



APLICACIÓN DE MANET COMO SISTEMA DE COMUNICACIÓN EN LA MOVILIDAD SOSTENIBLE

APPLICATION OF MANETS AS A COMMUNICATION SYSTEM FOR SUSTAINABLE MOBILITY

Nancy Eras¹ , José Andrés Otavalo¹ , Santiago González^{1,*} 

Recibido: 09-05-2024, Recibido tras revisión: 10-06-2024, Aceptado: 16-09-2024, Publicado: 01-01-2025

Resumen

En este artículo se presenta una arquitectura basada en el paradigma MANET (Mobile Ad Hoc Network) como un sistema de comunicación de emergencia entre usuarios de bicicletas eléctricas. La solución consta de cuatro nodos móviles que representan a los usuarios y un nodo fijo principal, que emula una estación de anclaje de bicicletas. Esta arquitectura permite la comunicación multisalto entre los nodos, utilizando los protocolos de enrutamiento proactivos OLSR (Optimized Link State Routing) y BATMAN (Better Approach to Mobile Ad Hoc Networking). El estudio se dividió en tres etapas principales. Primero, se hizo un análisis del medio inalámbrico para determinar la distancia máxima de transmisión y el bitrate máximo entre dos nodos. Posteriormente, se caracterizó el comportamiento del throughput en una configuración multisalto conformada por cuatro nodos con el fin de establecer la capacidad de la red en términos de ancho de banda. Finalmente, se implementó una aplicación web para la transmisión de tráfico de audio y texto. En cuanto a la evaluación de la propuesta, se diseñaron dos escenarios que emulan la integración de un nuevo ciclista a la red y la comunicación entre dos usuarios en movimiento. Los resultados revelan que OLSR proporciona una mejor operación del sistema, con un throughput de 2.54 Mbps a 3 saltos y un PRR (*Packet Reception Rate*) superior al 96 %. Además, garantiza un delay dentro de la recomendación G.114 de la ITU-T (*International Telecommunication Union-Telecommunication*) para una comunicación bidireccional.

Palabras clave: BATMAN, BSS, ITS, MANET, OLSR, sistema de comunicación de emergencia

Abstract

This paper presents an architecture based on the MANET (Mobile Ad Hoc Network) paradigm as an emergency communication system between users of electric bicycles. The solution consists of 4 mobile nodes representing the users and a main fixed node, which emulates a bicycle docking station. This architecture allows multi-hop communication between the nodes, using the proactive routing protocols OLSR (Optimized Link State Routing) and BATMAN (Better Approach to Mobile Ad Hoc Networking). The study was divided into 3 main stages. First, an analysis of the wireless medium was performed to determine the maximum transmission distance and the maximum bitrate between 2 nodes. Subsequently, the throughput behavior was characterized in a multi-hop configuration consisting of 4 nodes in order to establish the network capacity in terms of bandwidth. Finally, a web application was implemented for the transmission of audio and text traffic. Regarding the evaluation of the proposal, two scenarios were designed to emulate the integration of a new cyclist to the network and the communication between two users in motion. The results reveal that OLSR provides a better system operation, with a throughput of 2.54 Mbps at 3 hops and a PRR (Packet Reception Rate) higher than 96%. In addition, it guarantees a delay within the ITU-T (International Telecommunication Union-Telecommunication) G.114 recommendation for bidirectional communication.

Keywords: BATMAN, BSS, Emergency communication system, ITS, MANET, OLSR

^{1,*}Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador.
 Autor para correspondencia ✉: santiago.gonzalezm@ucuenca.edu.ec.

Forma sugerida de citación: Eras, N.; Otavalo, J. A. y González, S. “Aplicación de MANET como sistema de comunicación en la movilidad sostenible,” *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, N.º 33, pp. 27-37, 2025. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n33.2025.03>.

1. Introducción

La bicicleta es un medio de transporte esencial para la implementación de sistemas de movilidad sostenibles. En Salmerón y Manzano [1], se destacan las ventajas que ofrece al usuario para viajar de forma asequible, eficiente, segura y respetuosa con el medioambiente. En tal sentido, varias ciudades han implementado los denominados BSS (*Bike Sharing Systems*). No obstante, a pesar de las bondades resaltadas, los usuarios están expuestos a condiciones tales como: la congestión de tráfico, accidentes, la contaminación ambiental y auditiva, entre otros [2].

En tal contexto, los BSS han evolucionado tecnológicamente y hoy se encuentran en su cuarta y quinta generación, integrando mejoras para facilitar el uso compartido, incorporar bicicletas eléctricas, así como desplegar sistemas de comunicación entre los usuarios [3]. Dichos sistemas forman parte de los ITS (*Intelligent Transport System*) que han sido adoptados ampliamente en diversas ciudades del mundo, contribuyendo, además, a la reducción de emisiones de CO_2 [4–8].

Por otra parte, considerando que un BSS implica múltiples usuarios, los sistemas ITS han adoptado arquitecturas de comunicación híbridas basadas en el paradigma ad hoc, en concreto en redes MANET y VANET (*Vehicular Ad Hoc Network*).

En particular, en una red tipo MANET, cada nodo cumple la función de dispositivo terminal y a la vez de enrutador, lo que permite establecer enlaces de comunicación de una forma ágil y sin la necesidad de una infraestructura de red centralizada. Consecuentemente, representan una opción tecnológica valiosa para escenarios que requieran sistemas de comunicación resilientes, como se discute en [9,10]. En cuanto a los desafíos de implementación, se debe considerar topologías dinámicas debido al movimiento de los nodos, las restricciones de energía en el caso de emplear baterías, así como la variabilidad del medio inalámbrico, especialmente en configuraciones multisalto [11,12].

En tal contexto, en la literatura se han propuesto diversos mecanismos de enrutamiento para hacer frente a los desafíos en diferentes aplicaciones y escenarios, tales como MANET, VANET, FANET (*Flying Ad Hoc Network*), SANET (*Sea Ad Hoc Network*), entre otros [13]. En especial, los trabajos previos destacan la funcionalidad de protocolos tipo proactivos frente a los reactivos o híbridos, incluso en topologías muy cambiantes [14,15].

