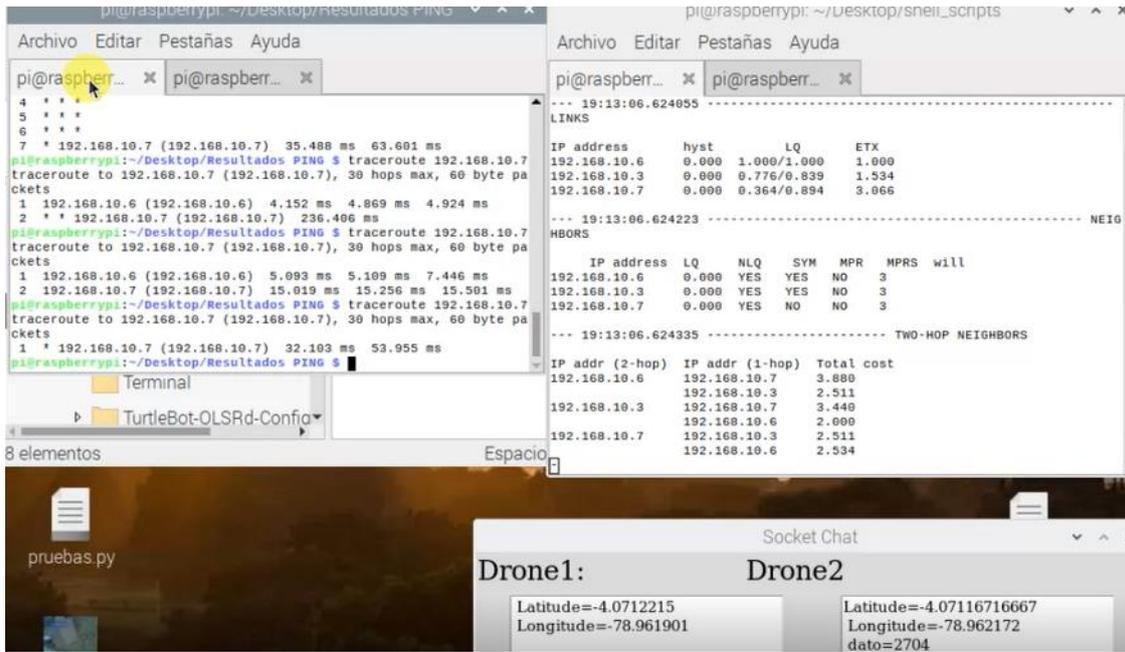


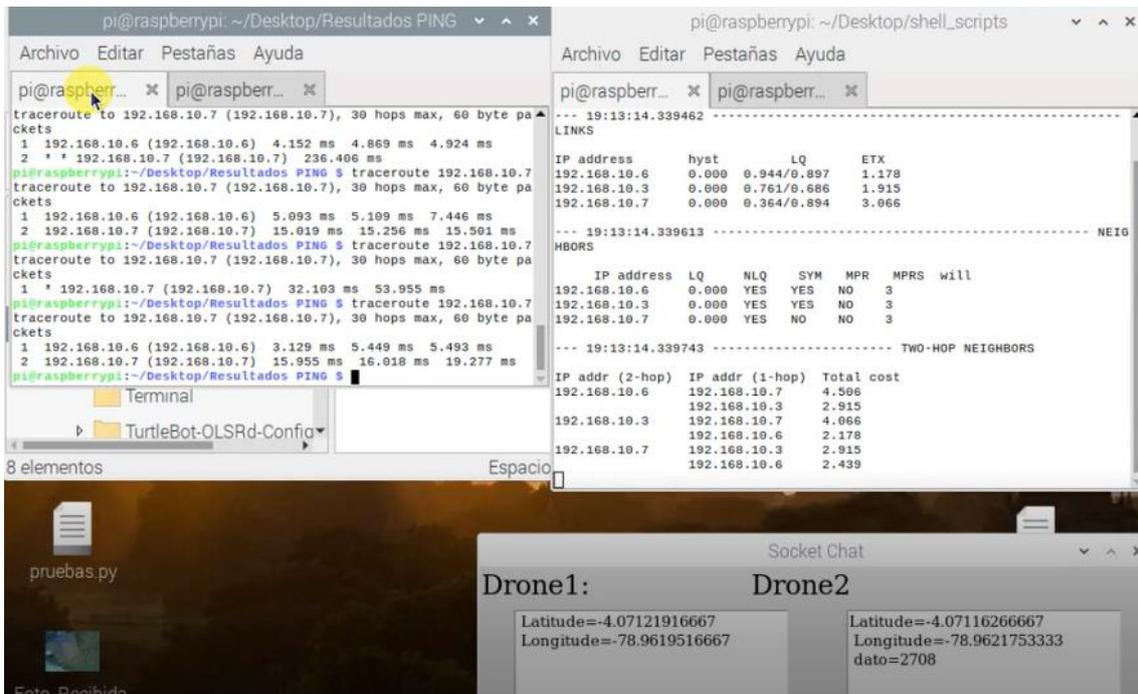
Figura 22. - Escenario 4.

Fuente: (Autor)

Los resultados obtenidos en este escenario se muestran a continuación:



(a)



(b)

Figura 23. - Verificación de las rutas establecidas en la red de tipo malla.

Fuente: (Autor)

En la Figura 23, en la ventana superior derecha se puede observar que existe una comunicación directa con los Nodos B, C y D según las direcciones IP mostradas. También se observa las comunicaciones indirectas con los nodos, como se muestra en la Figura 24. En la Columna uno se visualiza la dirección IP del Nodo D que se encuentra a dos saltos de red, seguidamente en la columna dos se observa la existencia de las direcciones 192.168.10.7, 192.168.10.3

