

UCUENCA

Universidad de Cuenca

Facultad de Ingeniería

Carrera de Electrónica y Telecomunicaciones

Aplicación de MANET's como Sistema de Comunicación en la Movilidad Sostenible

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones

Autores:

Nancy Maribel Eras Eras

José Andrés Otavalo Quito

Director:

Santiago Renán González Martínez

ORCID:  0000-0001-6604-889X

Cuenca, Ecuador

2023-09-15

Resumen

La movilidad sostenible es crucial en la sociedad actual, la cual busca reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y promover el uso de medios de transporte más limpios y eficientes. La bicicleta se ha vuelto esencial ya que ofrece asequibilidad, eficiencia, salud, seguridad y respeto al medio ambiente. De este modo, distintas ciudades han impulsado los [Bike Sharing Systems \(BSS\)](#) tanto desde el ámbito público como privado, implementando tecnologías que mejoran su operación y seguridad. Las [Mobile Ad-Hoc Network \(MANET\)](#) han surgido como una solución innovadora para mejorar la comunicación en la movilidad sostenible. Este trabajo de investigación propone una metodología experimental para implementar un sistema de comunicación entre bicicletas eléctricas como nodos de una [MANET](#) y la evaluación de la misma empleando los protocolos de enrutamiento proactivos [Optimized Link State Routing \(OLSR\)](#) y [Better Approach to Mobile Ad-Hoc Networking \(B.A.T.M.A.N.\)](#). La configuración de la red se establece de forma sistemática, considerando las condiciones del canal inalámbrico a 2.4 GHz, el máximo alcance de transmisión y el ancho de banda a uno y tres saltos. Además, se ofrece una solución a nivel de capa de aplicación con el fin de simular la transmisión de mensajes de texto y tráfico de audio en la red. A fin de comparar la funcionalidad del sistema de comunicación empleando cada protocolo se establecen distintos escenarios de pruebas con nodos fijos y en movimiento. En cuanto a las métricas de red evaluadas, se empleó el Delay, [Packet Reception Ratio \(PRR\)](#) y Throughput.

Palabras clave: BSS, ITS, MANET, OLSR, B.A.T.M.A.N.



El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Cuenca ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por la propiedad intelectual y los derechos de autor.

Repositorio Institucional: <https://dspace.ucuenca.edu.ec/>

Abstract

Sustainable mobility is crucial in today's society, which seeks to reduce greenhouse gas emissions and promote the use of cleaner and more efficient means of transportation. The bicycle has become essential as it offers affordability, efficiency, health, safety and environmental friendliness. Thus, different cities have promoted bicycles from both the public and private spheres, implementing technologies that improve their operation and safety. The **Mobile Ad-Hoc Network (MANET)** have emerged as an innovative solution to improve communication in sustainable mobility. This research work proposes an experimental methodology to implement a communication system between electric bicycles as nodes of a **MANET** and the evaluation of the same using the proactive routing protocols **Optimized Link State Routing (OLSR)** and **Better Approach to Mobile Ad-Hoc Networking (B.A.T.M.A.N.)**. The network configuration is set up systematically, considering the 2.4 GHz wireless channel conditions, maximum transmission range and bandwidth at one and three hops. In addition, an application layer solution is provided in order to simulate the transmission of text messages and audio traffic in the network. In order to compare the functionality of the communication system using each protocol, different test scenarios with fixed and moving nodes are established. In terms of the network metrics evaluated, the Delay, **Packet Reception Ratio (PRR)** and Throughput were used.

Keywords: BSS, ITS, MANET, OLSR, B.A.T.M.A.N.



The content of this work corresponds to the right of expression of the authors and does not compromise the institutional thinking of the University of Cuenca, nor does it release its responsibility before third parties. The authors assume responsibility for the intellectual property and copyrights.

Institutional Repository: <https://dspace.ucuenca.edu.ec/>

Índice de contenidos

1. Introducción	18
1.1. Definición del problema	18
1.2. Justificación	18
1.3. Alcance de la propuesta	19
1.4. Objetivos generales y específicos	19
1.4.1. Objetivo general	19
1.4.2. Objetivos específicos	19
1.5. Estructura del documento y contribuciones	20
2. Fundamentos Teóricos	21
2.1. Movilidad sostenible – Bike Sharing Systems (BSS)	22
2.1.1. Movilidad sostenible	22
2.1.2. Bike Sharing Systems (BSS)	22
2.1.3. Movilidad y BSS en la ciudad de Cuenca	23
2.2. Intelligent Transport Systems (ITS)	23
2.2.1. Arquitectura ITS	23
2.2.1.1. Arquitectura en Estados Unidos	23
2.2.1.2. Arquitectura Europea	24
2.3. Redes Ad-Hoc	25
2.3.1. Tipos de redes inalámbricas Ad-Hoc	26
2.3.2. Ventajas de las redes Ad-Hoc	27
2.3.3. Aplicaciones de las redes Ad-Hoc	27
2.3.3.1. Aplicaciones militares	28
2.3.3.2. Operaciones de emergencia	28
2.3.3.3. Computación colaborativa y distribuida	28
2.3.3.4. Aplicaciones para el hogar, la oficina y la educación	29
2.4. Mobile Ad-Hoc Network (MANET)	29
2.4.1. Características de las MANETs	29
2.4.2. Ventajas de las MANETs	30
2.4.3. Desventajas de las MANETs	30
2.4.4. Tipos de MANETs	31
2.5. Enrutamiento en MANETs	31
2.5.1. Protocolos de enrutamiento Proactivos	31

2.5.2. Protocolos de enrutamiento Reactivos	33
2.5.3. Protocolos de enrutamiento Híbridos	33
2.5.4. Optimized Link State Routing (OLSR)	33
2.5.4.1. Componentes del paquete OLSR	34
2.5.5. Better Approach to Mobile Ad-Hoc Networking (B.A.T.M.A.N.)	36
2.5.5.1. Campos del mensaje HNA	38
2.6. Tráfico multimedia - Audio	39
2.6.1. Categorías de tráfico	40
2.6.1.1. Constant Bit Rate (CBR)	40
2.6.1.2. Variable Bit Rate (VBR)	40
2.6.1.3. Undefined Bit Rate (UBR)	40
2.6.1.4. Available Bit Rate (ABR)	40
2.6.2. Parámetros de tráfico	41
2.6.3. Tráfico de audio	41
2.6.3.1. Codecs de audio	42
2.6.3.2. Protocolos para la transmisión de audio	44
2.6.3.3. Características del tráfico de audio	45
2.6.4. Tráfico de datos	45
2.6.5. Delay	46
2.6.6. Throughput	47
2.6.7. Packet Reception Ratio (PRR)	47
2.7. Hardware y Software	47
2.7.1. Rapsberry Pi	48
2.7.2. Sistema operativo	48
2.7.3. Herramientas para análisis de red	49
2.8. Conclusiones	50
3. Estado del Arte	52
3.1. Soluciones de movilidad basada en BSS	52
3.2. Comparación de los protocolos de enrutamiento OLSR y B.A.T.M.A.N.	53
3.3. Conclusiones	57
4. Metodología	58
4.1. Descripción de la arquitectura	58
4.2. Capa física	59

4.2.1. Componentes del nodo	60
4.2.2. Acoplamiento del nodo	61
4.3. Capa de red	62
4.3.1. Instalación y configuración de los protocolos de enrutamiento	62
4.3.2. Elección del escenario para realizar los experimentos	63
4.3.2.1. Primer escenario	64
4.3.2.2. Segundo escenario	65
4.3.3. Selección de parámetros para realizar los experimentos	65
4.3.3.1. Selección del canal a utilizar en la red Ad-Hoc	66
4.3.3.2. Determinación del máximo bitrate de las tarjetas inalámbricas	66
4.3.3.3. Determinación del máximo alcance	67
4.4. Capa de aplicación	68
4.4.1. Sincronización de nodos	68
4.4.2. Determinación del bitrate en el canal	69
4.4.2.1. Perfil de tráfico de audio	69
4.4.3. Prueba de capacidad del canal	69
4.4.4. Determinación de los parámetros de audio	71
4.4.5. Selección de escenarios para pruebas de la red MANET con la aplica- ción web móvil	72
4.4.5.1. Primer escenario	73
4.4.5.2. Segundo escenario	73
4.4.6. Desarrollo de la aplicación web móvil	74
4.4.6.1. Estructura de la aplicación web móvil	75
4.5. Conclusiones	79
5. Resultados	80
5.1. Condiciones del canal inalámbrico	80
5.2. Rendimiento de los protocolos	82
5.2.1. Distancia de transmisión	83
5.2.2. bitrate del canal	87
5.2.2.1. Perfil de tráfico	87
5.2.2.2. Máximo bitrate del canal	91
5.2.3. Resultados de capacidad del canal a múltiples saltos	94
5.2.4. Parámetros para cada escenario con la aplicación web móvil	97
5.2.5. Delay	99

5.2.5.1. Primer escenario	100
5.2.5.2. Segundo escenario	101
5.2.6. Packet Reception Ratio (PRR)	102
5.2.6.1. Primer escenario	102
5.2.6.2. Segundo escenario	102
5.2.7. Throughput	103
5.2.7.1. Primer escenario	103
5.2.7.2. Segundo escenario	104
5.3. Consumo energético	106
5.3.1. Primer escenario	106
5.3.1.1. Segundo escenario	107
5.4. Conclusiones	108
6. Conclusiones y Recomendaciones	111
6.1. Conclusiones	111
6.2. Recomendaciones	112
6.3. Trabajos futuros	112
Referencias	114

Índice de figuras

2.1. Arquitectura ITS en Estados Unidos.	24
2.2. Arquitectura ITS Europea	25
2.3. Tipos de MANETs	32
2.4. Clasificación de enrutamiento MANET	32
2.5. Encapsulación de datos en OLSR	34
2.6. Formato de un paquete OLSR	34
2.7. Diagrama de la heurística para calcular el Multipoint Relays (MPR)	37
2.8. Campos de un mensaje OGM	38
2.9. Campos de un mensaje HNA	38
2.10. Diagrama de bloques para la codificación y envío de flujos de voz	42
2.11. Curva de los efectos del delay absoluto	46
2.12. Raspberry Pi modelo 3B+	48
4.1. Arquitectura del sistema de movilidad propuesto	60
4.2. Dispositivos empleados en el nodo Ad-Hoc	61
4.3. Diagrama de conexión del sensor INA219	62
4.4. Distribución del Campus Balzay	64
4.5. Escenario 1 Campus Balzay	65
4.6. Escenario 2 Campus Balzay	65
4.7. Diagrama de los nodos en multi-salto	71
4.8. Primer escenario para pruebas de la red y aplicación	73
4.9. Segundo escenario para pruebas de la red y aplicación	74
4.10. Ventana de inicio para la administración de los nodos	76
4.11. Ventana de control de nodo con diferentes opciones	76
4.12. Ventana para comunicación unidireccional modo Tx	77
4.13. Ventana para comunicación unidireccional modo Rx	77
4.14. Ventana para comunicación bidireccional	78
4.15. Códigos acrshortqr para la red Wi-Fi y aplicación web móvil	78
5.1. Mapa de calor de los canales contra la distancia para el escenario 1 Campus Balzay.	81
5.2. Mapa de calor de los canales contra la distancia para el escenario 2 Campus Balzay.	82
5.3. Gráfica de PRR para el Escenario 1 Campus Balzay	84

5.4. Gráfica de PRR para el Escenario 1 Ideal Campus Balzay	85
5.5. Gráfica de PRR para el Escenario 2 Campus Balzay	86
5.6. Gráfica del perfil de tráfico para 1 s en el nodo 1	88
5.7. Gráfica del perfil de tráfico para 1 s en el nodo 2	88
5.8. Gráfica del perfil de tráfico para 0.1 s en el nodo 1	89
5.9. Gráfica del perfil de tráfico para 0.1 s en el nodo 2	90
5.10. Gráfica del perfil de tráfico para 0.01 s en el nodo 1	90
5.11. Gráfica del perfil de tráfico para 0.01 s en el nodo 2	91
5.12. Gráfica del comportamiento del bitrate para el escenario 1 con interrupciones . .	92
5.13. Gráfica del comportamiento del bitrate para el escenario 1 ideal	93
5.14. Gráfica del comportamiento del bitrate para el escenario 2	94
5.15. Comportamiento del canal con múltiples saltos OLSR	95
5.16. Comportamiento del canal con múltiples saltos B.A.T.M.A.N.	96
5.17. Comportamiento del bitrate según el número de saltos	97
5.18. Bicicletas con los nodos acoplados	98
5.19. Distribución de las bicicletas en el escenario 1	98
5.20. Distribución de las bicicletas en el escenario 2	99
5.21. Gráfica de Delay en el escenario 1	100
5.22. Gráfica de Delay en el escenario 2	101
5.23. Gráfica de PRR en el escenario 1	102
5.24. Gráfica de PRR en el escenario 2	103
5.25. Gráfica de Throughput en el escenario 1	104
5.26. Gráfica de Throughput en el Escenario 1	105
5.27. Gráfica del consumo de corriente en el escenario 1	107
5.28. Gráfica del consumo de corriente en el escenario 1	108

Índice de tablas

3.1. Resumen de Resultados de algunos Trabajos.	57
4.1. Parámetros por defecto de los protocolos OLSR y B.A.T.M.A.N.	63
4.2. IPs utilizadas en los nodos para el protocolo B.A.T.M.A.N.	63
4.3. IPs utilizadas en los nodos para el protocolo OLSR	63
4.4. Parámetros para Iperf3	68
4.5. Filtros MAC para aceptar o rechazar la comunicación en cada nodo	70
5.1. Resumen de máximas distancia para el protocolo OLSR y B.A.T.M.A.N..	87
5.2. Resumen de la distancia intermedia para el protocolo OLSR y B.A.T.M.A.N.. . .	92
5.3. Parámetros generales para la transmisión y recepción de audio.	97
5.4. Intervalos de tiempo configurados en OLSR y B.A.T.M.A.N.	99
5.5. Cálculo de la energía en cada nodo	108

Índice de abreviaturas y acrónimos

AAC Advanced Audio Coding. [43](#), [87](#), [97](#)

ABR Available Bit Rate. [5](#), [40](#)

ADTS Audio Data Transport Stream. [72](#), [97](#)

AODV On Demand Distance Vector. [33](#)

API Application Programming Interface. [75](#)

ARCOTEL Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones. [66](#), [79](#)

B.A.T.M.A.N. Better Approach to Mobile Ad-Hoc Networking. [2](#), [3](#), [5](#), [9](#), [10](#), [19–21](#), [33](#), [36–38](#), [53–59](#), [62](#), [63](#), [70](#), [75](#), [80](#), [83](#), [85–93](#), [95](#), [96](#), [99–112](#), [129](#), [130](#)

BSS Bike Sharing Systems. [2](#), [4](#), [5](#), [18](#), [21–23](#), [50](#), [52](#), [53](#), [57](#)

CBR Constant Bit Rate. [5](#), [40](#), [41](#)

CBS Capital Bikeshare System. [53](#)

CO2 Carbon Dioxide. [52](#), [53](#)

CPU Central Processing Unit. [30](#)

CSS Cascading Style Sheets. [75](#)

DHCP Dynamic Host Configuration Protocol. [74](#), [130](#), [133](#)

DSDV Destination-Sequenced Distance-Vector Routing. [33](#)

DSR Dynamic Source Routing Protocol. [33](#)

ELP Echo Location Protocol. [99](#), [110](#)

ETSI European Telecommunication Standards Institute. [24](#)

FANET Flying Ad-Hoc Network. [31](#)

FFMPEG Fast Forward Moving Picture Experts Group. [49](#)

FLAC Free Lossless Audio Codec. [43](#)

GPIO General-purpose input/output. [48](#), [60](#), [62](#), [121](#), [122](#)

HDMI High-Definition Multimedia Interface. [48](#), [121](#)

HNA Host and Network Association. [5](#), [8](#), [35](#), [38](#)

HTML5 HyperText Markup Language 5. [75](#)

HTTPS Hypertext Transfer Protocol Secure. [74](#)

HZBike Hangzhou public bicycle. [52](#)

I2C Inter-Integrated Circuit. [62](#), [124](#), [125](#)

IANA Internet Assigned Numbers Authority. [37](#)

IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers. [59](#), [60](#), [79](#), [122](#)

IETF Internet Engineering Task Force. [29](#)

IMANET Internet Based Mobile Ad-Hoc Networks. [31](#)

INVANET Intelligent Vehicular Ad-Hoc Networks. [31](#)

IoT Internet of Things. [48](#), [56](#)

IP Internet Protocol. [10](#), [26](#), [31](#), [34](#), [37](#), [44](#), [47](#), [49](#), [58](#), [62](#), [63](#), [67](#), [70](#), [74](#), [133](#)

IPv4 Internet Protocol version 4. [34](#), [38](#)

IPv6 Internet Protocol version 6. [34](#)

ITS Intelligent Transport Systems. [4](#), [8](#), [18](#), [21](#), [23–25](#), [50](#)

ITU International Telecommunication Union. [41](#), [46](#), [101](#), [102](#), [109](#)

ITU-T International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector. [46](#), [47](#)

JSON JavaScript Object Notation. [67](#)

LXDE Lightweight X11 Desktop Environment. [49](#)

MAC Media Access Control. [10](#), [62](#), [63](#), [69](#), [70](#), [73](#), [94](#)

MANET Mobile Ad-Hoc Network. [2–4](#), [6](#), [8](#), [19–21](#), [27](#), [29–32](#), [35](#), [37](#), [50](#), [52](#), [58](#), [72](#), [73](#), [79](#), [110](#), [111](#)

MDCT Modified Discrete Cosine Transform. [43](#)

- MID** Multiple Interface Declaration. [35](#)
- MIPI** Mobile Industry Processor Interface. [48](#)
- MP3** MPEG Audio Layer-3. [43](#)
- MPEG** Moving Pictures Enhanced Group. [43](#)
- MPEGTS** Moving Pictures Enhanced Group Transport Stream. [72](#)
- MPR** Multipoint Relays. [8](#), [34–37](#)
- MUSICAM** Masking-pattern Adapted Universal Sub band Integrated Coding and Multiplexing. [43](#)
- NTP** Network Time Protocol. [58](#), [68](#), [103](#), [106](#), [132](#)
- OBU** On-Board Unit. [25](#)
- OGM** Originator Message. [8](#), [37](#), [38](#), [56](#), [99](#), [110](#)
- OLSR** Optimized Link State Routing. [2](#), [3](#), [5](#), [8–10](#), [19–21](#), [33–35](#), [53–59](#), [62](#), [63](#), [70](#), [75](#), [80](#), [83–95](#), [99–112](#), [129](#), [130](#)
- OS** Operating System. [20](#), [21](#), [48](#), [127](#)
- PCM** Pulse Code Modulation. [42](#), [43](#)
- PDA** Personal Digital Assistant. [29](#)
- PDR** Packet Delivery Ratio. [55](#)
- PRR** Packet Reception Ratio. [2](#), [3](#), [5](#), [7–9](#), [19](#), [20](#), [47](#), [59](#), [72](#), [80](#), [84–86](#), [102](#), [103](#), [109](#), [111](#), [112](#)
- QoE** Quality of Experience. [47](#)
- QR** QR Code. [78](#), [97](#)
- RTP** Real-time Transport Protocol. [44](#)
- RTS/CTS** Request to send/Clear to send. [94](#), [109](#)
- SBC** Single Board Computer. [19](#), [21](#), [48](#), [58](#), [61](#), [74](#), [79](#), [80](#), [112](#)
- SD** Secure Digital. [48](#), [121](#), [127](#)

SDU Service Data Unit. [40](#)

SMBus System Management Bus. [124](#)

SSH secure Shell. [103](#)

TC Topology Control. [35](#), [99](#)

TCP Transmission Control Protocol. [31](#), [44](#), [50](#), [54](#)

TORA Temporally-Ordered Routing Algorithm. [33](#)

TTL Time to live. [35](#), [37](#), [38](#)

UBR Undefined Bit Rate. [5](#), [40](#), [41](#)

UDP User Datagram Protocol. [31](#), [37](#), [44](#), [50](#), [54](#), [67](#), [97](#), [103](#)

USB Universal Serial Bus. [48](#), [60](#), [61](#), [108](#), [122](#), [123](#)

VANET Vehicular Ad-Hoc Network. [31](#)

VBR Variable Bit Rate. [5](#), [40](#)

VoIP Voice Over Internet Protocol. [44](#), [47](#)

WAV Waveform Audio Format. [42](#)

WLAN Wireless Local Area Network. [29](#), [63](#), [74](#), [133](#), [134](#)

WMN Wireless Mesh Networks. [26](#)

WSN Wireless Sensor Networks. [27](#)

ZHLS Zone-Based Hierarchical Link State. [33](#)

ZRP Zone Routing Protocol. [33](#)

Agradecimientos

Deseamos expresar nuestro sincero agradecimiento a nuestras familias y amigos por su constante apoyo a lo largo de nuestra trayectoria universitaria y durante el desarrollo de este trabajo de titulación.

A todos los profesores que han contribuido en nuestra formación académica, en especial al Dr. Santiago González, nuestro director de tesis, quien ha desempeñado un papel fundamental en el desarrollo de este proyecto.

Nos gustaría extender nuestro agradecimiento al laboratorio de la Micro-Red de la Universidad de Cuenca, por su invaluable apoyo durante la realización de este trabajo. Además, queremos expresar nuestra gratitud al Sr. Pablo Delgado y al Dr. Danny Ochoa por su confianza y por brindarnos acceso a las instalaciones del laboratorio, lo cual ha sido fundamental para llevar a cabo nuestro trabajo de investigación.

Los Autores

Dedicatoria

A Dios por darme la vida y la fuerza necesaria para superar los desafíos en todos los aspectos de mi vida, especialmente en mis estudios y en la consecución de esta meta.

Quiero dedicar este logro a mi madre, Merci, quien ha sido mi mayor inspiración y mi motor para seguir adelante. Le debo todo lo que soy y su amor incondicional ha sido mi mayor motivación.

A mi familia, los pilares fundamentales que me han brindado su apoyo incondicional a lo largo de este camino. A mi abuelita Mercedes aunque ya no esté físicamente, su amor y sabiduría siguen siendo una guía en mi vida. A mi abuelito José.

A mis queridos tíos y tías Mercedes, Wilson, Miguel y Gladis por su apoyo. A mi prima María Augusta, quien ha sido mi hermana por su comprensión y cariño sincero.

Por último, a mis amigos, quienes han estado a mi lado en cada paso del camino. Sus palabras de aliento, su apoyo incondicional y su presencia en los momentos buenos y difíciles han sido un regalo inmenso.

Nancy Maribel Eras Eras

Dedicatoria

A mis seres queridos, por su apoyo no solo durante la realización de este trabajo de tesis, mismo que ha sido el resultado de meses de arduo esfuerzo, dedicación y perseverancia, y que no habría sido posible sin el apoyo incondicional de cada uno de ustedes.

A mi madre Ana María y hermanas Vane y Gaby, quienes han sido mi mayor fuente de inspiración. Su amor y apoyo incondicional me han dado la fuerza necesaria para superar los obstáculos y alcanzar mis metas.

A mi pareja Ana Belén, por su paciencia y comprensión durante todas las largas horas que he dedicado a este proyecto.

A mis profesores, por su guía experta y sabia orientación a lo largo de este proyecto. Agradezco su paciencia y su disposición para responder a mis preguntas y dudas, y por compartir su conocimiento y experiencia.

A todos aquellos que han formado parte de mi vida y han contribuido de alguna manera a mi desarrollo académico y personal, les dedico este trabajo. Vuestra confianza y apoyo han sido fundamentales para mi crecimiento y éxito.

José Andrés Otavalo Quito

Introducción

1.1. Definición del problema

La bicicleta es un medio de transporte esencial para la implementación de sistemas de movilidad sostenibles. Este medio brinda al usuario la posibilidad de viajar de forma: asequible, eficiente, saludable, segura y respetuosa con el medio ambiente [1]. De modo que en varias ciudades se han implementado los Bike Sharing Systems (BSS), como el caso de la "Bici Pública Cuenca". Aunque se ha fomentado el uso de este medio de transporte en general las ciclovías no se encuentran entrelazadas y hay tramos compartidos con vehículos, existe el irrespeto por parte de conductores y peatones al espacio designado para ciclistas y de forma similar las estaciones se encuentran mal ubicadas y no están distribuidas en toda el área urbana. En este sentido, la congestión de tráfico, accidentes de tránsito y la contaminación ambiental y auditiva [2] son los principales problemas que experimentan los usuarios de este medio.

1.2. Justificación

Actualmente se han desarrollado soluciones que se apoyan en las Tecnologías de la Información y Comunicación para mejorar la operación y la seguridad de los BSS. No obstante, en la ciudad de Cuenca no se ha implementado un sistema capaz de informar acerca del estado vial para evitar los sectores con congestión vehicular y accidentes de tránsito u ofrecer la posibilidad de comunicarse exclusivamente entre los usuarios de los BSS. En este contexto, este trabajo de titulación se enfoca en implementar un sistema espontáneo de comunicación directa entre dispositivos instalados en bicicletas eléctricas. Con lo cual, el usuario podrá hacer uso de una aplicación móvil que le permitirá enviar y recibir mensajes de voz de otros ciclistas y además recibir mensajes de texto referentes a sectores con congestión y accidentes de tráfico. Mediante este sistema de comunicación para los usuarios de BSS se pretende cumplir con los objetivos de movilidad, transporte sostenible y comodidad en los que se basan los Intelligent Transport Systems (ITS) dentro del marco de la movilidad sostenible. Los resultados alcanzados son de gran utilidad para la mejora de los BSS fomentando el uso de la bicicleta como un medio de transporte de forma segura y eficiente.

1.3. Alcance de la propuesta

En este trabajo de titulación se propone implementar un sistema de comunicación basado en Mobile Ad-Hoc Network (MANET) de al menos cuatro nodos para medios de transporte sostenibles. En este contexto, contamos con el valioso respaldo del Laboratorio de la Micro-Red Eléctrica de la Universidad de Cuenca, quienes nos facilitan el uso de bicicletas eléctricas. Cada nodo de la MANET corresponde a una bicicleta con una plataforma Single Board Computer (SBC) y la conexión con el smartphone del usuario. En la capa de comunicación se habilita el intercambio de paquetes por medio de los protocolos de enrutamiento proactivos Optimized Link State Routing (OLSR) y Better Approach to Mobile Ad-Hoc Networking (B.A.T.M.A.N.). Además, la conexión de la plataforma SBC con el dispositivo móvil se realiza a través de una aplicación mediante una red IEEE 802.11 (Wi-Fi). Los protocolos de enrutamiento se evalúan y comparan bajo condiciones de movilidad y tráfico de usuario (mensajes de texto y audio). Dicha comparación se realiza tanto en relación a la funcionalidad como a la configuración de los parámetros requeridos para cada protocolo. En cuanto a la aplicación móvil, esta permite al usuario enviar/recibir mensajes de audio y texto entre otros usuarios. Para la evaluación del sistema se consideraron las siguientes métricas de red: Delay, Throughput y Packet Reception Ratio (PRR).

1.4. Objetivos generales y específicos

1.4.1. Objetivo general

- Implementar un sistema de comunicación basado en redes MANET para medios de traslado sostenibles.

1.4.2. Objetivos específicos

- Implementar nodos con capacidad de comunicación Ad-Hoc sobre medios de traslado sostenibles en concreto sobre bicicletas.
- Configurar una red MANET empleando mecanismos de enrutamiento proactivos.
- Comparar la funcionalidad de los protocolos proactivos.
- Implementar una solución a nivel de capa de aplicación para la transmisión de datos entre los nodos (mensajes informativos y tráfico de audio).

1.5. Estructura del documento y contribuciones

Este documento se compone de seis capítulos. El Capítulo 2 proporciona una base teórica que respalda los conceptos y tecnologías clave utilizados en la implementación. El Capítulo 3, examina la literatura existente sobre problemas similares y las soluciones propuestas, extrayendo información de revistas especializadas para asegurar la relevancia y actualidad de los trabajos relacionados.

En el Capítulo 4 se expone la arquitectura del sistema, donde se describen los componentes utilizados en la implementación de los nodos, el diseño físico adaptado para integrarse en bicicletas y los elementos de comunicación empleados para la transmisión de datos. También se presenta el desarrollo de la aplicación destinada a la comunicación entre usuarios.

Las pruebas realizadas y los resultados obtenidos se detallan en el Capítulo 5, incluyendo métricas como el Delay, el PRR y el Throughput. En el Capítulo 6 se presentan las conclusiones principales derivadas del desarrollo de este proyecto de tesis en relación con los objetivos planteados inicialmente. Por último en los apéndices se describen las instalaciones y configuraciones del (Operating System (OS)) y los protocolos.

En base a esto, las principales contribuciones de este trabajo de titulación son:

- Evaluación y comparación de dos protocolos proactivos de enrutamiento como son OLSR y B.A.T.M.A.N. para una red MANET.
- Desarrollo de un sistema de comunicación para el envío de datos en una red Ad-Hoc.
- Desarrollo de una aplicación web móvil intuitiva para los usuarios que permitirá una comunicación en tiempo real.

Fundamentos Teóricos

En este capítulo se exponen los principales conceptos relacionados con el trabajo de titulación. Se discutirán temas relacionados con tecnologías recientes aplicadas en ciudades en el ámbito de la movilidad. De esta forma, en la Sección 2.1 se presentan los conceptos fundamentales sobre la movilidad sostenible, con un énfasis en los Bike Sharing Systems (BSS) y su importancia en la movilidad dentro de la ciudad.

Dentro de la movilidad sostenible se encuentran un conjunto de tecnologías y sistemas denominados Intelligent Transport Systems (ITS), que buscan mejorar la seguridad, eficiencia y sostenibilidad en el transporte. Estos ITS se basan en el uso de sistemas de comunicación, sensores y tecnologías de información para optimizar el manejo del tráfico, mejorar la planificación del transporte y proporcionar información en tiempo real a los usuarios del transporte. En la Sección 2.2, se describen los conceptos relacionados con ITS y su arquitectura.

Para el desarrollo del trabajo es necesario describir la estructura de la capa de comunicación, para esto, en la Sección 2.3 se presenta una revisión del concepto, características, tipos, ventajas, desventajas y campos de aplicación de las redes Ad-Hoc. Por otra parte, la Sección 2.4 se centra en las redes Mobile Ad-Hoc Network (MANET), un tipo específico de redes Ad-Hoc dinámicas diseñadas para dispositivos móviles. El enrutamiento es clave en estas redes debido a su topología cambiante, y por tanto se abordan aspectos tales como la elección de la mejor ruta, selección y actualización del estado de las mismas, además de las características, ventajas, desventajas y principales aplicaciones.

Los protocolos de enrutamiento Optimized Link State Routing (OLSR) y Better Approach to Mobile Ad-Hoc Networking (B.A.T.M.A.N.) que se implementan en el desarrollo del trabajo de titulación se definen en la Sección 2.5.

La evaluación de la red se lleva a cabo mediante el análisis del tráfico de audio y texto, por lo que las condiciones de la red son fundamentales para establecer los parámetros mínimos del tráfico multimedia. En la Sección 2.6, se presenta el concepto de tráfico multimedia, las categorías y los parámetros necesarios. Además, se describen los diferentes codecs utilizados para la codificación de la información, así como los protocolos de transmisión y sus características para el tráfico de audio. Por último, se incluye una breve descripción de las métricas de red que se evaluarán en los resultados.

Por último, en la Sección 2.7, se brindará una breve descripción de la plataforma Single Board Computer (SBC) junto con el (OS) utilizado. Además, se detallan las herramientas que serán

empleadas para el análisis de la red.

2.1. Movilidad sostenible – Bike Sharing Systems (BSS)

El incremento de la densidad poblacional y la expansión de la urbanización en las ciudades conlleva grandes desafíos en cuanto a la movilidad y al uso de infraestructuras existentes, que se han vuelto insuficientes. Se deben buscar nuevas formas y conceptos para un uso eficiente de estas infraestructuras, es aquí donde la movilidad sostenible y los sistemas BSS son una solución.

2.1.1. Movilidad sostenible

La movilidad sostenible está vinculada al concepto de ciudades inteligentes ya que incorpora nuevas tecnologías para brindar alternativas de soluciones ambientales, impulsar el crecimiento económico sostenible y mejorar la prestación de servicios. Además, la infraestructura y servicios presentes en las ciudades y países son vitales para garantizar no solo la movilidad, sino también la conectividad.

La movilidad sostenible comprende las siguientes características:

- Eficiencia del transporte.
- Transporte asequible y accesible para las personas y la sociedad.
- Transporte seguro.
- Seguridad en el transporte.
- Transporte y medio ambiente.

2.1.2. Bike Sharing Systems (BSS)

Los BSS son una alternativa económica tanto para las ciudades como para los usuarios, y un servicio sostenible y respetuoso con el medio ambiente que fortalece la modernidad y la identidad de una ciudad. Las bicicletas son un medio de transporte eficiente que requiere poco en términos de infraestructura, lo que significa que se requiere una inversión relativamente baja para crear o mejorar la misma [3].

2.1.3. Movilidad y BSS en la ciudad de Cuenca

En el caso de la ciudad de Cuenca, el plan de movilidad fue desarrollado en el año 2015 [4]. Este plan integra el transporte público, la electromovilidad, la movilidad compartida e intermodalidad. La prioridad es la movilidad activa (caminar y andar en bicicleta), y también se busca reducir las emisiones de gases de efecto invernadero para impactar positivamente en la sostenibilidad económica, social y ambiental.

2.2. Intelligent Transport Systems (ITS)

Las innovaciones en la sociedad y la industria automotriz han llevado al desarrollo de los sistemas ITS, impulsando esta transformación.

Los ITS incluyen tecnologías de última generación, inalámbricas, electrónicas y automatizadas, con el objetivo de mejorar la seguridad, eficiencia y comodidad del transporte [5]. La integración de estas tecnologías permite optimizar y mejorar de forma integral la movilidad urbana, brindando mayor seguridad e información a los conductores, así como entretenimiento y comodidad a los pasajeros.

En relación al procesamiento de la información obtenida de los sensores y equipos instalados, los ITS pueden utilizar esta información para optimizar la gestión de los recursos del sistema de transporte [6]. También se centran en mejorar la comodidad de las personas mediante la oferta de servicios de información y alerta.

2.2.1. Arquitectura ITS

La arquitectura ITS proporciona un marco general para planificar, diseñar e implementar un sistema integrado en una área geográfica y período determinado. Debido a la gran diversidad de factores es necesario la estandarización de la arquitectura para definir un método general donde los dispositivos y componentes puedan interactuar de forma efectiva. Entre las diferentes arquitecturas existentes, se destacan las adoptadas en Estados Unidos y en Europa.

2.2.1.1. Arquitectura en Estados Unidos

La arquitectura utilizada en los Estados Unidos fue desarrollada por el Departamento de Transporte [6]. Su diseño se enfoca en mejorar la movilidad urbana mediante un sistema cooperati-

vo, formado por un conjunto de componentes interconectados y organizados en cuatro vistas, como se muestra en la Figura 2.1.

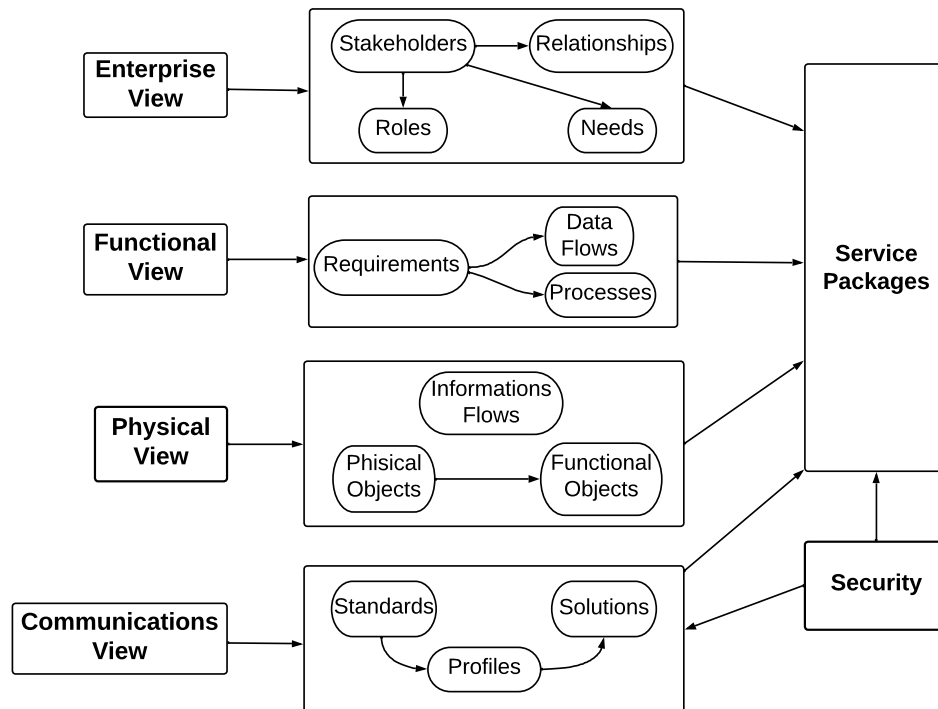


Figura 2.1: Arquitectura ITS en Estados Unidos. Fuente: [6].

- Vista empresarial: es la relación entre usuarios y organizaciones, y establece las reglas que deben seguir estas organizaciones dentro del entorno ITS cooperativo.
- Vista Funcional: se enfoca en el funcionamiento de los componentes abstractos y sus interacciones lógicas. Ofrece una estructura de presentación de interacciones y funciones que cumplen con los requisitos específicos.
- Vista Física: describe los componentes físicos, como dispositivos y sistemas. Proporciona la funcionalidad de los ITS y contiene los roles de los componentes involucrados en el servicio al usuario, sus capacidades y las conexiones entre ellos.
- Vista de Comunicación: describe cómo se comunican los componentes físicos y define los protocolos de comunicación para garantizar la interoperabilidad entre ellos.

2.2.1.2. Arquitectura Europea

La Arquitectura ITS para Europa fue desarrollada por el European Telecommunication Standards Institute (ETSI) y consta de cuatro subsistemas, como se muestra en la Figura 2.2.

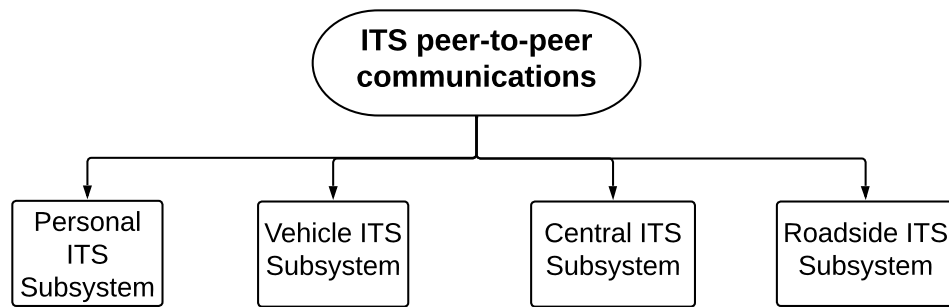


Figura 2.2: Arquitectura ITS Europea. Fuente: [6]

- Personal: permite a los usuarios acceder a los servicios ITS a través de dispositivos móviles.
- Vehículo: se refiere a los dispositivos integrados en un vehículo, como la On-Board Unit (OBU), que alojan aplicaciones que reciben y envían información sobre el vehículo y su entorno.
- Central: se refiere a un dispositivo central que administra, supervisa y ofrece servicios ITS a los usuarios.
- Carretera: representa los dispositivos instalados que recopilan información sobre el flujo de vehículos y las condiciones de la carretera, también controlan los equipos de la carretera y establecen la comunicación entre los vehículos para permitir el intercambio de información entre ellos.

