

Research Article /Electrical, Electronics, and Telecommunications Engineering

Ad hoc networks to solve digital deserts: Case Universidad Nacional de Colombia - Bogotá Campus.

Redes ad hoc para solucionar desierto digitales: Caso Campus Sede Bogotá Universidad Nacional de Colombia.

[Cristian Camilo Vargas Morales¹](#), [Henry Zarate Ceballos²](#), [Jorge Eduardo Ortiz Triviño³](#)

ABSTRACT

It is quite difficult to communicate geographically distant devices, especially when they are in areas where, for socioeconomic or environmental reasons, there is no mobile telephony infrastructure. MANETs are a type of ad hoc network characterized by the high degree of geographical mobility of their nodes. This document presents the results of the research conducted to solve the communication problems present in isolated areas by means of ad hoc networks and the use of mobile devices such as UAVs that allow working in regions of difficult access.

Keywords: ad hoc networks, UAV, batman-adv, MANET, raspberry pi.

RESUMEN

Es bastante difícil comunicar dispositivos distados geográficamente, en especial cuando estos se ubican en zonas donde por cuestiones socioeconómicas, o ambientales no existe una infraestructura de telefonía móvil. Las MANET son un tipo de red ad hoc que se caracterizan por el alto grado de movilidad geográfica que sus nodos presentan. En el presente documento se presenta el resultado de la investigación realizada para solucionar los problemas de comunicación presente en zonas aisladas por medio de redes ad hoc y el uso de dispositivos móviles como lo son UAV que permiten trabajar en regiones de difícil acceso.

Palabras clave: redes ad hoc, drones, batman-adv, MANET, raspberry pi.

Received: January __th 20xx

Accepted: January __th 20xx

Introducción

La comunicación entre computadores hace parte del conjunto de hitos trascendentales en la historia de la humanidad, al afectar aspectos cotidianos de la vida humana tan relevantes como la forma misma en que se comunica la especie. Mensajes que tardaban días e incluso semanas en ser entregados, ahora se transmiten en fracciones de segundo.

Sin embargo, es bastante difícil comunicar dispositivos distados geográficamente, en especial cuando estos se ubican en zonas donde por cuestiones socioeconómicas⁴ o ambientales⁵ no existe una infraestructura de telefonía móvil. Por ejemplo, en zonas petroleras o regiones agrícolas aisladas se llevan a cabo misiones

de acondicionamiento de red a través de alternativas no intrusivas como el uso de enlace satelital VSAT para establecer un nodo con conexión a internet por medio de ISP privados (Peñafiel Ricaurte & Espinosa Missura, 2010). En edificaciones urbanas se establece un punto de acceso a internet por VSAT y por medio de enrutadores con tecnología wifi (IEEE 802.11), se logra extender la cobertura a unos cuantos dispositivos ubicados en el inmueble (Ver Figura 1).

Si bien VSAT es una solución a los problemas de comunicación en áreas desconectadas, la realidad es que esta tecnología presenta algunas exigencias técnicas como el suministro constante de red eléctrica, la necesidad de ambientes de baja temperatura y baja salinidad para el hábitat de los equipos de cómputo, además de

¹ Afiliación: Estudiante Pregrado en Ingeniería de Sistemas y Computación, Universidad Nacional de Colombia, Colombia. ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-3049-2543>. Email: crvargasm@unal.edu.co

² PhD en Ingeniería de Sistemas y Computación, Universidad Nacional de Colombia, Colombia. Afiliación: Profesor Ocasional. Universidad Nacional de Colombia, Colombia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4261-3609>. Email: hzaratec@unal.edu.co

³ PhD en Ingeniería de Sistemas y Computación, Universidad Nacional de Colombia, Colombia. Afiliación: Profesor de Planta. Universidad Nacional de Colombia, Colombia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3196-3841>. Email: jeortizt@unal.edu.co

⁴ Poblaciones o zonas agrícolas donde sus planes de desarrollo no contemplan el aprovisionamiento de infraestructura de red física ya sea instalación de antenas de telefonía móvil (GSM, EDGE, etc.), o cableado de fibra óptica o cobre.

⁵ Regiones donde la instalación de antenas implicaría, o bien la tala de árboles en zonas boscosas, o la contaminación visual de zonas de interés público como son los cerros de ciertas regiones (Morales Durán, 2016, p. 113).



Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) Share Adapt

zonas despejadas de obstáculos aéreos para las antenas, requerimientos que normalmente no se pueden proveer en estas zonas (Borgelt et al., 2022, pp. 6, 7).