correspondiente al Nodo C y B respectivamente. Estas columnas nos muestran la existencia de dos rutas para llegar al nodo D, la primera ruta establecida es a través del Nodo C y la segunda es por medio del Nodo B.

```

--- 19:13:06.624223 ----- NEIG
HBORS
      IP address  LQ    NLQ    SYM    MPR    MPRS  will
192.168.10.6    0.000  YES   YES   NO     3
192.168.10.3    0.000  YES   YES   NO     3
192.168.10.7    0.000  YES   NO    NO     3

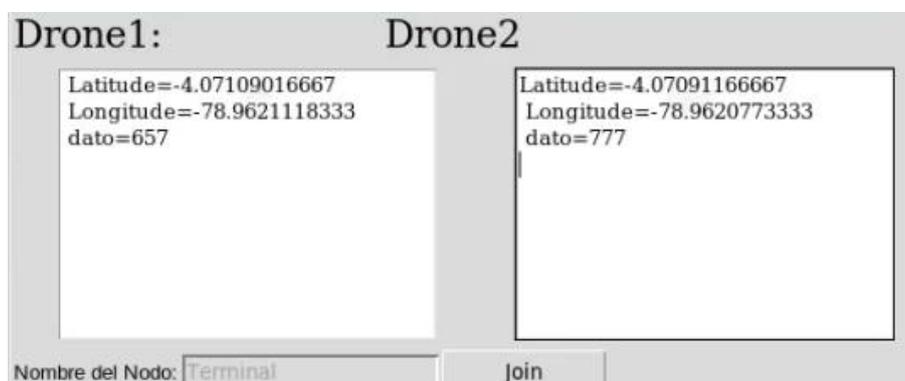
--- 19:13:06.624335 ----- TWO-HOP NEIGHBORS
IP addr (2-hop)  IP addr (1-hop)  Total cost
192.168.10.6    192.168.10.7    3.880
192.168.10.6    192.168.10.3    2.511
192.168.10.3    192.168.10.7    3.440
192.168.10.3    192.168.10.6    2.000
192.168.10.7    192.168.10.3    2.511
192.168.10.7    192.168.10.6    2.534
  
```

Figura 24. - Rutas establecidas.

Fuente: (Autor)

En la gráfica Figura 23-(a) por medio del comando traceroute se puede ver que, para llegar al Nodo C realiza una comunicación a través de un solo salto es decir directa. Segundos después se desplaza el nodo en otra dirección, seguidamente se ejecuta el comando traceroute como se visualiza en la Figura 23-(b) dando como resultado una nueva ruta, en este caso es a través de dos saltos de red.

Finalmente, se ejecutó una prueba adicional para constatar el funcionamiento del protocolo OLSR utilizando la herramienta Wireshark con la que se realizó la captura de paquetes que se transmiten a través de la red inalámbrica. En la Figura 25 se visualiza en la interfaz de Wireshark dos protocolos distintos, el primer protocolo corresponde a OLSR, encargado de establecer las diferentes rutas para llegar a un determinado host. También se puede observar el protocolo TCP, encargado de la transmisión de datos a través de la red FANET.



(a)

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
2339	402.831671212	192.168.10.6	192.168.10.255	OLSR v1	90	OL
2340	402.974776279	192.168.10.5	192.168.10.255	OLSR v1	90	OL
2341	403.892453020	192.168.10.7	192.168.10.255	OLSR v1	90	OL
2342	404.003145306	192.168.10.6	192.168.10.5	TCP	132	52
2343	404.003208613	192.168.10.5	192.168.10.6	TCP	66	10
2344	404.003523649	192.168.10.5	192.168.10.3	TCP	132	10
2345	404.012694073	192.168.10.3	192.168.10.5	TCP	66	35
2346	404.840640752	192.168.10.5	192.168.10.3	TCP	79	10
2347	404.840719613	192.168.10.5	192.168.10.6	TCP	79	10


```

> Ethernet II, Src: Raspberr_97:3f:c2 (b8:27:eb:97:3f:c2), Dst: Raspberr_15:2e:26
> Internet Protocol Version 4, Src: 192.168.10.6, Dst: 192.168.10.5
> Transmission Control Protocol, Src Port: 52518, Dst Port: 10319, Seq: 12586, Ac
Data (66 bytes)
Data: 44726f6e65323a4c617469747564653d2d342e30373131363636370a204c6f6e
0000 dc a6 32 15 2e 26 b8 27 eb 97 3f c2 08 00 45 00 ..2.&.'..?..E.
0010 00 76 43 12 40 00 40 06 62 14 c0 a8 0a 06 c0 a8 ..vC.@.@.b.....
0020 0a 05 cd 26 28 4f f8 60 ab 47 ad c9 95 26 80 18 ...&(O`G...&..
0030 01 f6 aa ee 00 00 01 01 08 0a 6d eb 9b 07 13 2e .....m.....
0040 0a da 44 72 6f 6e 65 32 3a 4c 61 74 69 74 75 64 ..Drone2 :Latitud
0050 65 3d 2d 34 2e 30 37 30 39 31 31 36 36 36 37 e=-4.070 91166667
0060 0a 20 4c 6f 6e 67 69 74 75 64 65 3d 2d 37 38 2e . Longit ude=-78.
0070 39 36 32 30 37 37 33 33 33 33 0a 20 64 61 74 6f .96207733 33· dato
0080 3d 37 37 37 =777

```

(b)

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Len
2333	402.012046276	192.168.10.3	192.168.10.5	TCP	
2334	402.041197121	192.168.10.7	192.168.10.255	OLSR v1	
2335	402.092343102	192.168.10.3	192.168.10.5	TCP	
2336	402.092410354	192.168.10.5	192.168.10.3	TCP	
2337	402.092891037	192.168.10.5	192.168.10.6	TCP	
2338	402.097151496	192.168.10.6	192.168.10.5	TCP	
2339	402.831671212	192.168.10.6	192.168.10.255	OLSR v1	
2340	402.974776279	192.168.10.5	192.168.10.255	OLSR v1	
2341	403.892453020	192.168.10.7	192.168.10.255	OLSR v1	


```

> Ethernet II, Src: Raspberr_ae:0f:89 (dc:a6:32:ae:0f:89), Dst: Raspberr_15:
> Internet Protocol Version 4, Src: 192.168.10.3, Dst: 192.168.10.5
> Transmission Control Protocol, Src Port: 35880, Dst Port: 10319, Seq: 5316
Data (67 bytes)
Data: 44726f6e65313a204c617469747564653d2d342e30373130393031363636370a2
0000 dc a6 32 15 2e 26 dc a6 32 ae 0f 89 08 00 45 00 ..2.&. & 2.....E.
0010 00 77 a7 e4 40 00 40 06 fd 43 c0 a8 0a 03 c0 a8 ..w.@.@.C.....
0020 0a 05 8c 28 28 4f b6 87 48 63 a5 b0 fc fd 80 18 ...((O.HC.....
0030 01 f5 a5 ba 00 00 01 01 08 0a e9 a2 e9 e4 38 48 .....8H.....
0040 a0 85 44 72 6f 6e 65 31 3a 20 4c 61 74 69 74 75 ..Drone1 : Latitu
0050 64 65 3d 2d 34 2e 30 37 31 30 39 30 31 36 36 36 de=-4.07 10901666
0060 37 0a 20 4c 6f 6e 67 69 74 75 64 65 3d 2d 37 38 7· Longi tude=-78
0070 2e 39 36 32 31 31 31 38 33 33 33 0a 20 64 61 74 .9621118 333· dat
0080 6f 3d 36 35 37 o=657

```

(c)

Figura 25. - Captura de paquetes realizado con Wireshark. (a) Datos recibidos en el Terminal, (b) y (c) Datos capturados con Wireshark.