2.3. Redes Ad-Hoc

El desarrollo de las comunicaciones inalámbricas ha permitido que las investigaciones en este campo se centren en mejorar su funcionamiento y garantizar un acceso rápido a la información sin importar el lugar o el momento. El objetivo principal es establecer comunicaciones personalizadas y especializadas para situaciones imprevistas en áreas donde no existe una infraestructura preexistente o donde esta ha fallado o no es adecuada para las necesidades actuales [7].

Se define a las redes Ad-Hoc como redes inalámbricas descentralizadas, autoorganizadas y capaces de formar una red de comunicación sin depender de una infraestructura fija previa, como los enrutadores en redes cableadas o puntos de acceso en redes inalámbricas. Los dispositivos que componen la red son conocidos como nodos, y las rutas de comunicación se seleccionan mediante un protocolo de enrutamiento. Cada nodo participa en el enrutamiento

reenviando datos a otros nodos, y la elección de qué nodo reenviará datos se realiza de manera dinámica en función de la conectividad de la red.

A continuación, se destacan las principales características de una red tipo Ad-Hoc:

- **Movilidad:** Los nodos pueden moverse libremente y rápidamente, lo que tiene un impacto importante en la selección del esquema de enrutamiento y puede afectar el rendimiento de la red.
- **Multisalto:** En una red Ad-Hoc, la ruta de origen a destino pasa por varios nodos, con frecuencia haciendo varios saltos para evadir obstáculos, reutilizar el espectro y ahorrar energía.
- **Autoorganización:** La red Ad-Hoc determina de forma automática sus propios parámetros de configuración, incluyendo direccionamiento, enrutamiento, agrupación, identificación de posición, control de potencia, etc. Algunos nodos especiales pueden coordinar su movimiento dinámicamente.
- **Conservación de energía:** Es crucial para la autonomía de las redes Ad-Hoc tener protocolos eficientes en energía, ya que la mayoría de los nodos tienen un suministro limitado y no cuentan con la capacidad de generar su propia energía.
- **Escalabilidad:** La movilidad y la escalabilidad son unos de los mayores desafíos en el diseño Ad-Hoc, que no toleran el Internet Protocol (IP) móvil o una estructura jerárquica fija.
- **Seguridad:** Las redes Ad-Hoc son aún más vulnerables debido a la complejidad de los protocolos, donde los ataques activos son más difíciles de detectar que en las redes de infraestructura.

2.3.1. Tipos de redes inalámbricas Ad-Hoc

Existen varios tipos de redes inalámbricas basados en redes Ad-Hoc, según se describe en [8, 9] a continuación:

- **Wireless Mesh Networks (WMN):** Es una red de comunicación compuesta por nodos organizados en una topología de clientes, enrutadores y puertas de enlace. Los nodos no solo transmiten y reciben datos, sino que también actúan como repetidores para otros nodos, y cada uno contribuye a la propagación de datos en la red. Una WMN se autoorganiza y autoconfigura dinámicamente, los nodos de la red establecen y mantienen

automáticamente la conectividad de malla entre ellos permitiendo un bajo coste inicial, fácil mantenimiento de la red, robustez y cobertura de servicio fiable.

- **Wireless Sensor Networks (WSN):** Esta red está compuesta por sensores y nodos pequeños, ligeros, portátiles y autónomos distribuidos espacialmente para monitorear condiciones físicas o ambientales, como temperatura, sonido, presión, etc. Por lo general, cada nodo sensor está equipado con un transductor, una microcomputadora, un transmisor y una fuente de energía.
- **Mobile Ad-Hoc Network (MANET):** Es una red compuesta por varios nodos libres o autónomos como laptops, celulares, radios, etc; que pueden organizarse de diferentes maneras y funcionar sin una estricta gestión de red jerárquica. Este tipo de red permite moverse, agregar y eliminar dispositivos móviles y reconfigurarse sobre la marcha.

2.3.2. Ventajas de las redes Ad-Hoc

Existen varias ventajas de las redes Ad-Hoc en comparación con las redes de comunicación tradicionales, las más importantes se describen en [10] y [11]:

- Mejora de la movilidad y flexibilidad gracias a la capacidad de activar y desactivar nodos rápidamente.
- Mayor robustez gracias a los mecanismos distribuidos y no jerárquicos de gestión y control.
- Reducción del consumo de energía y robustez en los nodos móviles por medio el uso de enrutadores inalámbricos que realizan múltiples saltos cortos en lugar de un solo salto largo en conjunto con mecanismos distribuidos y no jerárquicos de gestión y control.
- Reducción de la interferencia, mejora de la eficiencia de reutilización del espectro y posibilidad de usar bandas de frecuencia no reguladas y sin licencia debido a la utilización de enlaces de comunicación cortos y bajos niveles de emisión de radio.

2.3.3. Aplicaciones de las redes Ad-Hoc

Las redes Ad-Hoc se implementan en condiciones en donde la infraestructura no está disponible, por lo que tienen un amplio campo de aplicación. A continuación, se describen algunas de las aplicaciones más importantes que se han desarrollado [8].

2.3.3.1. Aplicaciones militares

Son aplicables en situaciones de operaciones tácticas militares en regiones hostiles, donde la disponibilidad de una red de comunicación entre unidades militares sin apoyo de infraestructura proporciona una ventaja táctica. Cada soldado puede llevar un dispositivo móvil que funcione como un nodo y se conecte con el resto de los soldados, tanques y otros elementos.

Como por ejemplo, la coordinación de varios vehículos militares que se desplazan a gran velocidad, liderados por un oficial que necesita dar órdenes a todos los soldados involucrados en la operación. En este escenario, es esencial contar con una comunicación rápida y fiable para alcanzar los objetivos planteados y asegurar el éxito de la operación en cuestión.

2.3.3.2. Operaciones de emergencia

Las redes Ad-Hoc son muy útiles en situaciones de emergencia, tales como búsquedas y rescates, control de multitudes y respuestas ante desastres. Los equipos de emergencia pueden configurarlas rápidamente para reemplazar la infraestructura dañada y coordinar mejor sus esfuerzos.

Como es el caso de los chalecos salvavidas con dispositivos inalámbricos que mejoran la coordinación y rescate en accidentes aéreos en el agua. Proporcionan información precisa sobre la ubicación de las víctimas, agilizando el rescate. También permiten monitorear los signos vitales de los pasajeros para brindar atención médica eficiente.

2.3.3.3. Computación colaborativa y distribuida

Para entornos empresariales, las redes Ad-Hoc son ideales para la colaboración y el intercambio de información en un proyecto específico. Son perfectas para requerir una infraestructura de comunicación temporal para una comunicación rápida con una configuración mínima entre un grupo de personas en una conferencia o reunión.

Para ejemplificar esta aplicación se puede pensar en un grupo de investigadores que necesitan compartir sus resultados e investigaciones para una conferencia, entonces la configuración de una Ad-Hoc garantizaría el poder compartir archivos de forma fiable.

2.3.3.4. Aplicaciones para el hogar, la oficina y la educación

La aplicación más sencilla y directa de las redes Ad-Hoc para el hogar y la oficina es la conexión en red de diferentes dispositivos como computadoras portátiles, Personal Digital Assistant (PDA) y otros dispositivos compatibles con Wireless Local Area Network (WLAN) en ausencia de un punto de acceso inalámbrico. Estos dispositivos pueden conectarse a una computadora mediante enlaces Bluetooth, lo que elimina la necesidad de cables. También permiten la transmisión de audio y vídeo entre nodos inalámbricos sin la necesidad de un punto de acceso.

2.4. Mobile Ad-Hoc Network (MANET)

El grupo de trabajo Internet Engineering Task Force (IETF) designó la sigla MANET en 1998 para estandarizar los protocolos de enrutamiento en redes Ad-Hoc móviles. Estas redes son dinámicas y se crean a través de nodos móviles conectados mediante enlaces inalámbricos sin necesidad de una infraestructura externa o una administración centralizada [12]. Los nodos móviles son libres de moverse y organizarse de manera arbitraria, y están conectados mediante enlaces multisalto sin soporte de infraestructura. La funcionalidad de enrutamiento incorporada en los nodos móviles permite un funcionamiento robusto y eficiente en las redes inalámbricas móviles.

2.4.1. Características de las MANETs

Antes de implementar una red MANET, es necesario considerar sus características, como se menciona en [8]. A continuación, se detallan las más importantes.

- Autonomía, autoconfiguración e infraestructura: Las comunicaciones entre los nodos se realizan a través de la conectividad inalámbrica. Estas características hacen que los dispositivos sean fácilmente configurables. Cada nodo móvil es independiente y puede actuar tanto como host y enrutador, generando datos independientes. Además, esta tecnología permite una comunicación más rápida y una interconexión ágil entre dispositivos.
- Topologías dinámicas: La topología de la red cambia de forma rápida y aleatoria en momentos impredecibles, y los enlaces pueden ser bidireccionales o unidireccionales, lo que permite mayor flexibilidad y adaptabilidad.

- Limitación de energía: Los hosts son pequeños y livianos, con una capacidad limitada de Central Processing Unit (CPU), un almacenamiento de baja energía y un tamaño de memoria reducido. Estos dispositivos se alimentan por fuentes de energía limitadas como baterías pequeñas, por lo que la eficiencia debe ser una prioridad.
- Enrutamiento multisalto: Cuando un nodo intenta enviar información a otros nodos que están fuera de su rango de comunicación, el paquete debe ser reenviado a través de uno o más nodos intermedios. Estos nodos actúan como enrutadores y transmiten los paquetes entre los hosts móviles, permitiendo el intercambio de información.
- Escalabilidad de la red: La mayoría de las aplicaciones MANET implican grandes redes con miles de nodos, y es aquí donde la escalabilidad es fundamental para una implementación exitosa. Esto plantea desafíos en áreas como el direccionamiento, el enrutamiento, la gestión de ubicación, la gestión de configuración, la interoperabilidad, la seguridad y las tecnologías inalámbricas de alto rendimiento, entre otras.

2.4.2. Ventajas de las MANETs

- Permite conectarse a Internet sin la necesidad de un enrutador inalámbrico. Esto hace que la red sea más asequible que la red tradicional dado que no se tiene el costo adicional del enrutador.
- Admiten fallas de conexión ya que cuenta con protocolos de enrutamiento y transmisión que permiten conexiones redundantes.
- No es necesario el uso de puntos centralizados o gateways para la comunicación dentro de estas redes, debido a la colaboración entre nodos en la tarea de entrega de paquetes mediante múltiples saltos.
- Más económica ya que no hay un costo fijo de infraestructura y reduce el consumo de energía en los nodos móviles.

2.4.3. Desventajas de las MANETs

- La mayoría de las redes cableadas se basan en enlaces simétricos fijos pero en el caso de las MANETs los enlaces pueden cambiar dinámicamente puesto que los nodos son móviles y cambian constantemente de posición dentro de la red.

- La desactualización de las rutas en la tabla de enrutamiento ocasiona una sobrecarga innecesaria.
- En una MANET existe interferencia entre nodos. Las transmisiones pueden ser escuchadas por otros nodos corrompiendo la transmisión.
- La implementación de una conexión redundante proporcional al número de nodos puede resultar en un aumento significativo de la complejidad y los costos de la red.

2.4.4. Tipos de MANETs

Los tipos de MANET descritos en [13] se indican a continuación (véase la Figura 2.3):

- Vehicular Ad-Hoc Network (VANET): Se crean aplicando los principios de las redes MANET destinados a comunicaciones entre vehículos (V2V) y equipos de carretera (V2I).
- Internet Based Mobile Ad-Hoc Networks (IMANET): Permite la comunicación directa entre dispositivos móviles sin infraestructura centralizada. Utiliza protocolos de Internet como TCP/UDP e IP, junto con enrutamiento automático para establecer conexiones y rutas entre nodos móviles.
- Intelligent Vehicular Ad-Hoc Networks (INVANET): Hace uso de la inteligencia artificial para hacer frente a situaciones inesperadas como colisión de vehículos y accidentes.
- Flying Ad-Hoc Network (FANET): Están compuestas por vehículos aéreos no tripulados que brindan movilidad y conectividad en áreas remotas.

2.5. Enrutamiento en MANETs

El enrutamiento en redes tipo MANETs debe hacer frente a desafíos tales como: topologías cambiantes, limitación en la capacidad de energía al usar baterías, bajo ancho de banda y altas tasas de error [14].

En la Figura 2.4 se presenta la clasificación de los tres principales tipos de protocolos de enrutamiento: proactivos, reactivos e híbridos.

2.5.1. Protocolos de enrutamiento Proactivos

Se conocen también como "protocolos de enrutamiento controlados por tablas". Estos permiten que cada nodo mantenga información actualizada de enrutamiento en una tabla y la

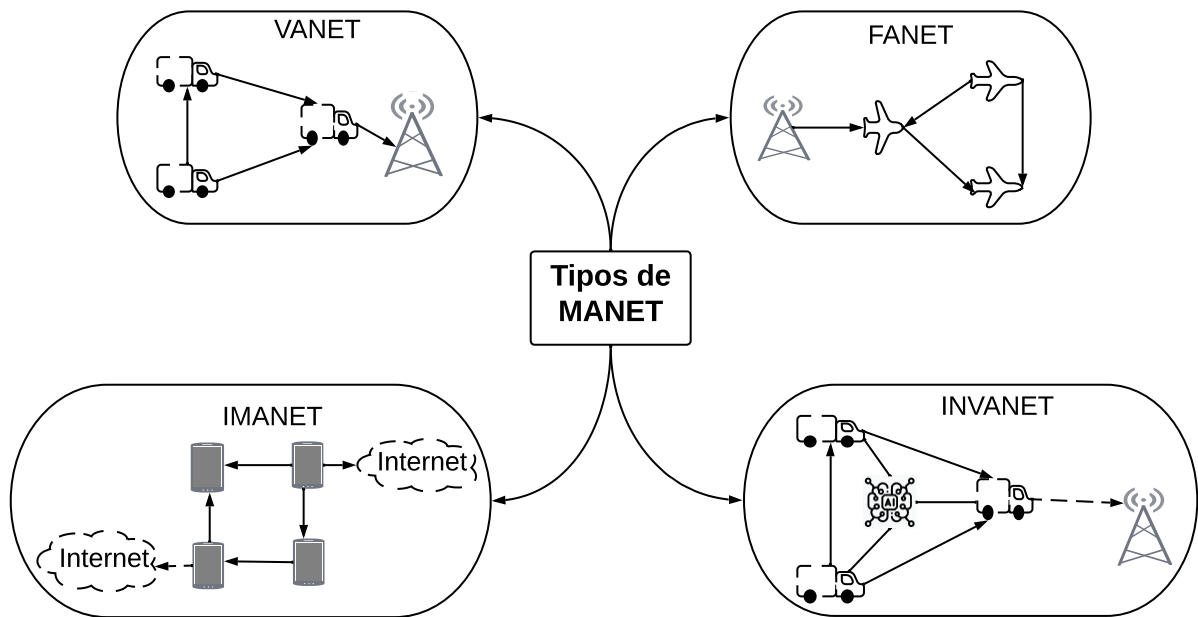


Figura 2.3: Tipos de MANETs

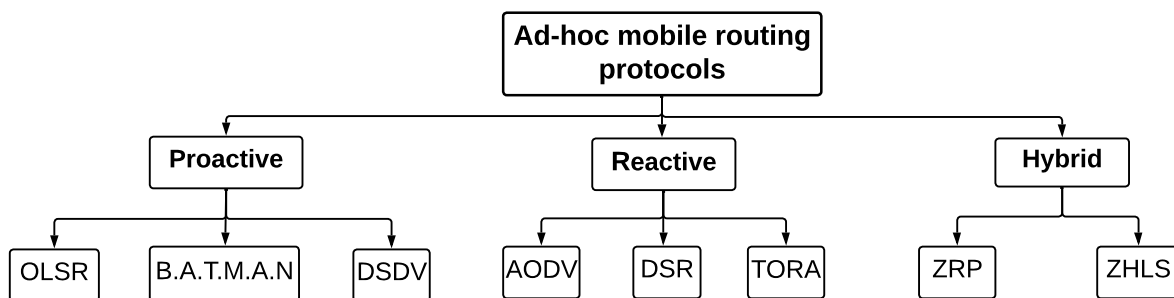


Figura 2.4: Clasificación de enrutamiento MANET

intercambie periódicamente con otros nodos o cuando la topología de la red cambia. De esta manera, cuando un nodo necesita enviar un paquete, la ruta está disponible [15].

La desventaja de este tipo de protocolo es la sobrecarga en la señalización, lo cual puede afectar el ancho de banda disponible. También pueden tener limitaciones en entornos con topologías cambiantes o en redes de gran tamaño. No obstante, una ventaja de estos protocolos es que siempre hay una ruta disponible desde el origen hasta el destino, sin necesidad de recurrir a mecanismos de búsqueda de nuevas rutas.

Los principales mecanismos utilizados en los protocolos proactivos son:

- Aumentar la cantidad de información topológica guardada en cada nodo para prevenir bucles y acelerar la convergencia de los protocolos.

- Variar dinámicamente el tamaño y/o la frecuencia de las actualizaciones de ruta.
- Optimización de flooding.

Algunos protocolos proactivos conocidos incluyen OLSR, B.A.T.M.A.N. y Destination-Sequenced Distance-Vector Routing (DSDV).

2.5.2. Protocolos de enrutamiento Reactivos

También conocidos como protocolos de enrutamiento bajo demanda, su principal característica es la creación de rutas solo cuando se requieren. El proceso de descubrimiento de rutas se activa cada vez que una fuente desea enviar datos a un destino, y la ruta se conserva gracias al mantenimiento de rutas hasta que ya no sea necesaria. De esta forma, se reduce la sobrecarga de comunicación y se preserva la energía de la batería en comparación con los protocolos proactivos [14].

Los nodos configuran el descubrimiento de rutas bajo demanda, mientras que el nodo origen revisa su caché de rutas desde el origen hasta el destino. Si la ruta no está disponible, se inicia el proceso de descubrimiento de ruta. Ejemplos de protocolos reactivos son Dynamic Source Routing Protocol (DSR), On Demand Distance Vector (AODV) y Temporally-Ordered Routing Algorithm (TORA).

2.5.3. Protocolos de enrutamiento Híbridos

Los protocolos híbridos combinan características de protocolos de enrutamiento reactivos y proactivos. Generalmente, intentan aprovechar la reducción de la sobrecarga de tráfico de control en los sistemas proactivos y reducir los retrasos en el descubrimiento de rutas en los sistemas reactivos al mantener una forma de tabla de enrutamiento [14]. Dentro de este tipo de protocolos se encuentran Zone Routing Protocol (ZRP) y Zone-Based Hierarchical Link State (ZHLS).

2.5.4. Optimized Link State Routing (OLSR)

El protocolo Optimized Link State Routing (OLSR) es una mejora sobre el protocolo clásico de estado de enlace, diseñado en este caso para redes móviles Ad-Hoc. El RFC 3626 [16] define a OLSR como una función central encargada del enrutamiento de manera estricta. Además,

es acompañado por un conjunto de funciones auxiliares que proporcionan aplicaciones adicionales para escenarios específicos. Además, implementa un nuevo método para intercambiar información topológica en la red y reduce el volumen de tráfico generado.

Aunque todos los nodos están autorizados para recibir mensajes de datos topológicos, solo un número mínimo de ellos, conocidos como Multipoint Relays (MPR), son responsables de propagarlos a través de la red. Estos MPR son el número mínimo de vecinos inmediatos necesarios para contactar a todos los vecinos del nodo dentro de dos saltos [17].

Los paquetes de control permiten actualizar las tablas y transmitir información a través de las tablas de enrutamiento, cabe mencionar que la información extraída se mantiene solo por un tiempo limitado.

En la Figura 2.5 se presenta el encapsulado de datos en una red con OLSR. Este protocolo usa direcciones IP como identificador único de los nodos de la red. Además, puede funcionar a través de múltiples interfaces de comunicación de la cual se escoge una dirección principal para cada nodo de la red. OLSR puede trabajar con ambas versiones de IP, la versión 4 (IPv4) y la versión 6 (IPv6) [12].

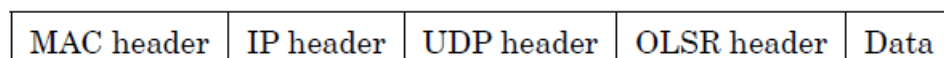


Figura 2.5: Encapsulación de datos en OLSR. Fuente: [12].

2.5.4.1. Componentes del paquete OLSR

En la Figura 2.6 se indican los componentes de un paquete OLSR [16, 18].

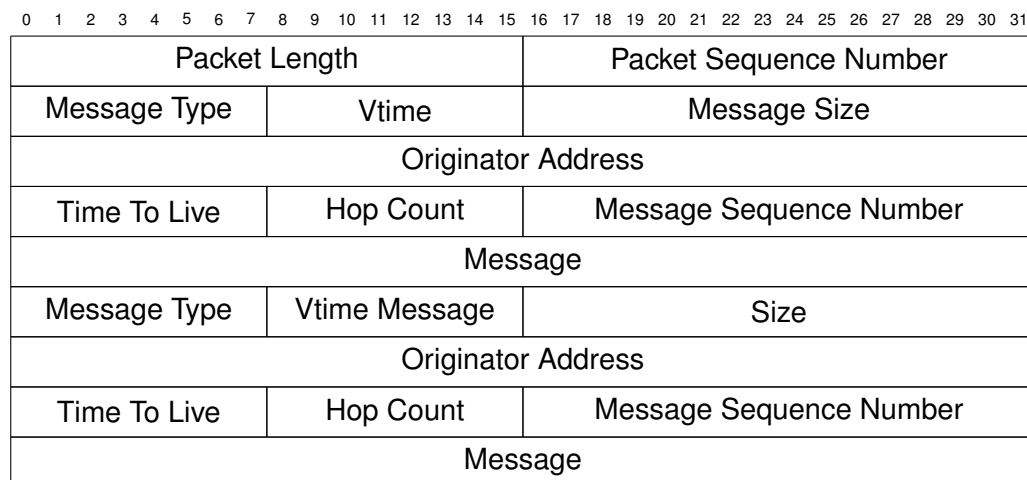


Figura 2.6: Formato de un paquete OLSR. Fuente: [12]

- Packet length (16 bits): Tamaño en bytes del paquete.
- Packet sequence number (16 bits): Este campo se utiliza para asignar un número de secuencia a cada paquete OLSR enviado por el host. El número de secuencia se incrementa en uno cada vez que se transmite un nuevo mensaje.
- Message type (8 bits): Este campo indica el tipo de mensaje OLSR, como un mensaje de control, un mensaje de datos o un mensaje de error. Los tipos de mensajes pueden ser:
 1. Hello: permite la detección de nodos vecinos, enlaces y señalización de MPR.
 2. Topology Control (TC): encargado de la difusión acerca de la topología, es decir, contienen una lista de los enlaces del nodo en donde se gestiona este paquete.
 3. Multiple Interface Declaration (MID): su función es declarar la presencia de múltiples interfaces en un nodo.
 4. Host and Network Association (HNA): utilizados para declarar subredes y hosts accesibles por nodo que funciona como gateway fuera de una MANET.
- Vtime - Validity time (8 bits): Período de tiempo después de la recepción de un mensaje durante el cual el nodo receptor debe considerar válida la información del paquete.
- Message size: Tamaño en bytes, desde el comienzo del tipo de mensaje hasta el comienzo del siguiente tipo de mensaje o el final del paquete si no hay ningún mensaje siguiente.
- Originator address (32 bits): Dirección principal del nodo que generó el mensaje.
- Time to live (TTL) (8 bits): Contiene el número máximo de saltos que puede realizar el mensaje en un rango de 0 – 255. Antes de retransmitir un mensaje, el TTL debe reducirse en 1. Cuando un nodo recibe un mensaje con un TTL de 1, el mensaje no se retransmite.
- Hop count (8 bits): Número de saltos que ha realizado un mensaje antes de que se retransmita el mismo. El conteo de saltos aumenta en 1 y el valor inicial antes de salir de la fuente es 0.
- Message sequence number (16 bits): El nodo de origen asigna un identificador único a cada mensaje.
- Data: contiene el mensaje real, ya sea HELLO, TC, MID, HNA o un paquete de datos.

La selección de los MPR es crucial para reducir la cantidad de transmisiones redundantes. Esta elección debe realizarse de manera rápida y con un mínimo de cálculos. La difusión de esta métrica disminuye el número de retransmisiones utilizando la regla “un nodo retransmite un mensaje si, y sólo si no lo ha recibido antes y/o acaba de recibir el mensaje de un nodo para el que actúa como Multipoint Relays (MPR)” [16].

La heurística para la selección de esta métrica permite a un nodo transmitir a todos los demás en dos saltos, basándose en conjuntos de vecinos y vecinos de dos saltos. A continuación se explica las variables empleadas:

- **N**: es el grupo de vecinos directos de un nodo x a través de la interfaz l .
- **N2**: grupo de vecinos de nivel 2 accesible a través de la interfaz l excluyendo:
 - nodos accesibles a través de un miembro de $N(x)$ con $Willingness=WILL_NEVER$
 - nodo que realiza el cálculo
 - todos los nodos vecinos con un enlace simétrico a través de una de las interfaces.
- **D(y)**: hace referencia al número de vecinos vinculados simétricamente es de nivel 1, además excluye a todos los elementos de $N(x)$ y del nodo x .

Finalmente el algoritmo para la heurística se presenta en la Figura 2.7:

El parámetro willingness permite a un nodo establecer un valor entre 0 a 7, y especifica la disponibilidad de un nodo para enviar tráfico a otros nodos. A continuación, se listan los tres tipos de valores que tiene esta variable:

- Por defecto de willingness es **WILL_DEFAULT**.
- Para indicar que un nodo no desea transportar tráfico para otros nodos el valor de willingness es **WILL_NEVER**.
- Para indicar que un nodo siempre debe ser seleccionado para transportar tráfico en nombre de otros nodos, willingness es **WILL_ALWAYS**.

2.5.5. Better Approach to Mobile Ad-Hoc Networking (B.A.T.M.A.N.)

Fue desarrollado por la comunidad de software libre y es ampliamente utilizado en redes inalámbricas comunitarias y en escenarios donde no hay infraestructura de red fija disponible. Mantiene información sobre la existencia de todos los nodos en la malla a los que se puede acceder a través de enlaces de comunicación de un solo salto o de varios saltos.

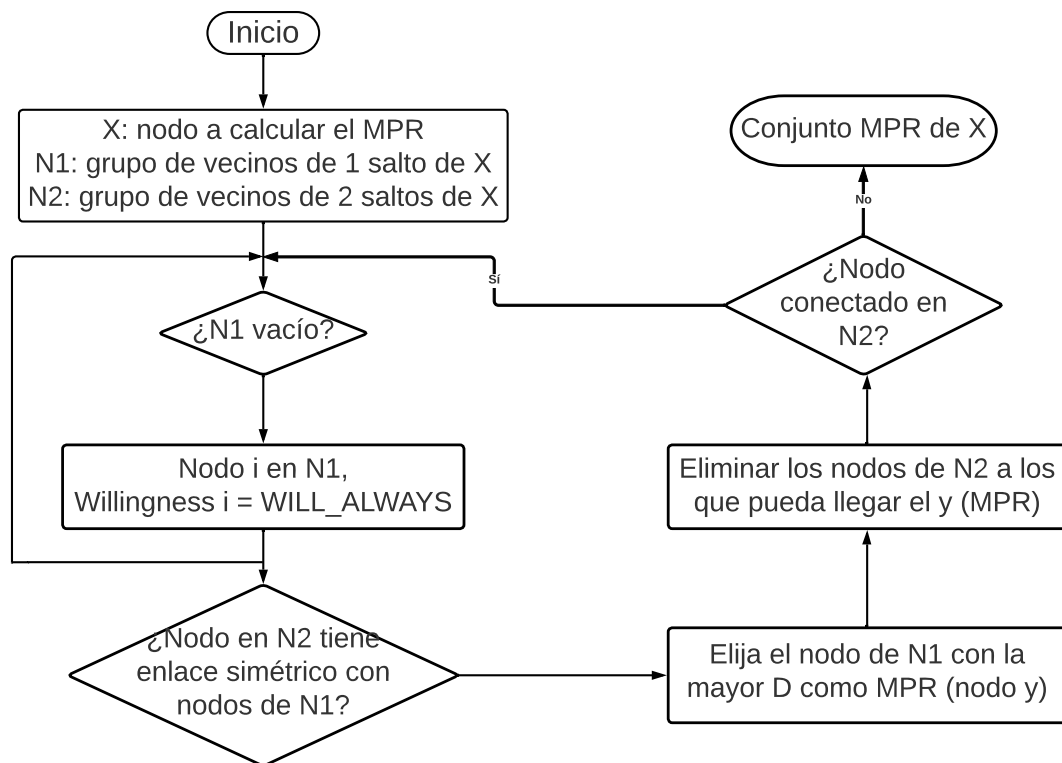


Figura 2.7: Diagrama de la heurística para calcular el Multipoint Relays (MPR)

La estrategia del protocolo B.A.T.M.A.N. es determinar para cada destino en la malla un vecino de un solo salto, que se utiliza como la mejor puerta de enlace para comunicarse con el nodo de destino [19]. En el enrutamiento basado en IP de varios saltos, cada nodo debe tener una puerta de enlace local en su tabla de enrutamiento para cada host o ruta de red. Por lo tanto, con B.A.T.M.A.N. no se averigua o calcula la ruta completa en su lugar se trata de descubrir el próximo salto más adecuado para cada destino, haciendo posible una implementación muy rápida y eficiente [20].

En una MANET con B.A.T.M.A.N. cada nodo transmite un Originator Message (OGM) para informar a sus vecinos de enlace local sobre su existencia. Los vecinos de enlace local son nodos adyacentes directamente conectados a través de una interfaz de red física. Además, estos nodos reciben los mensajes del originador y se encargan de retransmitirlos. Los OGM se envían y repiten como transmisiones UDP utilizando el puerto 4305, asignado por la Internet Assigned Numbers Authority (IANA) para uso exclusivo del protocolo B.A.T.M.A.N.. Estos mensajes son reenviados hasta que cada nodo los haya recibido al menos una vez, a menos que se produzca una pérdida en los enlaces de comunicación o que el valor de TTL haya expirado [19].

Un paquete de este protocolo consta de un mensaje de OGM y cero o más mensajes de

extensión HNA adjuntos [19].

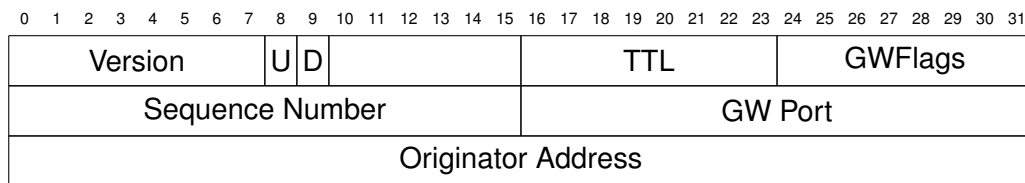


Figura 2.8: Campos de un mensaje OGM [19]

- Version: se utiliza para indicar la versión del protocolo que está siendo implementado. Este campo es importante para asegurarse de que los nodos en la red estén utilizando la misma versión del protocolo y puedan interpretar correctamente los mensajes OGM.
- Is-direct-link flag: Señala si un nodo es un vecino directo o no.
- Unidirectional flag: Indica si el nodo vecino es bidireccional o no.
- TTL: Define un límite superior del número de saltos permitidos que el OGM puede realizar antes de ser descartado.
- Sequence Number: El originador de un OGM numera consecutivamente cada nuevo OGM con un número de secuencia incrementado en uno.
- Originator Address: La dirección IPv4 de la interfaz B.A.T.M.A.N. en cuyo nombre se generó el OGM.

2.5.5.1. Campos del mensaje HNA

Un OGM puede ir seguido de cero o más mensajes de extensión HNA. Cada mensaje de extensión está asociado con el OGM anterior y debe ser procesado. Los mensajes HNA tienen un tamaño fijo de 5 octetos, compuestos por los siguientes campos que se presentan en la Figura 2.9.

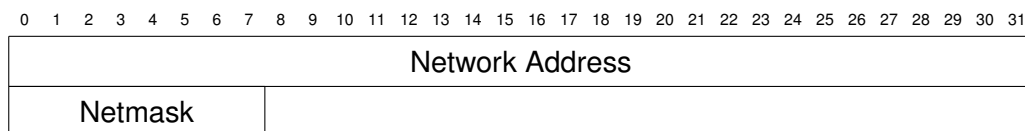


Figura 2.9: Campos de un mensaje HNA [19]

- Netmask: Número de bits que presenta el tamaño de la red anunciada.
- Network Address: Dirección de red IPv4 de la red anunciada.

2.6. Tráfico multimedia - Audio

El término multimedia se refiere a diferentes tipos de medios utilizados para representar información, y también se refiere a la transmisión de datos que representan diversos medios a través de redes de comunicación [21]. La diversidad de los medios se puede clasificar en tres grupos:

- Texto
- Imágenes
- Sonido

Con el creciente aumento del tráfico multimedia y el desarrollo de las tecnologías de telecomunicaciones, es fundamental depurar las técnicas de gestión del tráfico. Dado que el tráfico de audio y vídeo requiere un mayor ancho de banda que los datos de texto, por tanto al ser transportados a través de una red, resulta imprescindible implementar estrategias y técnicas que permitan una gestión eficiente del tráfico multimedia [22].

En este sentido, es necesario revisar las teorías y enfoques existentes que aborden la gestión del tráfico. Algunos de los desafíos técnicos que deben ser considerados en la gestión del tráfico multimedia a través del Internet:

- Conformación del tráfico y el control de velocidad
- Control de congestión
- Asignación de ancho de banda
- Control de flujo
- Escalabilidad de vídeo

El tráfico consiste en la transferencia de información, que puede ser sensible o no al tiempo. El tráfico sensible al tiempo abarca aplicaciones en tiempo real como el vídeo y la voz, que requieren una transmisión rápida y constante. Por otro lado, el tráfico no sensible al tiempo se refiere a la transferencia de archivos que involucran imágenes y datos [23]. Para estudiar el tráfico, se emplean procesos estocásticos que ayudan a comprender y caracterizar los patrones de generación de paquetes en momentos arbitrarios.

2.6.1. Categorías de tráfico

En este apartado se analiza las distintas categorías de tráfico en función de los diferentes requisitos:

2.6.1.1. Constant Bit Rate (CBR)

Está diseñado para aplicaciones que requieren un retardo y una variación de retardo muy limitados, especialmente para aquellas que necesitan ser transmitidas a una velocidad continua. El servicio CBR recibe o entrega Service Data Unit (SDU) con una tasa de bits constante desde o hacia la capa superior. En una red, las aplicaciones pueden generar tráfico constante, como es el caso de la transferencia de ficheros, donde la tasa de bits se mantiene constante a lo largo de la transmisión.

2.6.1.2. Variable Bit Rate (VBR)

Está diseñada para aplicaciones que comparten los requisitos de retraso estrictamente restringido y variación de retraso del tráfico CBR, pero que transmiten a una velocidad variable. Un ejemplo de esta categoría de tráfico son los códecs de voz y vídeo que utilizan técnicas de compresión y supresión de silencio, lo que implica una tasa de bits variable. Existen criterios adicionales que se deben considerar al momento de dimensionar una red. Como considerar valores que incluyen promedio del tráfico, valor máximo, duración y valor pico de las ráfagas de tráfico. Estos parámetros son necesarios para diseñar una red capaz de manejar eficientemente las variaciones en la demanda de ancho de banda y garantizar una calidad de servicio.

2.6.1.3. Undefined Bit Rate (UBR)

Fue diseñado originalmente para aplicaciones de datos que no requieren una demora o variación de demora estrictamente restringida. Una de las desventajas es que no ofrece garantías en términos de tasa de pérdida y retraso, lo que significa que puede haber congestión en la red y las tasas de transferencia de datos pueden variar.

2.6.1.4. Available Bit Rate (ABR)

Se utiliza para equilibrar el rendimiento de la red y garantizar una distribución justa de los recursos. Brinda a la fuente un control de flujo de retorno para ajustar la velocidad a la que se

envía tráfico a la red. Se ha diseñado este servicio para aplicaciones que requieren un nivel de confiabilidad superior al proporcionado por UBR. Es especialmente útil para transferencias de datos críticos y aplicaciones que necesitan un rendimiento consistente y asegurar la integridad de los datos.

2.6.2. Parámetros de tráfico

El rendimiento de una red se puede medir en términos de la cantidad de bits por segundo entregados a la aplicación. La latencia, por otro lado, es la suma del retraso de transmisión, el retraso de propagación y el retraso de cola a través de cada elemento de red. En general, la latencia se refiere al tiempo total que tarda un paquete de datos en recorrer la red desde su origen hasta su destino [23].

El jitter se refiere a la variación en el retardo o en el intervalo de llegada entre paquetes o celdas consecutivos. Ciertas aplicaciones, como la voz y el vídeo en tiempo real, son muy sensibles al jitter, ya que puede causar problemas en la calidad del audio y la imagen.

2.6.3. Tráfico de audio

Los medios de audio son el sonido o la voz que se han convertido a formato digital mediante técnicas de muestreo y cuantificación. Estos medios de audio digitalizados se transmiten como un flujo de paquetes discretos a través de la red. Los requisitos de ancho de banda del audio digitalizado dependen de varios factores, como la tasa de muestreo, la profundidad de bits y la complejidad del audio. El rango dinámico o el espectro del audio también pueden influir en los requisitos de ancho de banda, especialmente para aplicaciones de audio de alta calidad [23].

La Figura 2.10 ilustra el diagrama de bloques de una estación que codifica y envía un flujo de voz. Cada fuente de voz tiene una señal analógica continua que es digitalizada por un codificador. Las muestras generadas se acumulan en un empaquetador y cuando el número de muestras en el empaquetador alcanza la longitud de celda predeterminada, se adjunta el encabezado y se genera una celda de voz. Los paquetes generados se almacenan en el búfer de transmisión en el orden de su generación, en espera de ser transmitidas.

La información puede transmitirse a una tasa constante sin fluctuaciones a través del servicio CBR. Se impone un requisito de restricción en el retardo de extremo a extremo que debe cumplir con la norma International Telecommunication Union (ITU) G.114 [24], que establece

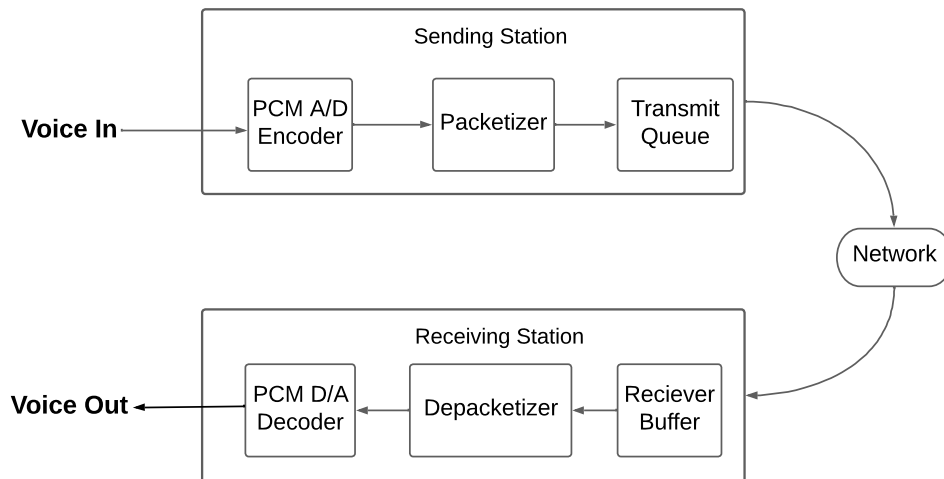


Figura 2.10: Diagrama de bloques para la codificación y envío de flujos de voz. Fuente: [23].

un retardo ideal de menos de 150 ms y un máximo tolerable de 400 ms, excluyendo el retardo de transmisión.