Cabe indicar que la mayor parte de las propuestas han sido evaluadas en entornos de simulación y bajo condiciones controladas, lo que revela el desafío y complejidad adicional que conlleva la experimentación en escenarios y aplicaciones reales [14]. A continuación, se discuten los trabajos más relevantes disponibles en la literatura con énfasis en aplicaciones que requieran

sistemas de comunicación resilientes o de emergencia.

Los sistemas de comunicación de emergencia son críticos en escenarios donde las infraestructuras tradicionales de telecomunicaciones se encuentren inoperables (v. g., sismos, inundaciones, accidentes, zonas de difícil acceso o con coberturas limitadas) [12,16].

León et al. [17] presenta una evaluación de protocolos de enrutamiento en aplicaciones de emergencia mediante FANET, los resultados destacan el uso de los mecanismos AODV (*Ad Hoc On-Demand Distance Vector*), DSDV (*Destination Sequenced Distance Vector*) y OLSR. Por otro lado, Soomro et al. [18] indican que en aplicaciones de emergencia los protocolos proactivos presentan un menor delay entre los dispositivos finales, dado que sus tablas de enrutamiento se actualizan ante un cambio en la topología de red. Sin embargo, esto supone otros retos como altos requerimientos en ancho de banda y consumo energético [19].

En [20], se compara la operación de los protocolos OLSR y BATMAN en la banda de 2.4 GHz como en 5 GHz. Los resultados revelan un mejor desempeño de OLSR en cuanto a *throughput* (0.91 Mbps para 2.4 GHz y 0.82 Mbps para 5 GHz a una distancia de 50 m) y en lo que respecta a la tasa de pérdida de paquetes o PLR (*Packet Lost Ratio*) con un 11 % para 2.4 GHz y un 20.4 % para 5 GHz.

De igual manera, en [21] se comparan los protocolos OLSR y BATMAN, en este caso se definen dos escenarios de análisis. En primer lugar, una topología multisalto con 4 nodos estáticos, donde se destaca un mayor *throughput* para el caso de OLSR (10 Mbps a 2 saltos y 6 Mbps a 3 saltos) así como un menor delay para BATMAN (6 ms a 2 saltos y 8 ms a 3 saltos). Adicionalmente, se efectúa la evaluación sobre una topología mesh donde los dos protocolos presentan una tasa de recepción del 100 %.

En cuanto al tipo de tráfico, en la actualidad el contenido multimedia es predominante en Internet, en tal contexto en [10] se realiza una comparación de diferentes códecs de video sobre una red ad hoc multisalto. Los autores evaluaron métricas fundamentales como el PRR, delay y *throughput* para la transmisión de audio y video en tiempo real, el estudio concluye que el códec de video VP8 es el más adecuado para el escenario propuesto.

Otros estudios, en cambio, proponen novedosas adaptaciones de protocolos con el fin de garantizar una correcta transmisión de tráfico multimedia. En [22] se describe cómo el protocolo RTMC (*Real-Time Multi-Cast*) permite a los receptores especificar sus restricciones en tiempo real, optimizando los árboles de multidifusión para cumplir con exigencias de retardo y reducir el consumo de energía. Esta solución no requiere información de topología de red ni mecanismos de mantenimiento de enlaces, proporcionando un enrutamiento reactivo.

Por otro lado, en [23] se propone el enfoque de gestión de recursos de lógica difusa multiparamétrica o MP-FLRM (*Multi-Parameter Fuzzy Logic Resource Management*). El estudio emplea información de los tiempos de solicitud, descarga y carga para actualizar dinámicamente la lista de recursos en tiempo real. De esta manera, se obtienen mejoras en la gestión de recursos para escenarios de VANET.

Por último, en [24] se utiliza el protocolo OLSR, como mecanismo de enrutamiento para servicios de VoIP (*Voice over IP*) en una VANET con el fin de garantizar un nivel de calidad de servicio en las llamadas de voz. Los resultados muestran que con OLSR los valores de *delay*, *jitter* y la pérdida de paquetes son de 102.48 ms, 10.675 ms y 0.07 %, respectivamente. Sin embargo, surgen limitaciones cuando aumenta el número de saltos, superando los umbrales de retardo aceptables recomendados por el ITU-T [15, 25].

En lo que respecta a las restricciones de energía, en [26] se presenta un mecanismo denominado EARVRT (*Energy Aware Virtual Relay Tunnels*), el cual propone el establecimiento de túneles virtuales para la selección de rutas considerando la energía disponible en los nodos y el número de saltos. Además, en [27] se describe el protocolo EEE-SR (*Enhanced Energy Efficient-Secure Routing*), el cual integra políticas de seguridad, autenticación y umbrales de energía en las decisiones de enrutamiento.

Por otra parte, en [28] se tiene un mecanismo denominado ACEAMR (*Adaptive Congestion and Energy Aware Multipath Routing*), el cual apunta a lograr un equilibrio entre el nivel de calidad de servicio y el gasto de energía mediante el descubrimiento de rutas estables. Los resultados de la simulación muestran que ACEAMR supera a los esquemas existentes en *throughput* (0.2 kbps a una velocidad de 15 m/s y 7.2 kbps para 60 m/s), PDR (*Packet Delivery Ratio*) (81% a una velocidad de 15 m/s y 63 % para 60 m/s), *delay* (incrementa el retraso de 0.003 ms a 0.0093 ms) y eficiencia energética (consumo de 7.2 J).

Con tal motivación, en el presente trabajo se propone una solución de un sistema de comunicación basada en una MANET para la transmisión de mensajes informativos de emergencia en texto y audio entre usuarios de BSS. El sistema fue implementado y evaluado en un escenario real y consta de 4 nodos móviles y un nodo principal. Este último permite ejecutar los experimentos sobre cada nodo. Para la evaluación experimental se seleccionaron los protocolos OLSR y BATMAN destacados en los trabajos previos. En concreto, se hizo un análisis comparativo de los protocolos en cuanto a *throughput*, *delay* y PRR. Además, se incluyó un análisis del consumo energético y autonomía de los nodos bajo operaciones de comunicación de audio. La principal contribución de este trabajo consiste en el análisis experimental y propuesta de un sistema de comunicación para BSS empleando el paradigma

MANET sobre un escenario real.