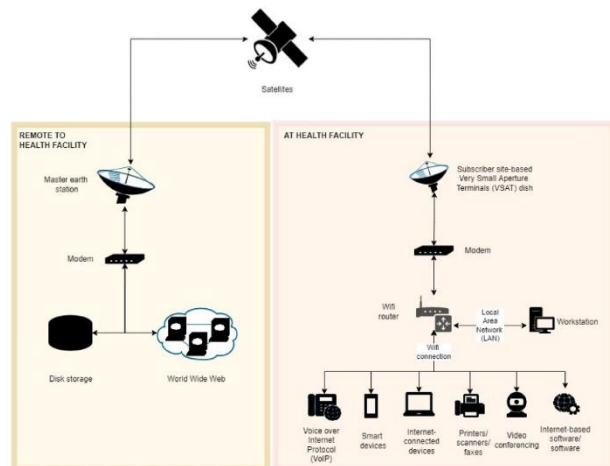


Fig. 1 Esquema del sistema VSAT (Very Small Aperture Terminal) de Tuvalu. Fuente: (Borgelt et al., 2022).

Por otro lado, las redes ad hoc permiten establecer comunicación entre dispositivos sin necesidad de utilizar equipos de gran capacidad computacional que medien la red. Estas redes se comunican por medio de los dispositivos que la conforman, es decir, hacen uso de las capacidades de cada dispositivo en la red para transferir información de un punto a otro sin tener que pasar por un nodo central que regule el tráfico de red, como se observa en el ejemplo de MANET (Ver figura 2).

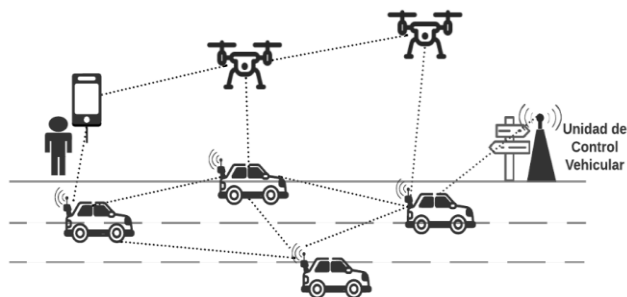


Fig. 2 Ejemplo de MANET. Fuente: (Checa, 2019, p. 12).

Las MANET son un tipo de red ad hoc que se caracterizan por el “alto grado de movilidad” geográfica que sus nodos presentan (Checa, 2019, p. 11). La conformación de estas redes no se limita a solo los dispositivos ilustrados en la figura 2, este tipo de redes también pueden estar conformadas por nodos que pueden ser desde servidores hasta sensores IoT, al hacer uso de dispositivos de baja potencia para establecer canales de comunicación a través de estos dispositivos conectados a la red. Estas redes presentan una alternativa ideal para establecer comunicaciones en las zonas comentadas anteriormente. En la práctica, los dispositivos que se comunican entre sí son sensores de baja potencia computacional,

que tienen la misión de transmitir los datos capturados a un servidor remoto (Latorre et al., 2015).

En regiones de sabana inundada no es posible montar infraestructura de red eléctrica por ende no se puede instalar un router o un switch convencional. Otro caso en que llega a ser de utilidad este tipo de red es en el que se requiera establecer un canal de comunicación en tiempo real para atender desastres en zonas boscosas, parques naturales o zonas montañosas, lugares donde no es posible establecer un canal de comunicación en cuestión de horas⁶. Considerando lo anterior se busca establecer la utilidad de las redes MANET en regiones que por sus características sociales y ambientales no sea posible ubicar uno de estos dispositivos sensores.

TLÖN: Computación Social-Inspirada

El Grupo de Investigación en Redes de Telecomunicaciones Dinámicas y Lenguajes de Programación Distribuidos, adscrito a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia, tiene como objetivo consolidar un sistema computacional inspirado en sistemas sociales, principalmente humanos, como herramienta de solución a problemas que mediante la computación tradicional no han sido resueltos aún.

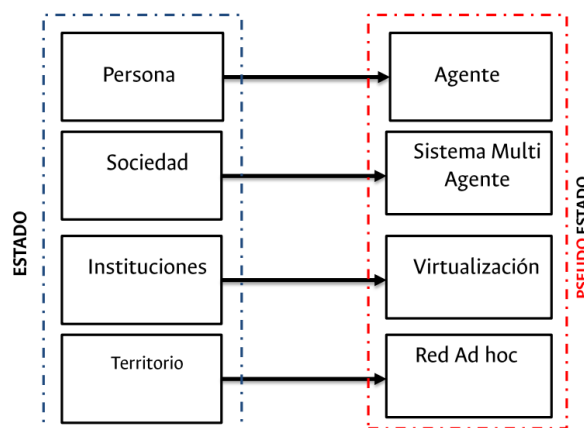


Fig. 3 Comparativa Estado País, y Pseudo Estado TLÖN. Fuente: (Ortiz Triviño, 2020, p. 12).