2.6.3.1. Codecs de audio

Los códecs de audio son algoritmos de compresión y descompresión que permiten codificar la información de audio para su almacenamiento o transmisión de manera eficiente, ocupando menos espacio de almacenamiento o ancho de banda en comparación con el audio sin comprimir.

Existen diversos tipos de códecs, incluyendo aquellos que trabajan con formatos de datos sin comprimir o sin pérdidas, lo cual ofrece una alta calidad de audio, ideal para su almacenamiento en estudios de grabación, copias de seguridad o archivos importantes. Por otro lado, el formato de datos con pérdida puede ser útil en situaciones donde haya restricciones de espacio de almacenamiento o ancho de banda limitado. La elección del códec adecuado depende de la calidad de audio, el espacio de almacenamiento disponible, el ancho de banda disponible y la popularidad y uso generalizado del códec en la industria [25].

A continuación se describen los principales códecs utilizados:

- **Waveform Audio Format (WAV):** Es un formato de datos diseñado para uso informático, y es compatible en diferentes sistemas operativos. Una ventaja en términos de calidad y desventaja en almacenamiento del formato Pulse Code Modulation (PCM) es que los archivos resultantes mantienen una alta calidad de audio que ocupan un espacio considerable debido a la falta de compresión. El formato WAV puede manejar archivos de

hasta 4 GB, equivalentes a 6,6 horas de audio (44,1 KHz, 16 bits estéreo).

- Moving Pictures Enhanced Group (MPEG) Audio: es una familia de tres códecs de audio y esquemas de compresión: Layer 1, Layer 2 y Layer 3. La técnica de compresión es una combinación de codificación por transformación y división en subbandas. Funciona a baja velocidad de bits de 32 a 448 Kbps por canal monofónico; codificando con frecuencias de muestreo de 32, 44,1 o 48 KHz.
 1. MPEG-1 es una versión simplificada del formato de audio Masking-pattern Adapted Universal Sub band Integrated Coding and Multiplexing (MUSICAM). Es comúnmente utilizado para la transmisión de video digital y en sistemas de transmisión directa vía satélite. MPEG-1 funciona bastante bien a 192 o 256 Kbps por canal.
 2. MPEG-2 está optimizado para una tasa de bits de 96 o 128 Kbs por canal monofónico, tiene una codificación de audio multicanal de alta calidad en un formato con una tasa de bits reducida.
- MPEG Audio Layer-3 (MP3): es el esquema de mayor rendimiento de la serie MPEG estándar. Su esquema de codificación más complejo permite alcanzar casi la calidad de 64 Kbps por canal. Implementa un algoritmo de compresión con pérdida, que comprime los datos de audio eliminando cierta información inaudible para el oído humano. Esto permite una alta tasa de compresión, lo que resulta en archivos de audio más pequeños en comparación con los formatos de audio sin compresión.
- Advanced Audio Coding (AAC): proporciona mejor calidad de sonido en relación con la tasa de bits porque se descartan los componentes irrelevantes de la señal y se eliminan las redundancias en la señal codificada. La señal se procesa mediante Modified Discrete Cosine Transform (MDCT) en función de su complejidad. Se caracteriza por su bajo retardo en latencia de red aproximadamente 20 ms y una buena calidad de audio para todo tipo de señales de audio. Incluye una herramienta de protección y técnicas de resistencia a errores.
- Free Lossless Audio Codec (FLAC): un formato de audio que comprime el sonido sin pérdida de calidad esto lo logra gracias a que las muestras de las señales de audio tienden a estar muy correlacionadas con sus vecinas más cercanas. Pueden codificar audio modulado por PCM con 1 a 8 canales, frecuencias de muestreo de 1 a 1048575 Hz y profundidades de bits de 4 a 32 bits [26].

2.6.3.2. Protocolos para la transmisión de audio

Son un conjunto de reglas y normas que permiten definir como se realiza la transmisión de los datos de audio por medio de la red. Además, establecen la forma de empaquetar, transmitir y recibir, también el manejo de errores y la sincronización entre el transmisor y el receptor.

- **Transmission Control Protocol (TCP):** es el protocolo de transporte fiable clásico del conjunto TCP/IP de extremo a extremo. Puede detectar errores o datos perdidos y activa la retransmisión hasta que los datos se reciban, completos y sin errores. Además cuenta con el mecanismo de control de congestión que permite asegurar que la red no se sature con demasiados paquetes de datos, para esto se ajusta la velocidad de transmisión de datos. TCP se encarga de dividir los datos en pequeños segmentos que se envían a través de la red y luego se reensamblan en el destino. En el caso de la transmisión de audio, los datos se dividen en paquetes pequeños y luego se envían a través de la red a un destino específico, como un reproductor de audio en línea. Para la transmisión de audio, el protocolo garantiza que los paquetes de datos lleguen al destino de manera confiable y en el orden correcto [27, 28].
- **User Datagram Protocol (UDP):** también denominado el protocolo de transporte no fiable y sin conexión y el más sencillo que funciona sobre IP. El mensaje se denomina datagrama y sólo encapsula los datos de la aplicación con su cabecera de 8 bytes. Los mensajes pueden perderse, duplicarse o llegar desordenados, por eso se le denomina protocolo de transporte no fiable. Las aplicaciones que utilizan UDP deben estar preparadas para hacer frente a la recuperación de errores, fallos de suma de comprobación, pérdida de paquetes, reordenación de paquetes, control de flujo, control de congestión, etc [27, 28]. En el caso de la transmisión de audio, UDP se utiliza a menudo para aplicaciones en tiempo real, como la transmisión de audio en vivo o Voice Over Internet Protocol (VoIP), debido a su baja latencia y su capacidad para transmitir datos rápidamente.
- **Real-time Transport Protocol (RTP):** proporciona servicios de entrega de extremo a extremo para datos con características de tiempo real, como audio y vídeo. La función principal es la identificación del tipo de carga útil, la numeración secuencial, el sellado de tiempo y la supervisión de la entrega permitiendo la sincronización y reproducción adecuada de los medios en el extremo receptor [29]. RTP puede trabajar en conjunto con otros protocolos de transporte como UDP o TCP para garantizar la entrega y la integridad de los datos. Es ampliamente utilizado en aplicaciones de comunicación mul-

timedia en tiempo real y es una parte esencial de muchas soluciones de transmisión de audio y vídeo en la actualidad [30].

2.6.3.3. Características del tráfico de audio

Se refieren a los diferentes formatos y tasas de bits, dependiendo del tipo de aplicación y del objetivo de la transmisión. Una mayor tasa de bits suele asociarse a una mayor calidad. Esto se debe a que cada bit de un archivo de audio captura un fragmento de datos que podemos utilizar para reproducir el sonido original.

A continuación, se presentan dos características fundamentales que deben tenerse en cuenta:

- **Bit Rate:** es la cantidad de datos que se almacenan por segundo en un archivo de sonido que está siendo reproducido. Se mide en Kbps y es una medida de la calidad de sonido que se obtiene en un archivo de audio. La tasa de bits se refiere a la cantidad de bits de datos que se transmiten por segundo y afecta directamente la calidad del sonido en un archivo de audio. Por lo general, se considera que una tasa de bits más alta proporciona una calidad de sonido más clara y detallada, mientras que una tasa de bits más baja reduce la calidad de sonido, lo que puede resultar en pérdida de detalles y claridad [31].
- **Perfil del tráfico:** se refiere a cómo se distribuye el tráfico de audio a lo largo del tiempo y puede variar dependiendo de la aplicación o del tipo de archivo de audio. La configuración del tráfico se logra mediante la aplicación de reglas o políticas que permiten especificar características como el ancho de banda, la velocidad o la prioridad máxima o mínima para cada clase de tráfico [32]. Estas reglas se definen en base a criterios como el origen, el destino, el puerto, el protocolo o la aplicación. En el caso del tráfico de audio, la forma o perfil del tráfico puede ser constante, variable o intermitente.

2.6.4. Tráfico de datos

El tráfico de datos se refiere a un mensaje que se distribuye en momentos específicos y que llega a través de la red en un instante determinado. A diferencia del tráfico sensible al tiempo, es insensible al retraso en la entrega, es decir, los datos pueden llegar al destino en cualquier momento. Para reducir el costo, el tamaño del búfer debe ser lo más pequeño posible. El proceso de llegada del tráfico de datos se define por dos parámetros: el tamaño del mensaje y el intervalo de tiempo entre llegadas [23].

2.6.5. Delay

Es el tiempo que tarda una señal de audio en viajar desde su fuente original a un receptor. Puede ser causado por varios factores, como la distancia física entre la fuente de audio y el receptor, la velocidad de transmisión del sonido a través del medio, la calidad de la señal de audio o el procesamiento de la señal.

Como recomienda la International Telecommunication Union (ITU), en [24] esta norma define los requisitos de delay para las comunicaciones de voz en tiempo real. El delay total (ida y vuelta) no debe superar los 400 ms, sin embargo, se recomienda que esta métrica sea inferior a 150 ms para garantizar una buena calidad de voz. Mientras que el retardo de propagación en una red de audio puede variar según la tecnología utilizada y la distancia entre los nodos de la red. La International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector (ITU-T) recomienda que el retardo de propagación en una red de audio no supere los 50 ms. En la Figura 2.11 se muestra la curva que representa los efectos del delay absoluto.

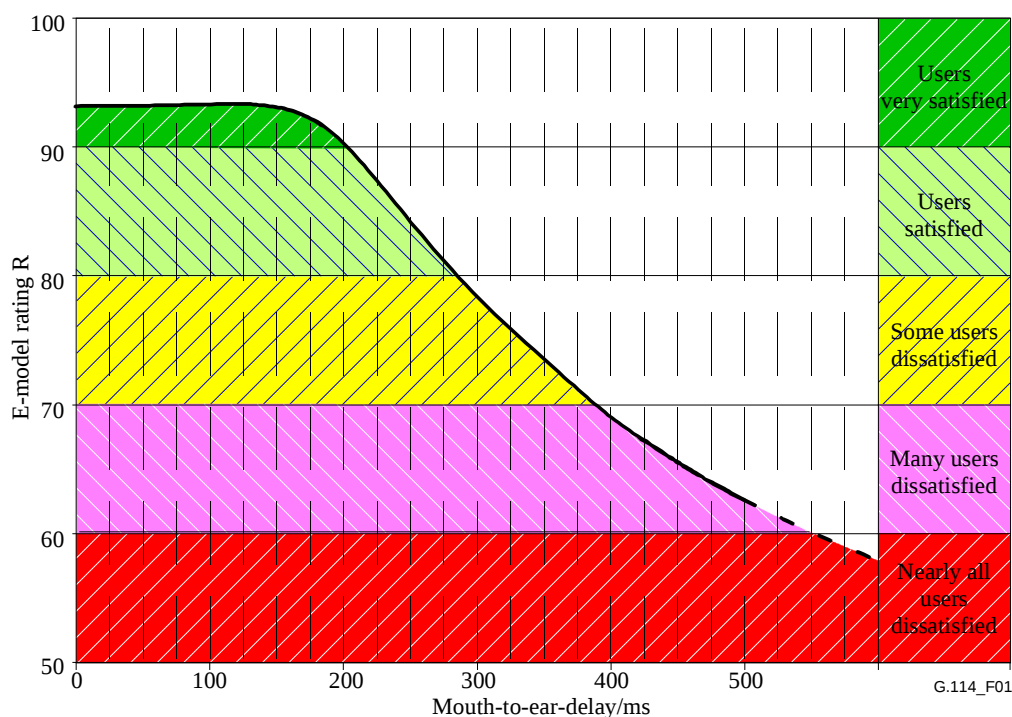


Figura 2.11: Curva de los efectos del delay absoluto. Fuente: [24].

En otra de las recomendaciones [33] en cuanto al delay por el procesamiento para la codificación y decodificación de audio se sugiere que no supere los 5 ms para así tener una codificación de audio de alta calidad. Finalmente la ITU-T P.1305 [34] establece que el delay total de extremo a extremo para aplicaciones multimedia interactivas debe ser inferior a 300

ms, para garantizar una buena Quality of Experience (QoE). Este incluye el tiempo de transmisión a través de la red, el tiempo de procesamiento en los nodos de la red y el tiempo de procesamiento en los dispositivos del usuario final.

2.6.6. Throughput

Es la cantidad de datos que se pueden transferir en un determinado período de tiempo. Para garantizar una calidad de audio adecuada, es necesario contar con un ancho de banda suficiente para transmitir los datos de audio de manera eficiente. El throughput depende de otros factores, como la calidad del códec de audio, la compresión utilizada y las condiciones de la red en la que se realiza la transmisión..

En el caso de la transmisión de audio en tiempo real, como en las llamadas VoIP o conferencias en línea, se requiere un throughput mínimo para garantizar una experiencia de audio sin interrupciones. Según las recomendaciones de la ITU-T en [24], se recomienda un mínimo de 100 Kbps por llamada para un rendimiento óptimo en la transmisión de voz sobre IP.

2.6.7. Packet Reception Ratio (PRR)

Se define como el porcentaje de paquetes transmitidos por el nodo de origen que se reciben con éxito por el nodo determinado como el destinatario [35]. El PRR se mide mediante el porcentaje, es decir, el 100 % indica una recepción perfecta, lo que significa que todos los paquetes enviados han sido recibidos sin errores, mientras que un valor inferior indica que algunos paquetes se han perdido o dañado durante la transmisión. Es una métrica importante para evaluar la calidad y confiabilidad de una red, especialmente en entornos inalámbricos o con condiciones de señal débiles.

En redes inalámbricas, el PRR puede verse afectado por diferentes factores, como la distancia entre el emisor y el receptor, las interferencias en el canal, la atenuación de la señal, la congestión de la red, entre otros. Para medir el PRR, se envían paquetes de prueba a través de la red y se registra cuántos son recibidos correctamente.

2.7. Hardware y Software

A continuación, se presenta una descripción del principal componente utilizado y las herramientas empleados a lo largo del desarrollo del trabajo de titulación.

2.7.1. Raspberry Pi

La Raspberry Pi es una serie de SBC basada en un ordenador pequeño y compacto, lo que significa que todos los componentes esenciales para su funcionamiento, como el procesador, memoria, puertos de entrada y salida, se encuentran en una sola placa.

Esta plataforma de procesamiento de datos se basa en un procesador ARM, una ranura para tarjetas microSD para almacenamiento y ejecuta una variedad de sistemas operativos, incluidos Linux (Raspbian, Ubuntu, etc.) y Windows 10 IoT Core. Además, cuenta con puertos USB, HDMI, Ethernet, Wi-Fi, Bluetooth, y una interfaz MIPI que puede conectarse a una serie de cámaras diferentes, además de un conjunto de pines GPIO [36, 37]. Los componentes que forman parte de Raspberry Pi se presentan en la Figura 2.12.

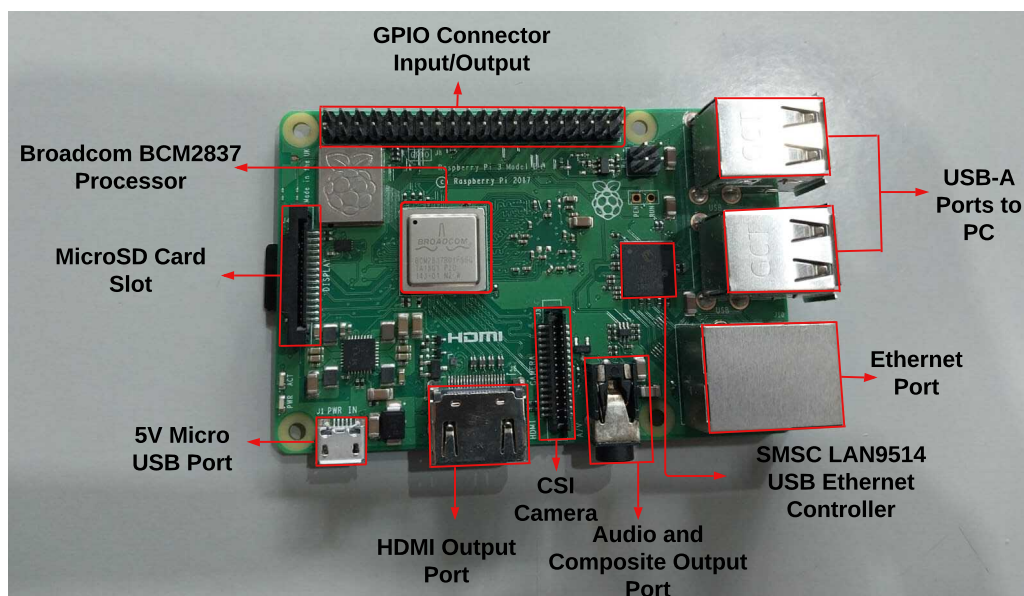


Figura 2.12: Raspberry Pi
modelo 3B+

En el Anexo A se presenta una descripción más detallada de las características técnicas de este dispositivo.

2.7.2. Sistema operativo

Raspbian es un Operating System (OS) gratuito con una distribución Linux basado en Debian, es versátil y confiable que ofrece una plataforma sólida para el desarrollo de proyectos en la Raspberry Pi [38]. Está diseñado para funcionar en procesadores de arquitectura de 32 bits, pero desde la serie 3B+ o posteriores tienen soporte para ejecutar sistemas operativos de 64 bits.

Raspbian ofrece un conjunto integral de herramientas y bibliotecas diseñadas para agilizar el desarrollo y la programación en la Raspberry Pi. Además, cuenta con el entorno de escritorio Lightweight X11 Desktop Environment (LXDE) como interfaz de usuario predeterminada, brindando una experiencia gráfica intuitiva y liviana. Pero también ofrece un potente entorno de con54sola que permite a los usuarios interactuar con el sistema mediante comandos de texto. La consola proporciona una forma eficiente de administrar y configurar la Raspberry Pi sin necesidad de utilizar una interfaz gráfica.

2.7.3. Herramientas para análisis de red

A continuación, se presenta una breve descripción de las herramientas utilizadas en el análisis del tráfico de red y comportamiento del canal de comunicación:

- Fast Forward Moving Picture Experts Group (FFMPEG) [39] es una biblioteca de software y conjunto de herramientas de línea de comandos altamente versátil y de código abierto para la grabación, conversión y transmisión de contenido multimedia. Tiene soporte para decodificación y codificación de alta calidad. Ofrece una variedad de opciones y filtros avanzados que permiten ajustar y optimizar la calidad y el tamaño de los archivos multimedia.
- Tcpcap [40] permite capturar y analizar de forma detallada el tráfico de la red en tiempo real. Emplea libpcap para acceder a la interfaz de red para la captura de paquetes y proporciona una amplia gama de opciones y filtros para especificar protocolos, direcciones IP, puertos y otros criterios de filtrado. Los paquetes capturados se pueden guardar en archivos para un análisis posterior, además ofrece opciones visualización y decodificación de los datos capturados.
- Tcpstat [41] es una herramienta de análisis de paquetes que se utiliza en conjunto para filtrar y analizar eficientemente el tráfico de red capturado. Al procesar archivos de captura generados permite aplicar filtros personalizados según criterios como direcciones IP, puertos y protocolos, para obtener estadísticas específicas sobre el tráfico seleccionado. Proporciona información clave, como el número total de paquetes capturados, el tamaño promedio de los paquetes y la distribución del tráfico por protocolo.
- Wireshark [42] es una herramienta de análisis de protocolos de red altamente versátil y potente. Proporciona una amplia gama de características, desde la captura y el análisis exhaustivo de paquetes hasta el filtrado avanzado, estadísticas y gráficos. Brinda

funciones avanzadas como filtrado flexible, generación de estadísticas detalladas y reconstrucción de flujos de datos.

- Iperf3 [43] es una herramienta que se emplea para realizar pruebas de ancho de banda, latencia y pérdida de paquetes en una red. Permite generar tráfico TCP y UDP, proporcionando información detallada sobre la velocidad de transferencia de datos entre dos puntos en una red. Se ejecuta en a línea de comandos y ofrece diversas opciones de configuración para adaptarse a diferentes escenarios de prueba.

2.8. Conclusiones

Los sistemas BSS se han convertido en una opción de movilidad cada vez más popular en los centros urbanos densamente poblados en los últimos años. Estos sistemas proporcionan una alternativa sostenible de transporte que puede mejorar la infraestructura y el transporte de las ciudades y a su vez tener beneficios económicos para las personas y las ciudades. Además, la promoción de sistemas de bicicletas compartidas como parte del transporte multimodal permite a las personas cambiar fácilmente entre el transporte público y la bicicleta, lo que se traduce en un servicio ambiental que apoya la modernidad y la individualidad de la ciudad.

Los ITS han evolucionado y se han convertido en una herramienta crucial para mejorar la calidad de los sistemas de transporte. Han permitido la modernización del control, la información y la comunicación en el tráfico, lo que se traduce en mejoras en el rendimiento, la eficiencia, la seguridad y la reducción de la contaminación. La implementación exitosa de los ITS depende de la armonización e integración de soluciones individuales a través de una arquitectura común y de la definición de estándares adecuados para cada región. Los ITS seguirán evolucionando y contribuyendo a la mejora del transporte en todo el mundo.

Las redes Ad-Hoc ofrecen una solución novedosa para la conectividad de usuarios sin depender de condiciones preestablecidas, ya sea desde una perspectiva lógica o de infraestructura. Aunque tienen el potencial de ofrecer un escenario de conectividad y movilidad total entre todos los dispositivos autónomos, aún existen limitaciones tecnológicas y técnicas que deben superarse para que estas redes sean de uso generalizado. En cualquier caso, las redes Ad-Hoc siguen evolucionando y mejorando, lo que nos permite esperar una mayor madurez y eficiencia en el futuro.

En los últimos años, las redes móviles han experimentado un rápido progreso y han abierto varias posibilidades para las redes Ad-Hoc. Las MANET son grupos de nodos móviles in-

alámbricos que forman una red Ad-Hoc descentralizada. Se han diseñado diversos protocolos Ad-Hoc para un enrutamiento preciso, rápido y confiable, pero estos protocolos aún enfrentan limitaciones inherentes a las estructuras de red cambiantes, el alto consumo de energía al emplear baterías y el ancho de banda limitado. A medida que la tecnología continúa avanzando, se espera que se superen estas limitaciones y se aprovechen al máximo las posibilidades de las redes Ad-Hoc.

Con el creciente aumento del tráfico multimedia y el desarrollo constante de las tecnologías de telecomunicaciones, resulta fundamental mejorar las técnicas de gestión del tráfico. Las aplicaciones que transportan audio y vídeo por una red requieren mayor ancho de banda que los datos de texto. El tráfico de audio se transmite de forma digitalizada que depende de factores como la tasa de muestreo, la profundidad de bits y la complejidad del audio con lo cual se vuelve sensible al tiempo. Mientras que el tráfico de datos es insensible al retraso de entrega puesto que los datos pueden llegar al destino en cualquier instante y depende de los factores del tamaño del mensaje y el intervalo de tiempo entre llegadas.

Estado del Arte

En el desarrollo de una ciudad inteligente y sostenible, mejorar el transporte es un componente fundamental e imprescindible para potenciar la calidad de vida de sus habitantes. En tal sentido, la implementación a gran escala de los Bike Sharing Systems (BSS) en diversas ciudades del mundo ha sido adoptada debido a que estos sistemas persiguen objetivos de movilidad eficiente, sostenible y amigable con el medio ambiente.

A medida que la tecnología ha avanzado y la necesidad de movilidad se ha vuelto cada vez más importante, las comunicaciones inalámbricas han evolucionado significativamente. En este contexto, las redes Mobile Ad-Hoc Network (MANET) han surgido como una solución alternativa debido a su capacidad para integrarse con otras tecnologías como Wi-Fi, ZigBee, Bluetooth y WAVE [44]. Sin embargo, para garantizar una comunicación confiable y eficiente en entornos extremo a extremo, es crucial considerar el rendimiento de las redes Ad-Hoc y el rol principal que desempeñan los protocolos de enrutamiento [45].

3.1. Soluciones de movilidad basada en BSS

Un BSS facilita el acceso a otros medios de transporte público y contribuyen a reducir el tráfico y las emisiones contaminantes [46]. Estos sistemas ofrecen movilidad flexible, reducen la congestión y fomentan la actividad física [47]. Los gobiernos locales desempeñan un papel fundamental al impulsar políticas sostenibles y brindar apoyo a las empresas operadoras de BSS [48].

Los BSS han evolucionado tecnológicamente y actualmente se encuentran en su cuarta y quinta generación, integrando mejoras para facilitar el uso compartido e incorporar bicicletas eléctricas [49]. Empresas como Ofo y Mobike han sido pioneras en sistemas sin estaciones fijas, permitiendo a los usuarios estacionar las bicicletas en cualquier lugar [50].

En ciudades como Hangzhou, el sistema Hangzhou public bicycle (HZBike) destaca por su amplia red, tecnología avanzada y bajos costos para los usuarios [51, 52], con estaciones fijas separadas a 300 metros para facilitar el estacionamiento. Para Beijing, Ofo es la empresa líder ha experimentado una expansión significativa, contando con millones de usuarios en China y otros países [52–54]. Asimismo, Mobike ha ganado popularidad y ha contribuido a evitar emisiones de dióxido de carbono significativas [53, 54] principalmente en Shanghái.

El gobierno japonés ha sido activo en promover el uso de los (BSS) como una opción sostenible para reducir el uso de automóviles y disminuir las emisiones de Carbon Dioxide (CO₂)

[48, 55]. Desde 2011, los BSS han experimentado un notable crecimiento en ciudades como Yokohama, Koto, Sendai, Chiyoda y Minato. En 2017, se registraron más de 5,600 bicicletas disponibles en todo el país, con 250,000 miembros y 521 estaciones de acoplamiento. Además, se propone aumentar el número de estaciones a 90, lo que podría reducir anualmente alrededor de 3.1 a 3.8 mil toneladas de emisiones de CO₂ [48].

Los BSS han sido ampliamente adoptados en numerosos países tras su éxito en las ciudades chinas, destacándose por mejorar el transporte y contribuir a la preservación del medio ambiente. En Polonia, tanto Varsovia como Cracovia cuentan con sistemas de bicicletas compartidas. En Varsovia, los BSS son parte del transporte público organizado por la Dirección Municipal de Carreteras y ocupan el cuarto lugar en Europa en términos de sistemas de transporte compartido, siendo NextBike Polska el operador dominante [53, 56].

En Cracovia, la empresa Wavelo, operada por BikeU, permite a los clientes tomar y devolver bicicletas en diferentes estaciones, y ha demostrado ser una herramienta efectiva para mejorar la calidad del aire y la condición física de los usuarios [57]. Durante 2018, el uso de bicicletas urbanas redujo las emisiones de CO₂ en más de 300,000 kg y los usuarios quemaron más de 90 millones de kilocalorías en sus desplazamientos en bicicleta [57].

En Estados Unidos desde 2000 se ha invertido en infraestructuras y políticas favorables para bicicletas, lo que ha aumentado su uso para desplazamientos. En 2010, se inauguró el BSS público más grande y largo del mundo, el Capital Bikeshare System (CBS), con más de 5,000 bicicletas y 600 estaciones en siete jurisdicciones de Washington DC [47, 58].

En Nueva York, el sistema CitiBike ha tenido beneficios notables, ahorrando 13,370 toneladas de petróleo y reduciendo 30,070 toneladas de CO₂ y 80 toneladas de NO_x durante sus primeros tres años de operación. Estos ahorros fueron más notorios durante las horas pico de la mañana y tarde, cuando el uso de bicicletas compartidas era más intenso y el tráfico vehicular era mayor. Estos ahorros se traducen directamente en emisiones vehiculares ahorradas de 0,2 a 2,0 toneladas de CO₂ por año.

3.2. Comparación de los protocolos de enrutamiento OLSR y B.A.T.M.A.N.

La función principal de los protocolos en redes inalámbricas es establecer rutas eficientes y confiables para la transmisión de datos a través de múltiples saltos. Existen diferentes tipos de protocolos, como los proactivos, reactivos e híbridos. Sin embargo, no existe un protocolo totalmente adecuado para todas las situaciones, por lo tanto, es crucial identificar las diferen-

cias y similitudes entre ellos para poder comparar, combinar o seleccionar el más apropiado según el escenario específico [59].

En este estudio, se examinarán los resultados de diferentes investigadores que han evaluado los protocolos proactivos OLSR y B.A.T.M.A.N., con el objetivo de realizar una comparación exhaustiva entre ambos y determinar sus características distintivas en experimentos simulados y reales.

En la selección de protocolos de red, es crucial tomar en cuenta distintas métricas como el throughput, delay y la pérdida de paquetes. Además, del manejo de sus tablas de enrutamiento. En el caso de los protocolos proactivos las tablas de enrutamiento se actualizan de forma continua ante cualquier cambio en los enlaces de la red [60].

En un estudio reciente [61], se evaluaron varios protocolos para redes en malla completa y multisalto, considerando el tráfico TCP y UDP. Los resultados indicaron que B.A.T.M.A.N. tuvo un mejor throughput que el protocolo OLSR, siendo los valores promedio de 648.16 Kbps y 491.33 Kbps, respectivamente. En el caso de una red con topología de malla completa, en la que todos los nodos están interconectados directamente, los resultados fueron de 684.45 Kbps para B.A.T.M.A.N. y 582.38 Kbps para OLSR. Sin embargo, se observó una disminución en el throughput al implementar TCP en comparación con UDP, tanto para OLSR como para B.A.T.M.A.N.. En conclusión, los autores pudieron establecer una relación inversa entre la pérdida de paquetes y el throughput, donde al disminuir una, el otro aumenta.

En el estudio realizado en [44], se presentaron los resultados obtenidos para el delay del procesamiento y el proceso de transición que es por el cual los nodos externos son reconocidos por una red, para los protocolos OLSR y B.A.T.M.A.N.. El protocolo B.A.T.M.A.N. muestra un delay bastante alto de 0,127453889 s debido al envío de paquetes a otros nodos antes de recibir la respuesta ack, mientras que en OLSR el delay es de 0.001336813 s.

Además, para el proceso de transición los autores lograron determinar que la distancia máxima de comunicación, fue de aproximadamente 135 m para el primer protocolo y 140 m para el segundo. También, se midió el delay en la transición cuando el nodo intermedio entra en la red, obteniendo 0,000030851 s para OLSR y 0,000038403 s para B.A.T.M.A.N..

En [62] se compararon los protocolos OLSR y B.A.T.M.A.N., donde se evaluaron tres métricas: probabilidad de entrega, latencia promedio y jitter. Se realizó una variación en el tamaño de los datos enviados, desde 1 Mb hasta 2 Mb, con el fin de analizar el throughput de los protocolos.

En relación a la probabilidad de entrega, se encontró que B.A.T.M.A.N. presentó un mejor

rendimiento en ciertos nodos al aumentar el tamaño de los datos. Sin embargo, en general, B.A.T.M.A.N. mostró una probabilidad de entrega más constante en todos los nodos, aunque apenas más baja comparada con OLSR.

En cuanto a la latencia promedio, B.A.T.M.A.N. tuvo un valor más alto y distribuido uniformemente. Por otro lado, al incrementar el tamaño de los datos a 2 Mb, OLSR mostró un aumento en la latencia debido a la selección desequilibrada de rutas y acumulación de datos en algunos nodos.

Ambos protocolos mostraron un incremento en el jitter cuando se aumentó el tamaño de los datos, pero OLSR tuvo cambios bruscos en esta métrica. En resumen, se puede concluir que ambos protocolos mostraron un buen throughput con datos de 1 Mb. No obstante, se observaron anomalías al aumentar el tamaño de los datos a 2 Mb, especialmente en el caso de OLSR.

En [63] se simularon distintos escenarios variando la cantidad de nodos, el radio de transmisión, velocidad de desplazamiento de los nodos y la longitud del mensaje. Los resultados obtenidos mostraron que los protocolos proactivos presentaron un mejor desempeño en comparación con los reactivos en términos de delay de extremo a extremo y número de saltos en los tres primeros escenarios evaluados. También se observó una mejora en el rendimiento de la red al aumentar el radio de transmisión a 200 m en donde las métricas evaluadas dieron mejores resultados.

Por otro lado, se encontró que aumentar la velocidad de los nodos no tuvo un impacto significativo en el delay de extremo a extremo, aunque sí disminuyó la eficiencia del Packet Delivery Ratio (PDR) y el conteo de saltos, que se refiere al número de saltos que los paquetes de datos necesitan para llegar a sus destinos. Además, al incrementar la longitud del mensaje a 500 bytes, no afectó el throughput de la red. En general, el comportamiento de B.A.T.M.A.N. y OLSR fue muy similar, con algunas mejoras particulares en ciertos puntos de los escenarios evaluados.

En otro estudio simulado se trabajó con un rango de 50 a 250 nodos. En este caso OLSR presentó una mayor pérdida de paquetes y una fase de convergencia más lenta en comparación con B.A.T.M.A.N., debido a la función de almacenamiento en búfer. Cabe recalcar que la métrica de pérdida de paquetes aumenta con la cantidad de nodos. En cuanto a la sobrecarga de enrutamiento, OLSR resultó más costoso que B.A.T.M.A.N. [64].

En el estudio presentado en [65], se evaluó la capacidad de recuperación de la tecnología de

blockchain en el contexto de las aplicaciones de IoT. blockchain es una base de datos distribuida que utiliza una cadena de bloques encriptados, mecanismos de consenso y comunicación entre pares. Al combinarlo con IoT, se crea un sistema poderoso que asegura la recopilación de datos de dispositivos y proporciona una seguridad mejorada. En este estudio se utilizaron nueve nodos empleando B.A.T.M.A.N. y OLSR en escenarios estáticos y móviles. Además, el movimiento del receptor provocó tres ocasiones de recuperación de la comunicación. Los resultados indican que B.A.T.M.A.N. presenta una mejor capacidad de recuperación en comparación con OLSR, siendo de un 74,9 % más rápida en escenarios estáticos y un 73,9 % para escenarios móviles. Con B.A.T.M.A.N. solo se transmite paquetes OGM para sondear sus nodos vecinos, mientras que con OLSR se requiere que el remitente conozca la topología de toda la red.

Por otro lado, para una red más grande con movilidad de nodos, B.A.T.M.A.N. también superó a OLSR y pudo recuperar la cadena de bloques en 6.22 s, 5.92 s y 5.95 s, siguiendo las diferentes etapas de recuperación, respectivamente.

Por último, en [59] se exponen los resultados de una evaluación experimental utilizando nodos Raspberry Pi. En esta evaluación se midió la recepción de mensajes, la latencia y la sobrecarga de comunicación en cuatro escenarios diferentes, con y sin fallas. Para los escenarios sin fallas, se seleccionaron nodos que no fueran el destino de los mensajes, con el fin de evitar afectar las mediciones.

Los resultados alcanzados indican que la confiabilidad de ambos protocolos fue del 85 %. Sin embargo, cuando se presentaron fallas en dos nodos, se observó que B.A.T.M.A.N. mostró un valor menor de confiabilidad debido a la aparición de bucles de enrutamiento de corta duración. Además, se registró una mayor latencia (35 ms) debido a estos mismos bucles de enrutamiento, mientras que OLSR mantuvo esta métrica por debajo de los 30 ms.

En cuanto a la sobrecarga de comunicación, se encontró que OLSR presentó el valor más alto debido a su estrategia de enrutamiento que difunde mensajes de control no programados al cambiar la topología. Por otro lado, B.A.T.M.A.N. tuvo una disminución en la sobrecarga de comunicación a medida que menos nodos difundían mensajes de control ante el aumento en la cantidad de fallas.

En la Tabla 3.1 se muestra un resumen de los resultados obtenidos en trabajos previos analizados.

Tabla 3.1: Resumen de Resultados de algunos Trabajos.

Trabajo	Protocolo	Tipo de Escenario	Métrica Evaluada	Resultado
[61]	OLSR	Multisalto	throughput	491.33 Kbps
	B.A.T.M.A.N.			648.16 Kbps
	OLSR	Malla Completa		582.38 Kbps
	B.A.T.M.A.N.			684.45 Kbps
[44]	OLSR	Real (nodos externos)	delay del procesamiento	0.127453889 s
	B.A.T.M.A.N.	Real (nodo intermedio)		0.001336813 s
	OLSR		delay en la transición	0.000030851 s
	B.A.T.M.A.N.			0.000038403 s
	OLSR		Distancia máxima	135 m
	B.A.T.M.A.N.	140 m		
[62]	OLSR	Simulación	Probabilidad de entrega	B.A.T.M.A.N. mostró una probabilidad de entrega más constante en todos los nodos, aunque apenas más baja comparada con OLSR .
	B.A.T.M.A.N.		jitter	Al aumentar el tamaño de los datos OLSR tuvo cambios bruscos
	OLSR			
	B.A.T.M.A.N.			
[44]	OLSR	Real	Latencia (falla dos nodos)	30 ms
	B.A.T.M.A.N.			35 ms
[64]	OLSR	Simulación	Pérdida de paquetes	OLSR presentó mayor pérdida de paquetes en comparación con el protocolo B.A.T.M.A.N. y más aún cuando se aumenta el número de nodos
	B.A.T.M.A.N.			

3.3. Conclusiones

Los BSS desempeñan un papel crucial en la promoción de la movilidad sostenible ofreciendo a los usuarios una serie de beneficios financieros, de salud y ambientales. Es importante destacar que los sistemas BSS también desempeñan un papel clave en la conexión de la “última milla” en el transporte urbano, especialmente en ciudades como Beijing y Shanghai, donde la mayoría de los viajes comienzan o terminan en estaciones de autobús y metro.

Según las investigaciones realizadas, tanto OLSR como B.A.T.M.A.N. ofrecen opciones viables para el enrutamiento en redes con nodos móviles. La elección adecuada dependerá de los requisitos específicos del sistema y de las prioridades establecidas en términos de rendimiento, eficiencia y confiabilidad. Un análisis cuidadoso de las características y el rendimiento de cada protocolo permitirá seleccionar la opción más adecuada para implementarse en un BSS determinado.

Por último, no existen muchas investigaciones experimentales realizadas en condiciones reales que permitan evaluar a los protocolos OLSR como B.A.T.M.A.N. considerando factores adicionales, como la escalabilidad, la capacidad de adaptación a cambios en la topología de la red, la resistencia a fallas y la interoperabilidad con otros sistemas de transporte y comunicación.

Metodología

En este capítulo se describe en detalle el proceso de instalación, configuración e implementación de la red Mobile Ad-Hoc Network (MANET). En primer lugar, se presenta la arquitectura general del sistema, destacando las diferentes capas que la conforman. Cada una de estas capas juega un papel crucial en el establecimiento de la comunicación y el intercambio de datos en la red.

En la capa física, se detallan los componentes que forman parte de cada uno de los nodos de la red. Estos componentes incluyen dispositivos inalámbricos, como tarjetas Wi-Fi y antenas, así como otros elementos necesarios para su integración en las bicicletas. Además, se explica el acoplamiento de los nodos a las bicicletas.