El artículo se estructura en varias secciones que abarcan distintos aspectos del estudio. En Materiales y métodos se describe la metodología empleada para la evaluación del sistema, que consta de tres partes: la caracterización de la red ad hoc, el análisis del *throughput* en la topología multisalto y el desarrollo de la aplicación web con la evaluación del sistema. En cada etapa se presentan tablas y figuras para facilitar su comprensión. En Resultados y Discusión se analizan e interpretan las métricas de evaluación, como *throughput*, *delay* y PRR, en dos escenarios. En Conclusiones se destacan las principales contribuciones del estudio, implicaciones prácticas y direcciones futuras para la investigación. Finalmente, la sección de Referencias es esencial para el sustento del trabajo.

2. Materiales y métodos

En la Figura 1 se puede apreciar el acoplamiento de un nodo con la bicicleta, adicionalmente se destaca los principales componentes del mismo. Específicamente, cada nodo está implementado mediante una plataforma *Raspberry Pi*, una tarjeta inalámbrica bajo el estándar IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) 802.11, compatible con el modo ad hoc, así como un sensor de corriente.

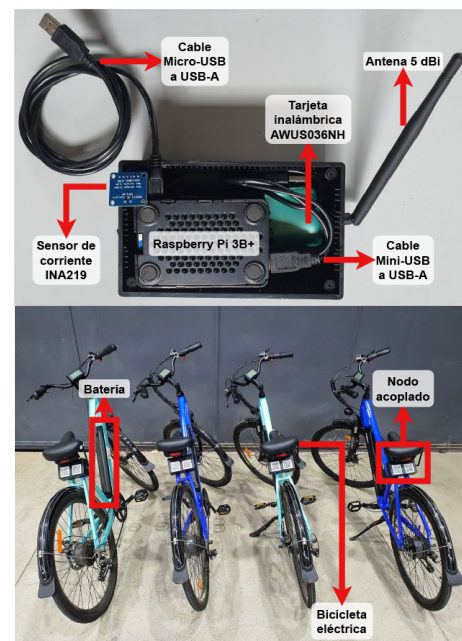


Figura 1. Bicicletas eléctricas con los nodos acoplados

En la Figura 2 se esquematiza la metodología diseñada para llevar a cabo la evaluación comparativa de los protocolos de enrutamiento en la red MANET. En primer lugar, se realizaron múltiples experimentos con el objetivo de caracterizar la máxima distancia de transmisión y la capacidad del canal inalámbrico

para el caso de dos nodos. A continuación, se evaluó el comportamiento del ancho de banda en una topología lineal conformada por cuatro nodos (tres saltos). Posteriormente, se desarrolló una aplicación web móvil y se analizó tanto de manera subjetiva como objetiva la calidad del tráfico de audio, lo que permitió ajust-

tar sus parámetros de codificación, considerando las características de la red.

Finalmente, se transmitió audio en tiempo real para verificar la comunicación entre los nodos, y se evaluó de manera objetiva el rendimiento del sistema en términos de *delay*, PRR y *throughput*.

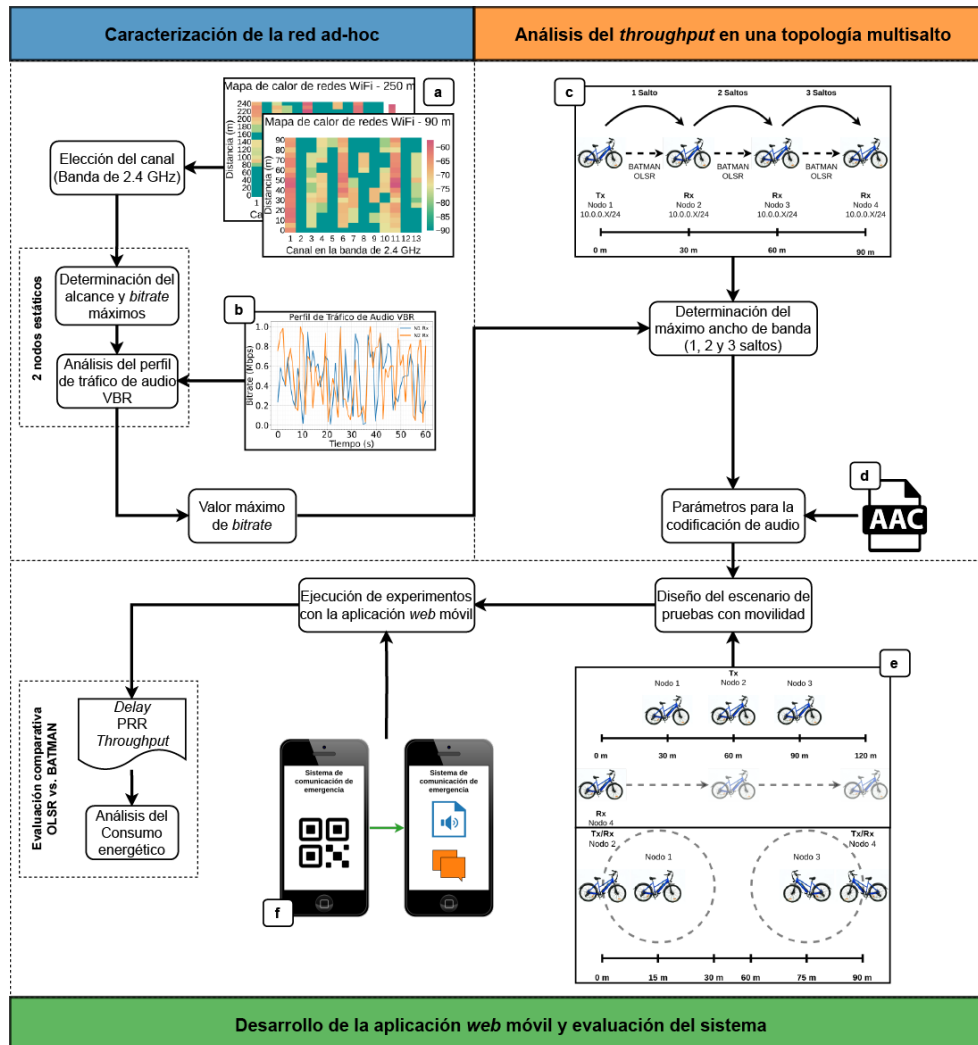


Figura 2. Metodología para la evaluación del sistema propuesto: (a) Mapas de calor de las redes wifi por cada canal en la banda de 2.4 GHz. (b) Gráficas del perfil de tráfico de audio VBR. (c) Topología de la red multisalto con 4 nodos. (d) Códec de audio AAC. (e) Escenarios de prueba con movilidad para evaluar la red y la aplicación *web* móvil. (f) Aplicación *web* móvil que escanea un código QR y obtiene funciones de envío de audio y texto.