Este modelo social-inspirado, es una abstracción superior a los modelos computacionales bio-inspirados de los cuales la computación se ha aprovechado y sacado provecho⁷. En la figura 3 se plasma el modelo disgregado en capas de la inspiración en la cual se basa el modelo computacional de TLÖN. Esta figura permite percibir la relación de cada componente del sistema propuesto el cual se soporta sobre una red ad hoc que brinda condiciones dinámicas y estocásticas que simulan las interacciones entre individuos propias de los sistemas sociales (Checa, 2019, p. 41).

Las propiedades de los sistemas sociales representan una de las mayores dificultades a la hora de implementar el modelo de TLÖN, particularmente el territorio. Este concepto es fundamental en la investigación por tratarse del ambiente en el cual fluyen las interacciones de cualquier sociedad; en este caso, el pseudo-

⁶ Es importante aclarar que estas herramientas no son de uso exclusivo en estos ámbitos, también pueden llegar a ser útiles en zonas con buena cobertura de sistemas de comunicación.

⁷ Es importante remarcar los logros de la computación bio-inspirada; un ejemplo son aquellas herramientas basadas en redes neuronales que logran simular el comportamiento del razonamiento humano.

territorio de TLÖN debe contemplar el concepto para simular correctamente el universo en donde cada nodo pueda interactuar con los demás del TLÖN al que pertenece.

De acuerdo con Verónica Giordano Jesús Antuña, (2021) el concepto de territorio hace necesario el escape de la concepción física que suele acompañar a este concepto. El territorio, así como el escenario de una obra, incluye a su vez el contexto en el que se dan las interacciones, el espacio en el que se construyen las identidades de cada individuo que en él habite, y las estructuras jerárquicas que se establecen en el mismo⁸.

“El territorio, de cualquier modo, se define ante todo con referencia a las relaciones sociales (o culturales, en sentido amplio) y al contexto histórico en el que está inserto.”
(Verónica Giordano Jesús Antuña, 2021, p. 67).

Por ello se requiere que el pseudo-territorio de TLÖN soporte la posibilidad de su reorganización, sea parcial o completa, en cuanto sus agentes e interacciones así lo demandaran.

De este punto emergen otras dos propiedades que cada TLÖN debe tener en cuenta a la hora de conformar sus respectivos clústeres de nodos: primero, la capacidad de autoorganización que posee cada individuo dentro de un territorio para decidir si se considera, o no, participe del mismo; y segundo, la capacidad de soportar el hecho de que los nodos presenten un alto grado de movilidad geográfica.

Como se aprecia en la figura 2, cualquier nodo puede cambiar arbitrariamente su posición en el espacio afectando la forma en cómo se concibe el pseudo-territorio; la variación geográfica de cualquier nodo puede variar el sistema anexándose a otro clúster vecino, separándose del clúster en el que estaba, o incluso creando nuevos clústeres⁹.

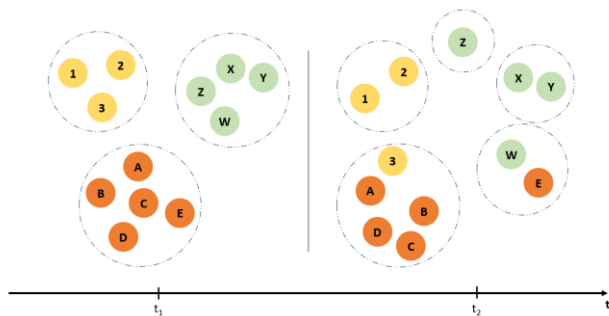


Fig. 4 Variación del estado del sistema entre dos instantes de tiempo. Fuente: Autoría propia.

En la figura 4 se observa el estado de varios clústeres en función del tiempo. En t_1 la conformación de clústeres se realiza en torno a la homogeneidad en las propiedades de cada nodo. En el siguiente instante de tiempo, t_2 , dado que los nodos se movieron respecto a su posición en t_1 , el sistema se autoorganizó en función de la cercanía con sus vecinos, alterando la pseudo-territorialidad en algunos de los nodos¹⁰.

Redes Ad hoc: El pseudo-territorio de TLÖN

⁸ Nótese que, históricamente hablando, los territorios de los estados que a la fecha conocemos han ido cambiando siglo a siglo, y probablemente sigan cambiando; en Latinoamérica se comprueba simplemente contrastando los mapas de las colonias españolas en América contra el mapa político actual de la región.