Fuente: (Autor)

4.3. DISCUSIÓN.

Finalizadas las pruebas de verificación se pudo constatar el funcionamiento del protocolo OLSR, y del correcto funcionamiento de la red FANET durante la transmisión de datos en tiempo real. Además, se consideró aspectos importantes como la distancia entre nodos, factor que afecta a la transmisión de paquetes, provocando retrasos que se pueden apreciar en la interfaz del nodo terminal. También se evidenció diferentes resultados para cada uno de los escenarios, mostrando el cambio del retardo extremo a extremo y el porcentaje de entrega de paquetes. Por último, se procede a ejecutar la simulación de los escenarios de prueba, y a su vez hacer la captura de los resultados obtenidos en cada una de las pruebas realizadas

permitiéndonos ejecutar uno de los objetivos planteados. A continuación, se muestran los resultados de las pruebas realizadas en la red FANET y la simulación de esta.

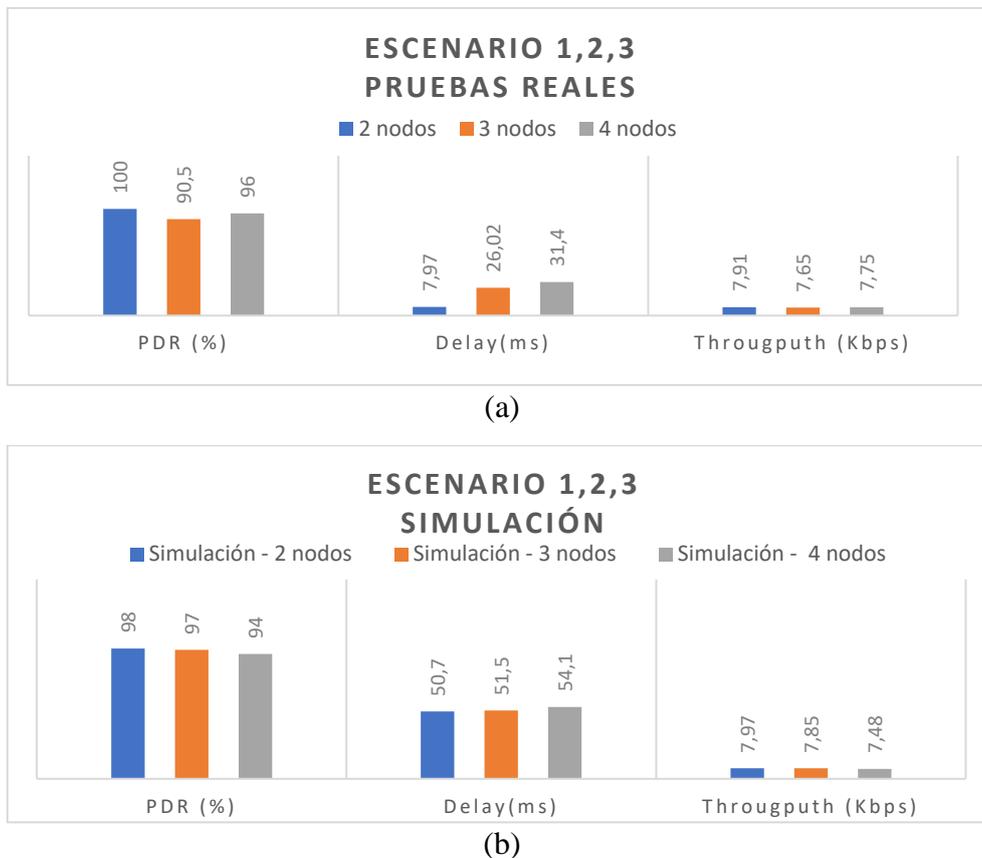


Figura 26. – Resultados obtenidos. (a) Resultados de pruebas físicas escenarios 1,2,3. (b) Resultados de simulación escenarios 1,2,3.

Fuente: (Autor)

En la Figura 26-(a) correspondiente a la red física implementada se observa que el porcentaje de entrega de paquetes tiene una eficiencia superior al 90% garantizando la comunicación en la mayoría de las transmisiones. En el caso del retardo extremo a extremo se percibe un incremento del retardo al insertar más nodos en la red, lo cual tiene lógica ya que los paquetes deben pasar por un mayor número de nodos, en la Figura 26-(b) correspondiente a la simulación se observa un comportamiento parecido en esta métrica, sin embargo, existe mayor retardo al comparar los valores con la red física. De manera similar se comporta el Throughput en ambos casos, disminuyendo su valor cuando se incrementa el número de nodos.



(c)

Figura 27. - Comparativa de resultados en el escenario 4.

Fuente: (Autor)

En la Figura 27 correspondiente a la topología de tipo malla, se observa un porcentaje de entrega de paquetes muy cercano al 100%, debido a que existen diferentes caminos para la transmisión de la información. Al igual que en los escenarios anteriores el retardo en la comunicación es inferior a la simulación, finalmente el Throughput es mejor en comparación con los resultados de la simulación y del despliegue de una red con topología lineal.

CAPÍTULO V

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

5.1. CONCLUSIONES.

En este trabajo de titulación se planteó el análisis e implementación de protocolos de enrutamiento para una Ad Hoc aérea que permita la telegestión de UAVs, donde se demostró que para realizar el despliegue de una red Ad Hoc aérea es necesario considerar la eficiencia de los distintos protocolos de encaminamiento Ad Hoc. Al modelar una red FANET que facilite evaluar diferentes protocolos de encaminamiento, se ha observado que la topología de red varía en el tiempo debido a que la red se forma por una agrupación de nodos inalámbricos móviles que se incorporan o salen de la red, por lo que establecer un protocolo de enrutamiento que maneje el direccionamiento de tráfico en una red de datos, es una labor sumamente importante. El protocolo de red, que se encarga de administrar el enrutamiento de información en un sistema de comunicación, establece cómo se direcciona el tráfico de la red.

La red FANET modelada para la evaluación en el software de simulación Ns-3, presenta un escenario de movilidad muy similar al realizado por los drones, por lo tanto, se puede concluir que el entorno utilizado permite evaluar diferentes protocolos de enrutamiento para redes Ad Hoc, obteniendo resultados que se asemejen a lo que sería una red física de UAVs, lo cual es de gran beneficio para nosotros como investigadores ya que reduce los tiempos y costos al momento del despliegue de una red de este tipo.