2.1. Caracterización de la red ad hoc

La caracterización de la red ad hoc tuvo como objetivo determinar la máxima distancia de transmisión, así como el *bitrate* máximo para el caso de dos nodos. Los experimentos se desarrollaron en las instalaciones del Centro Científico, Tecnológico y de Investigación Balzay (CCTI-B) de la Universidad de Cuenca, en particular se seleccionaron los trayectos resaltados en la Figura 3 con una longitud de 90 m y 250 m.

El primer experimento consistió en la transmisión de tráfico UDP (*User Datagram Protocol*) entre dos nodos, manteniendo a un nodo fijo y alejando gradualmente el otro con incrementos de 10 m. En cada punto de distancia, el tráfico se mantuvo constante a 200 kbps y se repitió 10 veces. En el segundo experimento, los dos nodos se colocaron a una distancia intermedia y se varió el tráfico UDP desde 200 kbps hasta 6 Mbps con incrementos de 100 kbps. Los experimentos se llevaron a cabo utilizando la herramienta Iperf [29].

En la Tabla 1 se resumen los principales parámetros configurados de cada protocolo de enrutamiento.



Figura 3. Trayectorias definidas para el desarrollo de los experimentos dentro del CCTI-B

Tabla 1. Intervalos de tiempo por defecto de los protocolos OLSR y BATMAN

OLSR	(s)	BATMAN	(s)
HELLO_INTERVAL	2.0	ORIG_INTERVAL	1.0
REFRESH_INTERVAL	2.0	ELP_INTERVAL	0.5
TC_INTERVAL	5.0		
MID_INTERVAL	TC		
HNA_INTERVAL	TC		

Por otra parte, se realizó un experimento adicional con el propósito de analizar la forma o perfil del tráfico que genera la transmisión de audio. En este caso se ubicó a los dos nodos con una separación de 10 m. Durante la prueba se empleó el códec AAC (*Advanced Audio Coding*) con una tasa promedio de compresión de 200 kbps. La tarjeta inalámbrica se configuró con una velocidad de transmisión de 54 Mbps y una potencia de 20 dBm. Cabe indicar que para este proceso se empleó la herramienta FFMPEG (*Fast Forward MPEG*) [30].

2.2. Análisis del *throughput* en una topología multisalto

En este caso se evaluó el comportamiento del *throughput* en una configuración multisalto, este escenario es de interés por cuanto permitiría a los usuarios de las bicicletas establecer comunicación a distancias mayores (v. g. nodos distantes, o con la estación de anclaje).

Se varió el bitrate para evaluar la respuesta del canal en configuraciones de uno, dos y tres saltos. Estas pruebas se llevaron a cabo con cuatro nodos dispuestos en una topología lineal. Cada nodo fue configurado de manera que solo pudiera recibir tráfico del nodo directamente adyacente.

En la Figura 4 se presenta la topología empleada en el experimento, donde el nodo 1 actúa como TX (Transmisor) y los nodos 2, 3 y 4 funcionan como receptores RX (Receptor). Además, se utilizó la herramienta

Iperf para ajustar el tráfico UDP con incrementos de 100 kbps hasta alcanzar un valor umbral en cada salto, utilizando nuevamente los valores de la Tabla 1.

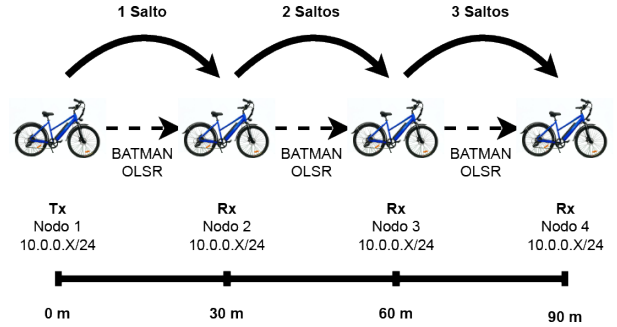


Figura 4. Topología de la red multisalto

A partir de los resultados obtenidos, se calibraron los parámetros de codificación para el tráfico de audio, los cuales se detallan en la Tabla 2.

Tabla 2. Parámetros generales para la transmisión y recepción de audio

Parámetro	Valor
Códec de audio	AAC
<i>Bitrate</i>	64 kbps
<i>Probesize</i>	50000
<i>Samplerate</i>	48000 Hz

2.3. Desarrollo de la aplicación *web* móvil y evaluación del sistema

En esta etapa se desarrolló una aplicación *web* móvil que facilita la administración remota de los nodos, así como se evaluó su funcionamiento.

La aplicación opera como un servidor DHCP (*Dynamic Host Configuration Protocol*) mediante *Hostapd* y *Dnsmasq* lo que permite gestionar la red local y asignar direcciones IPv4 (*Internet Protocol version 4*) a dispositivos conectados a través de una *Raspberry Pi*.

Además, se plantearon dos escenarios con el objetivo de poner a prueba la red MANET en conjunto con la aplicación *web* móvil, que se describirán en la siguiente sección.

Asimismo, con el propósito de brindar una experiencia cómoda al usuario, se incluyeron dos códigos QR (*Quick Response*), uno para gestionar la conexión a la red inalámbrica y el otro para ejecutar la aplicación *web* móvil. Esto permite a los usuarios escanear los códigos fácilmente para acceder a las funciones deseadas. En caso de no contar con la capacidad de escaneo, se proporcionan los datos necesarios para realizar la conexión de forma manual.

En cuanto a la evaluación, se emplearon las métricas de *delay*, PRR, *throughput* y consumo energético.

3. Resultados y discusión

En la Figura 5 se presenta el comportamiento del *bitrate* en función del número de saltos, según el protocolo de enrutamiento utilizado. Para los experimentos la topología lineal se configuró separando los nodos una distancia de 30 m entre sí. Como se puede apreciar a medida que aumenta el número de nodos y, por consiguiente, la cantidad de saltos necesarios, el *throughput* disminuye.