Para el prototipado de este modelo computacional, se hace uso de la definición formal de la unidad básica de un TLÖN: los nodos. La definición redactada por Checa (2019, pp. 37, 38) permite entender con detalle la unidad fundamental que soporta a cada TLÖN:

Sea N un nodo perteneciente a la red de un TLÖN tal que conforma la 5-tupla $N = \langle M, T, P, M, \Theta, V \rangle$,

- donde la 7-tupla $MT = \langle Q, q0, F, \Sigma, Y, b, \delta \rangle$, es una Máquina de Turing,
- Q es el conjunto finito de estados internos;
- $q0$ es el estado inicial;
- F es el conjunto de los estados de aceptación;
- Σ es el alfabeto de entrada;
- Y es el alfabeto de cinta que incluye a Σ , es decir, $\Sigma \subseteq Y$;
- $b \in Y$ es el símbolo “blanco” que no puede hacer parte de Σ ;
- δ es la función de transición de la máquina;
- donde P es la interfaz física que permite la interacción inalámbrica del nodo con su entorno;
- donde M abstrae el modelo de movilidad del nodo (Random Walk, Random Waypoint, Random Direction Mobility Model, Gauss-Markov, entre otros);
- donde Θ es la función que define el comportamiento del nodo en la red;
- y donde $V[...]$ es un vector con los roles que puede asumir el nodo,
- **GOD**: nodo que inicia la red Ad-hoc;
- **REPLAY**: nodo que sirve de puente entre dos o más nodos;
- **SINK**: es un nodo que solo recibe información;
- **SOURCE**: es un nodo que solo transmite información;
- **Tx/Rx**: es un nodo que transmite y recibe información a la vez.

Teniendo presente los términos usados en TLÖN, se entiende que las redes ad hoc nacen del concepto de comunicación descentralizada en cualquier conjunto de dispositivos. Estas plantean un modelo donde la comunicación entre dispositivos no requiera de un tercero que medie el canal. Las redes convencionales proponen un modelo altamente centralizado, como se observa en la figura 5, donde intervienen agentes reguladores del tráfico de datos en una red de dispositivos; este modelo convencional es denominado el modo infraestructura del estándar IEEE 802.11.

⁹ Nótese que en ningún momento se excluye el hecho de que un nodo pueda pertenecer a varios clústeres al tiempo.

¹⁰ Al observar al nodo Z, se aprecia que un clúster puede establecerse a partir de la presencia de uno o varios nodos.

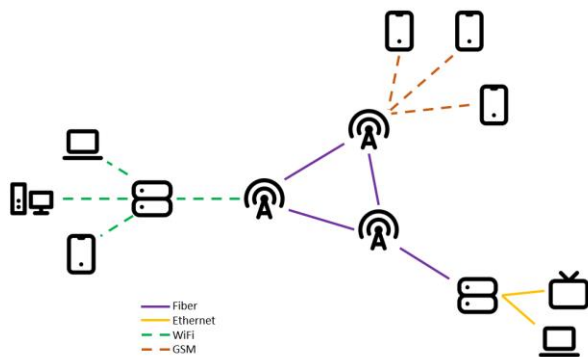


Fig. 5 Ejemplo de red en modo infraestructura. Fuente: autoría propia basada en Checa (2019, p. 8).

En el modo infraestructura cada dispositivo asume un rol específico dentro del modelo OSI/ISO; tómense como ejemplo los routers, estos dispositivos asumen la misión de enrutar los paquetes entre redes, actuando exclusivamente en la capa 3; si se hablara de la capa 2, los switches serían los dispositivos por excelencia. Esta especificidad representa una alta complejidad a la hora de formar una red debido a la cantidad de dispositivos que se requieren administrar para establecer canales de comunicación entre dispositivos cercanos.

En comparación, en el modo ad hoc presenta una organización de red distribuida y autoorganizada. en este modo no se requiere de un router o de un switch para el establecimiento de una red, cualquier nodo puede asumir su pertenencia a la misma identificándose con un ESSID (Extended Service Set Identifier)¹¹. La comunicación en estas redes se realiza entonces por medio de los mismos dispositivos que la conforman, es decir, en el modo ad hoc los nodos son multifuncionales y pueden asumir el papel de cliente cuando requieran comunicarse con otro dispositivo de la red, o asumir el rol de enrutador, al retransmitir algún paquete a cualquier otro destinatario en la red (Ver Figura 6).