En las simulaciones se evaluaron cuatro escenarios, en el cual, se concluye que el protocolo de enrutamiento más apropiado es Optimized Link State Routing (OLSR), a pesar de que en algunos casos el porcentaje de entrega de paquetes es inferior a los otros, en base a los resultados obtenidos por las demás métricas de evaluación, el protocolo de encaminamiento OLSR es el más adecuado a utilizar en el despliegue de redes móviles Ad Hoc aéreas con características similares a las empleadas.

Se implementó una red FANET con el protocolo de enrutamiento OLSR y como componente principal la Raspberry Pi debido al uso libre que presenta este dispositivo, además se empleó dispositivos electrónicos con los que se complementa la adquisición de datos a través del

sistema de comunicación entre UAVs. Con la implementación de esta red se puede concluir que es factible desplegar una red FANET aplicando componentes de bajo costo permitiendo la transmisión de diferentes tipos de datos como texto e imágenes, además se comprobó la eficiencia del protocolo de enrutamiento OLSR recurriendo a la medición de métricas utilizadas en la simulación.

Se contrastaron resultados en la red física aplicando topología lineal y de tipo malla, donde se logró comprobar el funcionamiento de la red Ad Hoc aérea a través del envío de paquetes ICMP desde el terminal hacia los distintos drones, mientras la red se encuentra en funcionamiento. Dicho esto, se concluye que para la topología lineal el protocolo OLSR en una red FANET garantiza la escalabilidad de la red al introducir nuevos nodos de red, finalmente en la topología malla se demostró una mejor eficacia del protocolo al establecer nuevas rutas, manteniendo actualizadas las rutas para el transporte de datos.

5.2. RECOMENDACIONES.

Para la elaboración y simulación de los diferentes escenarios en el simulador Ns-3 se recomienda que el computador a utilizar para este proceso tenga una alta capacidad de procesamiento, ya que en las simulaciones de un gran número de nodos toma mayor tiempo de análisis.

Para escenarios grandes, donde los nodos se encuentren separados por una distancia considerable, es recomendable emplear módulos de red con antena externa y extraíble para poder cambiarlas con antenas de mejores prestaciones a la de fábrica.

Para trabajos con relación a redes de UAVs o para trabajos futuros se recomienda que todos los drones que conformen la red dispongan de una capacidad de carga de 1kg o superior para la instalación de Routers y componentes electrónicos, además deben ser totalmente autónomos y con un tiempo de vuelo considerable.

BIBLIOGRAFÍA.

- [1] M. Hassanalain and A. Abdelkefi, “Classifications, applications, and design challenges of drones: A review,” *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 91, pp. 99–131, May 2017, doi: 10.1016/j.paerosci.2017.04.003.
- [2] A. Mukherjee, V. Keshary, K. Pandya, N. Dey, and S. C. Satapathy, “Flying Ad hoc Networks: A Comprehensive Survey,” in *Information and Decision Sciences*, Singapore, 2018, pp. 569–580. doi: 10.1007/978-981-10-7563-6_59.
- [3] R. Bruno, M. Conti, and E. Gregori, “Mesh networks: commodity multihop ad hoc networks,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 43, no. 3, pp. 123–131, Mar. 2005, doi: 10.1109/MCOM.2005.1404606.
- [4] S. Temel and İ. Bekmezci, “On the performance of Flying Ad Hoc Networks (FANETs) utilizing near space high altitude platforms (HAPs),” in *2013 6th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST)*, Jun. 2013, pp. 461–465. doi: 10.1109/RAST.2013.6581252.
- [5] H. Yang and Z. Liu, “An optimization routing protocol for FANETs,” *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2019, no. 1, p. 120, May 2019, doi: 10.1186/s13638-019-1442-0.
- [6] C. P. Saavedra Cañar, “Estudio comparativo de las métricas de calidad de servicio (QoS) empleando protocolos de encaminamiento reactivos DSR (dynamic source routing) y AODV (ad-hoc on demand distance vector) en redes vanets (vehicular ad-hoc networks).,” Jul. 2019, Accessed: Jan. 21, 2022. [Online]. Available: <https://dspace.unl.edu.ec/handle/123456789/22107>
- [7] M. A. Khan, A. Safi, I. M. Qureshi, and I. U. Khan, “Flying ad-hoc networks (FANETs): A review of communication architectures, and routing protocols,” in *2017 First International Conference on Latest trends in Electrical Engineering and Computing Technologies (INTELECT)*, Nov. 2017, pp. 1–9. doi: 10.1109/INTELECT.2017.8277614.
- [8] O. K. Sahingoz, “Networking Models in Flying Ad-Hoc Networks (FANETs): Concepts and Challenges,” *J Intell Robot Syst*, vol. 74, no. 1, pp. 513–527, Apr. 2014, doi: 10.1007/s10846-013-9959-7.

- [9] A. Chriki, H. Touati, H. Snoussi, and F. Kamoun, “FANET: Communication, mobility models and security issues,” *Computer Networks*, vol. 163, p. 106877, Nov. 2019, doi: 10.1016/j.comnet.2019.106877.
- [10] A. V. Leonov and G. A. Litvinov, “Simulation-Based Packet Delivery Performance Evaluation with Different Parameters in Flying Ad-Hoc Network (FANET) using AODV and OLSR,” *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 1015, p. 032178, May 2018, doi: 10.1088/1742-6596/1015/3/032178.
- [11] D.-Y. Kim and J.-W. Lee, “Integrated Topology Management in Flying Ad Hoc Networks: Topology Construction and Adjustment,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 61196–61211, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2875679.
- [12] A. Nayyar, “Flying Adhoc Network (FANETs): Simulation Based Performance Comparison of Routing Protocols: AODV, DSDV, DSR, OLSR, AOMDV and HWMP,” in *2018 International Conference on Advances in Big Data, Computing and Data Communication Systems (icABCD)*, Aug. 2018, pp. 1–9. doi: 10.1109/ICABCD.2018.8465130.
- [13] M. I. B. Azevedo, C. Coutinho, E. M. Toda, T. C. Carvalho, and J. Jailton, *Wireless Communications Challenges to Flying Ad Hoc Networks (FANET)*. IntechOpen, 2019. doi: 10.5772/intechopen.86544.
- [14] K. Singh and A. K. Verma, “Applying OLSR routing in FANETs,” in *2014 IEEE International Conference on Advanced Communications, Control and Computing Technologies*, May 2014, pp. 1212–1215. doi: 10.1109/ICACCCT.2014.7019290.
- [15] “Wi-Fi - Telecom ABC.” <http://www.telecomabc.com/w/wifi.html> (accessed Jan. 22, 2022).
- [16] “IEEE 802.11 - Telecom ABC.” <http://www.telecomabc.com/numbers/80211.html> (accessed Jan. 19, 2022).
- [17] A. M. Montoya Osete, “Estudio práctico del uso de drones en el campo de las telecomunicaciones,” *A practical study on the use of drones in the telecommunications field*, Oct. 2019, Accessed: Jan. 22, 2022. [Online]. Available: <https://repositorio.upct.es/handle/10317/8109>