A continuación, se aborda la capa de red, donde se exponen las configuraciones necesarias para activar los protocolos Optimized Link State Routing (OLSR) y Better Approach to Mobile Ad-Hoc Networking (B.A.T.M.A.N.). Se incluye una tabla con los parámetros correspondientes y las direcciones Internet Protocol (IP) utilizadas para la comunicación entre los nodos. Además, se presenta la selección de los escenarios donde se ejecutan las pruebas para caracterizar la red. Estas pruebas permiten seleccionar el canal, el bitrate máximo de las tarjetas inalámbricas y el alcance máximo.

Por último, se abordará la capa de aplicación, que desempeña un papel importante en la funcionalidad y utilidad de la red. Se describirá el proceso de sincronización de todos los nodos mediante el uso de Network Time Protocol (NTP), asegurando que los dispositivos estén alineados en tiempo y permitiendo una comunicación eficiente. Una vez establecidos los parámetros antes mencionados, se determinará el bitrate en el canal de comunicación, lo que permitirá definir los parámetros para el tráfico de audio utilizados en las pruebas. Además, se describirá el desarrollo del servidor web y la aplicación móvil.

4.1. Descripción de la arquitectura

En esta sección se describe la estructura de la arquitectura en la creación de una red MANET, con el objetivo de comparar dos protocolos proactivos, cada nodo corresponde a una bicicleta con una plataforma Single Board Computer (SBC) y la conexión con el smartphone del usuario. La arquitectura empleada se compone de varias capas que se describe a continuación:

- En la capa física, se utiliza la plataforma embebida de la Raspberry Pi 3 B+ junto con la antena inalámbrica para establecer la conectividad entre los nodos de la red.

- En la capa de red, se implementa la red Ad-Hoc utilizando el estándar IEEE 802.11, que permite la comunicación entre los nodos en este modo. Este estándar se seleccionó para aprovechar su amplia disponibilidad, compatibilidad con dispositivos de usuario y altas tasas de bitrate, característica requerida para un tráfico de tipo multimedia. Se habilita el intercambio de paquetes por medio de los protocolos de enrutamiento proactivos OLSR y B.A.T.M.A.N.. Los protocolos de enrutamiento se evalúan y comparan bajo condiciones de movilidad y tráfico de usuario (mensajes de texto y audio).
- La capa de aplicación se encarga de la comunicación a nivel de mensajes de audio y texto. Se utiliza para enviar mensajes entre los nodos de la red, lo que permite la transferencia de datos y la interacción entre los diferentes dispositivos. Los mensajes pueden ser tanto de audio como de texto, lo que proporciona flexibilidad en la comunicación. Se podrá conectar a un servidor para recibir mensajes informativos en Broadcast. Asimismo, la aplicación móvil permitirá al usuario enviar/recibir mensajes de audio y visualizar los mensajes de texto enviados desde el servidor.

Para la evaluación del sistema se considerarán las siguientes métricas de red: Delay, Throughput y Packet Reception Ratio (PRR), adicionalmente se realiza el análisis de consumo energético de la interfaz de red mediante un sensor de corriente. En la Figura 4.1, se presenta la arquitectura del sistema de movilidad.

El diagrama de la metodología utilizada para evaluar la red se encuentra detallada en el Anexo B en la Figura 7.5, la cual presenta un diagrama descriptivo de las distintas etapas llevadas a cabo durante su configuración y evaluación. Este enfoque metodológico fue cuidadosamente diseñado con el objetivo de garantizar una implementación precisa y un análisis riguroso de la red.

4.2. Capa física

En esta sección, se abordarán dos aspectos fundamentales. En el primero se describirán los componentes que forman parte del nodo, detallados en la Subsección 4.2.1. Y en segundo lugar se explica la elección de la estructura de acoplamiento que se instalará en el medio de transporte sostenible (bicicleta eléctrica), tal como se indica en la Subsección 4.2.2.

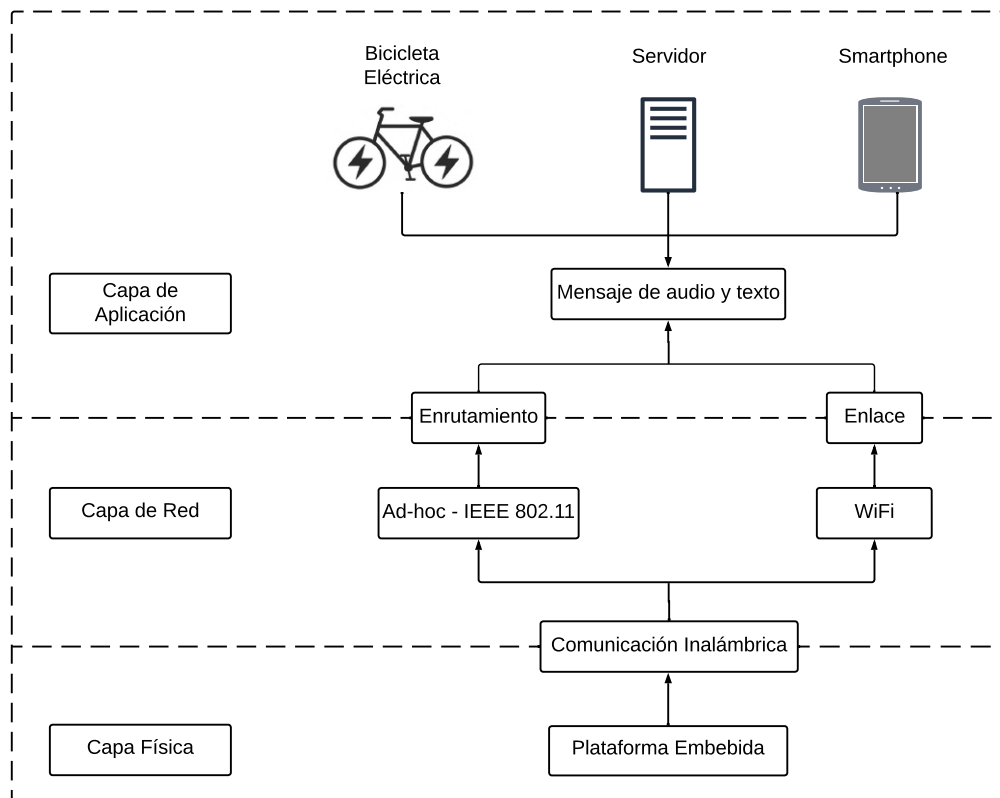


Figura 4.1: Arquitectura del sistema de movilidad propuesto

4.2.1. Componentes del nodo

El nodo consta de una Raspberry Pi 3B+ con el sistema operativo Raspberry Pi OS Lite (Legacy). Esta versión es más ligera en comparación con otras distribuciones, ya que elimina la interfaz gráfica de usuario y las aplicaciones preinstaladas. Esto ofrece un menor consumo de recursos y permite un mayor control y personalización del sistema. La instalación y configuración completa se detallan en el Anexo C.

A los puertos GPIO de la Raspberry Pi se conecta el sensor de corriente INA219, que se emplea para medir el consumo energético de una interfaz inalámbrica externa conectada a través de USB. Se ha optado por la antena AWUS036NH debido a su sencilla configuración para trabajar en modo Ad-Hoc en la banda de 2.4 GHz. Además, esta antena cumple con los estándares IEEE 802.11 b/g/n, ofreciendo velocidades de hasta 150 Mbps y una potencia de transmisión de hasta 2000 mW.

Los componentes antes mencionados se integran dentro de una caja que se acopla en la bicicleta eléctrica en específico el modelo Ecomove Electric Bikes TIV. La batería de iones de litio de 36 V y 7,8 Ah [66] de la bicicleta se emplea como fuente de alimentación del nodo por

medio de un cable USB A a micro USB. Los detalles técnicos de todos los componentes se detallan en el Anexo A.

4.2.2. Acoplamiento del nodo

La elección de la estructura de acoplamiento del nodo se seleccionó cuidadosamente para su instalación en la bicicleta. Proporciona una contención segura para los diferentes elementos del nodo, incluyendo el sistema SBC, la tarjeta inalámbrica y el sensor de corriente.

La distribución estratégica de los elementos dentro de la caja es un aspecto clave en el diseño. Se garantizó que la tarjeta inalámbrica tuviera libertad de movimiento para su antena, y el espacio suficiente para conectar el sensor de corriente entre la Raspberry Pi y la tarjeta inalámbrica. La caja cuenta con unas dimensiones interiores de 18 cm x 11.5 cm x 9 cm (largo x ancho x alto), que se ajusta perfectamente a los requisitos del sistema y se adapta perfectamente a la bicicleta, sin comprometer la comodidad y movilidad del ciclista durante su uso.

En la Figura 4.2 se puede apreciar como se encuentra acoplado el nodo dentro de la caja.

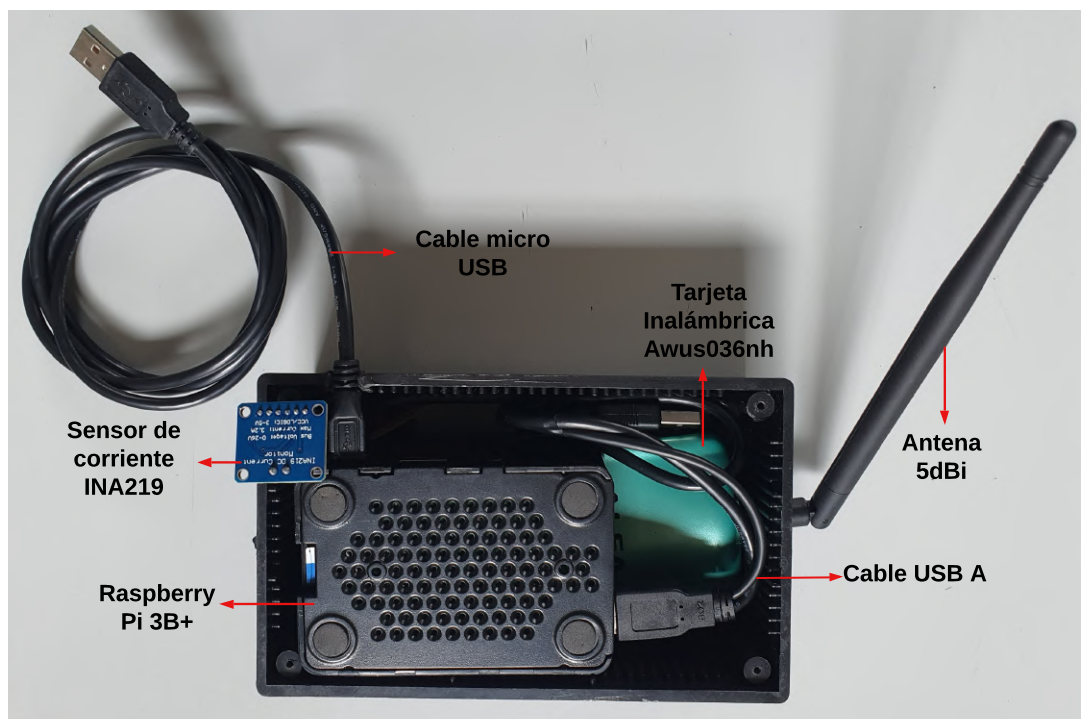


Figura 4.2: Dispositivos empleados en el nodo Ad-Hoc

En la Figura 4.3 se muestra el diagrama de conexión de los distintos componentes del nodo. Como se puede observar, es necesario conectar los pines de alimentación del sensor INA219

a los GPIO de la Raspberry Pi. Además, se deben conectar los pines I2C para permitir la captura y envío de las muestras de corriente. Por último, se conectan los pines Vin+ y Vin- a la antena inalámbrica. Esta conexión se realiza de manera similar a la de un amperímetro, ya que permite evaluar el flujo de carga eléctrica y activar los protocolos de enrutamiento.

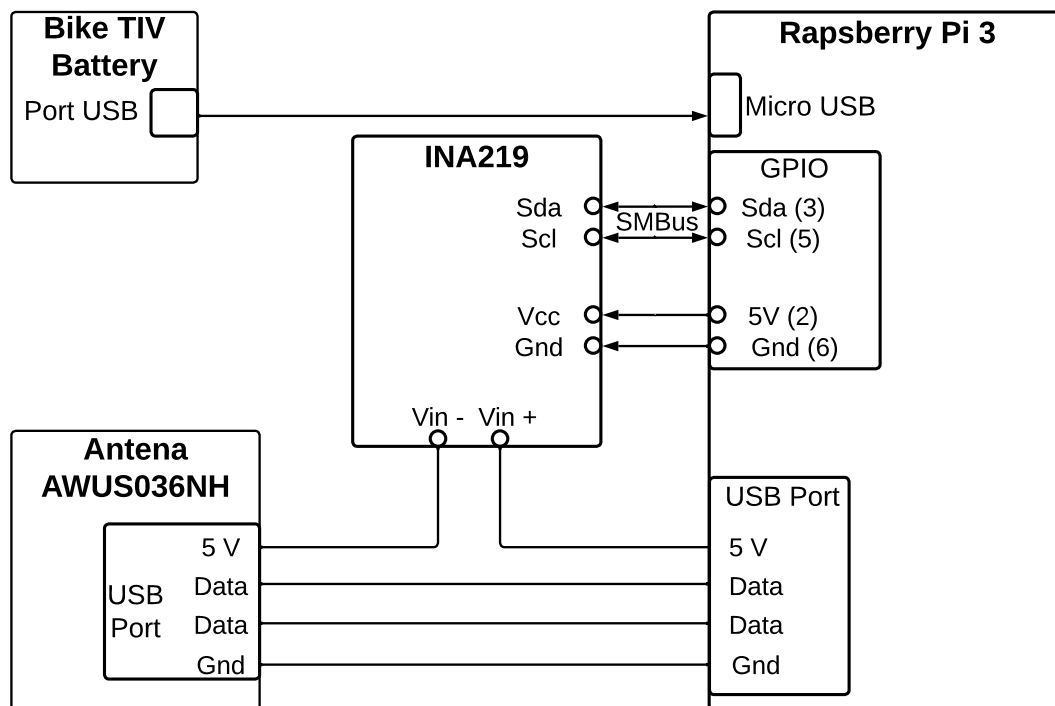


Figura 4.3: Diagrama de conexión del sensor INA219

4.3. Capa de red

En la Subsección 4.3.1 se presenta los diferentes parámetros, direcciones IP y MAC para los protocolos OLSR y B.A.T.M.A.N.. En la Subsección 4.3.2, se describe la selección de los escenarios en los cuales se llevarán a cabo los experimentos para la parametrización de la red. Finalmente, en la Subsección 4.3.3, se explican el proceso para seleccionar el canal a utilizadas y las métricas para parametrizar la red.

4.3.1. Instalación y configuración de los protocolos de enrutamiento

La capacidad de enrutamiento de cada nodo se ha logrado mediante la instalación y configuración de los protocolos OLSR y B.A.T.M.A.N.. Para el protocolo OLSR, se empleó el daemon olsrd-0.9.0.3 desarrollado por OLSR.org project [67]. Por otro lado, se utilizó el daemon B.A.T.M.A.N. Advanced desarrollado por Open-Mesh.org [68] para el protocolo B.A.T.M.A.N..

La elección de estos protocolos ha sido fundamental para asegurar un enrutamiento confiable y eficiente en cada nodo de la red evaluada, permitiendo un flujo óptimo de datos y una comunicación fluida entre los dispositivos.

En la Tabla 4.1 se muestran los parámetros por defecto correspondientes a los tiempos de transmisión de los paquetes HELLO y Originator para los protocolos OLSR y B.A.T.M.A.N., respectivamente.

Tabla 4.1: Parámetros por defecto de los protocolos OLSR y B.A.T.M.A.N.

	OLSR		B.A.T.M.A.N.
HELLO_INTERVAL	2 seg	ORIG_INTERVAL	1 seg
REFRESH_INTERVAL	2 seg	ELP_INTERVAL	0.5 seg
TC_INTERVAL	5 seg		
MID_INTERVAL	TC_INTERVAL		
MID_INTERVAL	TC_INTERVAL		

En el Anexo D, se ofrece una descripción detallada de la instalación y configuración realizada utilizando las direcciones IP de los nodos, las cuales se encuentran especificadas en las Tablas 4.2 y 4.3. Además, se proporcionan las direcciones MAC correspondientes a las tarjetas inalámbricas utilizadas.

Tabla 4.2: IPs utilizadas en los nodos para el protocolo B.A.T.M.A.N.

MAC BAT0	IP	Nodo
DC:A6:32:B9:0E:83	10.0.0.1	Servidor
00:C0:CA:98:63:3E	10.0.0.11	1
00:C0:CA:5A:27:8A	10.0.0.12	2
00:C0:CA:5A:27:87	10.0.0.13	3
00:C0:CA:98:63:4B	10.0.0.14	4

Tabla 4.3: IPs utilizadas en los nodos para el protocolo OLSR

MAC WLAN1	IP	Nodo
DC:A6:32:B9:0E:83	10.0.0.1	Servidor
00:C0:CA:98:63:3E	10.0.0.21	1
00:C0:CA:5A:27:8A	10.0.0.22	2
00:C0:CA:5A:27:87	10.0.0.23	3
00:C0:CA:98:63:4B	10.0.0.24	4

4.3.2. Elección del escenario para realizar los experimentos

La selección de los escenarios apropiados para llevar a cabo los experimentos es una parte fundamental de este trabajo. Con este fin, se ha decidido realizar las pruebas dentro del

campus Balzay de la Universidad de Cuenca. Este campus ofrece un entorno adecuado y representativo para evaluar el rendimiento de la red.

En la Figura 4.4, se puede apreciar la distribución geográfica del campus, lo cual proporciona una visión clara de las áreas donde se realizarán los experimentos. Esta elección estratégica asegura que los resultados obtenidos reflejen las condiciones reales en un entorno y contribuyan a un análisis significativo de la red.



Figura 4.4: Distribución del Campus Balzay

Basándose en esta distribución, se seleccionaron dos escenarios específicos para llevar a cabo los experimentos. A continuación, se describen detalladamente cada uno de ellos.

4.3.2.1. Primer escenario

El primer escenario seleccionado abarca la calle que pasa frente a la Micro-Red, así como los edificios aulario C y B (consulte la Figura 4.5). Este escenario se extiende por más de 250 metros y se eligió debido a sus características que permiten simular una ciclovía urbana de manera efectiva. La dinámica de movilidad de personas y vehículos en esta ubicación, junto con su topografía que incluye una curva, lo convierten en un entorno idóneo para una representación realista de una infraestructura similar en una zona urbana.



Figura 4.5: Escenario 1 Campus Balzay

4.3.2.2. Segundo escenario

Este escenario abarca la calle donde se lleva a cabo la actividad de tiro al arco, como se muestra en la Figura 4.6. Esta recta tiene una longitud de 90 metros. Se tiene la baja afluencia de peatones y las dimensiones rectas del área. Estas características proporcionan un entorno propicio para evaluar de manera precisa y controlada el rendimiento de la red en una situación con poca interferencia externa.



Figura 4.6: Escenario 2 Campus Balzay

4.3.3. Selección de parámetros para realizar los experimentos

Es importante tener conocimiento del estado del espectro de las redes interferentes en los escenarios seleccionados, por lo cual, se explica el método utilizado para elegir el canal adecuado. Además, se detalla el proceso de determinación del máximo bitrate y alcance, considerando los dispositivos a utilizar.

4.3.3.1. Selección del canal a utilizar en la red Ad-Hoc

Es esencial tomar en cuenta la elección del canal en la banda de 2.4 GHz, ya que esta frecuencia se divide en diferentes canales para evitar interferencias entre dispositivos. En el caso de los estándares de Wi-Fi más comunes, como 802.11 b/g/n, la banda de 2.4 GHz se divide en 14 canales. Sin embargo, la asignación y uso de estos canales varían según el país. En el contexto de Ecuador, la Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones (AR-COTEL) establece regulaciones que permiten el uso de 13 canales para redes inalámbricas. Cumplir con estas regulaciones es fundamental para asegurar un entorno inalámbrico eficiente y evitar posibles interferencias, lo cual garantiza una conexión estable y de calidad para los usuarios.

Con el objetivo de seleccionar el canal más adecuado, se realizó un escaneo de redes en los dos escenarios previamente mencionados. Para llevar a cabo este proceso, se desarrolló y ejecutó un script que permitió detectar la presencia de redes y generar un mapa de calor que reflejará los niveles de utilización en cada canal disponible.

4.3.3.2. Determinación del máximo bitrate de las tarjetas inalámbricas

Un aspecto crucial a considerar es la determinación del bitrate máximo de las tarjetas inalámbricas AWUS036NH, las cuales ofrecen diferentes niveles de velocidad en Mbps. Esta selección es fundamental para garantizar un rendimiento óptimo de la interfaz de red. En este contexto, se desarrolló un script que permite modificar de forma iterativa el bitrate de la interfaz haciendo uso del comando: `sudo iwconfig wlan1 rate "BITRATE"M >> output.txt`.

El comando anterior se ejecutó hasta 5 veces con el fin de forzar el valor de bitrate antes y después de configurar la tarjeta inalámbrica en modo Ad-Hoc. Además, se reinició la Raspberry Pi para eliminar cualquier configuración previa en cada incremento del bitrate.

El archivo de salida output.txt indica la lista de valores de bitrate aceptables por la tarjeta inalámbrica que no presentan el mensaje `.Error for wireless request "Set Bit Rate"(8B20)`. En tal sentido, de forma experimental se estableció que el valor de 54 Mbps es el más alto alcanzado para trabajar en modo Ad-Hoc. Esta elección proporciona un desempeño óptimo entre la tarjeta AWUS036NH y la Raspberry Pi 3B+. Por otro lado, se confía que la tarjeta se ha configurado con este valor dado que no se puede comprobar esta configuración mediante un comando cuando se activa el modo Ad-Hoc.

4.3.3.3. Determinación del máximo alcance

La determinación de la distancia máxima de transmisión que cada uno de los protocolos puede alcanzar, permite conocer hasta qué punto se mantendrá una comunicación óptima entre los nodos que conforman la red Ad-Hoc. Para llevar a cabo este experimento, dos nodos se ubicaron en posiciones fijas con incrementos de distancias de 10 metros.

Adicionalmente, se utilizó la herramienta de código abierto iperf3 [43]. Se utiliza una configuración de cliente-servidor, que se detalla a continuación:

- En el servidor se ejecuta y espera las conexiones entrantes del cliente. Una vez que se establece la conexión, el servidor comienza a enviar datos al cliente para evaluar el rendimiento de la red.

El comando usado es: `sudo iperf -s`.

- En el cliente se especifica la dirección IP o el nombre del servidor y el puerto al que se conectará. Se puede configurar diferentes parámetros como son la tasa de transferencia de datos y el protocolo de transporte. Los parámetros que se establecieron para esta prueba son:

- Tráfico UDP.
- Tiempo de duración de 10 s para cada experimento.
- bitrate con un valor de 200 Kbps.
- Número de repeticiones en cada distancia de 10.
- Formato para guardar resultados con JavaScript Object Notation (JSON).

Se eligió este valor de bitrate con el propósito de emular la transmisión de audio.

El comando utilizado es: `sudo iperf3 -c IP_SERVER -u -t 10 -b 200K -J >./dist_"POSICION" /"POSICION"_"REPETICION".json`

Una vez establecida la conexión entre el cliente y servidor, realiza un intercambio de datos con el fin de medir aspectos cruciales como el ancho de banda, la latencia y la pérdida de paquetes. Los principales parámetros utilizados en los comandos mencionados anteriormente se describen detalladamente en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4: Parámetros para lperf3

Parámetro	Descripción
-c, --client host	Especifica el host o dirección IP del servidor al que conectarse
-s, --server	Inicia lperf3 en modo servidor
-p, --port port	Especifica el número de puerto
-t, --time time	Establece la duración de la prueba en segundos
-b, --bandwidth bps	Limita el ancho de banda en bits por segundo
-u, --udp	Utiliza el protocolo UDP en lugar de TCP
-l, --length length	Especifica el tamaño del datagrama en bytes
-f, --format format	Establece el formato de los resultados (por ejemplo, Mbits, Kbytes)
-n, --bytes number	Especifica el número total de bytes a transmitir
-J archivo.json	Carga los parámetros de configuración desde un archivo JSON
-h, --help	Muestra la ayuda y la lista de parámetros disponibles

4.4. Capa de aplicación

En la Subsección 4.4.1, se describe la utilización de Network Time Protocol (NTP) para sincronizar los nodos. Posteriormente, se procede a determinar el bitrate en el canal mediante varios experimentos detallados en la Subsección 4.4.2. También se toma en cuenta la capacidad del canal 4.4.3 con múltiples saltos. La determinación de los parámetros de audio se presenta en la Subsección 4.4.4. Además, se describe la realización de las pruebas finales en conjunto con la aplicación web móvil, para lo cual se exponen los escenarios a evaluar en la Subsección 4.4.5. Finalmente, se presenta una explicación del desarrollo de la aplicación web móvil en 4.4.6.

4.4.1. Sincronización de nodos

Con el fin de mantener la sincronización precisa de los nodos, se ha instalado en cada dispositivo el Network Time Protocol (NTP), un protocolo ampliamente utilizado para la sincronización de tiempo en redes. Los nodos de la red se han configurado como clientes de NTP, lo que les permite obtener referencias de tiempo precisas de servidores NTP externos. Además, en el nodo servidor se ha modificado el archivo de configuración para habilitar tres grupos de direcciones de servidores NTP específicos para la región de Ecuador. Estos servidores, denominados pools, agrupan múltiples servidores NTP confiables en diferentes ubicaciones geográficas.

El uso de NTP garantiza que todos los nodos de la red estén sincronizados de manera precisa y consistente. Para obtener información detallada sobre la instalación y configuración del protocolo de sincronización, se hace referencia al Anexo E.

4.4.2. Determinación del bitrate en el canal

Para la determinación de esta métrica es necesario realizar un análisis del perfil de tráfico de audio bidireccional a diferentes intervalos de tiempo y con la utilización de varias herramientas que se detallan a continuación.

4.4.2.1. Perfil de tráfico de audio

El análisis del perfil de tráfico en el canal que se ha designado para utilizar, es importante puesto que proporcionará información valiosa sobre el comportamiento del tráfico en la red. Permitirá identificar los picos de demanda, detectar anomalías o problemas de rendimiento y planificar adecuadamente la capacidad de la red.

En este trabajo, se realizó un análisis exhaustivo del tráfico y comportamiento en el canal de comunicación. Para ello, se estableció una comunicación bidireccional entre dos nodos ubicados a una corta distancia, utilizando la herramienta ffmpeg [39]. Para capturar los paquetes en el canal, se utilizó tcpdump [40], luego los paquetes obtenidos fueron filtrados y analizados utilizando las herramientas tcpstat [41] y Wireshark [42].

El comando empleado para la transmisión es: `ffmpeg -f alsa -i plughw:1,0 -acodec aac -ac 1 -b:a 200k -f mpegts udp://IP_NODOx:PORT_NODOy`

Para la recepción se empleó: `ffplay -probesize 1000 udp://IP_NODOx:PORT_NODOx`

4.4.3. Prueba de capacidad del canal

Se utilizó iperf3 para el intercambio de datos en escenarios de múltiples saltos. Se varía el bitrate para evaluar la respuesta del canal en configuraciones de uno, dos y tres saltos. Los nodos se ubican a una distancia menor a la máxima distancia de transmisión con el fin de facilitar la logística de los experimentos. Por lo tanto, es necesario emplear filtros MAC para forzar los saltos en la comunicación. Con estos experimentos se evalúa el impacto del incremento del bitrate en el rendimiento y la calidad de la conexión.

Las pruebas se realizaron con cuatro nodos en una topología lineal de múltiples saltos. Además se utilizó la herramienta iptables, que permite administrar el filtrado de paquetes y las reglas de firewall en un sistema. Mediante esta herramienta es posible configurar y controlar el tráfico de red entrante y saliente, estableciendo reglas específicas para permitir o bloquear

diferentes tipos de tráfico basado en direcciones IP, puertos, direcciones MAC, protocolos y otras características.

El comando utilizado para aplicar un filtro basado en direcciones MAC es: `iptables -t raw -A PREROUTING -m mac --mac-source MAC_NODOx -j DROP`

Donde:

- `-t raw`: especifica la tabla raw que se utiliza para configurar reglas de paquetes antes de que sean procesados por las otras tablas de iptables.
- `-A PREROUTING`: agrega la regla a la cadena PREROUTING en la tabla raw, que se aplica a los paquetes justo antes de que se realice cualquier ruta o traducción de direcciones.
- `-m mac --mac-source MAC_NODOx`: utiliza el módulo MAC para hacer coincidir el paquete con la dirección MAC de origen especificada como MAC_NODOx.
- `-j DROP`: indica que la acción a tomar es descartar (DROP) los paquetes que coincidan con la regla.

Cada nodo se configuró de forma que pueda recibir tráfico solo por el vecino directo a este. En las Tablas 4.2 y 4.3 se presenta las direcciones MAC mediante las cuales se realiza el filtrado del tráfico. Por otro lado, en la Tabla 4.5, se detallan los filtros MAC empleados para cada nodo.

Tabla 4.5: Filtros MAC para aceptar o rechazar la comunicación en cada nodo

	Opción	Nodo			Opción	Nodo	
NODE 1	DROP	Node 3	Node 4		ACCEPT	Node 2	Server
NODE 2		Node 4	Server			Node 1	Node 3
NODE 3		Node 1	Server			Node 2	Node 4
NODE 4		Node 1	Node 2	Server		Node 3	
SERVER		Node 2	Node 3	Node 4		Node 1	

En la Figura 4.7 se muestra el diagrama de multi-saltos que representa la conexión entre los cuatro nodos utilizados. Este gráfico ilustra la ruta del tráfico cuando el nodo 1 es el emisor y los nodos restantes actúan como receptores. Por ejemplo, para establecer una comunicación entre el nodo 1 y el nodo 4 se requieren tres saltos. Es importante destacar que las direcciones MAC utilizadas en el protocolo OLSR se basaron en las proporcionadas por la antena. Mientras que para el protocolo B.A.T.M.A.N. se utilizaron las generadas por la interfaz bat0 (interfaz virtual que se crea para permitir el enrutamiento con el protocolo B.A.T.M.A.N.).

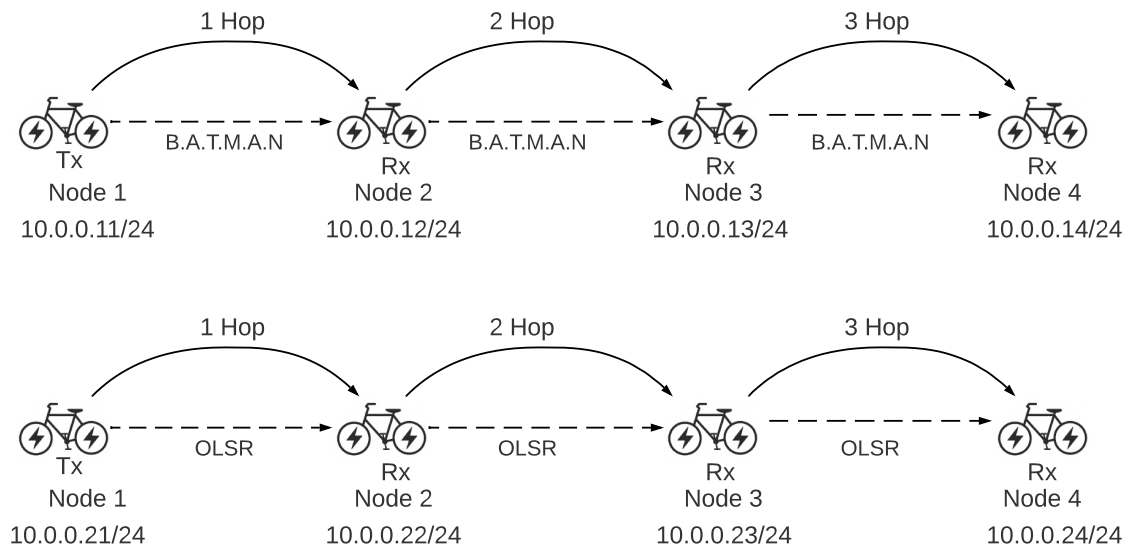


Figura 4.7: Diagrama de los nodos en multi-salto

4.4.4. Determinación de los parámetros de audio

La determinación de los parámetros adecuados para el envío de audio en la red Ad-Hoc se determinaron después de analizar los resultados obtenidos de los experimentos antes explicados.

Para el envío del audio se emplearon los siguientes parámetros:

- **bitrate:** este parámetro se determinó mediante experimentos de máximo alcance, perfil de tráfico y pruebas de capacidad de canal. El objetivo consistió en determinar el bitrate óptimo que garantice una transmisión eficiente sin afectar la calidad.
- **Códec:** la elección del formato de compresión de audio se debe a su capacidad para proporcionar una alta calidad de audio con una eficiencia de compresión mejorada.
- **Tasa de muestreo:** determina la cantidad de muestras de audio tomadas por segundo. Se seleccionó un valor apropiado que permita capturar con precisión y asegurar una reproducción fiel.
- **Tipo de canal:** se escogió de forma que se garantice una reproducción sencilla y eficiente sin la necesidad de transmitir y procesar audio en múltiples canales.
- **f32le:** este parámetro se refiere a la representación de punto flotante de 32 bits en el formato de audio. Se utiliza para garantizar una alta calidad y una representación precisa de las señales.

- Zero latency: es un ajuste que busca minimizar la latencia en la transmisión de audio. Se configura para asegurar una respuesta en tiempo real y una reproducción fluida sin retrasos significativos.
- Moving Pictures Enhanced Group Transport Stream (MPEGTS): es un formato de transporte para la transmisión de datos multimedia. Se utiliza este formato para la encapsulación y el transporte eficiente del audio en la red Ad-Hoc.

El comando utilizado para la transmisión es: `ffmpeg -f f32le -ar 48000 -ac 1 -i pipe:0 -c:a aac -preset ultrafast -tune zerolatency -fflags +nobuffer -flush_packets 0 -b:a 64k -f mpegts udp://IP_NODOx:PORT_NODOy`

También se utilizaron parámetros para la recepción y reproducción del audio.

- Probesize: para determinar el tamaño de la sonda utilizada en la detección y lectura de los paquetes. Este valor asegura una detección precisa y una reproducción sin interrupciones.
- Audio Data Transport Stream (ADTS): se utiliza para asegurar una correcta decodificación y reproducción.

El comando implementado para la recepción es: `ffmpeg -probesize 50000 -i udp://IP_NODOx:PORT_NODOx -c:a aac -preset ultrafast -tune zerolatency -fflags +nobuffer -flush_packets 0 -f adts pipe:1.`

4.4.5. Selección de escenarios para pruebas de la red MANET con la aplicación web móvil

En este estudio, se plantearon dos escenarios con el objetivo de poner a prueba la red MANET en conjunto con la aplicación web móvil. Estos escenarios seleccionados se encuentran ubicados dentro del campus Balzay. Para llevar a cabo los experimentos finales, se utilizaron los cuatro nodos que conforman la red. Se evaluaron las métricas Delay, PRR y Throughput para lo cual se realizaron 10 veces cada experimento con el fin de obtener intervalos de confianza. A continuación, se proporciona una descripción detallada de dichos escenarios, así como una explicación del funcionamiento de cada uno de los nodos involucrados.

4.4.5.1. Primer escenario

En este escenario, se pretende recrear una situación realista en la cual un nuevo nodo (ciclista) se conecta a la red MANET. Este nodo en particular es móvil, lo que implica que su posición y movimiento serán parámetros clave a controlar durante el experimento como la distancia recorrida, la velocidad de desplazamiento y la cantidad de mensajes enviados.

Por otro lado, los tres nodos restantes en la red estarán estáticos, simbolizando tanto ciclistas estacionados como estaciones base. Esto permitirá una comparación adecuada y una evaluación precisa de las comunicaciones entre el nodo móvil y los nodos estáticos.

En la Figura 4.8 se muestra la distribución de los cuatro nodos utilizados en este escenario. La comunicación se realizará de manera unidireccional, donde el nodo 2 (Tx) actuará como servidor encargado de enviar mensajes de texto informativos y de audio. El receptor de estos mensajes será el nodo 4 (Rx).

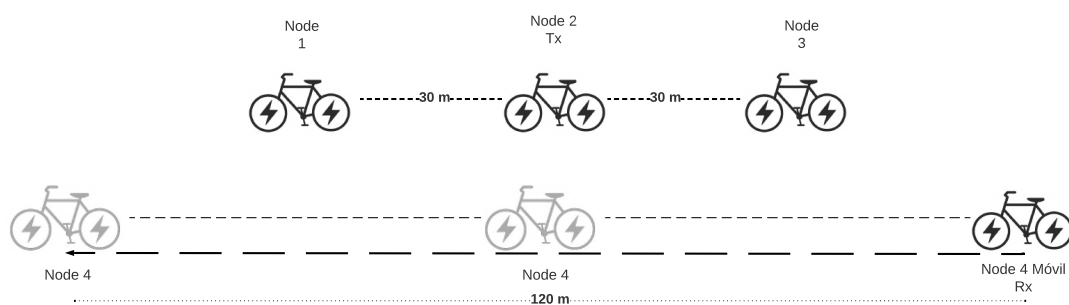


Figura 4.8: Primer escenario para pruebas de la red y aplicación

4.4.5.2. Segundo escenario

En este caso, se recrea una comunicación bidireccional entre dos ciclistas representados por los nodos 2 y 4, los cuales se encuentran en movimiento a una velocidad media. Los otros dos nodos, 1 y 3, fungirán como estaciones base y permitirán la comunicación mediante el uso de multisaltos. Para gestionar esta comunicación de manera eficiente, se aplican filtros MAC que determinan qué paquetes de comunicación deben ser aceptados o rechazados entre los nodos.

La configuración de la comunicación se establecerá de tal manera que el nodo 2 (Tx/Rx) estará dentro del rango de cobertura del nodo 1, que permanecerá estático. A su vez, el nodo 1 se comunicará con el nodo 3, que también estará estático. De manera similar, el nodo 4 (Tx/Rx) se encontrará dentro del alcance del nodo 3. La Figura 4.9 muestra la disposición de los nodos

en este escenario.

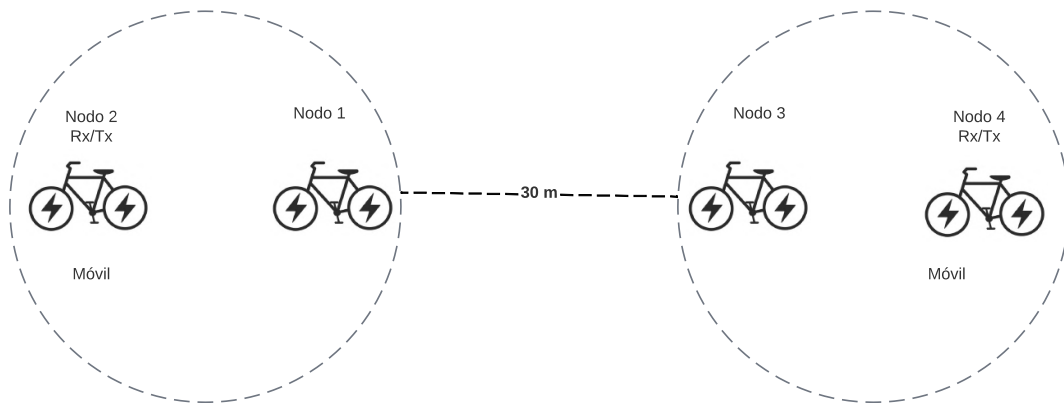


Figura 4.9: Segundo escenario para pruebas de la red y aplicación

4.4.6. Desarrollo de la aplicación web móvil

El desarrollo de la aplicación web móvil ha sido un proceso clave en la implementación de un sistema eficiente y accesible para la comunicación en redes Ad-Hoc. Esta aplicación se ha diseñado con el objetivo de proporcionar a los usuarios una experiencia intuitiva y práctica al interactuar entre ellos. Durante el desarrollo, se han tenido en cuenta diversos aspectos, como la configuración de una red local en cada nodo, la seguridad de la comunicación y la interfaz de usuario. La aplicación web móvil se ha convertido en una herramienta central para permitir la conexión y la comunicación fluida entre los diferentes nodos, así como para ofrecer una plataforma atractiva y funcional para los usuarios.