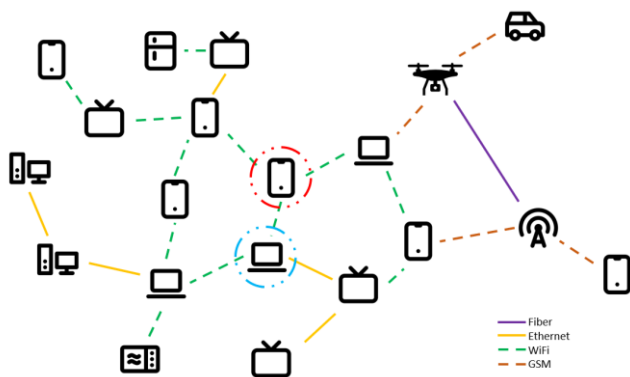


Fig. 6 Ejemplo de red en modo ad hoc. Fuente: autoría propia basada en Checa (2019, p. 8).

En la figura 6 se observa la presencia de ciertos nodos que, por su ubicación, aparentemente se convierten en puntos importantes de la red, lo que en el modo infraestructura representaría el centro de la red, pero en el modo ad hoc la presencia de un nodo no implica la centralización de la red, esto debido a la redundancia

que este tipo de redes manejan. Detallando la figura 6, si en un instante t_1 , se desconectara el dispositivo móvil señalado por la circunferencia roja, la red podría continuar enviando mensajes sin mayor inconveniente debido a la ruta que soporta el nodo señalado por la circunferencia azul; de igual manera en un instante de tiempo t_2 puede anexarse a la red un nuevo dispositivo que establezca una ruta por la que puedan circular mensajes a través del grafo.

Sí en las redes ad hoc las interacciones entre dispositivos no son necesariamente jerárquicas, no significa que no las pueda haber en las mismas. Suponga de nuevo el caso en que dos grupos de dispositivos lo suficientemente separados requieran establecer un canal de comunicación, cada red puede establecerse localmente y permitir el flujo de datos en el clúster, pero si se deseara enviar datos de un clúster a otro se haría necesario que un tercero perteneciera a ambas redes para servir de puente entre las mismas; de tal manera, el dispositivo puente, denominado clusterhead, brindaría sus servicios como agente mediador de la comunicación, sin perder su propiedad de cliente en ambas redes.

Raspberry Pi: Pequeños gigantes

Los dispositivos Raspberry Pi son ordenadores de placa simple con propiedades útiles en entornos de difícil implementación. estos ordenadores están equipados de microcontroladores de bajo consumo ARM para el procesamiento digital y un subsistema de comunicación inalámbrica de bajo consumo (Sultan & Banday, 2023).

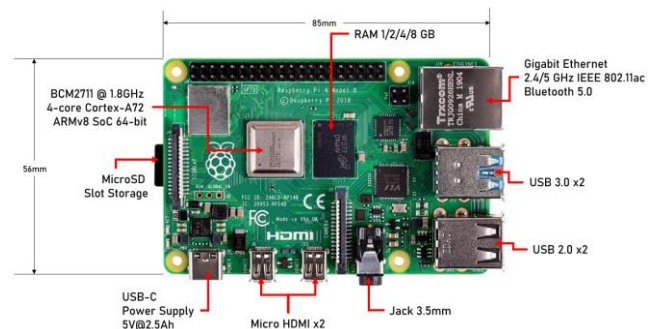


Fig. 7 Vista general componentes Raspberry Pi 4 Model B 2018. Fuente: Autoría Propia.

La figura 7 muestra a detalle el dispositivo que emula un ordenador de uso convencional a bajo costo energético. entre las características de estos dispositivos se encuentran su peso inferior a 100 gramos, el tamaño aproximado al de un dispositivo celular convencional, su consumo promedio de 12 Watts por hora que facilita su alimentación y portabilidad, el hecho de que puedan correr sistemas operativos como Debian o Ubuntu por medio de una tarjeta MicroSD, y que la tarjeta presenta una serie de pines de alimentación de energía para dotar de herramientas de medición y actuación a estos dispositivos.