- [18] D. Helen and D. Arivazhagan, “Applications, Advantages and Challenges of Ad Hoc Networks,” undefined, 2014, Accessed: Jan. 22, 2022. [Online]. Available: <https://www.semanticscholar.org/paper/Applications%2C-Advantages-and-Challenges-of-Ad-Hoc-Helen-Arivazhagan/68551857c467105f273654a764af337c1dd24d76>
- [19] B. Mitchell, “How Is Ad-Hoc Mode Used in Networking?,” Lifewire, Apr. 2020. <https://www.lifewire.com/ad-hoc-mode-in-wireless-networking-816560> (accessed Jan. 20, 2022).
- [20] I. Sumra, P. Sellappan, A. Abdullah, and A. Ali, “Security issues and Challenges in MANET-VANET-FANET: A Survey,” EAI Endorsed Transactions on Energy Web, vol. 5, p. 155884, Abril 2018, doi: 10.4108/eai.10-4-2018.155884.
- [21] E. G. Estupiñán Chaw, “Análisis de los protocolos de enrutamiento para las redes móviles Ad-Hoc con el simulador NS-3.,” Mar. 2019, Accessed: Jan. 20, 2022. [Online]. Available: <http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/12730>
- [22] HispaDrones, “TIPOS DE DRONES,” HispaDrones, Jan. 26, 2019. <https://www.hispadrones.com/principiantes/aprendizaje-consejos/tipos-de-drones/> (accessed Jan. 20, 2022).
- [23] G. M. Rodríguez Pineda, ““Análisis y simulación de protocolos de enrutamiento adecuados en diferentes escenarios para redes AdHoc, mediante la herramienta Ns-3’.”,” 2016, Accessed: Jan. 04, 2022. [Online]. Available: <https://dspace.unl.edu.ec/handle/123456789/11585>
- [24] D. L. Gu, G. Pei, H. Ly, M. Gerla, B. Zhang, and X. Hong, “UAV aided intelligent routing for ad-hoc wireless network in single-area theater,” in 2000 IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Conference Record (Cat. No.00TH8540), Sep. 2000, vol. 3, pp. 1220–1225 vol.3. doi: 10.1109/WCNC.2000.904805.
- [25] M. T. Hyland, “Performance Evaluation of Ad Hoc Routing Protocols in a Swarm of Autonomous Unmanned Aerial Vehicles,” AIR FORCE INST OF TECH WRIGHT-PATTERSON AFB OH SCHOOL OF ENGINEERING AND MANAGEMENT, Mar. 2007. Accessed: Jan. 20, 2022. [Online]. Available: <https://apps.dtic.mil/sti/citations/ADA469161>

- [26] L. Naik, L. R. U. Khan, and R. B. Mishra, "Comparative Performance Analysis on Revised MANET Routing Protocols," *International Journal of Applied Engineering Research*, vol. 13, pp. 2443–2451, 2018, [Online]. Available: https://www.ripublication.com/ijaer18/ijaerv13n5_45.pdf
- [27] A. Singh, G. Singh, and M. Singh, "Comparative Study of OLSR, DSDV, AODV, DSR and ZRP Routing Protocols Under Blackhole Attack in Mobile Ad Hoc Network," in *Intelligent Communication, Control and Devices*, Singapore, 2018, pp. 443–453. doi: 10.1007/978-981-10-5903-2_45.
- [28] D. J. Calvachi Moreno, "Evaluación de la eficiencia del protocolo OLSR sobre redes MANET usando el simulador NS3," Oct. 2020, Accessed: Jan. 20, 2022. [Online]. Available: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/21153>
- [29] K. K. Niama Borja, "Simulación, modelamiento y evaluación de los protocolos de routing en redes MANET's con aplicaciones de video mediante plataformas opensource de eventos discretos.," Mar. 2017, Accessed: Jan. 04, 2022. [Online]. Available: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/6859>
- [30] S. Maakar, Y. Singh, and R. Singh, "Performance Investigation of OLSR and AODV Routing Protocols for 3D FANET Environment using NS3," Oct. 2018.
- [31] A. Garcia-Santiago, J. Castaneda-Camacho, J. F. Guerrero-Castellanos, and G. Mino-Aguilar, "Evaluation of AODV and DSDV routing protocols for a FANET: Further results towards robotic vehicle networks," in *2018 IEEE 9th Latin American Symposium on Circuits Systems (LASCAS)*, Feb. 2018, pp. 1–4. doi: 10.1109/LASCAS.2018.8399972.
- [32] S. Taneja and ashwani Kush, "A survey of routing protocols in mobile ad hoc networks," *International Journal of Innovation, Management and Technology*, vol. 1, Jan. 2010.
- [33] P. Fromaget, "The Epic Story of the Raspberry Pi – RaspberryTips." <https://raspberrytips.com/raspberry-pi-history/> (accessed Jan. 27, 2022).
- [34] "Raspberry Pi 3 B+, análisis: review con características, precio y especificaciones." <https://www.xataka.com/ordenadores/raspberry-pi-3-model-b-analisis-mas-potencia-y-mejor-wifi-para-un-minipc-que-sigue-asombrando> (accessed Jan. 27, 2022).