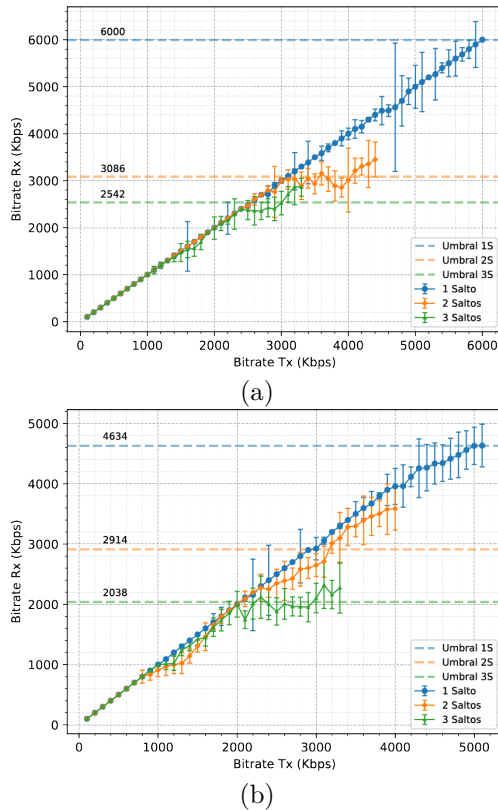


Figura 5. Comportamiento del *bitrate* según el número de saltos. (a) Con OLSR. (b) Con BATMAN.

Tal comportamiento se debe a la contienda de los flujos de datos en cada salto, efecto conocido como interferencia intraflujo, así como a los mecanismos de señalización que limita la velocidad en la transferencia de datos (v. g. mensajes ACK) como se discute en [31].

En la Figura 5a se presenta el comportamiento del *bitrate* para el protocolo OLSR, en el caso de un salto (azul) el canal muestra una respuesta muy favorable lo que se refleja en un comportamiento lineal hasta alcanzar los 6 Mbps. En cambio, para dos saltos (naranja) se mantiene lineal hasta los 3 Mbps. Sin embargo, una vez superado este valor el canal comienza a mostrar variabilidad siendo posible alcanzar solo los 3.2 Mbps. Por último, para tres saltos (verde) se observa que inicialmente se muestra lineal hasta los 2.4 Mbps. No obstante, cuando supera este valor el *bitrate* recibido presenta una alta variabilidad, oscilando entre 2.3 y

2.8 Mbps. Durante el experimento se logró transmitir tráfico hasta un valor de 3.3 Mbps.

En la Figura 5b se presenta el comportamiento del *bitrate* para el protocolo BATMAN, con respecto a un salto (azul) el canal muestra una respuesta favorable casi lineal hasta alcanzar 4.63 Mbps cuando el tráfico se envía a 5.1 Mbps. Mientras que para dos saltos (naranja) el comportamiento es casi lineal hasta los 2.2 Mbps. Cuando se supera este valor el canal comienza a mostrar variabilidad siendo posible alcanzar solo los 3.6 Mbps. Por último, para tres saltos (verde) se observa que inicialmente es lineal hasta alcanzar un 1 Mbps. Después, la gráfica presenta cierta variabilidad aun lográndose recibir un valor cercano a los 2 Mbps. Sin embargo, una vez superado este valor el *bitrate* recibido oscila entre los 1.8 Mbps y 2.3 Mbps.

Sin embargo, una vez superado este valor el *bitrate* recibido oscila entre los 1.8 Mbps y 2.3 Mbps.

A partir de los resultados, se determinaron los valores umbrales que corresponden al máximo *throughput* obtenido en cada salto, los cuales se detallan en la Tabla 3.

Tabla 3. Parámetros generales para la transmisión y recepción de audio

Protocolo	1 salto	2 saltos	3 saltos	Unidad
OLSR	6.00	3.08	2.54	Mbps
BATMAN	4.63	2.91	2,038	

Los resultados obtenidos en la Figura 5 van de acuerdo con lo establecido en [31], 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 *throughput* a dos y tres saltos.

3.1. Selección de escenarios para la evaluación de la red

Se diseñaron dos escenarios con el objetivo de evaluar la red MANET junto con la aplicación *web* móvil. Específicamente, se delimitó el área destacada en la Figura 6, que abarca una trayectoria de 120 m en el CCTI-B de la Universidad de Cuenca.

Los experimentos consistieron en enviar tráfico de voz. El primer escenario, indicado en la Figura 7, tiene como propósito emular la integración de un nuevo nodo a la red MANET (nodo 4). Dicho nodo representa el objetivo de los datos y se desplaza a lo largo de la ruta mientras los tres nodos restantes permanecen fijos y el nodo 2 actúa como transmisor. Por consiguiente, los nodos 3 y 1 actúan como saltos para establecer la comunicación, cuando el nodo 4 se encuentre hacia los extremos de la trayectoria.

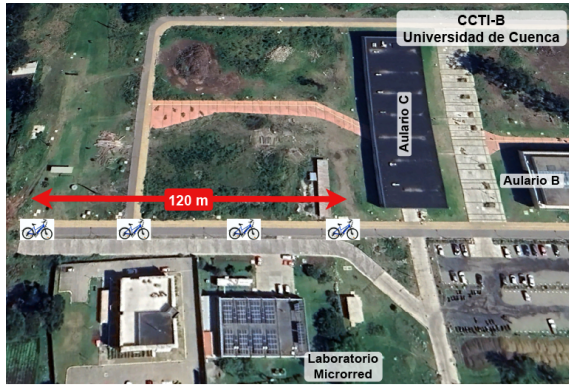


Figura 6. Lugar seleccionado para realizar los experimentos dentro del CCTI-B

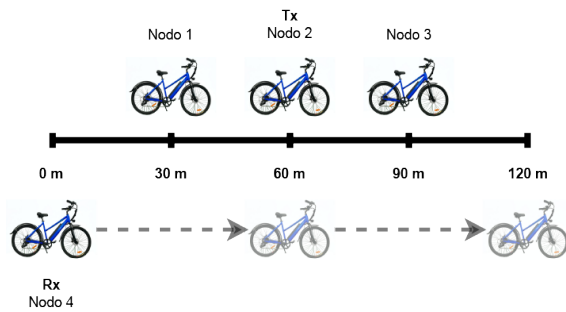


Figura 7. Primer escenario para la evaluación del sistema y la aplicación *web* móvil

El segundo escenario se presenta en la Figura 8, en este caso se emula la comunicación entre dos ciclistas en movimiento (nodo 2 y nodo 4), mientras que los nodos 1 y 3 permanecen fijos actuando como estaciones de anclaje que permiten la comunicación a través de saltos. La distancia entre los dos nodos estáticos es de 60 m, en cuanto a los nodos móviles su distancia varía entre los 30 y 90 m. A continuación, se exponen los resultados para cada métrica y escenario.