Cada nodo actúa como un servidor Dynamic Host Configuration Protocol (DHCP) utilizando los demonios Hostapd y Dnsmasq. Estos componentes permiten establecer la red local y asignar direcciones IP a los dispositivos conectados. La implementación de la red se realiza a través de la interfaz WLAN 0 de la Raspberry Pi, que facilita la comunicación inalámbrica entre los nodos y los dispositivos móviles de los usuarios.

Además la plataforma SBC actúa como servidor de una página web Hypertext Transfer Protocol Secure (HTTPS). La cual utiliza certificados autofirmados para garantizar una comunicación segura con los clientes y permiten utilizar las interfaces de audio del navegador además de garantizar la privacidad y la integridad de los datos transmitidos.

La aplicación web móvil se ha desarrollado utilizando Node.js [69], un entorno de JavaScript de código abierto multiplataforma.

Node.js puede usarse tanto para el frontend como el backend. En el caso del frontend se emplea HyperText Markup Language 5 (HTML5), Cascading Style Sheets (CSS) y código de JavaScript para el manejo de eventos. Por otro lado, en el backend se utilizan módulos como Express y Socket.IO.

Express es un framework de aplicación web ampliamente utilizado para Node.js, que ofrece un conjunto robusto de características para construir servidores web y Application Programming Interface (API)s. Simplifica la gestión de rutas, el uso de middleware y el manejo de solicitudes, lo que permite centrarse en la lógica de la aplicación.

Además, Socket.IO se utiliza para habilitar la comunicación bidireccional en tiempo real entre el servidor y los clientes conectados. Proporciona una poderosa capa de abstracción para implementar características como mensajería instantánea, actualizaciones en tiempo real y funcionalidades colaborativas en la aplicación. Se pueden establecer conexiones persistentes con los clientes e intercambiar datos de manera fluida, mejorando la interactividad y capacidad de respuesta general de la aplicación.

4.4.6.1. Estructura de la aplicación web móvil

La estructura de la aplicación se divide en 4 páginas. En la página principal se ofrece la información del proyecto de titulación así como se muestra en la Figura 4.10. Esta página presenta una barra de navegación que permite acceder a los siguientes sitios:

- Home: es la página de inicio del proyecto de titulación.
- Control: ofrece funciones al administrador del nodo, además; de herramientas empleadas en los escenarios de pruebas.
- Comunicación Unidireccional: presenta dos versiones para el nodo emisor y el receptor. Permite el acceso al micrófono y a un reproductor de audio. Además, presentan cuadros de texto para enviar y recibir mensajes de texto.
- Comunicación Bidireccional: permite el acceso al micrófono y a un reproductor de audio por lo tanto un mismo nodo actúa como emisor y receptor. Además, presentan cuadros de texto para enviar y recibir mensajes de texto.

La página de control del nodo indicado en la Figura 4.11 desempeña un papel crucial en la gestión de la red, ya que permite a los administradores llevar acciones como las de apagar, reiniciar y activar los protocolos de enrutamiento OLSR y B.A.T.M.A.N. en el nodo. Además,



Figura 4.10: Ventana de inicio para la administración de los nodos

también facilita la captura del tráfico de red y las mediciones del consumo energético de la interfaz inalámbrica Ad-Hoc.



Figura 4.11: Ventana de control de nodo con diferentes opciones

Las páginas de las Figuras 4.12, 4.13 y 4.14 se han empleado como interfaz gráfica para que los usuarios puedan establecer comunicaciones de audio y texto con otros ciclistas.



Figura 4.12: Ventana para comunicación unidireccional modo Tx



Figura 4.13: Ventana para comunicación unidireccional modo Rx



Figura 4.14: Ventana para comunicación bidireccional

Con el objetivo de brindar una experiencia cómoda al usuario, se han generado dos códigos QR Code (QR) utilizando Python. El primero de ellos permite establecer la conexión con la red Wi-Fi, mientras que el segundo facilita la apertura de la aplicación web móvil. De esta manera, se pretende que el usuario pueda escanear estos códigos de manera sencilla y rápida. En caso de que no cuente con la función de escaneo, se proporcionan los datos necesarios para realizar la conexión manualmente. En la Figura 4.15, se muestran los ocho códigos QR generados.



Figura 4.15: Códigos acrshortqr para la red Wi-Fi y aplicación web móvil

Cabe resaltar que la aplicación desarrollada en este trabajo ha sido liberada para su uso y se puede descargar en [70].

4.5. Conclusiones

La propuesta de una arquitectura para la red MANET, compuesta por tres capas (física, de red y de aplicación), ha permitido el desarrollo de este trabajo de manera secuencial. La elección cuidadosa de elementos electrónicos, como la Raspberry Pi 3 B+ y las antenas inalámbricas, garantiza una captura eficiente de los datos en tiempo real. La utilización del estándar IEEE 802.11 facilita la comunicación entre los nodos de la red Ad-Hoc, estableciendo una conexión sólida y confiable.

La estructura de acoplamiento del nodo, adquirida específicamente para la instalación en la bicicleta, garantiza la seguridad y protección de los componentes, como el sistema SBC, la tarjeta inalámbrica y el sensor de corriente. Los elementos han sido estratégicamente distribuidos dentro de la estructura para permitir la libertad de movimiento de la antena de la tarjeta inalámbrica y para conectar de manera óptima el sensor de corriente entre la Raspberry Pi y la tarjeta inalámbrica. Además, la caja seleccionada se adapta perfectamente a las dimensiones de la bicicleta, sin comprometer la comodidad del ciclista durante su uso.

La elección de los escenarios ha sido fundamental para realizar los experimentos para la caracterización de la red MANET. En la selección de parámetros, se consideraron dos aspectos clave. En primer lugar, un escaneo de redes para seleccionar el canal más adecuado en la banda de 2.4 GHz, siguiendo las regulaciones establecidas por la ARCOTEL en Ecuador. Además, se determinó el máximo alcance de los protocolos mediante pruebas utilizando la herramienta iperf3, estableciendo intervalos de distancia y evaluando la velocidad de transferencia de datos.

La configuración precisa de los parámetros de transmisión de audio en la red Ad-Hoc es fundamental para garantizar una transmisión eficiente y de alta calidad. Mediante pruebas exhaustivas y una cuidadosa selección de parámetros, se logra una configuración óptima que asegura una transmisión y una reproducción confiable del audio en la red. Además, el desarrollo de la aplicación web móvil proporciona una plataforma intuitiva y práctica para la comunicación en la red, permitiendo realizar pruebas y administrar los nodos de manera eficiente.

Resultados

En este capítulo, se presentan los resultados obtenidos al utilizar una red Ad-Hoc configurada con los protocolos de enrutamiento proactivos Optimized Link State Routing (OLSR) y Better Approach to Mobile Ad-Hoc Networking (B.A.T.M.A.N.) sobre una plataforma Single Board Computer (SBC). Además, se analizan y discuten los efectos de estos protocolos en la transmisión y recepción de datos en tiempo real.

Los parámetros de la red se selecciona tras un análisis exhaustivo de las condiciones del canal a través de gráficas del mapa de calor para diferentes escenarios de pruebas con el fin de reducir interferencias por parte de otras redes. Por otro lado, se estudia la máxima distancia de transmisión en cada escenario seleccionado. Además, se evalúa la métrica de bitrate mediante comunicaciones bidireccionales entre dos nodos, con el fin de determinar el perfil de tráfico en distintos intervalos de tiempo y seleccionar una tasa de codificación para transmisiones de audio. De igual forma, se investiga el bitrate máximo que la red Ad-Hoc puede soportar en escenarios multisalto.

Posteriormente, se realizan pruebas a múltiples saltos utilizando los cuatro nodos de la red en distintas configuraciones con nodos estáticos y con movimiento. Durante estas pruebas, se ha evaluado el rendimiento de la red a través de tres métricas fundamentales: Delay, Throughput y Packet Reception Ratio (PRR).

Por último, también se ha tenido en cuenta el consumo energético de las interfaces inalámbricas en cada uno de los nodos, dado su relevancia en el despliegue y funcionamiento efectivo de la red.

5.1. Condiciones del canal inalámbrico

El análisis de las redes presentes en los entornos seleccionados para los experimentos resulta crucial para el desarrollo y obtención de resultados precisos. Si el canal elegido está ocupado por otras redes domésticas o del campus, se producirá interferencia con la red configurada, lo que limitará el rendimiento óptimo de los protocolos. Por lo tanto, es de vital importancia realizar un análisis exhaustivo de las redes existentes antes de proceder con la configuración de la red Ad-Hoc.

En la Figura 5.1 se presenta el mapa de calor que representa la potencia de los canales distribuidos a lo largo del escenario 1. El color rojo indica la mayor potencia y el verde la menor potencia.

Al analizar el mapa, se observa que el canal 1 muestra potencias altas, especialmente en los últimos metros, pero carece de potencia de redes interferentes en las distancias iniciales. Por otro lado, el canal 11 exhibe una potencia alta principalmente desde los 180 m hasta los 240 m, mientras que en los intervalos anteriores la potencia es media. El canal 6 presenta redes con potencia nula en los primeros intervalos, luego cambia a potencia media desde los 80 m hasta los 150 m, y finalmente, en el intervalo de 180 m a 240 m, la potencia se vuelve alta, mostrando un comportamiento similar al canal 11. Respecto a los canales 3, 7 y 9, se observa una potencia media en las redes interferentes, mientras que los canales 2 y 4 presentan una potencia muy baja. Por último, los canales 5, 8, 10, 12 y 13 exhiben una potencia nula.



Figura 5.1: Mapa de calor de los canales contra la distancia para el escenario 1 Campus Balzay

En el Escenario 2, el mapa de calor representado en la Figura 5.2 muestra la potencia de los canales de redes interferentes, siendo el color rojo indicativo de la mayor potencia y verde de potencias más bajas.

Al analizar el mapa, se destaca que el canal 1 presenta la mayor potencia en casi todas las distancias analizadas. En segundo lugar, el canal 11 exhibe una potencia alta, especialmente en el último intervalo. Respecto al canal 6, se observan redes con una potencia considerable, especialmente en el rango de 35 m a 75 m. Por otro lado, los canales 3, 4, 10 y 13 muestran una potencia media en las redes, mientras que los canales 5, 8 y 9 presentan una potencia muy baja. Por último, los canales 2 y 12 tienen una potencia nula.

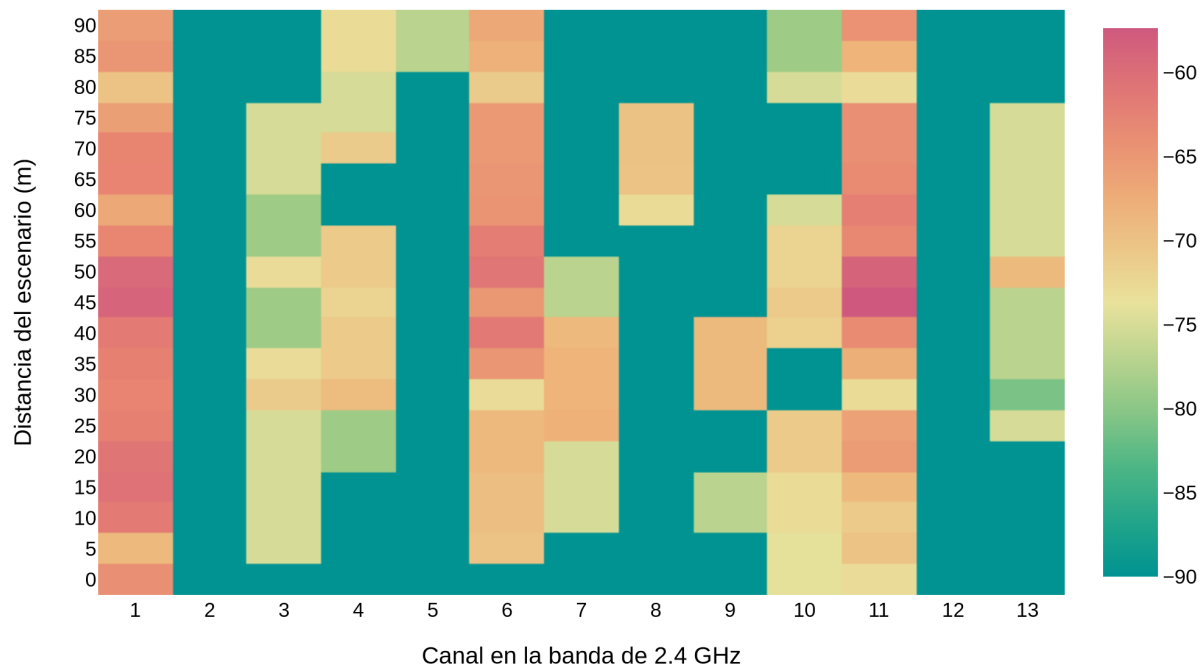


Figura 5.2: Mapa de calor de los canales contra la distancia para el escenario 2 Campus Balzay.

Como resultado de la evaluación de los mapas de calor y la potencia de los canales en los escenarios 1 y 2, se identificó que los canales 2 y 12 se encuentran libres de redes debido a una potencia nula o muy baja. Esta información es de vital importancia al configurar una red inalámbrica, ya que se busca evitar la interferencia y la congestión del espectro.

En base a esta evaluación, se ha tomado la decisión de elegir el canal 2 para las redes Ad-Hoc `olsr_network` y `batman_network`. Al seleccionar un canal sin presencia de otras redes, se espera minimizar la interferencia y lograr un entorno de comunicación más estable y confiable y que no afecte la comparación entre los dos protocolos de enrutamiento.

5.2. Rendimiento de los protocolos

En esta sección se presentan los distintos resultados obtenidos para la determinación de la distancia de transmisión. Además, se expone cual es el máximo bitrate del canal. Finalmente, se presentan los resultados obtenidos del ancho de banda al emplear múltiples saltos. Dado que los experimentos finales involucran la transmisión de audio, también se describen los diferentes parámetros utilizados para su transmisión y recepción.

5.2.1. Distancia de transmisión

Para evaluar el desempeño de los protocolos, se llevaron a cabo pruebas en dos escenarios distintos, como se describió previamente en la Sección 4.3.2. Estos escenarios fueron seleccionados para representar condiciones diferentes y proporcionar una evaluación completa de los protocolos.

En el Escenario 1, se realizaron dos pruebas. La primera prueba se llevó a cabo en un entorno ideal, sin la presencia de personas o vehículos en movimiento alrededor del área de prueba. Esta configuración permitió evaluar el rendimiento de los protocolos en condiciones óptimas, sin interferencias externas. En cuanto a la segunda prueba se emuló un entorno realista similar a una ciclovía urbana, donde se introdujo movimiento alrededor del área de prueba. Este escenario más desafiante refleja condiciones del mundo real donde los nodos pueden estar en movimiento y pueden surgir obstáculos y cambios en el entorno.

Por otro lado, en el Escenario 2 se realizó una prueba en un entorno corto que consistía en una vía recta y de longitud reducida. Esta prueba tenía como objetivo evaluar el desempeño de los protocolos en un entorno específico y analizar su comportamiento en distancias más cortas.

Ambas pruebas se llevaron a cabo utilizando dos nodos estáticos, variando la distancia entre ellos. Esto permitió medir el alcance máximo al emplear los protocolos de enrutamiento y evaluar cómo se comportan a diferentes distancias entre nodos.

■ Primer escenario con interrupciones

En la Figura 5.3, se analiza el rendimiento del protocolo OLSR en verde. Se observa que en los primeros 110 m la recepción de paquetes supera el 96 %. Sin embargo, en el intervalo de 120 m, se produce una ligera disminución a aproximadamente un 84 %, debido al paso de personas en esa área. En los siguientes tres intervalos, de 130 m a 150 m, la tasa de recepción se mantiene por encima del 92 %.

A partir de una distancia de 151 m, al mover la bicicleta del nodo dos, se pierde la comunicación entre los nodos. Para investigar con mayor detalle el comportamiento, se realizaron movimientos incrementales de 0.25 m a partir de los 150 m. En esta serie de movimientos, se puede observar una disminución progresiva en la tasa de recepción de paquetes, alcanzando aproximadamente el 74 %.

La gráfica correspondiente al protocolo B.A.T.M.A.N. muestra un patrón interesante. Al inicio

del experimento, en el rango de 0 m a 110 m, el PRR supera el 99 %. Sin embargo, se observa un descenso en el intervalo de 120 m a 130 m, alcanzando aproximadamente el 90 %. En el punto de 140 m, se registra una mejora en la recepción con un valor del 94 %.

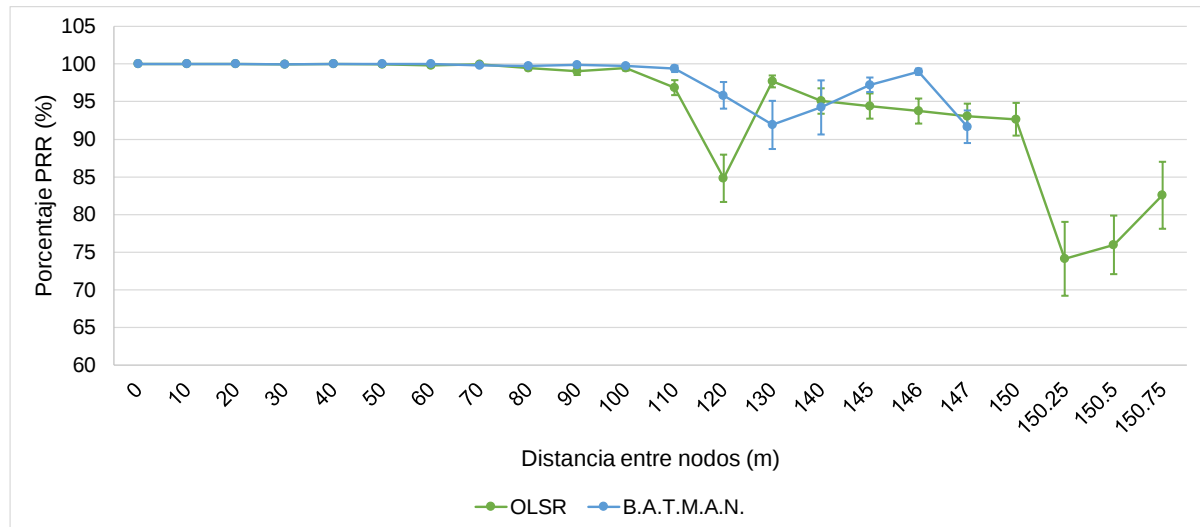


Figura 5.3: Gráfica de PRR para el Escenario 1 Campus Balzay

No obstante, al mover la bicicleta del nodo 2 a una distancia de 150 m, se produce una pérdida total de comunicación. Para investigar más a fondo este fenómeno, se realizaron movimientos incrementales desde los 145 m, es decir, cada metro hasta los 147 m. A partir de ese punto, la conexión se pierde por completo y la tasa de recepción disminuye hasta alcanzar aproximadamente el 91 %.

■ Escenario 1 ideal

En la Figura 5.4, se presenta la gráfica correspondiente al protocolo OLSR, representado por el color verde, obteniéndose los siguientes resultados.

Hasta los 120 m de distancia, el PRR se mantiene por encima del 96 %, lo cual indica una comunicación estable y confiable. Sin embargo, en el intervalo de 130 m, se registra una disminución en la recepción, llegando a un valor de aproximadamente el 91 %. A partir de ese punto, en el intervalo de 140 m a 211 m, la recepción se vuelve variable, oscilando entre el 99 % y el 91 %.

El punto crítico se encuentra en los 212 m, donde se observa una disminución significativa en la recepción, alcanzando aproximadamente un 90 %. A lo largo de los 215 m, se mantiene una tasa de recepción superior al 80 %, lo cual indica una conectividad aceptable.

Sin embargo, al mover la bicicleta del nodo 2 a una distancia de 216 m, se produce la pér-

total de comunicación. Para investigar más a fondo este comportamiento, se realizaron movimientos incrementales de 0.25 m a partir de los 215 m. En esta serie de movimientos, se puede apreciar una disminución significativa en la tasa de recepción de paquetes, llegando a aproximadamente un 50 %.

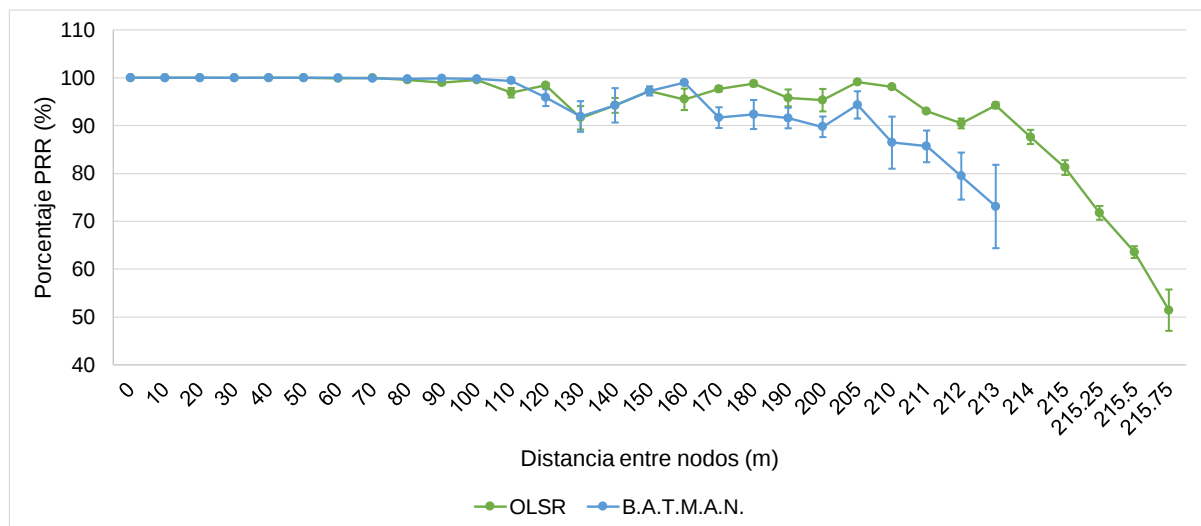


Figura 5.4: Gráfica de PRR para el Escenario 1 Ideal Campus Balzay

La gráfica en azul corresponde al mismo experimento con el protocolo B.A.T.M.A.N.. Se puede observar que hasta los 120 metros, el PRR se mantiene por encima del 96 %. A los 130 metros, este valor disminuye hasta el 91 %. Posteriormente, en el intervalo de 140 a 160 metros, la recepción vuelve a aumentar hasta alcanzar aproximadamente el 98 %. Sin embargo, en los 200 metros, vuelve a disminuir a aproximadamente el 98 %.

En los 205 metros siguientes, hay un incremento en la recepción, pero después de este punto vuelve a descender hasta los 213 metros, que se convierte en la máxima distancia alcanzada con un PRR aproximado del 73 %. Si se supera esta medida, se produce una pérdida de comunicación entre los dos nodos, incluso cuando se mueve el nodo 2 en incrementos de 0.25 m.

■ Segundo escenario

Los experimentos se llevaron a cabo hasta una distancia de 90 m entre los dos nodos para ambos protocolos, y los resultados se presentan en la Figura 5.5.

Para el protocolo OLSR, la gráfica correspondiente se muestra en color verde. Al analizar las primeras distancias, desde los 0 m hasta los 40 m, se observa que la métrica del PRR se mantiene constantemente por encima del 99.5 %, lo cual indica una excelente comunicación

entre los nodos. A los 50 m, se registra una ligera disminución, alcanzando el valor de 99.4 %. A partir de ese punto, la métrica presenta pequeñas variaciones, pero se mantiene en un rango cercano al máximo rendimiento hasta llegar a los 90 m, que es el alcance máximo establecido para este escenario.

Es interesante destacar que en el punto de 70 m se alcanza el valor más bajo de PRR, que corresponde a 99.01 %. A pesar de esta disminución mínima, el protocolo OLSR sigue demostrando un rendimiento excepcional en términos de recepción de paquetes en distancias cortas.

Para el protocolo B.A.T.M.A.N., representado en color azul, se pueden observar diferentes comportamientos en la gráfica. Al inicio del experimento, a una distancia de 10 m, el PRR supera el 99.85 %, lo cual indica una excelente comunicación entre los nodos. Sin embargo, se registra una notable variación cuando la distancia se incrementa a 30 m, disminuyendo al 99.76 %.

A medida que la distancia aumenta, se observa una tendencia a disminuir el porcentaje de recepción de paquetes. En una distancia de 60 m, se alcanza un valor de 99.65 %. A partir de este punto, la tasa de recepción se mantiene relativamente constante en los dos últimos intervalos de distancia, alrededor del 99.76 %.

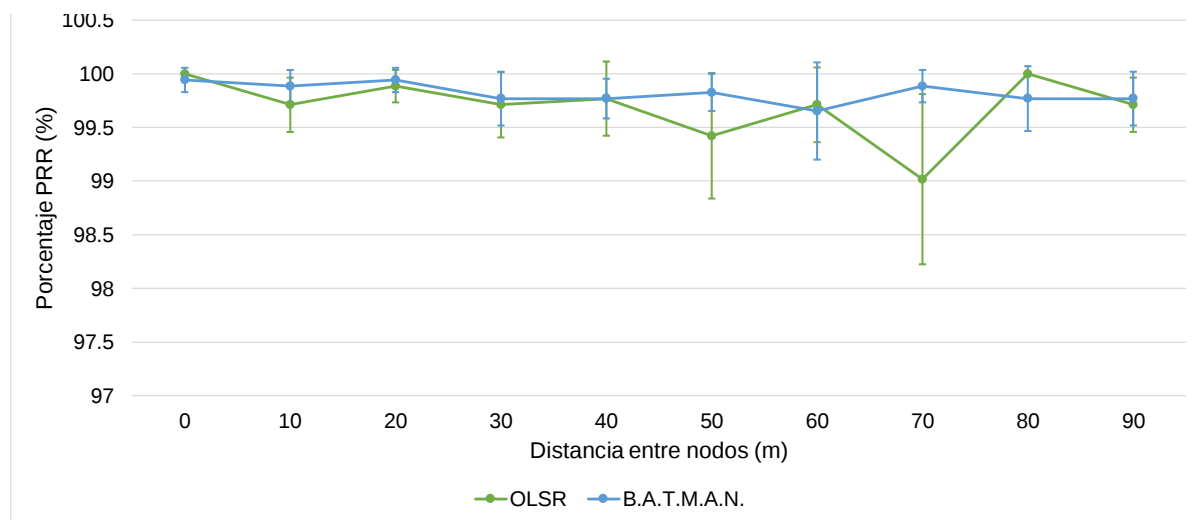


Figura 5.5: Gráfica de PRR para el Escenario 2 Campus Balzay

En la Tabla 5.1 se presenta un resumen de las máximas distancias alcanzadas por cada protocolo en los escenarios evaluados. Esta información proporciona una visión clara de las capacidades de alcance de los protocolos OLSR y B.A.T.M.A.N. en los diferentes entornos.

Tabla 5.1: Resumen de máximas distancia para el protocolo OLSR y B.A.T.M.A.N..

Escenario	Distancia Máxima	
	OLSR	B.A.T.M.A.N
E1 interrupciones	150.75 m	147 m
E1 ideal	215.75 m	213 m
E2	90 m	90 m

5.2.2. bitrate del canal

En esta sección se presentan los resultados del análisis del perfil de tráfico de audio en tres intervalos de tiempo distintos, y a partir del valor encontrado se determina el máximo bitrate para los tres escenarios evaluados.

5.2.2.1. Perfil de tráfico

Se realizó una prueba de comunicación bidireccional entre dos nodos que se encontraban separados por unos 10 m, utilizando los protocolos OLSR y B.A.T.M.A.N.. Durante la prueba, se empleó una codificación Advanced Audio Coding (AAC) de 200 Kbps utilizando la herramienta ffmpeg. La tarjeta inalámbrica se configuró con una velocidad de transmisión de 54 Mbps y una potencia de 20 dBm.

Para capturar los paquetes transmitidos durante la comunicación, se utilizó tcpdump y se almacenó el tráfico del receptor en archivos con extensión .pcap. La duración total de la conversación fue de aproximadamente 2.5 minutos.

Con el fin de analizar el perfil de tráfico, se realizaron gráficas del Throughput en intervalos de tiempo de 1 segundo, 0.1 segundos y 0.01 segundos empleando la herramienta tcpstat. Estos intervalos permitieron observar con mayor detalle la variación del tráfico a lo largo del tiempo y examinar posibles patrones o fluctuaciones en la comunicación.

■ Intervalo de 1 s

En la Figura 5.6 se presentan las gráficas obtenidas en el nodo 1 cuando este actúa como receptor para ambos protocolos. Para el protocolo OLSR, se observa el perfil de tráfico representado por la gráfica en verde. Se puede apreciar que el pico más alto alcanza aproximadamente 581 Kbps.

En cuanto al protocolo B.A.T.M.A.N., su perfil de tráfico se muestra en la gráfica de color azul. En este caso, el punto máximo de tráfico llega cerca de los 600 Kbps.

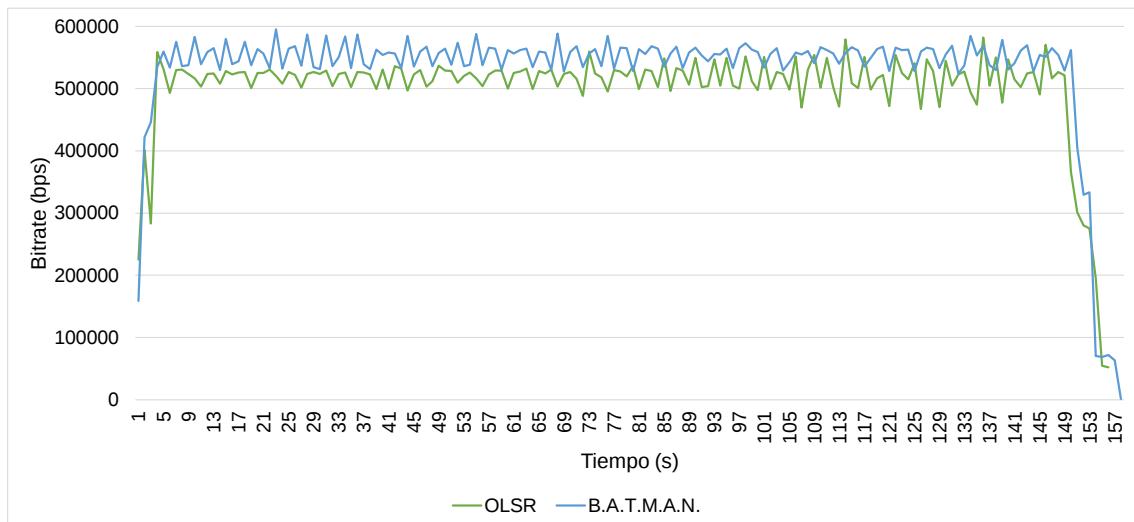


Figura 5.6: Gráfica del perfil de tráfico para 1 s en el nodo 1

En la Figura 5.7, se muestra la gráfica del perfil de tráfico para el nodo 2 en su función de receptor. Para el protocolo OLSR, el límite máximo del perfil de tráfico se sitúa en 672 Kbps.

Por otro lado, en el caso del protocolo B.A.T.M.A.N., se identifica un punto máximo en el perfil de tráfico alcanzando aproximadamente 791 Kbps.

Es importante destacar que, para ambos protocolos el perfil de tráfico se encuentra por encima del valor seleccionado para la codificación de audio, (200 Kbps). Los diferentes intervalos de análisis provocan diferentes gráficas del perfil de tráfico, al reducir este intervalo se obtendrán picos todavía más grandes.

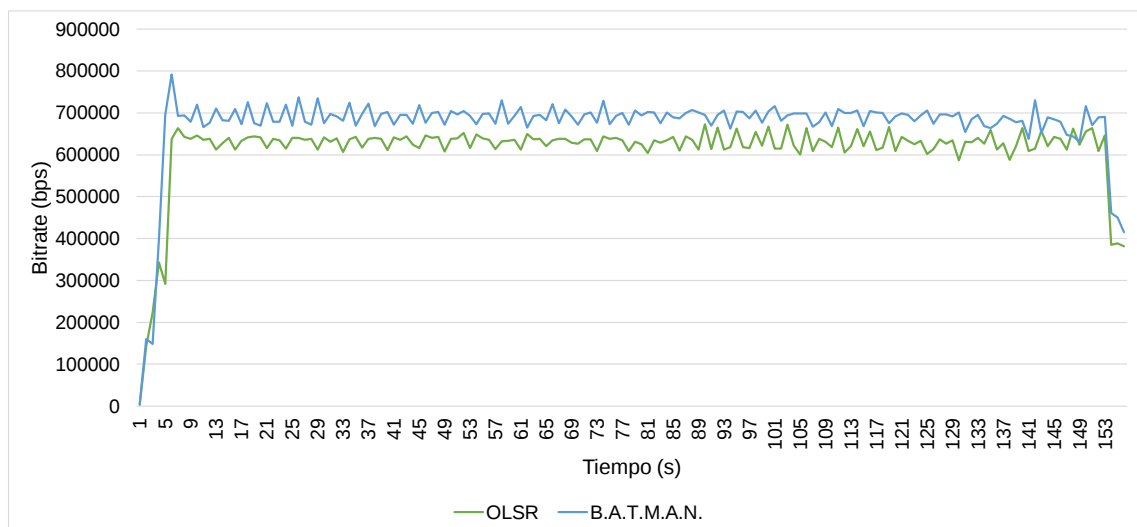


Figura 5.7: Gráfica del perfil de tráfico para 1 s en el nodo 2

■ Intervalo de 0.1 s

La Figura 5.8 muestra que el pico máximo del perfil de tráfico para ambos protocolos es de aproximadamente 1720 Kbps. Sin embargo, para el protocolo B.A.T.M.A.N., se observa un valor mínimo de 0 Kbps, mientras que para el protocolo OLSR, el valor mínimo es de 22.4 Kbps. Es importante destacar que estos valores corresponden a la función de receptor del nodo 1.

Además, se destaca que el valor promedio del tráfico supera el valor utilizado para la codificación de audio ya que el tráfico capturado también incluye mensajes de los protocolos de enrutamiento y mensajes de sincronización. Además, al reducir el tiempo de análisis es posible detectar picos máximos con mayor precisión.

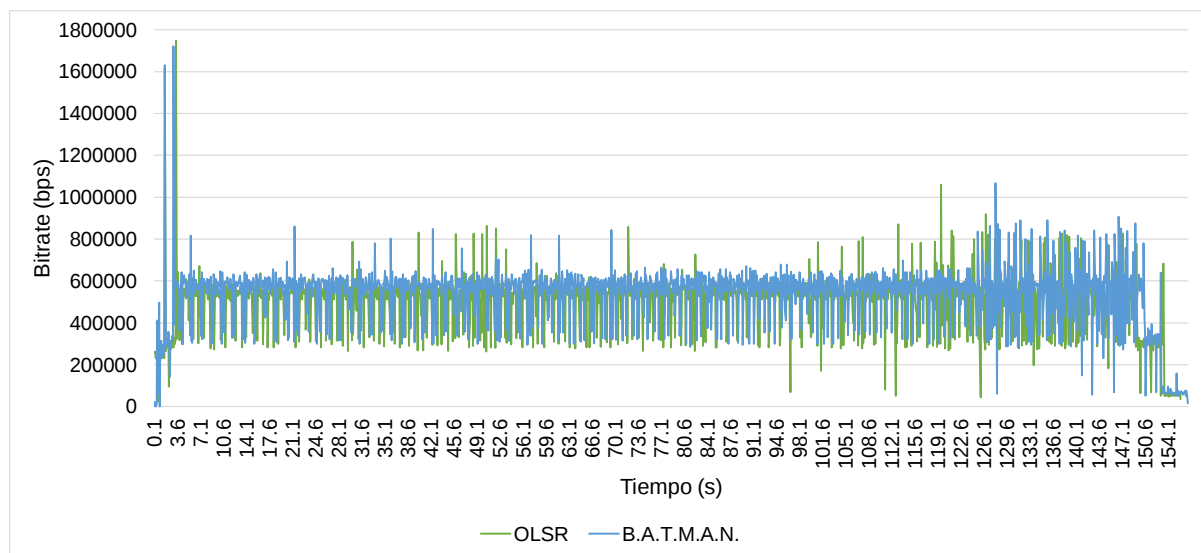


Figura 5.8: Gráfica del perfil de tráfico para 0.1 s en el nodo 1

En la Figura 5.9 se muestra el perfil de tráfico analizado en intervalos de 0.01 s para el nodo 2. Se puede observar que tanto para el protocolo OLSR como para el protocolo B.A.T.M.A.N., se alcanzan valores máximos cercanos a los 3015 Kbps y 2971 Kbps, respectivamente. Sin embargo, se registra un valor mínimo de 0 Kbps para ambos protocolos.

■ Intervalo de 0.01 s

En la Figura 5.10 se muestra el perfil de tráfico para el nodo 1 en su función de receptor. Se puede observar que en ambos protocolos, tanto OLSR como B.A.T.M.A.N., se registran picos máximos de aproximadamente 6000 Kbps. Por otro lado, se puede identificar un valor mínimo de 0 Kbps debido a pausas propias de una comunicación. Es importante destacar que el valor de codificación de audio utilizado, se ve claramente superado en la mayoría de las muestras

debido a que el tráfico capturado incluye paquetes de los protocolos de enrutamiento y de sincronización.