- [35] “Buy a Raspberry Pi 3 Model B+ – Raspberry Pi.” <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-3-model-b-plus/> (accessed Jan. 27, 2022).
- [36] “RT5370,” MediaTek. <https://www.mediatek.com/es/products/broadband-wifi/rt5370> (accessed Jan. 28, 2022).
- [37] nsnam, “ns-3,” ns-3. <https://www.nsnam.org/> (accessed Jan. 28, 2022).
- [38] L. C. Rey, T. O. L. Quiñones, and W. B. García, “Protocolos de enrutamiento aplicables a redes MANET,” *Telemática*, vol. 13, no. 3, pp. 59–74, Dec. 2014, Accessed: Jan. 28, 2022. [Online]. Available: <https://revistatelematica.cujae.edu.cu/index.php/tele/article/view/170>
- [39] H. Nawaz, H. M. Ali, and S. ur R. Massan, “A Study of Mobility Models for UAV Communication Networks,” *3C Tecnología. Glosas de innovación aplicadas a la pyme*, pp. 276–297, May 2019, Accessed: Jan. 05, 2022. [Online]. Available: <http://ojs.3ciencias.com/index.php/3c-tecnologia/article/view/800>
- [40] İ. Bekmezci, O. K. Sahingoz, and Ş. Temel, “Flying Ad-Hoc Networks (FANETs): A survey,” *Ad Hoc Networks*, vol. 11, no. 3, pp. 1254–1270, May 2013, doi: 10.1016/j.adhoc.2012.12.004.
- [41] E. Yanmaz, C. Costanzo, C. Bettstetter, and W. Elmenreich, “A discrete stochastic process for coverage analysis of autonomous UAV networks,” in *2010 IEEE Globecom Workshops*, Dec. 2010, pp. 1777–1782. doi: 10.1109/GLOCOMW.2010.5700247.
- [42] I. Bekmezci, I. Sen, and E. Erkalkan, “Flying ad hoc networks (FANET) test bed implementation,” in *2015 7th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST)*, Jun. 2015, pp. 665–668. doi: 10.1109/RAST.2015.7208426.
- [43] G.-H. Kim, J.-C. Nam, I. Mahmud, and Y.-Z. Cho, “Multi-drone control and network self-recovery for flying Ad Hoc Networks,” in *2016 Eighth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN)*, Jul. 2016, pp. 148–150. doi: 10.1109/ICUFN.2016.7537004.
- [44] A. Bujari, C. E. Palazzi, and D. Ronzani, “FANET Application Scenarios and Mobility Models,” in *Proceedings of the 3rd Workshop on Micro Aerial Vehicle Networks*,

Systems, and Applications, New York, NY, USA, Jun. 2017, pp. 43–46. doi: 10.1145/3086439.3086440.

[45]G. A. Litvinov, A. V. Leonov, y D. A. Korneev, «Applying Static Mobility Model in Relaying Network Organization in Mini-UAVs Based FANET», en 2018Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO), jul. 2018, pp. 1-7. doi: 10.1109/SYNCHROINFO.2018.8456951.

[46]«Ecuador ya cuenta con un reglamento para el uso de drones – Dirección General de Aviación Civil». <https://www.aviacioncivil.gob.ec/ecuador-ya-cuenta-con-un-reglamento-para-el-uso-de-drones/> (accedido 17 de marzo de 2022).

ANEXOS.

ANEXO 1.

CÓDIGO IMPLEMENTADO PARA LA SIMULACIÓN DE LA RED FANET.

```
#include "ns3/core-module.h"
#include "ns3/point-to-point-module.h"
#include "ns3/network-module.h"
#include "ns3/applications-module.h"
#include "ns3/wifi-module.h"
#include "ns3/mobility-module.h"
#include "ns3/csma-module.h"
#include "ns3/internet-module.h"

#include "ns3/netanim-module.h"
#include "ns3/flow-monitor-helper.h"
#include "ns3/flow-monitor-module.h"
// #include "ns3/flow-monitor-module.h"
#include "ns3/dsdv-module.h"
// Default Network Topology
//
// Number of wifi or csma nodes can be increased up to 250
//
//                               |
//                               Rank 0 | Rank 1
// -----|-----
// Wifi 10.1.3.0
//                               AP
// * * * *
// | | | | 10.1.1.0
// n5 n6 n7 n0 ----- n1 n2 n3 n4
//                               point-to-point | | | |
//                               =====
//                               LAN 10.1.2.0

using namespace ns3;

NS_LOG_COMPONENT_DEFINE ("ThirdScriptExample");

int
main (int argc, char *argv[])
{
    bool verbose = true;

    uint32_t nWifi = 10;
    //double tiempo = 120, interval_start, interval_end, interval;
    double tiempo = 120;
    bool tracing = false;

    //int nodeSpeed = 20; //in m/s
    //int nodePause = 0; //in
    //std::string tr_name = "FANET";
```

```

CommandLine cmd;
cmd.AddValue ("nCsma", "Number of \"extra\" CSMA nodes/devices", nCsma);
cmd.AddValue ("nWifi", "Number of wifi STA devices", nWifi);
cmd.AddValue ("verbose", "Tell echo applications to log if true", verbose);
cmd.AddValue ("tracing", "Enable pcap tracing", tracing);

cmd.Parse (argc,argv);
std::cout <<"Simulation Time: "<<tiempo<<"s"<<std::endl;
std::cout <<"Run simulation.....wait "<<std::endl;
if (nWifi > 250)
{
    std::cout << "Too many wifi or csma nodes, no more than 250 each." << std::endl;
    return 1;
}

if (verbose)
{
    LogComponentEnable ("UdpEchoClientApplication", LOG_LEVEL_INFO);
    LogComponentEnable ("UdpEchoServerApplication", LOG_LEVEL_INFO);
}

NodeContainer wifiStaNodes;
wifiStaNodes.Create (nWifi);

//*****Configuracion de wifi*****
// setting up wifi phy and channel using helpers
WifiHelper wifi;
wifi.SetStandard (WIFI_PHY_STANDARD_80211b);
//YANS - Yet Another NETwork Simulator
YansWifiPhyHelper wifiPhy = YansWifiPhyHelper::Default ();
YansWifiChannelHelper wifiChannel;
wifiChannel.SetPropagationDelay ("ns3::ConstantSpeedPropagationDelayModel");
wifiChannel.AddPropagationLoss ("ns3::FriisPropagationLossModel");
wifiPhy.SetChannel (wifiChannel.Create ());

// Add a mac and disable rate control
WifiMacHelper wifiMac;
wifi.SetRemoteStationManager ("ns3::ConstantRateWifiManager",
                               "DataMode",StringValue ("DsssRate11Mbps"),
                               "ControlMode",StringValue ("DsssRate11Mbps"));

wifiPhy.Set ("TxPowerStart",DoubleValue (7.5));
wifiPhy.Set ("TxPowerEnd", DoubleValue (7.5));

wifiMac.SetType ("ns3::AdhocWifiMac");
NetDeviceContainer staDevices;
staDevices = wifi.Install (wifiPhy, wifiMac, wifiStaNodes);
//*****

//Mobility Model -3D
MobilityHelper mobilityAdhoc;
mobilityAdhoc.SetMobilityModel ("ns3::GaussMarkovMobilityModel",
    "Bounds", BoxValue (Box (0, 250, 0, 250, 0, 120)),
    "TimeStep", TimeValue (Seconds (0.5)),
    "Alpha", DoubleValue (1),
    "MeanVelocity", StringValue ("ns3::UniformRandomVariable[Min=8|Max=15]"),
    "MeanDirection", StringValue ("ns3::UniformRandomVariable[Min=0|Max=6.283185307]"),
    "MeanPitch", StringValue ("ns3::UniformRandomVariable[Min=0.05|Max=0.05]"),
    "NormalVelocity", StringValue ("ns3::NormalRandomVariable[Mean=0.0|Variance=0.0|Bound=0.0]"),
    "NormalDirection", StringValue ("ns3::NormalRandomVariable[Mean=0.0|Variance=0.2|Bound=0.4]"),
    "NormalPitch", StringValue ("ns3::NormalRandomVariable[Mean=0.0|Variance=0.02|Bound=0.04]"));