B.A.T.M.A.N. Advanced: Better Approach to Mobile Ad hoc Networking – Advanced

¹¹ Esto representa una vulnerabilidad al no exigir una autenticación para pertenecer a la misma. Se extiende una invitación al lector a documentarse sobre mecanismos de seguridad en estas redes bajo el modo ad hoc.

batmand surge como un proyecto de idear un protocolo de enrutamiento para MANET que remplazara a OSLR. En un principio el trabajo se centró en el diseño de un daemon Linux, con el fin de permitir enrutamiento proactivo entre dispositivos pertenecientes a una red ad hoc. En 2007, el proyecto tomó diferentes líneas, entre ellas se encuentra la idea de intervenir la capa 2 de enlace de datos del modelo OSI de red, puntualmente incluir enrutamiento en el protocolo Ethernet¹². Este protocolo, producto de la experimentación en esta capa, denominado *batman-adv*, viene incluido en el kernel de Linux lo que facilita su uso y permite estandarizar el proceso de establecimiento de una red ad hoc entre diferentes dispositivos, ya sean IoT, servidores o PCs.

batman-adv es un protocolo de enrutamiento proactivo, esto quiere decir que descubre los nodos vecinos mediante un mensaje de reconocimiento OGM, el cual contiene el ESSID para informarle a los dispositivos cercanos de su existencia; esto permite su acceso a la red siempre y cuando sus interfaces de red se encuentran bajo el mismo rango de frecuencia, y claro se encuentren en el modo ad hoc. Para la conformación de la red basta con cargar el módulo de batman-adv al núcleo Linux e instalar la herramienta batctl para poder administrar y depurar el LKM (Rueda Dimaté, 2021).



Fig. 8 Estructura de encapsulación de B.A.T.M.A.N. Adv.

Fuente: Rueda Dimaté (2021).

Caso de estudio: El Diamante Ciudad Universitaria Nacional

La Universidad Nacional de Colombia en su sede ubicada en la ciudad de Bogotá se caracteriza por tener una extensión, incluyendo todos sus predios, superior a 2'300.000 metros cuadrados, de los cuales solo el 20% corresponde a área construida, el resto se distribuye entre zonas verdes que incluyen céspedes, jardines, y plantas de interior, y zonas de superficies absorbentes como tierra, humedales, hierba o adoquín (Molano Sanabria, 2015).

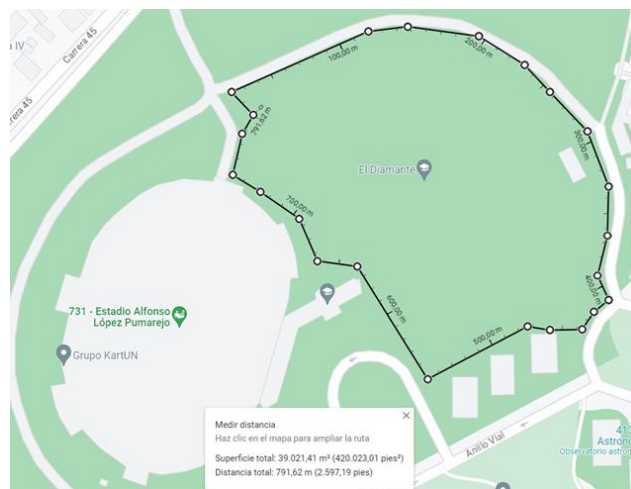


Fig. 9 Perímetro El Diamante - Ciudad Universitaria.

Fuente: Herramienta 'Medir distancia' (Google Maps, 2023).

En los espacios de área no construida se dificulta la comunicación por medio de dispositivos convencionales, particularmente una zona ubicada dentro la Ciudad Universitaria de Bogotá, conocida como 'El Diamante', que cuenta con aproximadamente 39.000 metros cuadrados de zona verde. Este espacio abierto presenta dificultades de comunicación, al no poder proveer acceso a wifi por falta de contactos de red eléctrica, además de intermitencias en la señal de telefonía móvil.

Se dificulta ubicar un router en esta zona puesto que los equipos de administración de red requieren de un lugar donde ningún agente externo afecte la integridad de la infraestructura.¹³ por esta misma razón, el espacio no cuenta con puntos de acceso a red eléctrica, por lo que se requiere de alternativas no convencionales para aprovisionar estas zonas de cobertura de red.

La necesidad de brindar cobertura a estas zonas está en el hecho de que en estos espacios no es posible la comunicación en tiempo real. En un escenario posible en el cual ocurriese una emergencia en la zona, se dificultaría el establecer un canal de comunicación para solicitar ayuda. A pesar de que "El Diamante" es cercano a una zona concurrida, coordinar un equipo de reacción o rescate resultaría difícil al no existir medios digitales que permitieran una comunicación en tiempo real.

El presente proyecto se realizó con apoyo del Grupo de Investigación en Redes de Telecomunicaciones Dinámicas y Lenguajes de Programación Distribuidos - TLÓN de la Universidad Nacional de Colombia¹⁴, específicamente del semillero Orbis Tertius, el cual concentra sus investigaciones en sistemas distribuidos¹⁵. esta investigación busca contribuir a cualquier persona que quiera comunicarse con otro dispositivo en estas zonas sin cobertura de red. Además, muchas entidades o instituciones¹⁶ podrían plantearse la posibilidad de brindar

¹² El proyecto original, denominado bmx-routing, puede ser consultado en

<https://github.com/bmx-routing>.