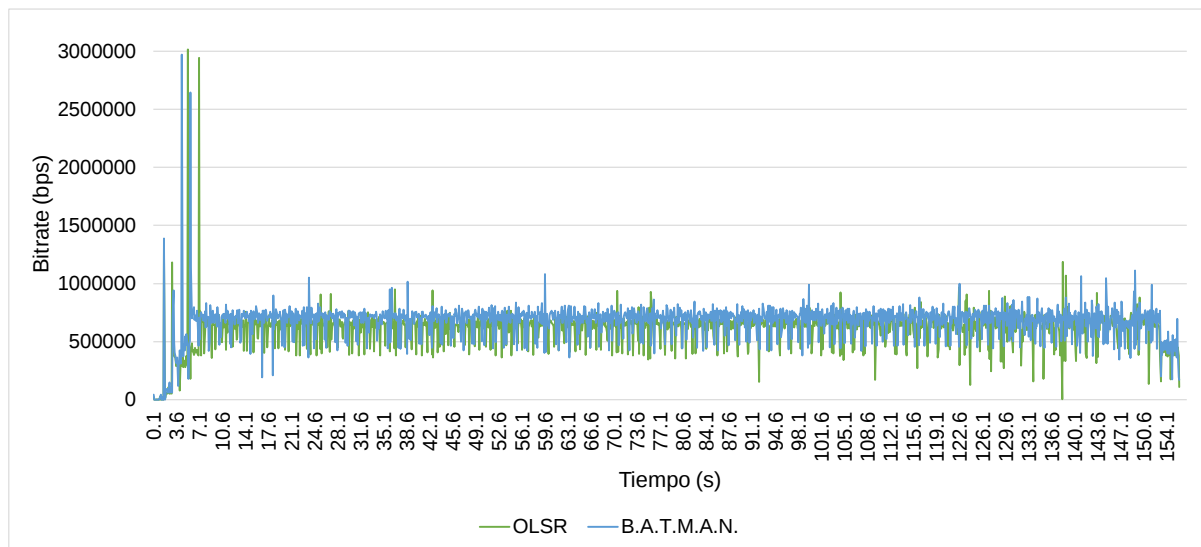


Figura 5.9: Gráfica del perfil de tráfico para 0.1 s en el nodo 2

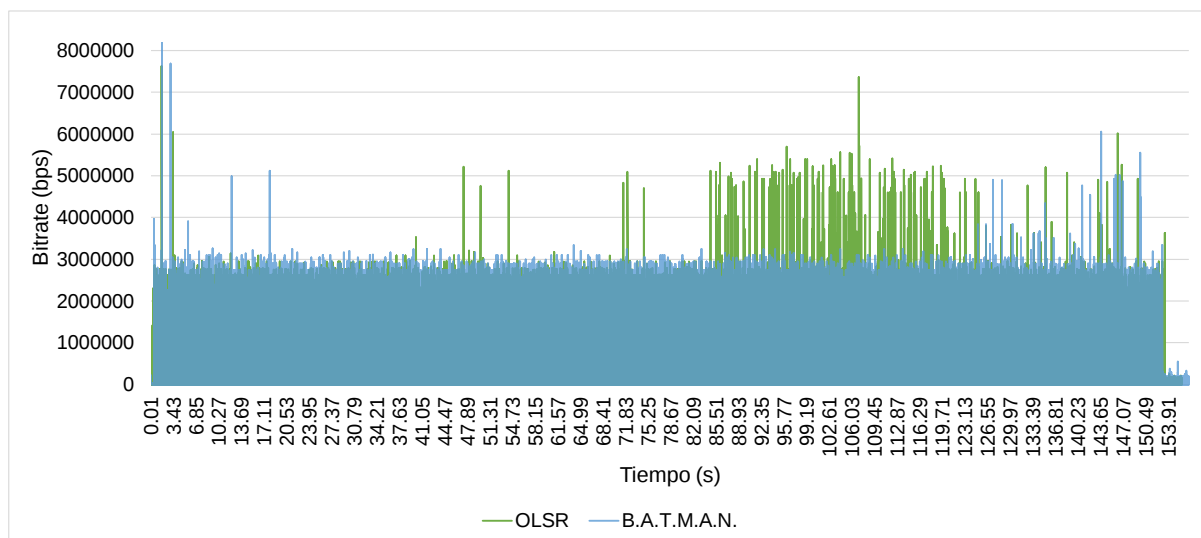


Figura 5.10: Gráfica del perfil de tráfico para 0.01 s en el nodo 1

En la Figura 5.11 se muestra el perfil de tráfico cuando el nodo 2 actúa como receptor. Se observa que tanto para el protocolo OLSR como para B.A.T.M.A.N., se registran picos máximos de alrededor de 6000 Kbps. Por otro lado, se observa un valor mínimo de 0 Kbps en ambos casos debido a pausas dentro de la conversación. Además, al reducir el intervalo de análisis del perfil de tráfico, se logra una mejor caracterización del comportamiento y se identifican picos o ráfagas con mayor precisión.

Es importante destacar que los resultados son similares para ambos protocolos, lo que indica que en este escenario particular no hay una diferencia significativa en cuanto al rendimiento en términos de ancho de banda entre ambos protocolos.

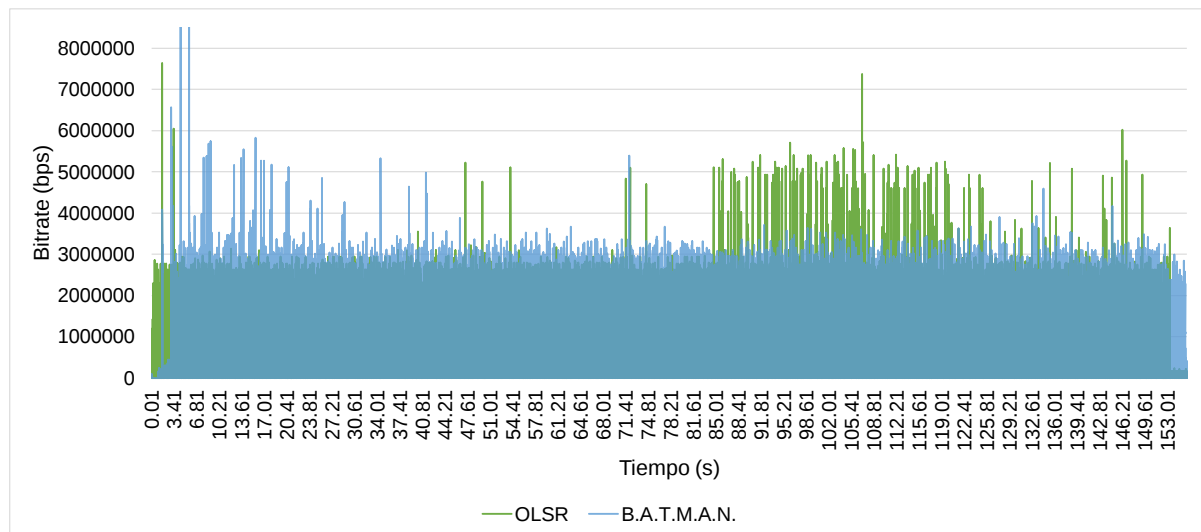


Figura 5.11: Gráfica del perfil de tráfico para 0.01 s en el nodo 2

Cabe mencionar que en este caso se han tenido en cuenta los picos cercanos al valor máximo mencionado. Sin embargo, se ha descartado considerar los valores que sobrepasan este límite, ya que son casos aislados que ocurren en solo tres o cuatro puntos dentro de todo el intervalo analizado.

5.2.2.2. Máximo bitrate del canal

Tras analizar el tráfico global de la red Ad-Hoc durante una conversación bidireccional, se identificó un pico máximo de bitrate, llegando a establecer un valor de referencia de 6 Mbps para los protocolos OLSR y B.A.T.M.A.N..

Con el objetivo de evaluar el comportamiento del canal para cada protocolo (configurados con sus parámetros por defecto), se realizó un estudio adicional, variando el bitrate desde 200 Kbps hasta 6 Mbps, con incrementos de 100 Kbps. Para cada valor de bitrate, se llevó a cabo un experimento de 10 segundos, y se registró una muestra del bitrate por segundo. Estos datos fueron utilizados para generar una gráfica con intervalos de confianza, con un nivel de confiabilidad del 95 %.

Los experimentos se realizaron considerando distancias intermedias entre nodos, las cuales fueron determinadas a partir de la máxima distancia obtenida según lo descrito en la Subsec-

ción 5.2.1. En la Tabla 5.2 se presentan las distancias intermedias seleccionadas para llevar a cabo las pruebas en cada escenario.

Tabla 5.2: Resumen de la distancia intermedia para el protocolo OLSR y B.A.T.M.A.N..

Escenario	Distancia Intermedia	
	OLSR	B.A.T.M.A.N
E1 interrupciones	75 m	75 m
E1 ideal	105 m	105 m
E2	45 m	45 m

■ Escenario 1 con interrupciones

En este escenario, los nodos se distribuyen en dos ubicaciones: el nodo 1 se ubica en el punto de referencia de 0 m y el nodo 2 a 75 m.

La Figura 5.12 muestra la gráfica del bitrate recibido empleando los dos protocolos de enrutamiento. En color verde se indica el comportamiento del bitrate en el receptor para el protocolo OLSR. Es importante destacar un comportamiento lineal, manteniendo una relación directamente proporcional hasta alcanzar la marca de 6 Mbps.

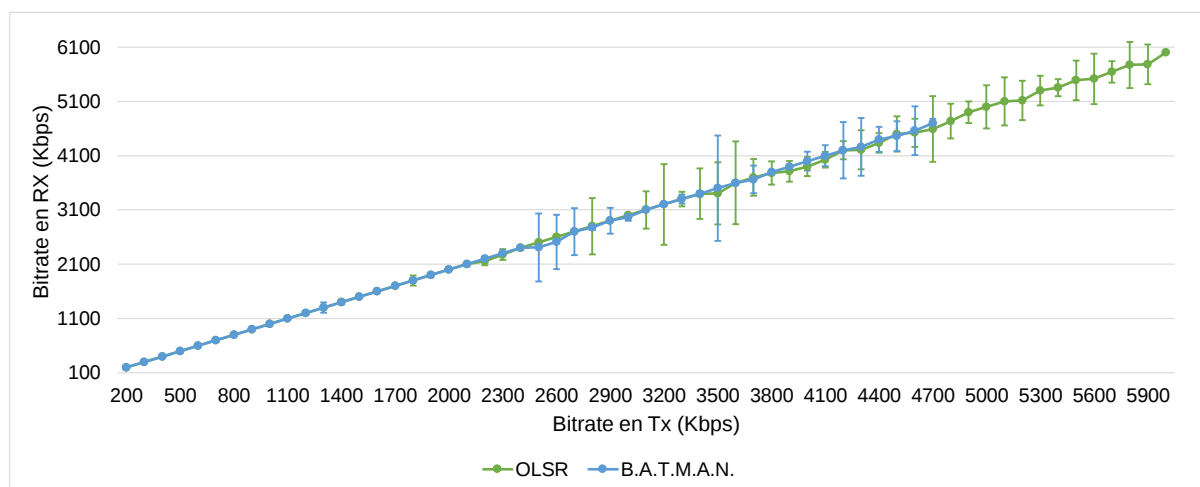


Figura 5.12: Gráfica del comportamiento del bitrate para el escenario 1 con interrupciones

En color azul se muestra el comportamiento del bitrate para el protocolo B.A.T.M.A.N., también mostrándose una relación lineal hasta alcanzar los 4.7 Mbps. Este valor representa el máximo bitrate que puede ser enviado desde el transmisor (Tx) y que pueda recibirse aproximadamente en el receptor (Rx). Al superar el umbral de 4.8 Mbps, se aprecia una disminución en el bitrate recibido en Rx. Este descenso indica que, a partir de ese punto, el sistema experimenta dificultades para mantener la integridad del bitrate durante la transmisión. Como resultado, las pruebas se detuvieron en ese punto para evitar una mayor degradación de la calidad del

canal.

■ Escenario 1 ideal

El comportamiento del bitrate recibido en el nodo 2 se puede observar en la Figura 5.13. La gráfica en color verde representa los resultados obtenidos con OLSR. Esta gráfica tiende a ser lineal en los primeros 4 valores. A partir de 600 Kbps en Tx, se visualiza que Rx recibe un menor valor en cada punto. Además, desde los 1100 Kbps en adelante se observa que la gráfica se estabiliza en aproximadamente 950 Kbps.

Por otro lado, para el protocolo B.A.T.M.A.N. se observa que la gráfica del bitrate recibido es lineal hasta los 700 Kbps. A partir de 800 Kbps se puede observar que se recibió un valor cercano a los 750 Kbps. Para 900 Kbps en Tx se recibe este mismo valor, no obstante después de este valor nuevamente la gráfica presenta una reducción del bitrate en Rx.

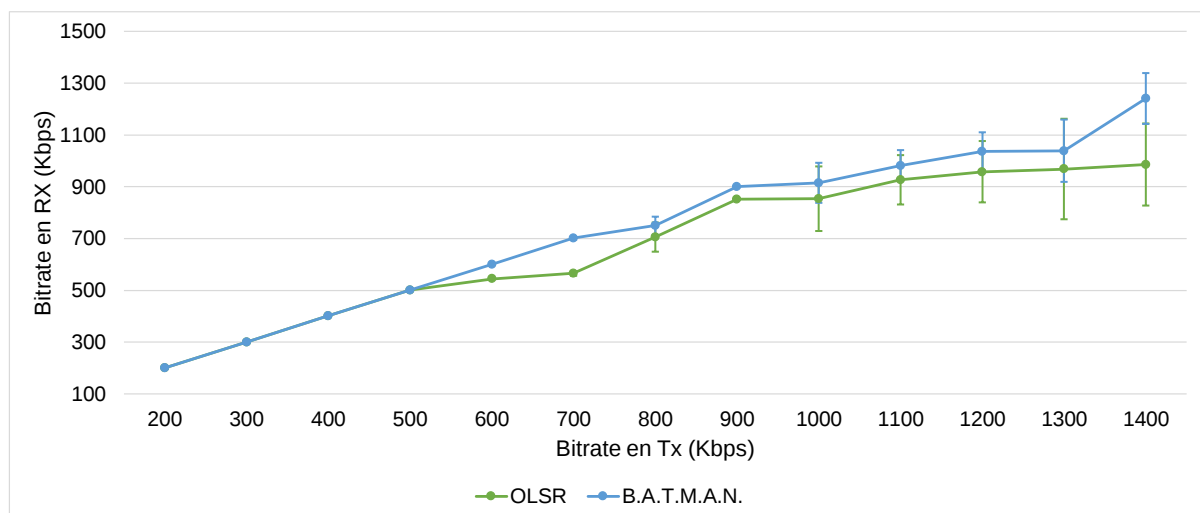


Figura 5.13: Gráfica del comportamiento del bitrate para el escenario 1 ideal

■ Escenario 2

Como se indicó en la Tabla 5.2, para este escenario se colocaron los dos nodos fijos a una distancia de 45 m. En la Figura 5.14 en color verde se presenta el bitrate recibido por el nodo 2 cuando se utilizó el protocolo de enrutamiento OLSR. La gráfica es lineal salvo en algunos puntos específicos en donde el valor en Rx disminuye en 100 Kbps. Desde 4.1 Mbps en Tx no se consigue un valor aproximado en Rx.

Por otro lado, en color azul se usa el protocolo B.A.T.M.A.N. donde la gráfica se comporta de igual manera que para OLSR. También se tienen puntos específicos en donde el bitrate no alcanza el valor enviado. Cuando se llega al valor de 3.9 Mbps se aprecia que se recepta un

valor de bitrate aproximado 2.3 Mbps.

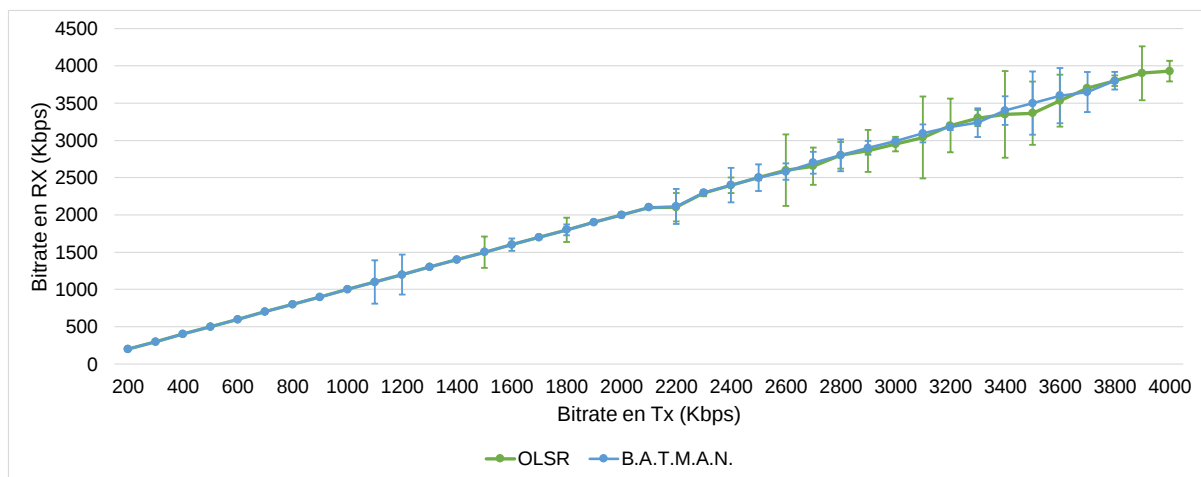


Figura 5.14: Gráfica del comportamiento del bitrate para el escenario 2

Según los resultados alcanzados en cada escenario, a partir de ciertos valores de bitrate en Tx no se puede alcanzar un valor aproximado en Rx para ambos protocolos de enrutamiento. Esto se debe a varios factores, como el overhead de las cabeceras para cada paquete tanto de datos como de los protocolos de enrutamiento, paquetes ACK, tiempos adicionales entre tramas o paquetes Request to send/Clear to send (RTS/CTS) tal como se indica en [71].

5.2.3. Resultados de capacidad del canal a múltiples saltos

Una vez completadas las pruebas de canal a un salto, se llevan a cabo experimentos para determinar los valores umbrales del bitrate utilizando cuatro nodos, con un máximo de tres saltos. Cada nodo fue ubicado a una distancia de 30 metros entre sí, creando un escenario realista de comunicación. Además, se empleó la herramienta de iptables para filtrar las direcciones MAC de las interfaces inalámbricas, permitiendo o bloqueando los paquetes de otros nodos forzando así los saltos.

Las direcciones utilizadas para el filtrado se detallan en la Tabla 4.5, que se encuentra en la Sección 4.4.3. El análisis se llevará a cabo para ambos protocolos, y se presentará un resumen de los resultados obtenidos.

■ OLSR

En la Figura 5.15 se muestran las gráficas del bitrate para diferentes saltos. Para el caso de 1 salto se representa el bitrate en Rx en color verde. La distancia de separación entre el nodo

1 y 2 es de 30 m. Como se puede observar, el canal muestra una respuesta muy favorable lo que se refleja en una gráfica lineal hasta alcanzar los 6 Mbps.

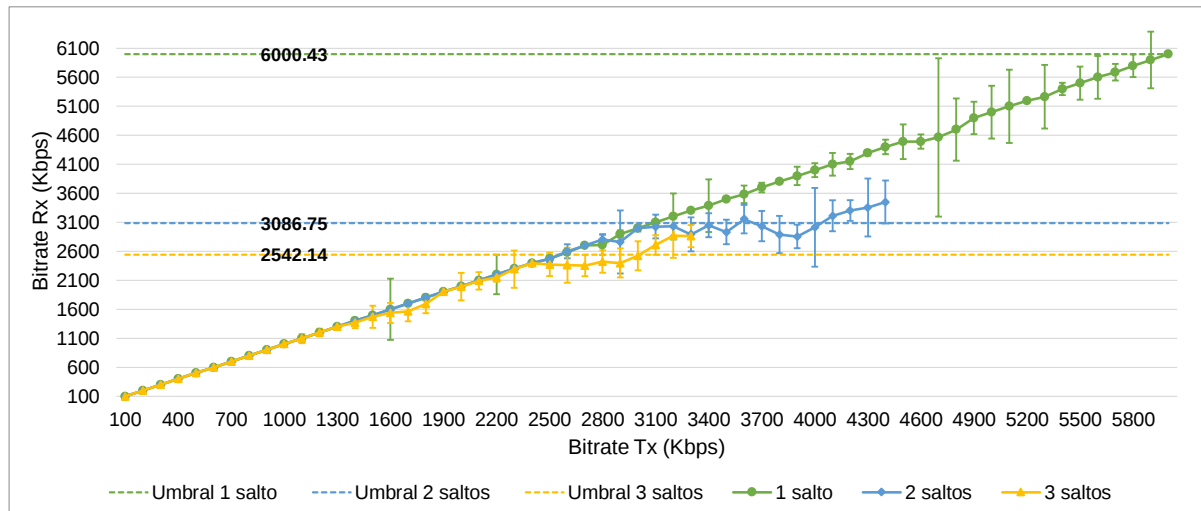


Figura 5.15: Comportamiento del canal con múltiples saltos OLSR

Por otro lado, al considerar dos saltos (representados en azul) y una distancia entre el nodo 1 y 3 de 60 m la gráfica es lineal hasta los 3 Mbps. Sin embargo, una vez superado este valor, el canal comienza a mostrar variabilidad siendo posible alcanzar solo 4.4 Mbps. Con base en estos resultados, se puede determinar que el umbral para dos saltos se sitúa en 3.05 Mbps, calculado a través del promedio de los bitrates recibidos (Rx) en el rango de 3.1 Mbps y 4.4 Mbps.

Por último, para tres saltos y una distancia de 90 m entre los nodos 1 y 4 (en color amarillo). Se puede observar que inicialmente muestra un comportamiento lineal hasta alcanzar los 2.4 Mbps. Sin embargo, una vez superado este valor, el bitrate recibido (Rx) se vuelve variable, oscilando entre 2.5 Mbps y 2.8 Mbps. Durante el experimento, se logró enviar un valor de 3.3 Mbps. En este caso, se determinó que el valor umbral se sitúa en 2.5 Mbps, calculado mediante el promedio de los valores de bitrate recibidos.

■ B.A.T.M.A.N.

Para el caso del protocolo B.A.T.M.A.N. se indica la gráfica del comportamiento del canal para un salto en la Figura 5.16 indicado con color verde. La distancia de separación entre el nodo 1 y 2 es de 30 m. Como se puede observar, el canal muestra una respuesta favorable casi lineal hasta los 4.63 Mbps en Rx cuando se envía 5.1 Mbps desde Tx.

Por otra parte, al considerar dos saltos (representados en azul) y una distancia entre el nodo

1 y 3 de 60 m la gráfica es casi lineal hasta los 2.2 Mbps. Sin embargo, una vez superado este valor, el canal comienza a mostrar variabilidad siendo posible alcanzar solo 4 Mbps. Con base en estos resultados, se puede determinar que el umbral para dos saltos se sitúa en 2.91 Mbps, calculado a través del promedio de los bitrates recibidos (Rx) en el rango de 2.3 Mbps y 4 Mbps.

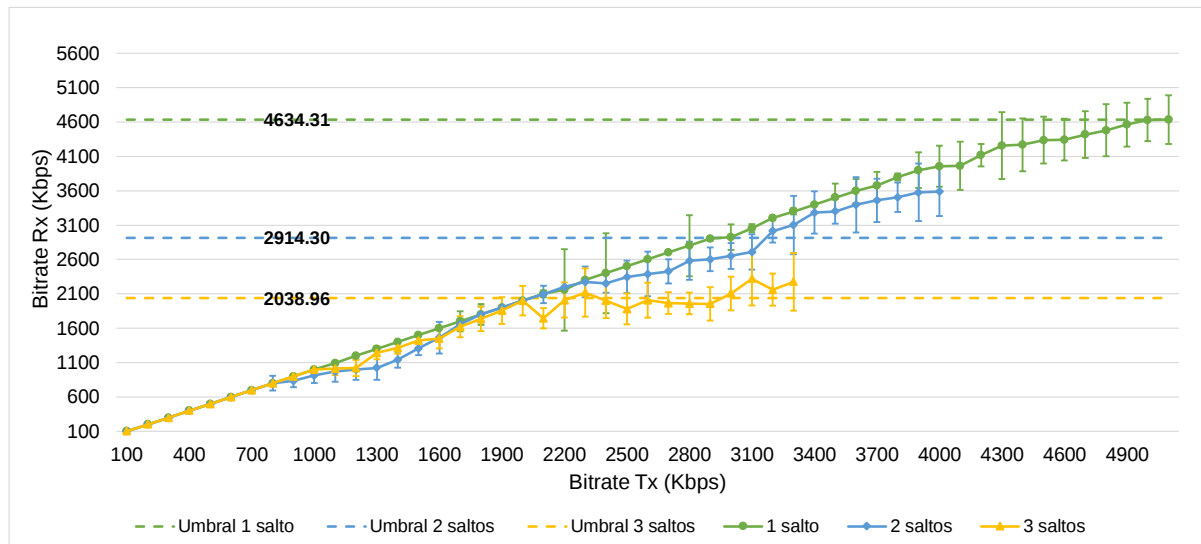


Figura 5.16: Comportamiento del canal con múltiples saltos B.A.T.M.A.N.

Por último, para tres saltos a una distancia de 90 m entre los nodos 1 y 4 (en amarillo). Se puede observar que inicialmente muestra un comportamiento lineal hasta alcanzar un 1 Mbps. Luego la gráfica presenta variabilidad aún lográndose recibir un valor cercano al enviado hasta los 2 Mbps. Sin embargo, una vez superado este valor el bitrate recibido (Rx) oscila entre 2.1 Mbps y 3.3 Mbps. En este caso, se determinó que el valor umbral se sitúa en 2.038 Mbps, calculado mediante el promedio de los valores de bitrate recibidos.

Finalmente, en la Figura 5.17 se muestra el comportamiento del bitrate en relación al número de saltos cuando se emplea cada uno de los protocolos de enrutamiento. Así de esta manera se indican los valores umbrales del bitrate mostrados en las gráficas anteriores.

Los resultados obtenidos van de acuerdo con lo establecido en [71], donde se indica que los flujos de múltiples saltos tienden que competir por el medio en cada salto en su camino hacia el nodo de destino. Por lo tanto, los paquetes reenviados por una ruta más larga tienen más probabilidades de ser descartados que los de una ruta más corta, lo cual explica la reducción del bitrate en Rx a 2 y 3 saltos.

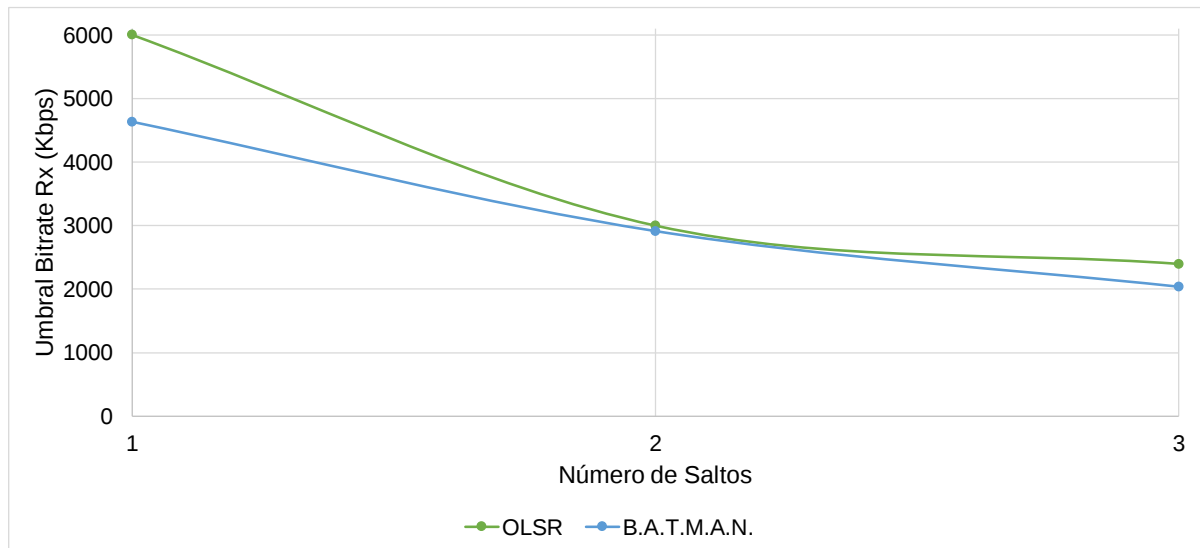


Figura 5.17: Comportamiento del bitrate según el número de saltos

5.2.4. Parámetros para cada escenario con la aplicación web móvil

Una vez desarrollada la aplicación web móvil, se procede a determinar los parámetros necesarios para la transmisión de datos de audio y los intervalos de tiempo adecuados para cada protocolo.

En la Tabla 5.3 se presentan los parámetros generales que corresponden al envío y recepción de audio empleados en los escenarios de pruebas.

Tabla 5.3: Parámetros generales para la transmisión y recepción de audio.

Parámetro	Valor
Velocidad del nodo móvil	10 Km/h
Códec de audio	AAC
Bit rate de audio	64 Kbps
Probesize	50000
Protocolo de transporte entre nodos	UDP
Formato de envío de audio desde el nodo al Smartphone	ADTS
Tasa de muestreo	48000 Hz
Representación tipo flotante	f32le

En la Figura 5.18 se ilustra el acoplamiento de los nodos a las bicicletas, con los códigos QR ubicados en la tapa de cada nodo para facilitar la conexión a la red Wi-Fi local de cada nodo y para abrir la aplicación en el navegador del dispositivo móvil.

La distribución de los nodos así como una fotografía capturada durante el desarrollo de los experimentos para el Escenario 1 se muestra en la Figura 5.19, donde el nodo 4 está representado por la bicicleta en movimiento.



Figura 5.18: Bicicletas con los nodos acoplados



Figura 5.19: Distribución de las bicicletas en el escenario 1

En la Tabla 5.4 se presentan los intervalos de tiempo para los mensajes HELLO y TC que mejores resultados ofrecieron al emplear el protocolo OLSR en la transmisión de audio. Además, se indican los valores para el caso de los mensajes OGM y ELP del protocolo B.A.T.M.A.N. que satisfacen un tráfico de audio óptimo.

Tabla 5.4: Intervalos de tiempo configurados en OLSR y B.A.T.M.A.N.

Protocolo	Parámetro	Valor
OLSR	Hello interval	5 seg
	TC interval	10 seg
B.A.T.M.A.N.	OGM interval	40 seg
	ELP interval	20 seg

Finalmente en la Figura 5.20 se presenta la distribución de los nodos en el Escenario 2. En esta configuración los nodos 2 y 4 están representados por las bicicletas en movimiento.



Figura 5.20: Distribución de las bicicletas en el escenario 2

5.2.5. Delay

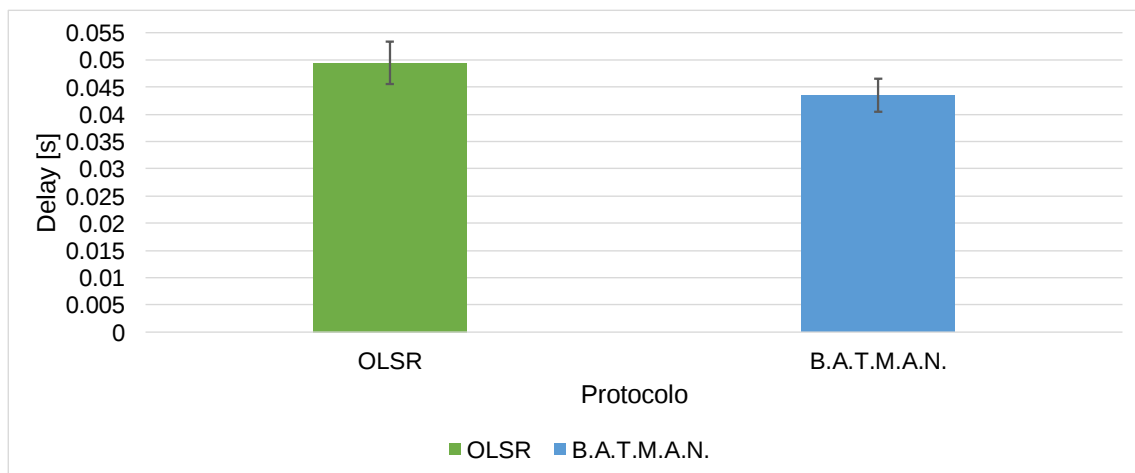
A continuación se presentan las gráficas de los resultados del análisis de la métrica de Delay para los protocolos OLSR (en color verde) y B.A.T.M.A.N. (en color azul), junto con el intervalo de confianza del 95 %.

5.2.5.1. Primer escenario

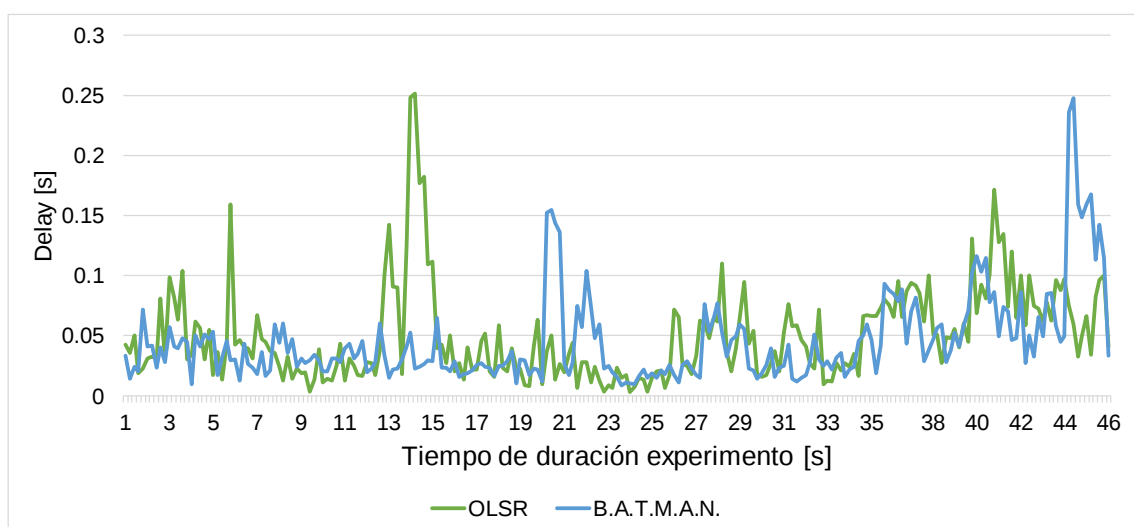
Para analizar el comportamiento de la métrica de Delay en los protocolos evaluados, se presenta la Figura 5.21 con un gráfico de barras del Delay promedio experimentado en todo el experimento y la distribución de mismo a lo largo del tiempo de duración.

En la Figura 5.21(a), se indica el promedio de 10 experimentos realizados. En el caso del protocolo OLSR, se observa un valor promedio de Delay inferior a 0.0500 s, mientras que para el protocolo B.A.T.M.A.N. se alcanza un valor de 0.043 s.

La Figura 5.21(b) ilustra la evolución temporal de la métrica, donde se identifican puntos máximos de Delay de 0.25 s en ambos casos. Para el resto de las muestras, los valores se mantienen por debajo de 0.15 s.



(a) Delay.



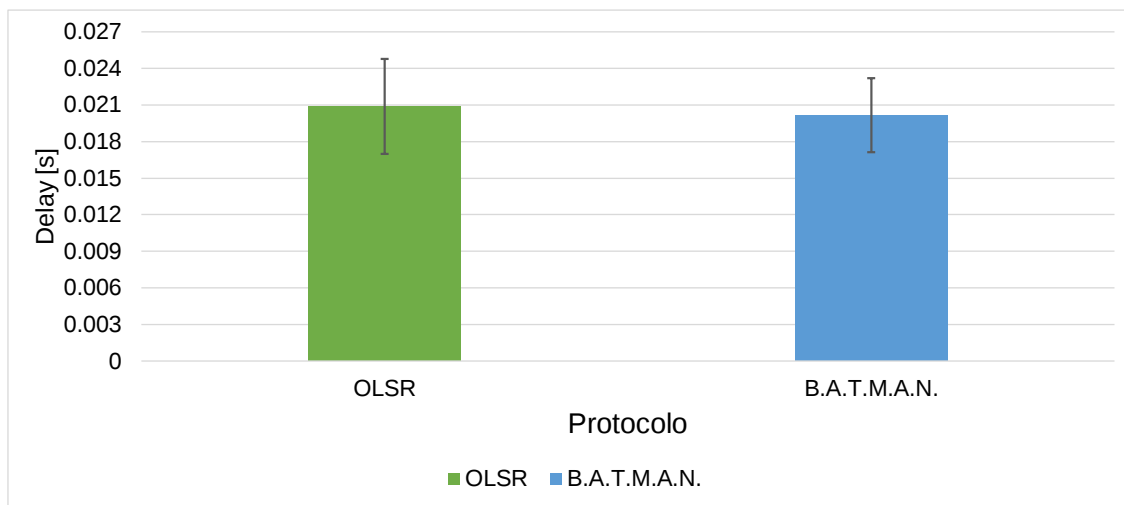
(b) comportamiento del Delay en el tiempo

Figura 5.21: Gráfica de Delay en el escenario 1

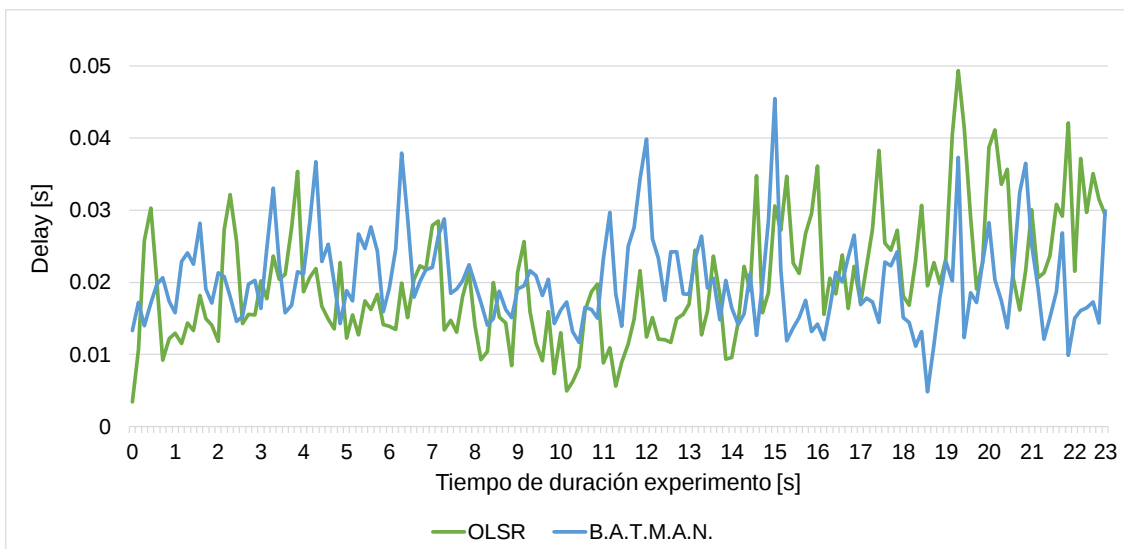
5.2.5.2. Segundo escenario

Para este escenario, la Figura 5.22 representa el resultado del Delay, para los experimentos que mantienen una comunicación bidireccional en tiempo real.

La Figura 5.22(a), corresponde al Delay promedio de los experimentos realizados. Para el protocolo OLSR, alcanza un valor aproximado de 0.021 s, mientras que para B.A.T.M.A.N. se tiene un valor de 0.020 s. La Figura 5.22(b) ilustra la evolución temporal del Delay, donde se identifican valores máximos a 0.049 s en ambos casos.



(a) Delay.



(b) Comportamiento del Delay en el tiempo

Figura 5.22: Gráfica de Delay en el escenario 2

En ambos escenarios, los valores promedio obtenidos demuestran que la comunicación es favorable. Estos resultados cumplen con las recomendaciones de la International Telecommu-

nication Union (ITU) [24], que establece valores de hasta 150 ms como adecuados para la comunicación, con un límite máximo de 450 ms.

5.2.6. Packet Reception Ratio (PRR)

A continuación, se muestran las gráficas de los resultados obtenidos para la métrica de PRR en verde empleando el protocolo OLSR, mientras que en azul usando B.A.T.M.A.N.. Además, se incluye el intervalo de confianza del 95 % para una evaluación más precisa de los resultados.

5.2.6.1. Primer escenario

El porcentaje de PRR obtenido en toda la duración del experimento se presenta en la Figura 5.23. Para el caso de OLSR se alcanza aproximadamente un 96 %. Mientras que para el protocolo B.A.T.M.A.N., un 97 %.