```

```

DsdvHelper dsdv;
Ipv4ListRoutingHelper list;
list.Add(dsdv,100);
InternetStackHelper stack;
stack.SetRoutingHelper (list); // tiene efecto en la próxima instalación ()
stack.Install (wifiStaNodes);

//*****

Ipv4AddressHelper address;

address.SetBase ("10.1.1.0", "255.255.255.0");
Ipv4InterfaceContainer wifiInterfaces;
wifiInterfaces = address.Assign (staDevices);
//address.Assign (apDevices);

UdpEchoServerHelper echoServer (9);
//=====
for(int i=1; i<=5; i++){
    //cliente envia 1024bytes al nodo x (wifiInterfaces.GetAddress (x))
    ApplicationContainer serverApps = echoServer.Install (wifiStaNodes.Get (nWifi-i));
    serverApps.Start (Seconds (0.5));
    serverApps.Stop (Seconds (tiempo-1));

    UdpEchoClientHelper echoClient (wifiInterfaces.GetAddress (nWifi-i), 9);
    echoClient.SetAttribute ("MaxPackets", UIntegerValue (0xFFFFFFFF));
    echoClient.SetAttribute ("Interval", TimeValue (Seconds (0.11)));
    echoClient.SetAttribute ("PacketSize", UIntegerValue (512));

    ApplicationContainer clientApps = echoClient.Install (wifiStaNodes.Get (0));
    clientApps.Start (Seconds (2.0));
    clientApps.Stop (Seconds (tiempo));

Simulator::Stop (Seconds (tiempo));

if (tracing == true)
{
    //pointToPoint.EnablePcapAll ("olsr");
    //phy.EnablePcap ("third", apDevices.Get (0));
    //csma.EnablePcap ("F", csmaDevices.Get (0), true);
}

// Para la animación en NetAnim
AnimationInterface anim("FanetNetanimDSDV.xml");
anim.SetMaxPktsPerTraceFile(9999999999999);

Simulator::Run ();
monitor->SerializeToXmlFile("DatosDSDV.xml", true, true);
monitor->CheckForLostPackets (); // Dirección y puerto de destino.

Simulator::Destroy ();
return 0;
}

```

ANEXO 2

COMPARATIVA DE LOS PROTOCOLOS DE ENRUTAMIENTO PROACTIVO Y REACTIVO PARA REDES MOVILES AD HOC.

	Protocolos de enrutamiento Proactivo				Protocolos de enrutamiento Reactivo		
Protocolo Características	DSDV	BATMAN	OLSR	WRP	AODV	DSR	TORA
Métrica de enrutamiento	Camino más corto	Próximo mejor salto para cada destino	Camino más corto	Camino más corto	Camino más rápido y corto	Camino más corto	Conteo de saltos
Algoritmo de enrutamiento	Vector Distancia	Estado de Enlace	Estado de Enlace	Vector Distancia	Vector Distancia	Source routing	Reversión de enlaces
Escalabilidad	No	Depende de la pérdida de paquete	No	No	No	No	No
Confiabilidad	No	Si	Si	No	Si	Si	Si
Libre de lazos	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
Plataforma de implementación	Linux Ns-3	Linux	Linux Ns-3	Linux	Linux Matlab Ns-3 Omnet++	Linux Ns-3	Implementación en hardware Ns-2.34

Tabla 4. - Comparativa entre protocolos de enrutamiento para redes Ad Hoc.

Fuente: (Autor).

ANEXO 3

ÁREA DE DESPLIEGUE DE LA RED FANET, ESCENARIO 3. LAS COORDENADAS GEOGRÁFICAS PARA LOS 4 NODOS SON LOS QUE SE MUESTRAN A CONTINUACIÓN EN LA FIGURA 27.

4°04'15.7"S 78°57'43.0"W - Nodo A

4°04'16.1"S 78°57'43.9"W - Nodo B

4°04'16.8"S 78°57'44.7"W - Nodo C

4°04'17.5"S 78°57'45.1"W - Nodo D



Figura 28. - Ubicación de los nodos para el escenario 3 – Distancia entre el Nodo A y D 75m aproximadamente.

Fuente: (Autor).

ANEXO 4.

FUNCIONAMIENTO DE LA RED FANET Y CONFIGURACIONES DE RED EN LOS NODOS (LAS CONFIGURACIONES REALIZADAS SE VIZUALIZAN EN WLAN1).

❖ Parámetros del Nodo B.

```
pi@raspberrypi: ~/Desktop/shell_scripts
18:49:55.724746 ----- LINKS
IP address hyst LQ ETX
192.168.10.5 0.000 1.000/1.000 1.000
192.168.10.7 0.000 1.000/0.940 1.063
192.168.10.6 0.000 0.776/0.831 1.549

18:49:55.724811 -----
IP address LQ NLQ SYM MPR MPRS
192.168.10.6 0.000 YES NO NO 3
192.168.10.5 0.000 YES NO NO 3
192.168.10.7 0.000 YES NO NO 3

18:49:55.724856 ----- TWO-HOP
IP addr (2-hop) IP addr (1-hop) Total cost
192.168.10.6 192.168.10.7 2.729
192.168.10.5 192.168.10.5 2.128
192.168.10.6 192.168.10.6 2.721
192.168.10.7 192.168.10.7 2.261
192.168.10.6 192.168.10.6 3.264
192.168.10.5 192.168.10.5 2.128

encender
wifi.txt

pi@raspberrypi: ~/Desktop/SoloGPServicio
* pi@raspberr...
inet6 fe80::927d:8c6a:3c23:e44a prefixlen 64 scopeid 0x20<link>
ether dc:a6:32:ae:0f:89 txqueuelen 1000 (Ethernet)
RX packets 8899 bytes 703476 (686.9 KiB)
RX errors 0 dropped 0 overruns 0 frame 0
TX packets 10456 bytes 7833355 (7.4 MiB)
TX errors 0 dropped 0 overruns 0 carrier 0 collisions 0

lo: flags=73<UP,LOOPBACK,RUNNING> mtu 65536
inet 127.0.0.1 netmask 255.0.0.0
inet6 ::1 prefixlen 128 scopeid 0x10<host>
loop txqueuelen 1000 (Local Loopback)
RX packets 532 bytes 55098 (53.8 KiB)
RX errors 0 dropped 0 overruns 0 frame 0
TX packets 532 bytes 55098 (53.8 KiB)
TX errors 0 dropped 0 overruns 0 carrier 0 collisions 0

wlan1: flags=4163<UP,BROADCAST,RUNNING,MULTICAST> mtu 1500
inet 192.168.10.3 netmask 255.255.255.0 broadcast 192.168.10.255
ether dc:a6:32:ae:0f:89 txqueuelen 1000 (Ethernet)
RX packets 19103 bytes 3489683 (3.3 MiB)
RX errors 0 dropped 0 overruns 0 frame 0
TX packets 15928 bytes 3623517 (3.4 MiB)
TX errors 0 dropped 0 overruns 0 carrier 0 collisions 0
```