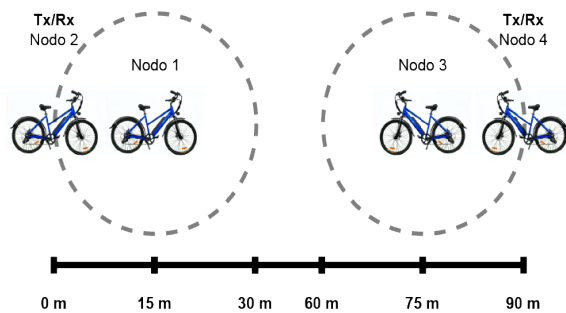


Figura 8. Segundo escenario para la evaluación del sistema y la aplicación *web* móvil

3.2. Delay

En la Figura 9 se presentan los resultados del delay promedio obtenido con cada protocolo. Los valores han

sido analizados con el 95 % de fiabilidad. En particular se puede apreciar que el protocolo OLSR ocasiona un mayor retardo frente a BATMAN (49.5 ms frente a 43.5 ms en el primer escenario y 20.9 ms frente a 20.2 ms en el segundo escenario). Tal comportamiento está relacionado con la demora adicional generada por el intercambio de mensajes de señalización para el establecimiento de las rutas (*v. g. Hello interval, Orig Interval*), descritos en la Tabla 1.

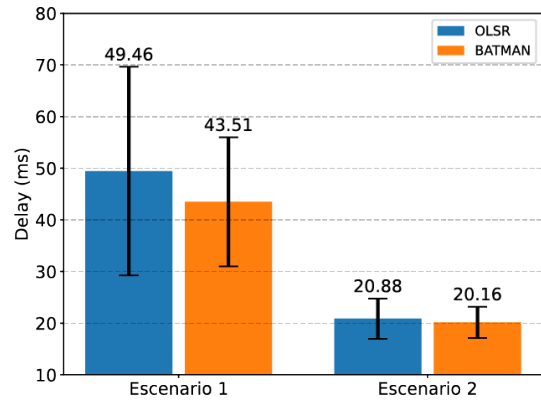


Figura 9. Delay promedio

3.3. PRR

En la Figura 10 se presentan los porcentajes de PRR para los escenarios 1 y 2. En el primer escenario, el protocolo OLSR alcanza aproximadamente un 96 % de PRR, mientras que el protocolo BATMAN logra un 97 % de recepción de paquetes. Por otro lado, en el segundo escenario, OLSR registra un valor del 99 % de PRR, superando el 97 % de BATMAN.

Estos resultados destacan el sólido desempeño en la recepción de paquetes para ambos protocolos evaluados. En el primer escenario, ambas soluciones mantienen una tasa de recepción superior al 95 %, mientras que en el segundo escenario esta cifra se incrementa por encima del 96 %. En conjunto, estos hallazgos subrayan la efectividad de ambos protocolos en los escenarios analizados.

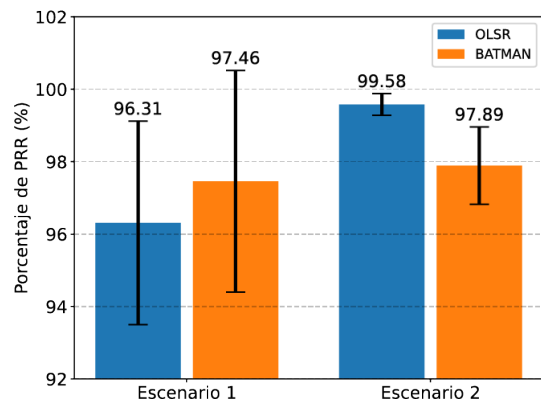


Figura 10. PRR promedio

3.4. Throughput

La Figura 11 presenta los resultados del *throughput* para cada protocolo. En el nodo 2 el protocolo OLSR alcanza un valor de 68.21 kbps, mientras que el nodo 4 registra 65.7 kbps. En cuanto al protocolo BATMAN, se observan valores de 69.1 kbps en el nodo 2 y 65.82 kbps en el nodo 4.

Para el escenario 2, con 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 BATMAN, se observan valores de 112.3 kbps en el nodo 2 y 112.79 kbps en el nodo 4.

Es importante señalar que, en el primer escenario, solo el nodo 2 funcionó como transmisor y el nodo 4 como receptor, mientras que en el segundo escenario se configuraron los nodos 2 y 4 para una comunicación bidireccional. Por esta razón, se observa un mayor *throughput* en el segundo escenario. Además, estos valores se mantienen dentro de la capacidad de ancho de banda multisalto para ambos protocolos de enrutamiento.

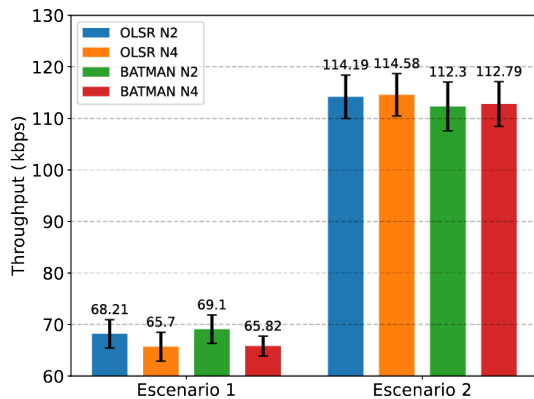


Figura 11. *Throughput* promedio

3.5. Consumo energético

En la Tabla 4 se presenta la medición 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 del puerto USB (*Universal Serial Bus*) tipo A.