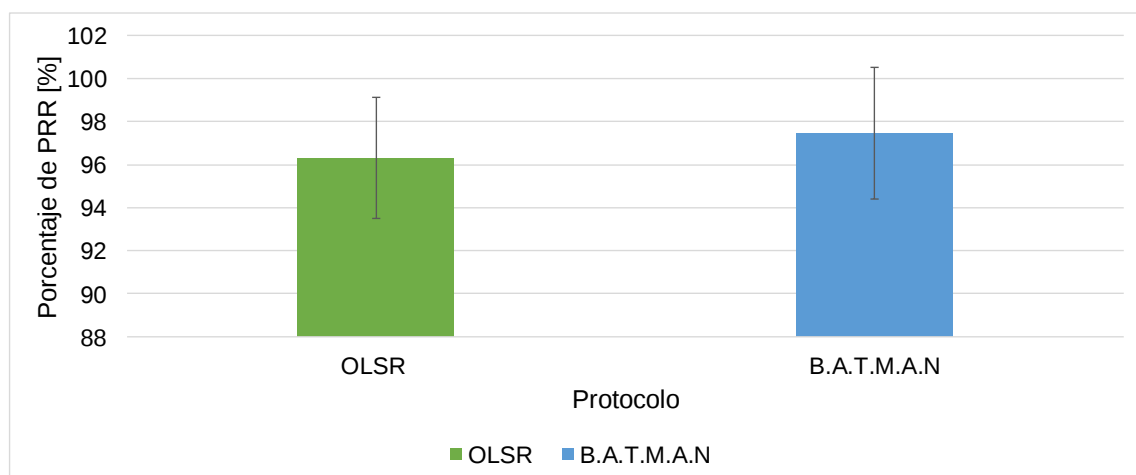


Figura 5.23: Gráfica de PRR en el escenario 1

5.2.6.2. Segundo escenario

En el contexto de este escenario, los resultados del PRR se presentan en la Figura 5.24. Con el protocolo OLSR se tiene un valor del 99 %, mientras que con B.A.T.M.A.N. se supera el 97 %.

Los resultados muestran un sólido rendimiento en la recepción de paquetes para ambos protocolos evaluados. En el primer escenario, ambos protocolos alcanzan una tasa de recepción superior al 95 %, mientras que en el segundo escenario se obtiene un valor superior al 96 %.

Con estos resultados se demuestra un buen desempeño de ambos protocolos en los escenarios evaluados.

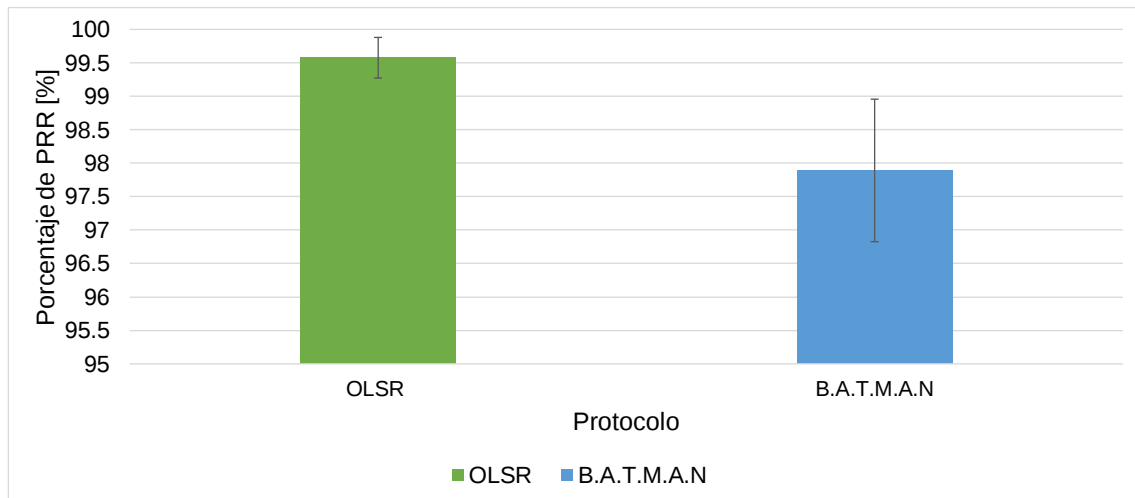


Figura 5.24: Gráfica de PRR en el escenario 2

5.2.7. Throughput

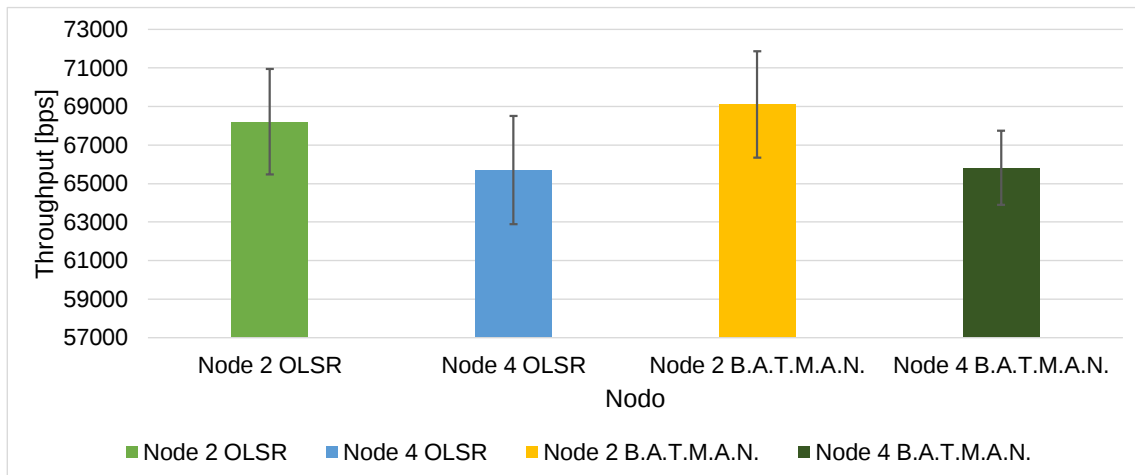
En este apartado se indican las gráficas del Throughput y su comportamiento en el tiempo y los valores promedios obtenidos en cada escenario. Para el cálculo del Throughput se considera todo el tráfico de la red generado exclusivamente en los nodos utilizados para la comunicación. Esto incluye los paquetes UDP (tráfico de audio, control de tráfico de audio), paquetes de los protocolos de enrutamiento, paquetes de SSH y paquetes de NTP. Utilizando la herramienta Wireshark se toma el tamaño total de los bits de los paquetes capturados a lo largo de la duración que comprendió el experimento. Esta métrica se presenta en bps.

5.2.7.1. Primer escenario

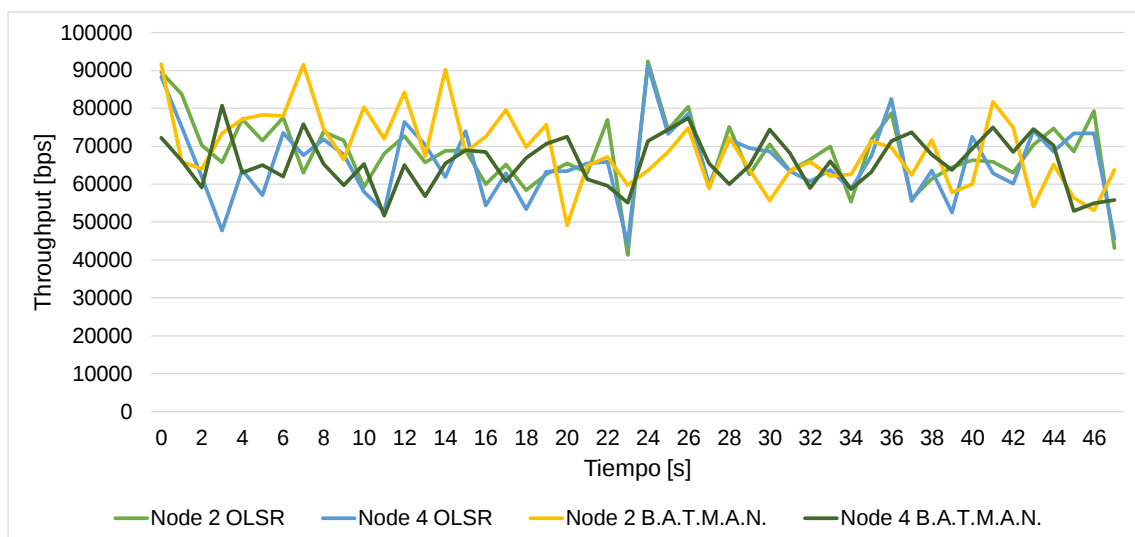
En este escenario, el nodo 2 se desempeña como transmisor (Tx) y el nodo 4 como receptor (Rx). Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 5.25. El promedio de esta métrica se presenta en la Figura 5.25(a). Para el protocolo OLSR, el nodo 2 alcanza un valor de 68.209 Kbps, mientras que el nodo 4 registra 65.699 Kbps. En cuanto al protocolo B.A.T.M.A.N., se observan valores de 69.103 Kbps en el nodo 2 y 65.817 Kbps en el nodo 4.

El comportamiento del Throughput a lo largo del tiempo se observa en la Figura 5.25(b). Para el protocolo OLSR, se registra un mínimo de 41.336 Kbps y un máximo de 92.409 Kbps en el nodo 2. En el nodo 4, los valores oscilan entre un mínimo de 44.201 Kbps y un máximo de

91.198 Kbps. Por otra lado, para el protocolo B.A.T.M.A.N. el valor más bajo se encuentra en 49.123 Kbps mientras que el pico más alto en 91.670 Kbps. En cambio, para el nodo 4 su pico inferior esta en 51.700 Kbps y el más alto en 80.734 Kbps.



(a) Throughput Promedio.



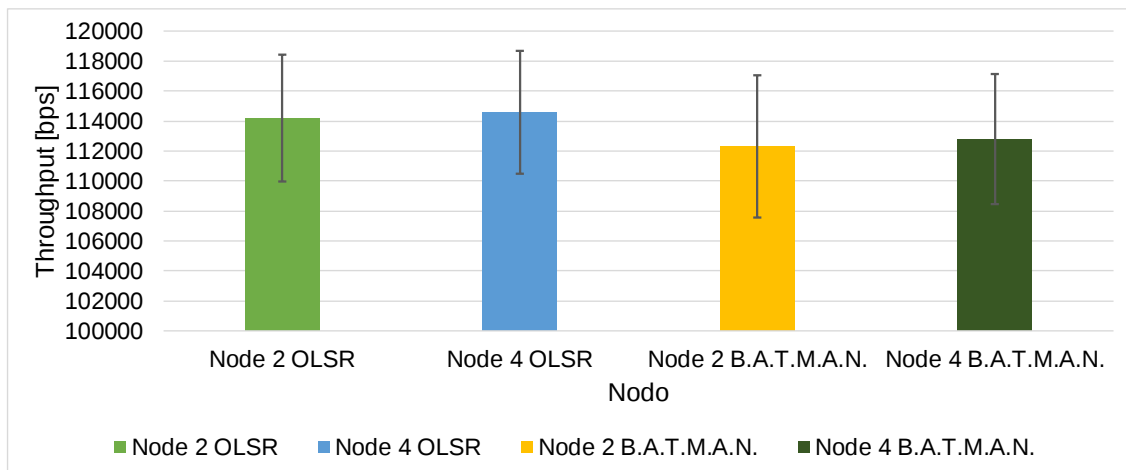
(b) Comportamiento del Throughput en el tiempo

Figura 5.25: Gráfica de Throughput en el escenario 1

5.2.7.2. Segundo escenario

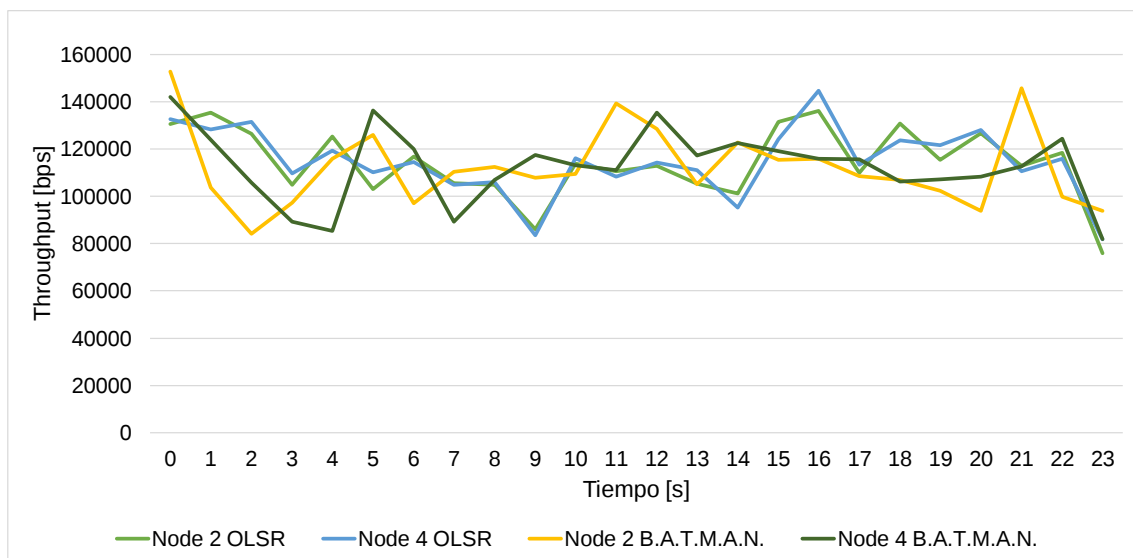
En este escenario, los nodos 2 y 4 operan simultáneamente como transmisores (Tx) y receptores (Rx), permitiendo una comunicación bidireccional. Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 5.26. El valor promedio del Throughput se indica en la Figura 5.26(a). Para el protocolo OLSR, el nodo 2 alcanza un valor de 114.19 Kbps, mientras que el nodo 4 registra 114.58 Kbps. En cuanto al protocolo B.A.T.M.A.N., se observan valores de 112.30 Kbps en el

nodo 2 y 112.79 Kbps en el nodo 4.



(a) Throughput Promedio.

El comportamiento del Throughput a lo largo del tiempo se observa en la Figura 5.26(b). Para el protocolo OLSR, se registra un mínimo de 75.92 Kbps y un máximo de 136.15 Kbps en el nodo 2. En el nodo 4, los valores oscilan entre un mínimo de 81.80 Kbps y un máximo de 144.68 Kbps. Por otra lado, para el protocolo B.A.T.M.A.N. el valor mas bajo se encuentra en 84.16 Kbps mientras que el pico más alto en 152.78 Kbps en el nodo 2. En cambio, para el nodo 4 su pico inferior esta en 81.89 Kbps y el más alto en 142.04 Kbps.



(b) Comportamiento del Throughput en el tiempo

Figura 5.26: Gráfica de Throughput en el Escenario 2

Los resultados obtenidos muestran que esta métrica se encuentra dentro de los valores evaluados en la capacidad del canal, con lo cual se garantiza una comunicación confiable y fluida

incluyendo los mensajes de cada protocolo que se difunden en broadcast y mensajes de sincronización del protocolo NTP.

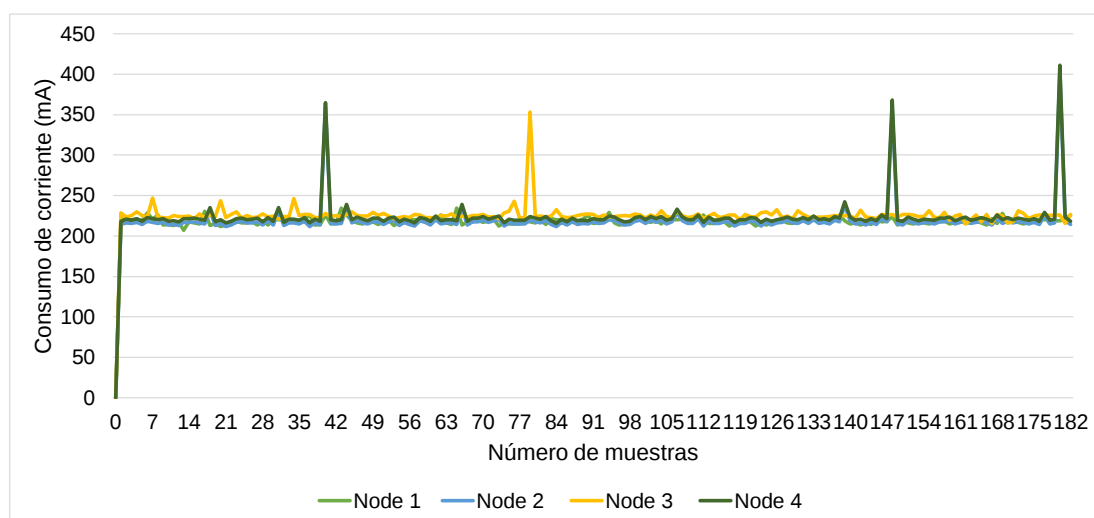
5.3. Consumo energético

El análisis del consumo energético se realizó utilizando el sensor de corriente INA219, el cual permitió medir el nivel de corriente utilizado por la interfaz inalámbrica en modo Ad-Hoc. La duración de la captura de datos varió en función del escenario evaluado, sin embargo, se aseguró que los cuatro nodos tuvieran el mismo número de muestras. Dado que el sensor funciona con 3.3V o 5V para los experimentos se conectó a un voltaje de 3.3 V.

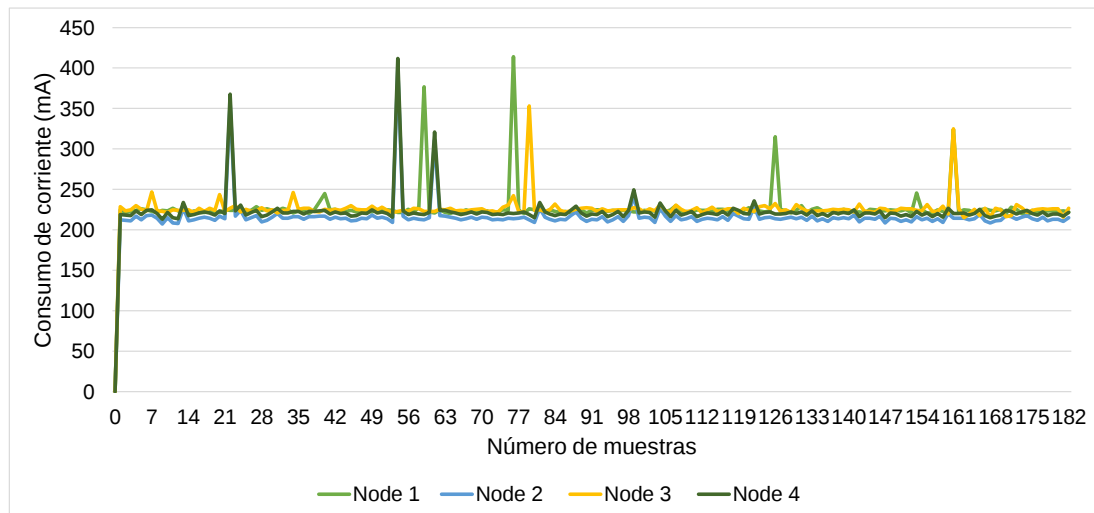
5.3.1. Primer escenario

La Figura 5.27 ilustra el comportamiento del consumo de corriente en cada uno de los nodos a lo largo del tiempo. Para este escenario, se realizó la captura de datos durante un período de 30 minutos, que corresponde a la duración de los diez experimentos llevados a cabo para cada uno de los protocolos.

En la Figura 5.27(a) se presentan los resultados del consumo de corriente para el protocolo OLSR. Se observan picos máximos en los nodos 2 y 4, alcanzando valores de 403 mA y 411.06 mA, respectivamente. Por otro lado, en la Figura 5.27(b), se muestran los valores máximos para el protocolo B.A.T.M.A.N., con el nodo 1 registrando 414 mA y el nodo 4 con 411.897 mA.



(a) Consumo de corriente para OLSR.



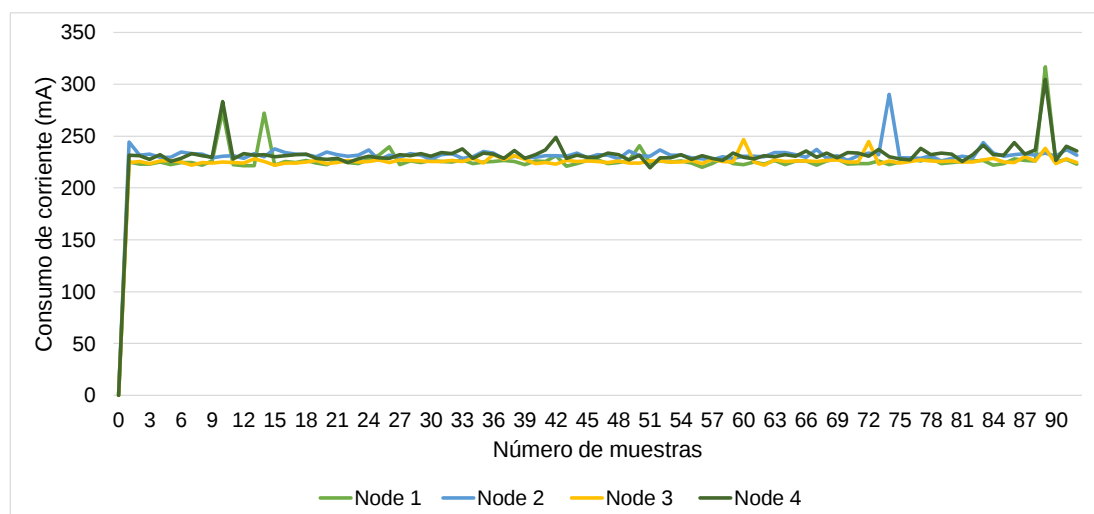
(b) Consumo de corriente para B.A.T.M.A.N..

Figura 5.27: Gráfica del consumo de corriente en el Escenario 1

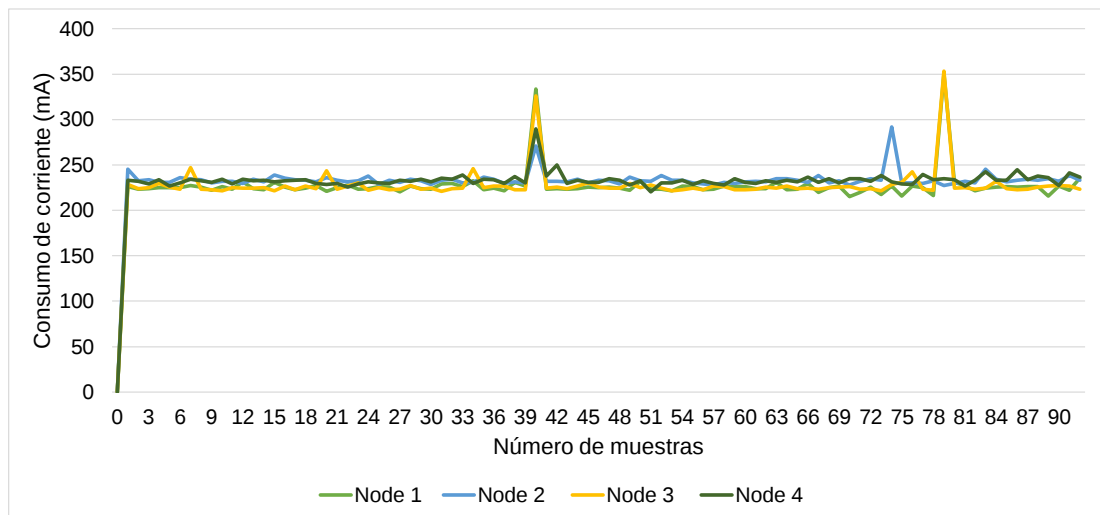
5.3.1.1. Segundo escenario

La Figura 5.28 ilustra el comportamiento del consumo de corriente instantánea de cada nodo. Para este escenario, se realizó la captura de datos durante un período de 15 minutos, que corresponde a la duración de los diez experimentos llevados a cabo para cada protocolo.

La Figura 5.28(a) presenta los resultados del consumo de corriente obtenidos para el protocolo OLSR. Se observan picos de consumo máximo en los nodos 1 y 4, alcanzando valores de 316.9 mA y 304.7 mA, respectivamente. Por otro lado, en la Figura 5.28(b), se exhiben los valores máximos de consumo para el protocolo B.A.T.M.A.N., con el nodo 1 registrando 350.3 mA y el nodo 3 con 353.2 mA.



(a) Consumo de corriente para OLSR.



(b) Consumo de corriente para B.A.T.M.A.N..

Figura 5.28: Gráfica del consumo de corriente en el Escenario 1

Finalmente en la Tabla 5.5 se presenta el cálculo de la energía en cada uno de los nodos para los dos escenarios. Para esto se toma en cuenta la corriente máxima consumida por la interfaz inalámbrica y el voltaje de operación que corresponde a 5 V (puerto USB A).

Tabla 5.5: Cálculo de la energía en cada nodo

Escenario	Protocolo	Corriente máxima mA				Energía mAh			
		Nodo 1	Nodo 2	Nodo 3	Nodo 4	Nodo 1	Nodo 2	Nodo 3	Nodo 4
1	OLSR	413.5	403	353.2	411.06	206.75	201.5	176.6	205.53
	B.A.T.M.A.N.	414.1	399.9	353.2	411.897	207.05	199.95	176.6	205.94
2	OLSR	316.9	290.3	317.7	304.7	79.225	72.575	79.425	76.175
	B.A.T.M.A.N.	350.3	291.75	353.2	289.641	87.575	72.93	88.3	72.410

5.4. Conclusiones

La evaluación exhaustiva de los mapas de calor y la potencia de los canales en los escenarios 1 y 2 ha proporcionado información valiosa para la configuración de la red Ad-Hoc. La elección del canal en la banda de 2.4 GHz es crucial para evitar interferencias y congestión del espectro con el fin de ofrecer un entorno para una evaluación confiable y precisa entre ambos protocolos de enrutamiento.

Al analizar el rendimiento de los protocolos OLSR y B.A.T.M.A.N., se ha logrado establecer los parámetros ideales para poner a prueba la comunicación entre los nodos. Las pruebas realizadas en dos escenarios diferentes han proporcionado información valiosa sobre el alcance máximo de los protocolos y su comportamiento en situaciones diversas. En el escenario que simula un entorno realista, se concluyó que el primer protocolo alcanzó una distancia máxima

de 150 metros y de 147 para el segundo.

Otro parámetro evaluado fue el bitrate del canal a un salto. Al analizar el perfil de tráfico se obtuvo un valor de 6000 Kbps para ambos protocolos. Además, se determinó que el bitrate máximo que soporta el canal es de 6 Mbps para OLSR y 4.7 Mbps para B.A.T.M.A.N. a una distancia entre nodos de 75 m.

Las simulaciones realizadas con dos nodos en [71] indican que el bitrate en Rx corresponde al 46 %, 35 % y 23.5 % con respecto a la máxima capacidad del estándar 802.11 b/g/n (11 Mbps, 54 Mbps y 96 Mbps). En este contexto, al emplear un escenario real con tarjetas inalámbricas configuradas a 54 Mbps con OLSR se alcanza el 11 % y con B.A.T.M.A.N. el 8.7 %.

Por otro lado, los mejores resultados de la capacidad del canal a múltiples saltos se alcanzaron con el protocolo OLSR. A un salto se alcanza un valor umbral de 6 Mbps. A medida que aumenta el número de saltos, este valor disminuye, llegando a 3 Mbps (2 saltos) y 2.397 Mbps (3 saltos). Por otro lado, con B.A.T.M.A.N. se muestra un comportamiento similar, pero con valores más bajos. El valor umbral para un salto es de 4.634 Mbps, 2.914 Mbps (2 saltos) y 2.038 Mbps (3 saltos).

Los factores que afectan el throughput efectivo en cada nodo se ve limitado por el acceso al canal y por el reenvío de paquetes a los otros nodos. Además, el mecanismo RTS/CTS que evita las colisiones de paquetes añade una cantidad significativa de sobrecarga de protocolo que también se traduce en una disminución del throughput de la red. En adición, el efecto Intra-flow Contention que representa la contención entre paquetes del mismo flujo que se reenvían a diferentes saltos a lo largo de una ruta multisalto, debe considerarse para el valor real de ancho de banda.

Después de analizar todos los parámetros mencionados anteriormente, se realizó un estudio exhaustivo del rendimiento de la red Ad-Hoc en conjunto con la aplicación web móvil, cuyo propósito es implementar un sistema de comunicación para medios de transporte sostenibles. La aplicación permite a los usuarios comunicarse en tiempo real y recibir mensajes informativos entre distintos nodos de la red.

En términos de Delay, los valores promedio obtenidos demostraron una comunicación favorable, cumpliendo con las recomendaciones de la International Telecommunication Union (ITU), que considera adecuados los valores de hasta 150 ms para la comunicación en tiempo real. En cuanto a la métrica de PRR, los resultados revelaron un rendimiento sólido en la recepción de paquetes para ambos protocolos evaluados, con una tasa de recepción superior al 95 %

en ambos escenarios. Por último, en relación al Throughput, los resultados indicaron que esta métrica se encuentra dentro de los valores evaluados en la capacidad del canal, lo que garantiza una comunicación confiable y fluida. En definitiva, los parámetros seleccionados para el funcionamiento de la red nodos ofrecen una comunicación adecuada para una red MANET.

En cuanto al protocolo OLSR, se pudo comprobar que los nodos vecinos se necesita de 0 a $2 \times \text{Hello_Interval}$ para reconocer un nuevo nodo vecino. Y para que desaparezca un nodo vecino se necesita $2 \times \text{Hello_Interval}$ a $3 \times \text{Hello_Interval}$. Por otro lado, cuando se trata de un nodo ubicado a más de dos saltos, se necesita un tiempo mínimo de Hello_Interval y máximo $5 \times \text{Hello_Interval}$. Estos intervalos de tiempo corresponden al tiempo necesario para que un nodo reconozca a un vecino nuevo, así como al tiempo requerido para propagar el mensaje de cambio de topología que anuncia la presencia de este nuevo nodo. En base a esto se determinó y comprobó que el valor de 5 s para los mensajes Hello proporcionan un buen funcionamiento en los experimentos realizados, teniendo así una comunicación fluida.

Para el protocolo B.A.T.M.A.N. se verificó que el incremento del intervalo de tiempo de los mensajes OGM y ELP con un a relación de 2 a 1 mejora la calidad del audio. Los nodos vecinos intercambian información sobre su estado y la calidad de la conexión mediante los mensajes OGM que son enviados a todos los nodos adyacentes de forma periódica. Si se utilizan valores por defecto para estos dos mensaje se genera un alto tráfico en la red. Con el objetivo de evitar el flooding de la red y minimizar la pérdida de datos, se han seleccionado los intervalos de tiempo para los mensajes OGM en 40 s y ELP en 20 s. Con estos valores se logró tener una comunicación fluida sin una pérdida de paquetes significativa.

Conclusiones y Recomendaciones

6.1. Conclusiones

Con la realización de este trabajo se pudo establecer un sistema de comunicación basado en redes MANET para medios de traslado sostenibles. Mediante la configuración de nodos de comunicación Ad-Hoc en bicicletas, se estableció una red MANET que permitió la comunicación entre los nodos de forma eficiente y confiable. El sistema permite la transmisión de datos entre los nodos ubicados en bicicletas, cumpliendo así con el objetivo general establecido. Con esta implementación se contribuye a la promoción de medios de transporte sostenibles al facilitar la comunicación y la interacción entre los usuarios.

La implementación exitosa de los nodos con capacidad de comunicación Ad-Hoc en bicicletas, permitió establecer una infraestructura de red móvil y autónoma. Esta implementación se llevó a cabo considerando factores como la selección de los elementos electrónicos adecuados, la estructura del acoplamiento de los nodos en las bicicletas y la elección de una caja de protección que garantizara la seguridad de los componentes y comodidad de los usuarios. Estos nodos están equipados con la capacidad de establecer y mantener conexiones inalámbricas entre sí, lo que posibilita la comunicación en tiempo real y la transmisión de datos en entornos de movilidad.

Se comparó la funcionalidad de los protocolos proactivos OLSR y B.A.T.M.A.N., evaluando su desempeño en diversos aspectos como la distancia de transmisión, la capacidad del canal y otras métricas relevantes. Estos análisis proporcionaron información detallada sobre el comportamiento de los protocolos en distintos escenarios y condiciones. Los resultados mostraron que ambos protocolos son capaces de establecer conexiones confiables y estables, pero con diferencias en términos de alcance máximo y capacidad del canal en modo estático. Sin embargo, las métricas más importantes a tomar en cuenta son las evaluadas en el sistema con movilidad. En relación al Delay, se encontró que el protocolo OLSR mostró un mejor rendimiento en ambos escenarios. En cuanto a la métrica de PRR, OLSR demostró una mejor recepción en el escenario de comunicación unidireccional, mientras que con B.A.T.M.A.N. fue más efectivo en la comunicación bidireccional. En cuanto al Throughput, en el Escenario 1 B.A.T.M.A.N. mostró un mayor rendimiento en el envío, mientras que ambos protocolos presentaron resultados similares en la recepción. Por otro lado, en el Escenario 2 se obtuvo un mayor Throughput con el protocolo OLSR. Es importante destacar que estos resultados pueden variar según el Escenario evaluado.

En base a los resultados obtenidos con la transmisión de audio, el cual representa el caso más crítico de análisis debido a los requerimientos en delay y PRR se puede concluir que el protocolo que mejor se adaptó a este trabajo fue OLSR. Con OLSR se tuvo un resultado favorable al evaluar la calidad del audio de forma subjetiva. Además, la determinación de los intervalos de tiempo para los mensajes de HELLO y TC en un entorno con dos nodos móviles es más intuitiva de realizar en comparación con B.A.T.M.A.N..

La implementación de una aplicación web móvil ha mejorado significativamente la experiencia de comunicación entre los nodos de la red Ad-Hoc. Esta aplicación se diseñó considerando aspectos como la configuración de una red local en cada nodo que aprovecha la interfaz inalámbrica propia de la SBC, la seguridad de la comunicación para el acceso de las interfaces de audio del navegador del usuario. Adicionalmente, proporciona una interfaz intuitiva y práctica para los usuarios, permitiendo intercambiar mensajes informativos y realizar transmisiones de audio en tiempo real. Asimismo, se ofrece herramientas para la gestión y el control de los nodos, lo que mejora la eficiencia y la funcionalidad general del sistema.

6.2. Recomendaciones

Este trabajo de titulación sienta las bases para futuras investigaciones en el campo de las redes Ad-Hoc y la comunicación en medios de transporte sostenibles. Se sugiere explorar temas relacionados, como el rendimiento de otros protocolos de enrutamiento tanto proactivos y reactivos.

Para obtener resultados más completos, se sugiere probar la red en escenarios más desafiantes, aumentando la distancia entre los nodos, probando distintas velocidades de los nodos y modificando los intervalos de tiempo para el envío de mensajes de los protocolos de enrutamiento. Esto ayudará a evaluar el rendimiento de los protocolos en condiciones más realistas y a identificar posibles desafíos y soluciones.

6.3. Trabajos futuros

A continuación, se mencionan algunas áreas de investigación que pueden considerarse como complemento a la propuesta tecnológica presentada en este trabajo.

Profundizar en el estudio de la movilidad de los nodos en la red Ad-Hoc, para esto se sugiere considerar una cantidad mayor de nodos e incrementar la movilidad en la mayoría de los

misimos. Esto implica analizar los efectos de los desplazamientos y cambios de posición de los nodos en la calidad de la comunicación y en la estabilidad de la red.

Realizar pruebas en escenarios realistas que involucren el tráfico de personas y vehículos, esto permitirá evaluar el rendimiento de la red en condiciones más desafiantes y representativas de entornos urbanos. Se recomienda explorar estrategias de mitigación de interferencias y optimización de recursos en escenarios complejos.

Aplicar medidas de seguridad adicionales para fortalecer la protección de la red Ad-Hoc contra posibles ataques y vulnerabilidades. Esto podría incluir el estudio de algoritmos de cifrado más robustos, técnicas de autenticación avanzada y protocolos de seguridad específicos, así como el desarrollo de mecanismos de detección y prevención de intrusiones.

Cambiar la capa física, se podría considerar el uso de tecnologías y técnicas que permitan ampliar la distancia de transmisión en la red Ad-Hoc. Por ejemplo, se podrían investigar el uso de antenas inalámbricas con una ganancia alta para aumentar el alcance de la señal, o explorar el uso de frecuencias más altas, como en el espectro de ondas milimétricas, para lograr una mayor capacidad y cobertura. Estas mejoras en la capa física podrían contribuir a ampliar las posibilidades de despliegue de la red Ad-Hoc en diferentes escenarios y entornos.

Referencias

- [1] E. Salmeron-Manzano y F. Manzano-Agugliaro, "The electric bicycle: Worldwide research trends," *Energies*, vol. 11, 2018. [En línea]. Disponible: https://www.researchgate.net/publication/326556421_The_Electric_Bicycle_Worldwide_Research_Trends
- [2] K. Pangbourne, D. Stead, M. Mladenovic, y D. Milakis, *The Case of Mobility as a Service: A Critical Reflection on Challenges for Urban Transport and Mobility Governance*. Emerald Publishing, 03 2018, pp. 33–48.
- [3] A. Chrysanthou, "European best practices in bike sharing systems national report coordinator: Panos antoniades local mobility coordinator: Index," *Intelligent Energy Europe*, 2009.
- [4] I. M. de Cuenca. (2015) Plan de movilidad y espacios públicos.
- [5] S. Shaheen y R. Finson, "Intelligent transportation systems," *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*, 2016. [En línea]. Disponible: https://www.researchgate.net/publication/285670989_Intelligent_Transportation_Systems
- [6] R. I. Meneguette, R. E. D. Grande, y A. A. F. Loureiro, "Intelligent transport system in smart cities," *Springer Link*, 2018. [En línea]. Disponible: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-93332-0>
- [7] P. Mohapatra y S. V. Krishnamurthy, *Ad hoc networks: Technologies and protocols*. Springer US, 2005.
- [8] E. Lawrence y L. Ramavel, *Fundamentals of Mobile Ad hoc Network*. Bonfring, 10 2016. [En línea]. Disponible: https://www.researchgate.net/publication/336669364_Fundamentals_of_Mobile_Ad_hoc_Network
- [9] I. F. Akyildiz, X. Wang, y W. Wang, "Wireless mesh networks: A survey," *Computer Networks*, vol. 47, pp. 445–487, 3 2005.
- [10] R. Hekmat, *Ad-hoc networks: Fundamental properties and network topologies*. Springer Netherlands, 2006. [En línea]. Disponible: <https://link.springer.com/book/10.1007/1-4020-5166-2>
- [11] P. Visalakshi, M. Mishra, YusufH, y S. Maity, "Ad hoc network- an overview," *International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)* www.ijmer.com Pp, pp. 27–29, 2013. [En línea]. Disponible: www.ijmer.com

- [12] M. Frikha, *Ad hoc networks: routing, QoS and optimization*. ISTE, 2011. [En línea]. Disponible: <https://www.amazon.com/Ad-Hoc-Networks-Routing-Optimization/dp/1848212275>
- [13] S. Mirza y S. Bakshi, "Introduction to manet," *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, pp. 17–20, 1 2018. [En línea]. Disponible: <https://www.irjet.net/archives/V5/i1/IRJET-V5I103.pdf>
- [14] J. Loo, J. Lloret, y J. Ortiz, *Mobile ad hoc networks: current status and future trends*. Wiley-ISTE, 2012. [En línea]. Disponible: <https://www.routledge.com/Mobile-Ad-Hoc-Networks-Current-Status-and-Future-Trends/Loo-Mauri-Ortiz/p/book/9781439856505>
- [15] M. Barbeau y E. Kranakis, *Principles of ad hoc networking*. John Wiley & Sons, 2007. [En línea]. Disponible: https://books.google.com/books/about/Principles_of_Ad_hoc_Networking.html?hl=es&id=Ik_CJjHlMucC
- [16] T. Clausen y P. Jacquet, *RFC3626: Optimized Link State Routing Protocol (OLSR)*. IETF, 9 2003. [En línea]. Disponible: <https://www.ietf.org/rfc/rfc3626.txt>
- [17] S. Basagni, M. Conti, S. Giordano, y I. Stojmenovic, *Mobile ad hoc networking*. IEEE Press, 2004. [En línea]. Disponible: <https://www.wiley.com/en-ie/Mobile+Ad+Hoc+Networking-p-9780471656883>
- [18] A. G. Sánchez, "Soporte de movilidad entre manet's y la internet, a traves de ipv6 y el protocolo de enrutamiento olsr," *Centro de Investigación Científica y Educación Superior Ensenada*, pp. 30–35, 11 2005.
- [19] C. Aichele, S. Wunderlich, A. Neumann, y M. Lindner, "Better approach to mobile ad-hoc networking (b.a.t.m.a.n.)," *IETF*, 2008. [En línea]. Disponible: <https://datatracker.ietf.org/doc/pdf/draft-wunderlich-openmesh-manet-routing-00.pdf>
- [20] M. Jobbeh, K. Khorzom, y H. Khayou, "B.a.t.m.a.n. layer3 protocol in wireless mesh networks wmns," *International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications*, vol. 81, pp. 27–44, 2019. [En línea]. Disponible: https://www.researchgate.net/publication/344903272_BATMAN_LAYER3_PROTOCOL_IN_WIRELESS_MESH_NETWORKS_WMNs
- [21] S. Khanvilkar, F. Bashir, D. Schonfeld, y A. Khokhar, "Multimedia networks and communication," *The Electrical Engineering Handbook*, pp. 401–425, 1 2005.