Figura 29. - Configuración en WLAN1 para el nodo B.

Fuente: (Autor).

❖ Parámetros del Nodo C.

```
192.168.137.117 (raspberrypi): VNC Viewer
pi@raspberrypi: ~/Desktop/shell_scripts
00:53:47.4309 NEIGHBORS
IP address
192.168.10.6
192.168.10.3
192.168.10.5
00:53:47.4310
IP addr (2-hop)
192.168.10.6
192.168.10.3
192.168.10.3
192.168.10.5
192.168.10.6
192.168.10.3

pi@raspberrypi: ~
wlan1: flags=4163<UP,BROADCAST,RUNNING,MULTICAST> mtu 1500
inet 192.168.10.7 netmask 255.255.255.0 broadcast
5
ether b8:27:eb:ab:d0:52 txqueuelen 1000 (Ethernet)
RX packets 19244 bytes 3351706 (3.1 MiB)
RX errors 0 dropped 0 overruns 0 frame 0
TX packets 12364 bytes 3268867 (3.1 MiB)
TX errors 0 dropped 0 overruns 0 carrier 0 collisions 0

pi@raspberrypi: ~ $
```

Figura 30. - Configuración en WLAN1 para el nodo C.

Fuente: (Autor).

❖ Parámetros del Nodo D.

192.168.137.86 (raspberrypi): VNC Viewer

```

pi@raspberrypi: ~/Desktop/shell_scripts
Archivo Editar Pestañas Ayuda
pi@raspberrypi: ~
192.168.10.5 0.000 0.940/1.000 1.063
192.168.10.3 0.000 0.839/1.000 1.191
192.168.10.7 0.000 1.000/1.000 1.000
----- 01:35:55.537463 ----- NEIGHBORS
IP address LQ NLQ SYM MPR MPRS will
192.168.10.3 0.000 YES NO NO 3
192.168.10.5 0.000 YES NO NO 3
192.168.10.7 0.000 YES NO NO 3
----- 01:35:55.537634 ----- TWO-HOP NEIGHBORS
IP addr (2-hop) IP addr (1-hop) Total cost
192.168.10.3 192.168.10.5 2.346
192.168.10.3 192.168.10.7 2.000
192.168.10.5 192.168.10.7 2.453
192.168.10.5 192.168.10.3 2.469
192.168.10.7 192.168.10.5 2.419
192.168.10.7 192.168.10.3 2.191

```

(a)

192.168.137.86 (raspberrypi): VNC Viewer

```

pi@raspberrypi: ~/Desktop
Archivo Editar Pestañas Ayuda
* pi@raspberrypi: ~
lo no wireless extensions.
eth0 no wireless extensions.
wlan0 unassociated Nickname:"<WIFI@REALTEK>"
Mode:Managed Frequency=2.412 GHz Access Point: Not-Associated
Sensitivity:0/0
Retry:off RTS thr:off Fragment thr:off
Power Management:off
Link Quality:0 Signal level:0 Noise level:0
Rx invalid nwid:0 Rx invalid crypt:0 Rx invalid frag:0
Tx excessive retries:0 Invalid misc:0 Missed beacon:0
wlan1 IEEE 802.11 ESSID:"FanetAdHoc"
Mode:Ad-Hoc Frequency:2.412 GHz Cell: DA:F3:CF:98:C1:9E
Tx-Power=31 dBm
Retry short limit:7 RTS thr:off Fragment thr:off
Power Management:on
pi@raspberrypi:~/Desktop/shell_scripts $

```

Low voltage warning
Please check your power supply

(b)

```

192.168.137.86 (raspberrypi): VNC Viewer
pi@raspberrypi: ~/Desk
pi@raspberrypi: ~
Archivo Editar Pestañas Ayuda
lo: flags=73<UP,LOOPBACK,RUNNING> mtu 65536
  inet 127.0.0.1 netmask 255.0.0.0
  inet6 ::1 prefixlen 128 scopeid 0x10
  loop txqueuelen 1000 (Local Loopback)
  RX packets 187 bytes 17952 (17.5 KiB)
  RX errors 0 dropped 0 overruns 0 fr
  TX packets 187 bytes 17952 (17.5 KiB)
  TX errors 0 dropped 0 overruns 0 car
wlan1: flags=4163<UP,BROADCAST,RUNNING,MULTICAST> mtu 1500
  inet 192.168.10.6 netmask 255.255.255.252
  ether b8:27:eb:97:3f:c2 txqueuelen 1000
  RX packets 17709 bytes 3134772 (2.9 MiB)
  RX errors 0 dropped 0 overruns 0 fr
  TX packets 13480 bytes 3804408 (3.6 MiB)
  TX errors 0 dropped 0 overruns 0 car
pi@raspberrypi:~$
192.168.10.7      192.168.10.5      2.128
192.168.10.7      192.168.10.3      2.261
Drone1: Latitude=-4.07100566667
Longitude=-78.9621636667
Drone1: Latitude=-4.071031
Longitude=-78.9621153333
Drone1: Latitude=-4.07103616667
Longitude=-78.9621065
Drone1: Latitude=-4.07105483333
Longitude=-78.9620748333
Drone1: Latitude=-4.07106216667
Longitude=-78.9620593333
Drone1: Latitude=-4.07106616667
Longitude=-78.9620531667
Drone1: Latitude=-4.0710765
Longitude=-78.9620471667
Low voltage warning
Please check your power supply

```

(c)

Figura 31.- *Nodo D. (a) Funcionamiento de OLSR, (b) y (c) Configuración en WLAN1 para el nodo.*

Fuente: (Autor).