Tabla 4. Consumo energético en cada nodo

Escenario	Protocolo	Energía mAh			
		Nodo 1	Nodo 2	Nodo 3	Nodo 4
1	OLSR	206.75	201.5	176.6	205.53
	BATMAN	207.05	199.95	176.6	205.94
2	OLSR	79.22	72.57	79.42	76175
	BATMAN	87.57	72.93	88.3	72410

Se llevó a cabo un análisis para estimar el tiempo de autonomía de los nodos según el consumo de energía

durante los experimentos realizados en los dos escenarios. Se utilizó la capacidad de 10 Ah de la batería de la bicicleta *Ecomove Electric Bikes* [32], junto con los datos de corriente máxima de cada nodo obtenidos mediante el sensor de corriente INA219 [33]. La Tabla 5 muestra la estimación del tiempo de autonomía en horas.

Tabla 5. Estimación del tiempo (h) de autonomía para cada nodo

Escenario	Protocolo	Estimación del tiempo de autonomía h			
		Nodo 1	Nodo 2	Nodo 3	Nodo 4
1	OLSR	24.18	24.18	28.31	24.32
	BATMAN	24.12	25.00	28.31	24.27
2	OLSR	31.55	34.44	31.47	32.81
	BATMAN	28.54	34.27	28.31	34.52

Es importante destacar que el tiempo de autonomía de los nodos supera en algunos casos las 24 h, esto se debe a la elección de escenarios de pruebas que implicaron un menor uso del motor y, por ende, un menor consumo de la batería de la bicicleta. Además, se destaca que durante los experimentos se realizaron recorridos de corta distancia a una velocidad por debajo de los 15 km/h.

4. Conclusiones

La investigación realizada presenta una solución basada en redes MANET como sistema de comunicación de emergencia en el contexto de la movilidad sostenible, específicamente utilizando bicicletas eléctricas. Se configuró una red conformada con cuatro nodos móviles y un nodo fijo principal, implementado para llevar a cabo experimentos que permitieran evaluar los protocolos de enrutamiento proactivos OLSR y BATMAN en topologías multisalto y con movilidad.

A partir de los experimentos, se determinó que el protocolo OLSR muestra un mejor desempeño en términos de ancho de banda en topologías de red multisalto. El máximo *throughput* a un salto fue de 6 Mbps. A medida que aumenta el número de saltos, este valor disminuye, llegando a 3.08 Mbps (dos saltos) y 2.54 Mbps (tres saltos). Por otro lado, con BATMAN se muestra un comportamiento similar, pero alcanzando valores umbrales más bajos, como 4.63 Mbps (un salto), 2.91 Mbps (dos saltos) y 2.038 Mbps (tres saltos).

Adicionalmente, en términos de *delay*, los valores promedio obtenidos para el escenario 1 no superan los 50 ms, en cambio en el escenario 2 son cercanos a 20 ms. Por lo tanto, la comunicación resulta favorable para ambos protocolos de acuerdo con las recomendaciones de la ITU-T G114, que considera retardos de hasta 150 ms para una comunicación en tiempo real. De igual forma, los porcentajes de PRR revelaron un rendimiento sólido para ambos protocolos, superando el 96 % de recepción de paquetes en los dos escenarios.

Por último, en relación con el *throughput*, los resultados indicaron que esta métrica se encuentra dentro de los valores evaluados en la capacidad de ancho de banda del canal, lo que garantiza una comunicación confiable y fluida.

El análisis de los resultados para la transmisión de audio (caso más crítico, debido a sus requerimientos de *delay* y PRR), demuestra que el protocolo OLSR se adaptó de mejor forma los experimentos realizados en este trabajo. Además, prueba la factibilidad de aplicar tecnologías emergentes como MANET para el diseño de sistemas de comunicación en el ámbito de la movilidad sostenible.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad de Cuenca por facilitar el acceso a las instalaciones del Laboratorio de Microrred del CCTI-B, por permitir hacer uso de sus equipos y por autorizar la provisión de soporte técnico por parte de su personal para la realización de los experimentos descritos en este artículo.

Referencias

- [1] E. Salmeron-Manzano and F. Manzano-Agugliaro, "The electric bicycle: Worldwide research trends," *Energies*, vol. 11, no. 7, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/en11071894>
- [2] K. Pangbourne, D. Stead, M. Mladenovic, and D. Milakis, *The Case of Mobility as a Service: A Critical Reflection on Challenges for Urban Transport and Mobility Governance*. United Kingdom: Emerald, 2018, pp. 33–48. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing33ar3r2>
- [3] X. Xia, H. Jiang, and J. Wang, "Analysis of user satisfaction of shared bicycles based on sem," *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, vol. 13, no. 3, pp. 1587–1601, Mar 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s12652-019-01422-y>
- [4] Z. Yang, J. Chen, J. Hu, Y. Shu, and P. Cheng, "Mobility modeling and data-driven closed-loop prediction in bike-sharing systems," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 20, no. 12, pp. 4488–4499, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TITS.2018.2886456>
- [5] S. Shen, Z.-Q. Wei, L.-J. Sun, Y.-Q. Su, R.-C. Wang, and H.-M. Jiang, "The shared bicycle and its network—internet of shared bicycle (iosb): A review and survey," *Sensors*, vol. 18, no. 8, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/s18082581>
- [6] F. Chen, K. Turoń, M. Kłos, W. Pamuła, G. Sierpiński, and P. Czech, "Fifth generation bike-sharing systems: examples from poland and china," *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*, vol. 99, pp. 05–13, 05 2018. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.20858/sjsutst.2018.99.1>
- [7] T. Bielinski and A. Wazna, "New generation of bike sharing systems in china: Lessons for european cities," *Journal of Management and Financial Sciences*, no. 33, pp. 25–42, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.33119/JMFS.2018.33.2>
- [8] S. Yoo, S. Hong, Y. Park, A. Okuyama, Z. Zhang, Y. Yoshida, and S. Managi, "Danger, Respect, and Indifference: Bike-Sharing Choices in Shanghai and Tokyo using Latent Choice Models," MPRA Paper 108312, 2021. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing33ar3r8>
- [9] M. Frikha, *Ad Hoc Networks: Routing, Qos and Optimization*. Wiley, 2013. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing33ar3r9>
- [10] P. Astudillo Picon, C. Quidne Romero, S. Gonzalez Martinez, and I. Palacios Serrano, "Evaluación y comparación de códecs de video para el despliegue de un sistema de comunicación resiliente," *Revista Tecnológica ESPOL*, vol. 34, no. 3, pp. 12–30, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.37815/rte.v34n3.935>
- [11] J. Loo, J. Lloret, and J. Ortiz, *Mobile Ad Hoc Networks*. Taylor & Francis, 2011. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1201/b11447>
- [12] K. Polshchikov, S. Lazarev, and E. Kiseleva, "Decision-making supporting algorithm for choosing the duration of the audio communication session in a mobile ad-hoc network," *Revista de la Universidad del Zulia*, vol. 10, no. 27, pp. 101–107, dic. 2019. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing33ar3r12>
- [13] M. A. Al-Absi, A. A. Al-Absi, M. Sain, and H. Lee, "Moving ad hoc networks—a comparative study," *Sustainability*, vol. 13, no. 11, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/su13116187>
- [14] A. Rosa, P. Á. Costa, and J. Leitão, "Generalizing wireless ad hoc routing for future edge applications," in *Mobile and Ubiquitous Systems: Computing, Networking and Services*, T. Hara and H. Yamaguchi, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2022, pp. 264–279. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-030-94822-1_15