- [22] F. Ahsan, N. Khadim, y K. Hussain, "Multimedia traffic engineering in next generation networks," *International Conference on Information & amp*, 2009. [En línea]. Disponible: https://www.academia.edu/343666/Multimedia_Traffic_Engineering_in_Next_Generation_Networks
- [23] "Chapter 3 atm and multimedia traffic," pp. 28–37, 2003. [En línea]. Disponible: <http://www.inrialpes.fr/planete/people/elsayed/msc/ch3.pdf>
- [24] I.-T. R. G.114, "Itu-t series g: Transmission systems and media, digital systems and networks international telephone connections and circuits-general recommendations on the transmission quality for an entire international telephone connection," 5 2003. [En línea]. Disponible: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.114-200305-I/en>
- [25] G. Dernaika y S. Khavtasi, "Multimedia codec evaluation and overview," Blekinge Institute of Technology, Tech. Rep., 2007. [En línea]. Disponible: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:828591/FULLTEXT01.pdf>
- [26] M. van Beurden y A. Weaver, "Free lossless audio codec," *Active Internet-Draft (cellar WG)*, 4 2023. [En línea]. Disponible: <https://datatracker.ietf.org/doc/draft-ietf-cellar-flac/>
- [27] F. Halsall, "Unit-8 transport protocol," in *Multimedia Communications: Applications, Networks, Protocols and Standards*, 1ra ed. Addison-Wesley, 2002.
- [28] F. L. Schiavoni, "Possibilities in network transport protocols to audio stream application context," *Semantic Scholar*, 2008. [En línea]. Disponible: <http://sourceforge.net/projects/medusa-audionet/>
- [29] H. Schulzrinne, S. Casner, R. Frederick, y V. Jacobson, "Rtp: A transport protocol for real-time applications," *RFC org*, 7 2003. [En línea]. Disponible: <https://www.rfc-editor.org/info/rfc3550>
- [30] H. W. Barz y G. A. Bassett, *Multimedia Networks Protocols, Design and Applications*, G. Bassett, Ed. Wiley Publishing, 2016. [En línea]. Disponible: https://www.google.com.ec/books/edition/Multimedia_Networks/326-CgAAQBAJ?hl=es&gbpv=0
- [31] R. Calabrese, "Ultimate guide to audio bitrate & audio formats," <https://homedjstudio.com/>, 7 2022. [En línea]. Disponible: <https://homedjstudio.com/audio-bitrates-formats/>
- [32] L. Deffinbaugh, "What are some common use cases and examples of traffic shaping in different network scenarios?" 3 2023. [En línea]. Disponible: <https://www.linkedin.com/advice/3/what-some-common-use-cases-examples-traffic>

- [33] I.-T. R. G.722, “Series g: Transmission systems and media, digital systems and networks digital terminal equipments – coding of voice and audio signals,” 9 2012. [En línea]. Disponible: <https://www.itu.int/ITU-T/recommendations/rec.aspx?rec=11673&lang=es>
- [34] I.-T. R. P.1305, “P.1305 : efecto de los retardos en la calidad de las teleconferencias,” 7 2016. [En línea]. Disponible: <https://www.itu.int/rec/T-REC-P.1305/es>
- [35] X. Ma, “Packet reception ratios in two-dimensional broadcast ad hoc networks,” *2012 International Conference on Computing, Networking and Communications, ICNC’12*, pp. 412–416, 2012.
- [36] A. O. Lawal, “An overview of raspberry pi,” 2015. [En línea]. Disponible: https://www.academia.edu/32419908/AN_OVERVIEW_OF_RASPBERRY_PI
- [37] R. Pi, “Raspberry pi 3 model b+ – raspberry pi.” [En línea]. Disponible: <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-3-model-b-plus/>
- [38] R. Org, “Raspbian.” [En línea]. Disponible: <http://www.raspbian.org/>
- [39] FFmpeg, “Ffmpeg documentation.” [En línea]. Disponible: <https://ffmpeg.org/documentation.html>
- [40] Tcpdump.org, “Tcpdump & libpcap.” [En línea]. Disponible: <https://www.tcpdump.org/>
- [41] Frenchfries.net, “Tcpstat.” [En línea]. Disponible: <https://frenchfries.net/paul/tcpstat/>
- [42] Wireshark.org, “Wireshark · documentation.” [En línea]. Disponible: <https://www.wireshark.org/docs/>
- [43] Iperf.fr, “iperf - the tcp, udp and sctp network bandwidth measurement tool.” [En línea]. Disponible: <https://iperf.fr/>
- [44] N. Ferdiansyah, N. Suharto, y R. Saptono, “Komparasi performansi node router tengah dan node router tepi pada jaringan manet menggunakan protokol olsr dan batman,” *Jurnal Jaringan Telekomunikasi (Journal of Telecommunication Networks)*, vol. 9, pp. 1–10, 6 2019. [En línea]. Disponible: <https://jartel.polinema.ac.id/index.php/jartel/article/view/168>
- [45] B. Sliwa, S. Falten, y C. Wietfeld, “Performance evaluation and optimization of b.a.t.m.a.n. v routing for aerial and ground-based mobile ad-hoc networks,” *IEEE Vehicular Technology Conference*, vol. 2019-April, 4 2019.

- [46] F. Soriguera y E. Jiménez-Meroño, “A continuous approximation model for the optimal design of public bike-sharing systems,” *Sustainable Cities and Society*, vol. 52, p. 101826, 1 2020.
- [47] M. M. Aydin y M. S. Yildirim, “The investigation of effective parameters on trip length of bikesharing systems (bss),” *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, vol. 9, pp. 163–172, 2019. [En línea]. Disponible: <http://dergipark.gov.tr/gumusfenbil>
[G  FBED/GUSTIJ](http://dergipark.gov.tr/gumusfenbil)
- [48] H. Zhang, X. Song, Y. Long, T. Xia, K. Fang, J. Zheng, D. Huang, R. Shibasaki, y Y. Liang, “Mobile phone gps data in urban bicycle-sharing: Layout optimization and emissions reduction analysis,” *Applied Energy*, vol. 242, pp. 138–147, 5 2019.
- [49] X. Xia, H. Jiang, y J. Wang, “Analysis of user satisfaction of shared bicycles based on sem,” *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, vol. 13, pp. 1587–1601, 3 2022. [En línea]. Disponible: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12652-019-01422-y>
- [50] H. Si, J. gang Shi, G. Wu, J. Chen, y X. Zhao, “Mapping the bike sharing research published from 2010 to 2018: A scientometric review,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 213, pp. 415–427, 3 2019.
- [51] Z. Yang, J. Chen, J. Hu, Y. Shu, y P. Cheng, “Mobility modeling and data-driven closed-loop prediction in bike-sharing systems,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 20, pp. 4488–4499, 12 2019.
- [52] S. Shen, Z. Q. Wei, L. J. Sun, Y. Q. Su, R. C. Wang, y H. M. Jiang, “The shared bicycle and its network—internet of shared bicycle (iosb): A review and survey,” *Sensors (Basel, Switzerland)*, vol. 18, 8 2018. [En línea]. Disponible: [/pmc/articles/PMC6111972/](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6111972/)
[https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6111972/](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6111972/?report=abstracthttps://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6111972/)
- [53] F. CHEN, K. TURO  , M. K  LOS, P. CZECH, W. PAMU  A, y G. SIERPI  NSKI, “Fifth-generation bike-sharing systems: examples from poland and china,” *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*, vol. 99, pp. 5–13, 6 2018.
- [54] T. Bieli  nski y A. Wa  zna, “New generation of bike-sharing systems in china: Lessons for european cities,” *Journal of Management and Financial Sciences*, pp. 25–42, 7 2019.

- [55] S. Yoo, S. Hong, Y. Park, A. Okuyama, Z. Z. Y. Yoshida, y S. Managi, “Danger, respect, and indifference: Bike-sharing choices in shanghai and tokyo using latent choice models,” *MPRA Munich Personal RePEc Archive*, vol. 108312, 6 2021. [En línea]. Disponible: <https://mpra.ub.uni-muenchen.de/108312/>
- [56] E. Macioszek, P. Świerk, y A. Kurek, “The bike-sharing system as an element of enhancing sustainable mobility—a case study based on a city in poland,” *Sustainability*, vol. 12, 4 2020.
- [57] “Kraków. niemal milion wypożyczeń wavelo w 2018 r. - transport publiczny.” [En línea]. Disponible: <https://www.transport-publiczny.pl/wiadomosci/krakow-niemal-milion-wypozychen-wavelo-w-2018-r-60604.html>
- [58] “How metro dc’s bikeshare system works | capital bikeshare.” [En línea]. Disponible: <https://capitalbikeshare.com/how-it-works>
- [59] A. Rosa, P. Ákos Costa, y J. Leitão, “Generalizing wireless ad hoc routing for future edge applications,” *Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering, LNICST*, vol. 419 LNICST, pp. 264–279, 2022. [En línea]. Disponible: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-94822-1_15
- [60] L. H. C. Reis, D. F. Macedo, J. Marcos, y S. Nogueira, “Autoconfiguração de rotas em redes ad-hoc de vants,” *Anais do Workshop de Gerência e Operação de Redes e Serviços (WGRS)*, pp. 99–112, 5 2022. [En línea]. Disponible: <https://sol.sbc.org.br/index.php/wgrs/article/view/21480>
- [61] S. Yogarayan, S. F. A. Razak, y A. Azman, “An experimental testbed performance evaluation for vehicular ad hoc network (vanet),” *Journal of Southwest Jiaotong University*, vol. 57, pp. 189–200, 12 2022.
- [62] A. Agussalim, D. S. Y. Kartika, y A. D. Rahajoe, “Implementation of ad-hoc protocol on tandem multihop wireless network,” *Jurnal Ecotipe (Electronic, Control, Telecommunication, Information, and Power Engineering)*, vol. 9, pp. 201–209, 10 2022. [En línea]. Disponible: <https://journal.ubb.ac.id/index.php/ecotipe/article/view/3305>
- [63] A. Russoniello y E. Gamess, “Evaluation of different routing protocols for mobile ad-hoc networks in scenarios with high-speed mobility,” *International Journal of Computer Network and Information Security*, vol. 10, pp. 46–52, 10 2018.

- [64] M. Bano, A. Qayyum, R. N. B. Rais, y S. S. A. Gilani, "Soft-mesh: A robust routing architecture for hybrid sdn and wireless mesh networks," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 87 715–87 730, 2021.
- [65] Y. Su, K. Nguyen, y H. Sekiya, "A comparison of blockchain recovery time in static and mobile iot-blockchain networks," *Future Internet 2022, Vol. 14, Page 330*, vol. 14, p. 330, 11 2022. [En línea]. Disponible: <https://www.mdpi.com/1999-5903/14/11/330/htmhttps://www.mdpi.com/1999-5903/14/11/330>
- [66] Ecomove, "Tiv - ecomove." [En línea]. Disponible: <https://ecomove.com.ec/producto/tiv/>
- [67] O. ORG, "Olsr.org wiki." [En línea]. Disponible: http://www.olsr.org/mediawiki/index.php/Main_Page
- [68] WikiStart, "Wikistart - open-mesh - open mesh." [En línea]. Disponible: <https://www.open-mesh.org/projects/open-mesh/wiki>
- [69] Nodejs.org, "Node.js." [En línea]. Disponible: <https://nodejs.org/en/about>
- [70] N. Eras y J. Otavalo, "Aplicación web para manet bike comm system," 2023. [En línea]. Disponible: <https://github.com/josandotavalo/BCSweb>
- [71] W. E. C. Hernández, "Quality of service routing and mechanisms for improving video streaming over mobile wireless ad hoc networks," 6 2015. [En línea]. Disponible: https://www.researchgate.net/publication/325049143_Quality_of_service_routing_and_mechanisms_for_improving_video_streaming_over_mobile_wireless_ad_hoc_networks
- [72] A. Javaid, "Raspberry pi 3 b+ pinout," 2022. [En línea]. Disponible: <https://linuxhint.com/raspberry-pi-3b-plus-pinout/>
- [73] A. Networks, "Technical specifications awus036nh usb wlan adapter," 12 2009. [En línea]. Disponible: <http://www.rokland.com/support/specs/AWUS036NH.pdf>
- [74] L. Ada, "Adafruit ina219 current sensor breakout," *Adafruit*, 5 2023. [En línea]. Disponible: <https://learn.adafruit.com/adafruit-ina219-current-sensor-breakout>
- [75] R. P. OS, "Operating system images – raspberry pi." [En línea]. Disponible: <https://www.raspberrypi.com/software/operating-systems/>

Anexos

Anexo A. Especificaciones técnicas de la Capa Física

■ Raspberry Pi

Las placas Raspberry Pi están disponibles en diferentes modelos, cada uno con diferentes características y especificaciones técnicas, en la Tabla 7.1 se presenta la información de algunas de estas versiones.

Tabla 7.1: Características de los diferentes modelos de Raspberry Pi.

Modelo	Procesador	Memoria RAM	Almacenamiento	Conectividad	Puertos
Raspberry Pi Zero W	Broadcom BCM2835 Single-Core 1GHz	512MB	Ranura para tarjeta microSD	Wi-Fi Bluetooth	Mini HDMI Micro USB OTG GPIO
Raspberry Pi 2 Model B	Broadcom BCM2836 Quad-Core 900MHz	1GB	Ranura para tarjeta microSD	Ethernet	4 x USB 2.0 HDMI Ethernet, GPIO
Raspberry Pi 3 Model B	Broadcom BCM2837 Quad-Core 1.2GHz 64-bit	1GB	Ranura para tarjeta microSD	Ethernet Wi-Fi Bluetooth	4 x USB 2.0 HDMI Ethernet GPIO
Raspberry Pi 3 Model B+	Broadcom BCM2837B0 Quad Core 64-bit 1.4GHz	1GB	Ranura para tarjeta microSD	Ethernet Wi-Fi Bluetooth	4 x USB 2.0 HDMI Ethernet GPIO
Raspberry Pi 3 Model A+	Broadcom BCM2837B0 Quad Core 1.4GHz	512MB	Ranura para tarjeta microSD	Wi-Fi Bluetooth	1 x USB 2.0 HDMI GPIO
Raspberry Pi 4	Broadcom BCM2711 Quad-core 1.5GHz	1GB, 2GB, 4GB	Ranura para tarjeta microSD	Ethernet Wi-Fi Bluetooth	2 x USB 2.0, 2 x USB 3.0 HDMI Ethernet GPIO

■ General-purpose input/output (GPIO)

Como se indica en [36] Raspberry Pi cuenta con un número distinto de pines disponibles según la versión. Estos pines pueden ser clasificados de dos formas: mediante su número de GPIO o su número físico (physical pin number). La Figura 7.1 muestra la distribución de estos pines en el modelo Raspberry Pi 3B+.

Los GPIO se pueden configurar como:

- **Habilitación/Deshabilitación:** pueden ser habilitados o deshabilitados según sea necesario, lo que permite controlar su funcionalidad en tiempo de ejecución.
- **Lectura/Escritura de valores de entrada/salida:** pueden obtener información de sensores, interruptores u otros dispositivos conectados o encender/enviar valores como salida. Los valores típicos son alto (1) o bajo (0), dependiendo del estado del dispositivo conectado.

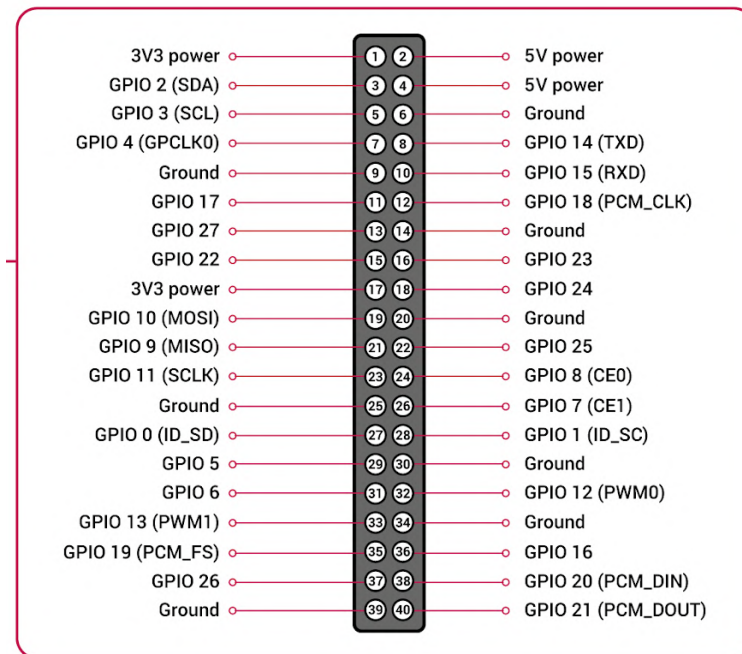


Figura 7.1: Distribución de GPIO del modelo Raspberry Pi 3B+. Fuente: [72]

■ Antena AWUS036NH

Es un adaptador USB inalámbrico de alta potencia fabricado por la marca Alfa Network. Se utiliza para mejorar la conectividad inalámbrica en dispositivos como computadoras y laptops. Permite conectarse a redes Wi-Fi en las bandas de 2.4 GHz. Por otro lado es compatible con los estándares de red IEEE 802.11b/g/n y ofrece una velocidad de transferencia de hasta 150 Mbps, lo que garantiza una conexión rápida y confiable. Además la antena cuenta con una potencia de transmisión de hasta 2000 mW, lo que le permite amplificar la señal y mejorar el alcance y la estabilidad de la conexión Wi-Fi [73].

En la Figura 7.2 se presentan los componentes que conforman la antena y también se da una descripción de los mismos.

- Antena: incluye una antena desmontable de alta ganancia, tiene una potencia de transmisión de 5 dBi, lo que facilita la amplificación de la señal y mejorar el alcance de la conexión Wi-Fi.
- Amplificador de señal: posee un amplificador de señal incorporado, que mejora la potencia de transmisión, la calidad y la estabilidad de la conexión inalámbrica.
- Base y cable USB: permiten una mejor colocación, estabilidad y ajuste de la antena para maximizar la recepción de señal.



Figura 7.2: Antena AWUS036NH

■ Bicicleta eléctrica TIV

La marca Ecomove Electric Bikes es una empresa dedicada a la fabricación y venta de bicicletas eléctricas con materiales respetuosos con el medio ambiente, las mismas que cuentan con tecnología avanzada, componentes de alta calidad y baterías de larga duración para garantizar una mayor autonomía y eficiencia energética.

Uno de los modelos más destacados de la marca es Ecomove Electric Bikes TIV, la cual se enfoca especialmente en la sostenibilidad y el cuidado del medio ambiente. Esta bicicleta cuenta con una batería de iones de litio de 36 V y 7,8 Ah, que proporciona una potencia suficiente para ofrecer una autonomía de hasta 50 Km con una sola carga. Además, la batería se puede quitar fácilmente para su carga, la cual se completa en tan solo 3-5 horas. La bicicleta también está equipada con un motor de 250 W, lo que le permite alcanzar una velocidad máxima de 28 Km/h [66].

En la Figura 7.3 se puede apreciar la bicicleta TIV, donde se destaca la ubicación de la batería. Es importante mencionar que en la parte trasera de la bicicleta se encuentran los conectores para la carga, así como un puerto USB para otras necesidades.

■ Sensor de corriente

El sensor de corriente INA219 es fabricado por Texas Instruments, está diseñado para medir



Figura 7.3: Bicicleta Eléctrica TIV

corriente, voltaje y potencia en un sistema electrónico. Es un dispositivo de monitorización de energía bidireccional de desviación cero que permite supervisar el voltaje de derivación, el voltaje del bus, la corriente y la potencia. Este módulo está equipado con una interfaz integrada compatible con Inter-Integrated Circuit (I2C) o System Management Bus (SMBus), que facilita la comunicación de datos con microcontroladores.

Dentro de sus datos técnicos en [74] expone que para su funcionamiento este dispositivo utiliza el principio del efecto Hall para medir la corriente. Detecta el campo magnético generado por la corriente que fluye a través de un conductor y lo convierte en una señal eléctrica proporcional. Además, tiene un rango de medición de corriente de hasta ± 3.2 A con una precisión de 0.8 % del valor leído. Puede manejar corrientes bidireccionales y ofrece una resolución de hasta 1.024 mA.

El INA219 se utiliza ampliamente en una variedad de aplicaciones, incluyendo monitoreo de energía, sistemas de alimentación, cargadores de baterías, sistemas de energía renovable, control de motores y mucho más. Gracias a su alta precisión, bajo consumo de energía y facilidad de uso, se ha convertido en una opción muy popular para medir corriente y voltaje en sistemas electrónicos.

La Figura 7.4 se puede apreciar una representación visual de los componentes del sensor INA219.

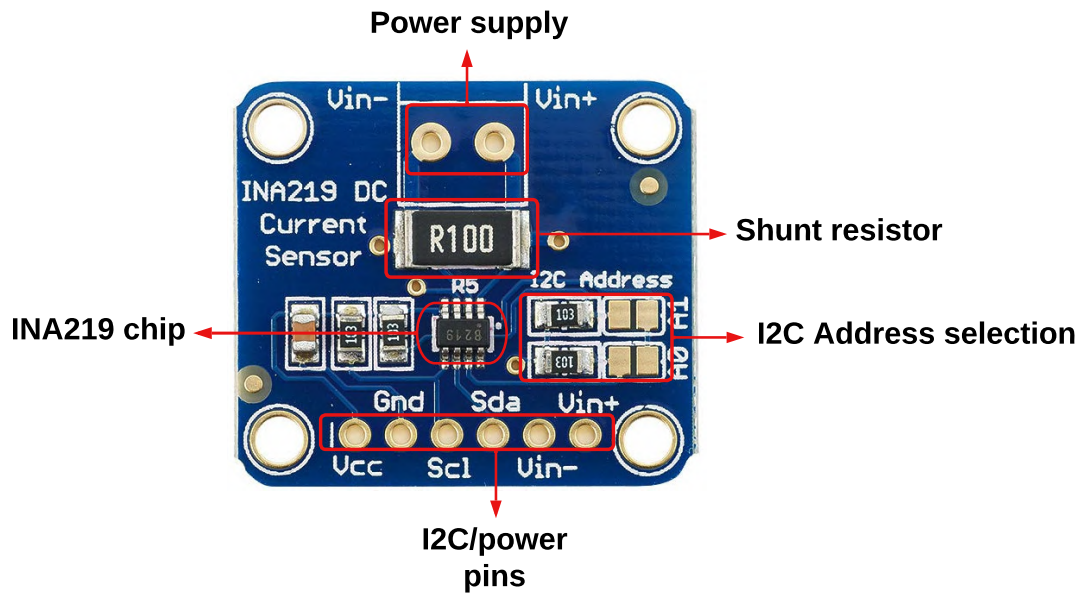


Figura 7.4: Sensor de corriente INA219

■ Pines

A continuación, se presenta una breve descripción de los pines:

■ Pines de alimentación

- VCC: pin de alimentación de la placa entre 3.3 V a 5 V.
- GND: pin de tierra común para la alimentación y la lógica.

■ Pines I2C

- Scl: pin de la señal de reloj I2C.
- Sda: pin para la señal de datos I2C.

■ Otros Pines

- Vin+: es el pin positivo de entrada de la carga a sensor su consumo de corriente.
- Vin-: es el pin de entrada negativa de la carga a sensor su consumo de corriente.

Anexo B. Diagrama de la metodología

En la Figura 7.5, se presentan detalladamente las diferentes etapas seguidas para la configuración y evaluación de la red, las cuales fueron descritas en los capítulos de metodología y resultados.

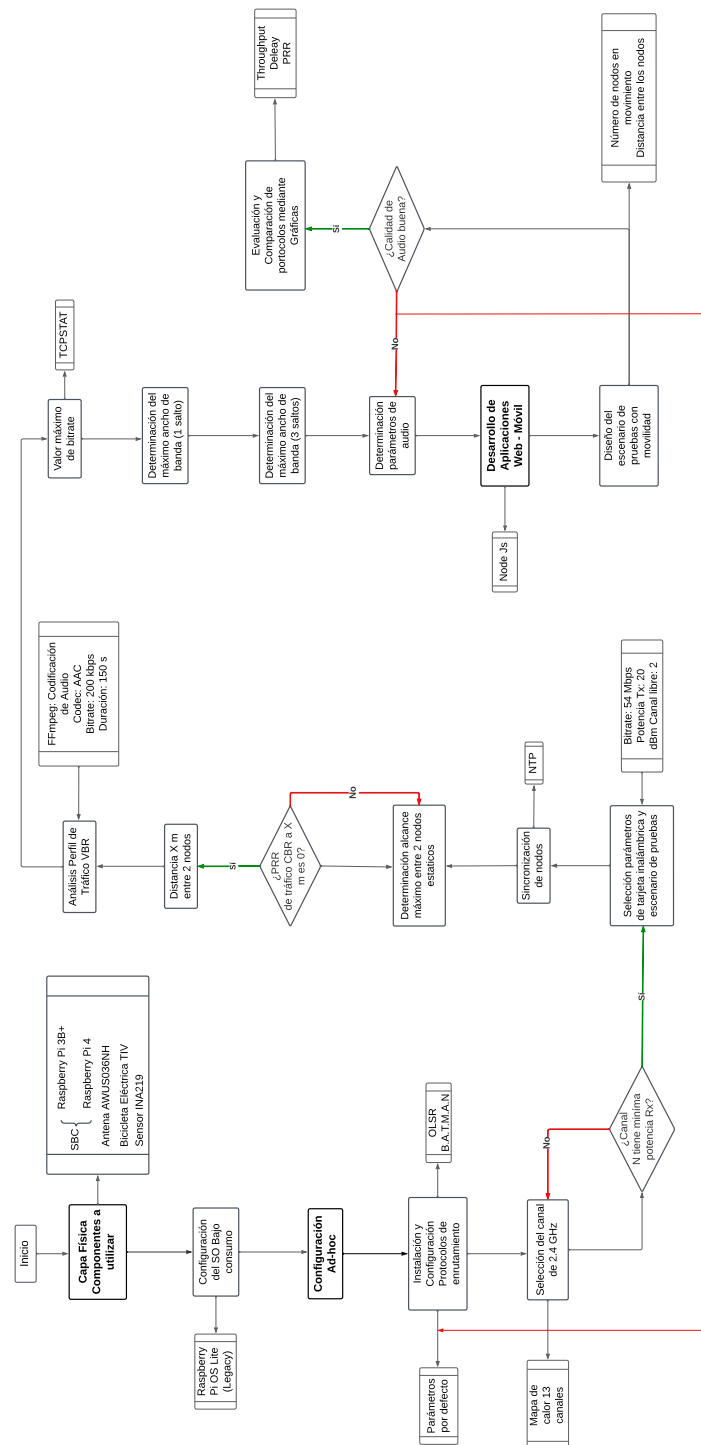


Figura 7.5: Diagrama esquemático de la metodología empleada para la evaluación de la red

Anexo C. Configuración del OS

■ Instalación del OS

En este apartado se presenta el proceso que se siguieron para la instalación y configuración del OS para la Raspberry Pi model 3 B+, para lo cual se requiere una tarjeta MicroSD de al menos 8 GB.

■ Descarga e instalación de la imagen Raspberry Pi OS Lite (Legacy)

- Descargar la imagen de Raspberry Pi OS Lite (Legacy), la cual corresponde a una versión de Debian Buster con Kernel de linux versión 5.10.X que se encuentra en la página oficial [\[75\]](#).
- Instalar este Raspbian en la tarjeta Micro SD mediante el Raspberry Pi Imager.

■ Acceso a la consola de Raspberry Pi

Una vez realizada la instalación se procede a la configuración, todo esto se realiza mediante comandos.

- Para poder acceder a la consola se debe ingresar el usuario y contraseña.
 - Usuario: pi
 - Contraseña: raspberry
- Para cambiar la fuente de la terminal colocar el siguiente comando: `sudo dpkg-reconfigure console-setup` Se elegirán las siguientes opciones
 - Encoding: UTF-8
 - Guess optional character set
 - Font for the console: Terminus
 - Font size: 12x24

■ Configuración de la Raspberry Pi

En este punto se presentan las configuraciones para el sistema, interfaz, localización y opciones avanzadas mediante el comando:

```
sudo raspi-config
```

- Opciones del sistema: en este punto se escoge la red a la cual se va a conectar el dispositivo.
 - Wireless LAN:
 - Country EC
 - SSID
 - Passphrase
 - Boot / Auto Login: Console Autologin
- Opciones de Interfaz: se habilitan las interfaces SSH e I2C. La primera permitirá conectarse de forma remota y la segunda es para poder conectar el sensor de corriente INA219.
 - SSH
 - I2C
- Opciones de Localización: Se realiza la selección de la localización, la zona horaria, idioma entre otras opciones que se indican a continuación:
 - Locale: es_EC.UTF-8 UTF-8
 - Timezone: America / Guayaquil
 - Keyboard:
 - Generic 105-key PC (intl.)
 - Spanish (Latin American)
 - The default for the keyboard layout
 - No compose key

Anexo D. Protocolos OLSR y B.A.T.M.A.N.

A continuación se detallan las versiones y sitios web empleados para la descarga de los protocolos de enrutamiento empleados en este trabajo.

■ Instalación del protocolo OLSR

Los siguientes comandos permiten la instalación del protocolo OLSR en una Raspberry Pi presentes en el Extracto de código 7.1. El archivo de configuración `olsrd.conf`, ubicado en la ruta `/etc/olsrd/`, ofrece una variedad de opciones para personalizar el funcionamiento del protocolo. En este archivo, es posible definir la interfaz inalámbrica utilizada por el protocolo y ajustar los intervalos de tiempo que determinan la frecuencia de envío de mensajes de control y la actualización de la información de enrutamiento en la red. Estas opciones permiten adaptar el comportamiento de OLSR a las necesidades específicas de la red, optimizando la eficiencia y el rendimiento de la comunicación entre los nodos.

```
sudo wget http://www.olsr.org/releases/0.9/olsrd-0.9.0.3.tar.bz2
```

```
sudo tar -xf olsrd-0.9.0.3.tar.bz2
```

```
cd olsrd-0.9.0.3
```

```
sudo make
```

```
sudo make install
```

Extracto de código 7.1: Comandos para la instalación del *daemon* `olsrd-0.9.0.3`

■ Instalación del protocolo B.A.T.M.A.N.

A continuación se presentan los comandos utilizados para llevar a cabo la instalación del protocolo B.A.T.M.A.N. Adv en una Raspberry Pi presentes en el Extracto de código 7.2.

```
sudo apt-get install libnl-3-dev libnl-genl-3-dev -y
```

```
sudo git clone https://git.open-mesh.org/batctl.git
```

```
cd batctl
```

```
sudo make install
```

Extracto de código 7.2: Comandos para la instalación del *daemon* B.A.T.M.A.N. Adv.

Además, se ejecutan los comandos para cargar el B.A.T.M.A.N.-adv kernel module y detener el proceso de DHCP en la interfaz de red inalámbrica. Estas acciones son necesarias para asegurar un correcto funcionamiento del protocolo y optimizar la configuración de la red. Estos comandos se presentan en el Extracto de código 7.3.

```
echo 'batman-adv' | sudo tee --append /etc/modules
```

```
echo 'denyinterfaces wlan1' | sudo tee --append /etc/dhcpd.conf
```

Extracto de código 7.3: Comandos de configuración del protocolo B.A.T.M.A.N. Adv

■ Ejecución automática de los protocolos

Con el fin de lograr la ejecución automática de cada protocolo en la Raspberry Pi, se han desarrollado scripts que permiten configurar las interfaces en modo Ad-Hoc y establecer sus parámetros, incluyendo la dirección ip.

A continuación, se presenta el código de configuración del protocolo OLSR en el Extracto de código 7.4 y de B.A.T.M.A.N. en el Extracto de código 7.5.

```
#!/bin/bash
```

```
# Configuración modo ad-hoc
```

```
sudo iwconfig wlan1 rate 54M
```

```
sudo ip link set wlan1 down
```

```
sudo ifconfig wlan1 mtu 1500
```

```
sudo iwconfig wlan1 mode ad-hoc
```

```
sudo iwconfig wlan1 essid ".olsr_network"
```

```
sudo iwconfig wlan1 ap any
```

```
sudo iwconfig wlan1 channel 2
```

```
sudo ip link set wlan1 up
```

```
sudo iwconfig wlan1 txpower 20dBm
```

```
sudo ifconfig wlan1 10.0.0.21/24
```

```
# OLSRd
```

```
sudo olsrd -i wlan1
```

exit

Extracto de código 7.4: Script del nodo 1 en modo Ad-Hoc con protocolo OLSR

```
#!/bin/bash

# Configuración modo ad-hoc

sudo iwconfig wlan1 rate 54M

sudo ip link set wlan1 down

sudo ifconfig wlan1 mtu 1500

sudo iwconfig wlan1 mode ad-hoc

sudo iwconfig wlan1 essid "batman_network"

sudo iwconfig wlan1 ap any

sudo iwconfig wlan1 channel 2

sudo ip link set wlan1 up

sudo iwconfig wlan1 txpower 20dBm

# BATMAN-adv

sudo modprobe batman-adv

sudo batctl if add wlan1

sudo ifconfig bat0 up

sudo ifconfig bat0 10.0.0.11/24
```

Extracto de código 7.5: Script del nodo 1 en modo Ad-Hoc con protocolo B.A.T.M.A.N.-Adv

Por último, es importante conceder permisos de ejecución a los scripts y asegurarse de que se ejecuten automáticamente al encender la Raspberry Pi. Para lograr esto, se recomienda agregar la ruta del script seguido de “&” en el archivo rc.local ubicado en el directorio /etc. A continuación se detallan estos comandos en el Extracto de código 7.6

```
sudo chmod +x batman_node1.sh

sudo chmod +x olsr_node1.sh
```

Extracto de código 7.6: Comandos para permisos de ejecución

Anexo E. Sincronización de nodos

El protocolo NTP se instala en una Raspberry Pi ejecutando los comandos presente en el Extracto de código 7.7.

```
sudo apt-get install ntp -y
```

```
sudo apt-get install ntpdate -y
```

Extracto de código 7.7: Comandos para la instalación de NTP y NTPDATE

Para el caso del nodo servidor se deben comentar los pool de servidores NTP de Debian y agregar las líneas del Extracto de código 7.8 al archivo ntp.conf que se encuentra en la ruta /etc.

```
server 3.ec.pool.ntp.org
```

```
server 3.south-america.pool.ntp.org
```

```
server 0.south-america.pool.ntp.org
```

```
server 127.127.1.0
```

```
fudge 127.127.1.0 time1 1 stratum 14
```

Extracto de código 7.8: Configuración del servidor NTP

Por otro lado, para el nodo cliente NTP se deben comentar los pool de servidores NTP de debian y agregar las líneas del Extracto del código 7.9 al archivo ntp.conf.

```
disable auth
```

```
broadcastclient
```

```
server 10.0.0.1 prefer iburst
```

Extracto de código 7.9: Configuración del servidor NTP

Anexo F. Configuración de Raspberry Pi como Access Point

En el Anexo se detallan las configuraciones realizadas en la interfaz inalámbrica WLAN0 para establecer un Access Point y configurar un servidor DHCP. Estas configuraciones son fundamentales para el correcto funcionamiento de la aplicación web móvil desarrollada en este proyecto. Para lograr esto, se instalaron las herramientas hostapd y dnsmasq como se indica en el Extracto de código 7.10.

```
sudo apt-get install hostapd -y  
sudo apt-get install dnsmasq -y
```

Extracto de código 7.10: Instalación de hostapd y dnsmasq

En el archivo dhcpcd.conf, que se encuentra en la ubicación /etc, se realiza la configuración de una dirección IP estática mediante la adición de las líneas del Extracto de código 7.11.

```
interface wlan0  
  
static ip_address=192.168.1.1/24  
  
nohook wpa_supplicant
```

Extracto de código 7.11: Configuración de IP estática en la interfaz wlan0 del nodo 1

Además, se habilita la capacidad de enrutamiento al editar el archivo sysctl.conf ubicado en la ruta /etc. En el Extracto de código 7.12 se muestra la línea que se tiene que cambiar.

```
net.ipv4.ip_forward=1
```

Extracto de código 7.12: Configuración de IP estática en la interfaz wlan0 del nodo 1

Por otro lado, la configuración del servidor DHCP se realiza mediante la adición de las siguientes líneas al archivo dnsmasq.conf ubicado en la ruta /etc. Esta configuración se presenta en el Extracto de código 7.13.

```
interface=wlan0  
  
dhcp-range=192.168.1.10,192.168.1.200,255.255.255.0,24h  
  
domain=wlan
```

Extracto de código 7.13: Configuración de IP estática en la interfaz wlan0 del nodo 1

Para asegurarse de que hostapd se inicie automáticamente cada vez que el equipo se encienda y la interfaz WLAN0 esté completamente desbloqueada, se deben ejecutar los comandos presentes en el Extracto de código 7.14:

```
sudo systemctl unmask hostapd
```

```
sudo rfkill unblock wlan
```

Extracto de código 7.14: Inicio automático del hostapd daemon

Por último, se requiere editar el archivo hostapd.conf ubicado en el directorio /etc/hostapd. A continuación en el Extracto de código 7.15 se presentan estos comandos.

```
country_code=EC
```

```
interface=wlan0
```

```
ssid=NONDEXnetwork
```

```
hw_mode=g
```

```
channel=12
```

```
macaddr_acl=0
```

```
auth_algs=1
```

```
ignore_broadcast_ssid=0
```

```
wpa=2
```

```
wpa_passphrase=nodexnetwork
```

```
wpa_key_mgmt=WPA-PSK
```

```
wpa_pairwise=TKIP
```

```
rsn_pairwise=CCMP
```

Extracto de código 7.15: Inicio automático del hostapd daemon