¹³ Entre algunos agentes externos que pueden afectar la integridad de un router están la lluvia (tanto el rocío como la acumulación), la exposición directa al sol, las interacciones de las especies nativas de la zona tales como roedores, o incluso la manipulación por parte de personas no autorizadas.

¹⁴ Ver página oficial del grupo de investigación: <http://tlon.unal.edu.co/>.

¹⁵ El grupo ha venido investigando e implementando prototipos de redes adhoc que brinden cobertura a dispositivos geográficamente dinámicos, como dispositivos embebidos o dispositivos móviles como celulares y relojes, los cuales se caracterizan por su movilidad geográfica; esto para poder aprovechar conjuntamente sus capacidades computacionales implementando así un sistema operativo distribuido sobre redes adhoc (Ceballos & Triviño, 2020).

¹⁶ Instituciones de rescate como bomberos o cuerpos policiales, cuerpos militares de avanzada, compañías navieras, empresas de aviación comercial.

cobertura de comunicación a cualquier dispositivo sin importar las dificultades geográficas que la zona o región presenten, tomando como ejemplo el implementado en el campus universitario.

El presente texto plantea un prototipo, abriendo un mundo de posibilidades para llevar a término proyectos que posibiliten establecer comunicación entre dispositivos con alto grado de movilidad en entornos donde aún no es posible establecer comunicación por medios tradicionales.¹⁷

Diseño Experimental

Dado que el objetivo del estudio es el de construir un artefacto de software que permita la conectividad temporal y escalamiento de cobertura en desiertos digitales, se recurrió al diseño de un prototipo de red jerárquica que permitiera conectar dispositivos pertenecientes a redes distadas geográficamente.

Por medio de los dispositivos Raspberry Pi se quiere consolidar dos clústeres, donde cada nodo se pueda comunicar con los otros miembros del clúster por medio una red ad hoc. Adicional, como el modelo TLÓN requiere que cada nodo presente movilidad geográfica se optó por hacer uso de un dispositivo UAV/RPAS equipado con una Raspberry Pi para conectar dos clústeres de redes ad hoc mientras se variaba el posicionamiento al tiempo de capturar las métricas de las redes.

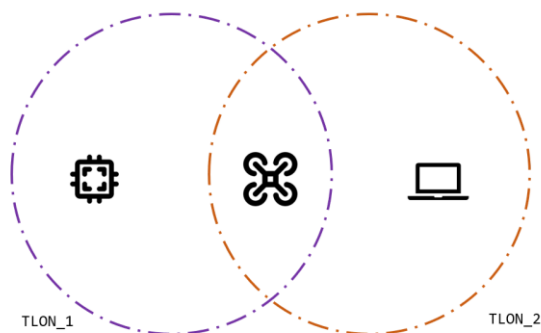


Fig. 9 Esquema Experimento. Plano horizontal.

Fuente: Autoría propia.

El hecho de que el dron pertenezca a las dos redes le brinda la posibilidad, a la Raspberry Pi anexa al dron, de ofrecer un puente de comunicación entre las dos redes. La variable independiente en este experimento sería la distancia entre los nodos la cual se modificará para capturar métricas de red a diferentes rangos de distancia; esta distancia entre nodos se alterará principalmente en cuanto al espacio en tierra entre nodos, y la altura del nodo dron respecto al suelo.

Para el experimento se va a hacer uso de un RPAS (del inglés Remotely Piloted Aircraft System) de la Marca DJI, modelo Phantom 3 Professional¹⁸, con una tarjeta Raspberry Pi 3 anexa al cuerpo del dron. Este nodo va a pertenecer a ambas redes al mismo tiempo y permitirá la comunicación entre los clústeres.

El clúster denominado TLON_1 estará compuesto por el nodo del dron y una Raspberry Pi 2 que contará con una cámara que estará transmitiendo video por medio de un servicio publicado en el puerto 80. El clúster TLON_2 se conformará por el nodo del dron y una maquina virtual de Oracle® VM VirtualBox con sistema operativo Ubuntu 22.04.3 LTS.

Los paquetes de la comunicación van a ser capturados por un tercero imparcial, un computador que no pertenezca a ninguno de los clústeres, el cual será equipado con un dispositivo USB AirPcap para capturar y analizar los paquetes de datos resultantes de la comunicación entre los dispositivos de las redes ad hoc. La visualización de estos paquetes capturados se realizará mediante el analizador de paquetes y protocolos Wireshark¹⁹.