- [15] L. Reis, D. Macedo, and J. Nogueira, “Autoconfiguração de rotas em redes ad-hoc de vants,” in *Anais do XXVII Workshop de Gerência e Operação de Redes e Serviços*. Porto Alegre, RS, Brasil: SBC, 2022, pp. 99–112. [Online]. Available: <https://doi.org/10.5753/wgrs.2022.223504>
- [16] D. G.C., A. Ladas, Y. A. Sambo, H. Pervaiz, C. Politis, and M. A. Imran, “An overview of post-disaster emergency communication systems in the future networks,” *IEEE Wireless Communications*, vol. 26, no. 6, pp. 132–139, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/MWC.2019.1800467>
- [17] F. A. León Mateo, M. d. R. Cruz Felipe, and E. T. Zambrano Solorzano, “Revisión de estudios sobre sistemas fanet y drones para emergencias o desastres naturales,” *Serie Científica de la Universidad de las Ciencias Informáticas*, vol. 15, no. 4, pp. 41–56, 2022. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing33ar3r17>
- [18] A. M. Soomro, M. F. Bin Fudzee, M. Husain, H. M. Saim, G. Zaman, A. Rahman, H. AlUbaidan, and M. Nabil, “Comparative review of routing protocols in manet for future research in disaster management,” *Journal of Communications*, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.12720/jcm>
- [19] M. O. Olusanya and O. R. Vincent, “A manet-based emergency communication system for environmental hazards using opportunistic routing,” in *2020 International Conference in Mathematics, Computer Engineering and Computer Science (ICMCECS)*, 2020, pp. 1–6. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ICMCECS47690.2020.240894>
- [20] A. Guillen-Perez, A.-M. Montoya, J.-C. Sanchez-Aarnoutse, and M.-D. Cano, “A comparative performance evaluation of routing protocols for flying ad-hoc networks in real conditions,” *Applied Sciences*, vol. 11, no. 10, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/app11104363>
- [21] Wardi, Dewiani, M. Baharuddin, S. Panggalo, and M. F. B. Gufran, “Performance of routing protocol olsr and batman in multi-hop and mesh ad hoc network on raspberry pi,” *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 875, no. 1, p. 012046, jun 2020. [Online]. Available: <https://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/875/1/012046>
- [22] J. Yi and C. Poellabauer, “Real-time multicast for wireless multihop networks,” *Computers & Electrical Engineering*, vol. 36, no. 2, pp. 313–327, 2010, wireless ad hoc, Sensor and Mesh Networks. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2009.03.009>
- [23] Z. haitao, Z. yuting, Z. hongbo, and L. dapeng, “Resource management in vehicular ad hoc networks: Multi-parameter fuzzy optimization scheme,” *Procedia Computer Science*, vol. 129, pp. 443–448, 2018, 2017 INTERNATIONAL CONFERENCE ON IDENTIFICATION, INFORMATION AND KNOWLEDGE IN THE INTERNET OF THINGS. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.03.022>
- [24] M. Elaryh Makki Dafalla, R. A. Mokhtar, R. A. Saeed, H. Alhumyani, S. Abdel-Khalek, and M. Khayyat, “An optimized link state routing protocol for real time application over vehicular ad hoc network,” *Alexandria Engineering Journal*, vol. 61, no. 6, pp. 4541–4556, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.10.013>
- [25] K. A. Polshchykov, S. A. Lazarev, E. D. Kiseleva, E. M. Mamatov, and E. V. Ilin-skaya, “Audio communication quality provision in a self-organizing network,” *Procedia Environmental Science, Engineering and Management*, vol. 9, pp. 509–515, 2022. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing33ar3r25>
- [26] M. Hosseinzadeh, S. Ali, A. H. Mohammed, J. Lansky, S. Mildeova, M. S. Yousefpoor, E. Yousefpoor, O. Hassan Ahmed, A. M. Rahmani, and A. Mehmood, “An energy-aware routing scheme based on a virtual relay tunnel in flying ad hoc networks,” *Alexandria Engineering Journal*, vol. 91, pp. 249–260, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2024.02.006>
- [27] R. Prasad P and Shivashankar, “Enhanced energy efficient secure routing protocol for mobile ad-hoc network,” *Global Transitions Proceedings*, vol. 3, no. 2, pp. 412–423, 2022, global Transitions 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.gltip.2021.10.001>
- [28] M. Arun and R. Jayanthi, “An adaptive congestion and energy aware multipath routing scheme for mobile ad-hoc networks through stable link prediction,” *Measurement: Sensors*, vol. 30, p. 100926, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.measen.2023.100926>
- [29] Iper.fr. (2023) iperf - the tcp, udp and sctp network bandwidth measurement tool. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing33ar3r29>
- [30] FFmpeg. (2023) A complete, cross-platform solution to record, convert and stream audio and video. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing33ar3r30>

-
- [31] W. E. Castellanos Hernández, “Quality of service routing and mechanisms for improving video streaming over mobile wireless ad hoc networks,” Ph.D. dissertation, Universitat Politècnica de Valencia, 2015. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.4995/Thesis/10251/53238>
- [32] Ecomove. (2023) Tiv - ecomove. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing33ar3r32>
- [33] Adafruit. (2023) Adafruit ina219 current sensor breakout. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing33ar3r33>