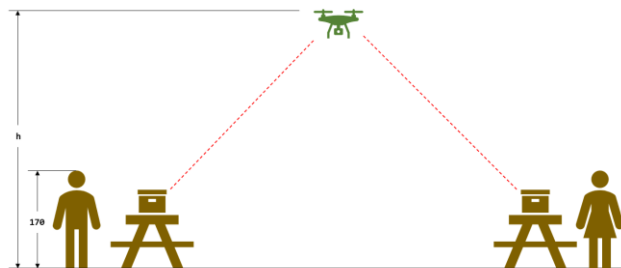


Fig. 10 Esquema Experimento. Plano vertical.

Fuente: Autoría propia.

Una vez establecidos los clústeres, y las redes que medien su comunicación, se sustentará el dron a diferentes rangos de altura, variando entre 1 y 5 metros respecto al suelo, y se realizarán pruebas de conectividad entre los dispositivos extremos; la comunicación se realizará intentando acceder al servidor web que transmite la imagen capturada por la cámara conectada a la Raspberry Pi 2 del clúster TLON_1. Adicional se realizarán pruebas por medio del envío de paquetes ICMP; adicional se enviarán paquetes de prueba con el comando 'batctl ping', herramienta provista para probar la comunicación por medio de una red bajo el protocolo batman-adv.

```
pi@empera:~$ sudo batctl ping 169.254.7.90
PING 169.254.7.90 (f8:1a:67:07:f0:37) 20(48) bytes of data
20 bytes from 169.254.7.90 icmp_seq=1 ttl=50 time=1.61 ms
20 bytes from 169.254.7.90 icmp_seq=2 ttl=50 time=4.19 ms
20 bytes from 169.254.7.90 icmp_seq=3 ttl=50 time=1.50 ms
20 bytes from 169.254.7.90 icmp_seq=4 ttl=50 time=13.51 ms
20 bytes from 169.254.7.90 icmp_seq=5 ttl=50 time=4.22 ms
20 bytes from 169.254.7.90 icmp_seq=6 ttl=50 time=1.94 ms
20 bytes from 169.254.7.90 icmp_seq=7 ttl=50 time=1.39 ms
^C--- 169.254.7.90 ping statistics ---
7 packets transmitted, 7 received, 0% packet loss
rtt min/avg/max/mdev = 1.386/4.051/13.512/4.028 ms
```

Fig. 11 Resultado ping batman-adv. Fuente: Autoría propia.

Resultados

Se realizaron cinco escenarios para la medición de la calidad del canal de comunicación entre los nodos, y, por medio de la herramienta Wireshark, se capturaron los paquetes resultantes de la comunicación entre los nodos pertenecientes a la red batman-adv.

¹⁷ La presente investigación surge en el marco del trabajo de grado en modalidad de investigación requisito para obtener el título profesional de Ingeniería de Sistemas y Computación en la Universidad Nacional de Colombia.

¹⁸ Las especificaciones pueden ser revisadas en <https://www.dji.com/global/phantom-3-pro/info>.
¹⁹ Para más información sobre la herramienta ver <https://www.wireshark.org/about.html>

En cada escenario se ubicaba un nodo a una distancia en tierra de 5 metros respecto al dron; así la variable que se alteró en este caso fue la altura del dron respecto al suelo en donde se ubicaban: la Raspberry Pi 2 que ejecutaba el servidor Webcam, y el investigador Henry Zarate con el portátil que virtualizaba Ubuntu.

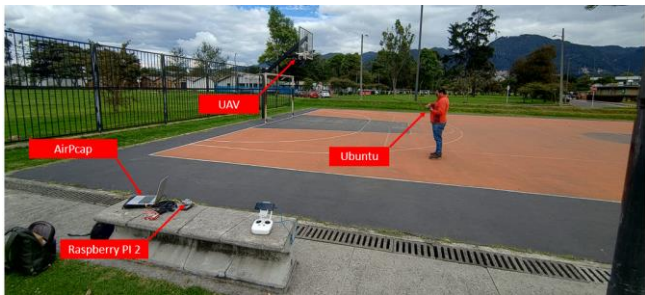


Fig. 12 Experimento realizado el 25 de Noviembre de 2023.
Fuente: Autoría propia.

Posterior a la ubicación de los elementos y al ajuste de cada nodo (ver Anexo A) se activó el dispositivo AirPcap para capturar los paquetes transmitidos a 2.4 GHz en el canal 7, en el experimento se usó este canal para la comunicación entre la Raspberry PI 2 y el nodo UAV. El resultado de las capturas se graficó por medio de Wireshark.

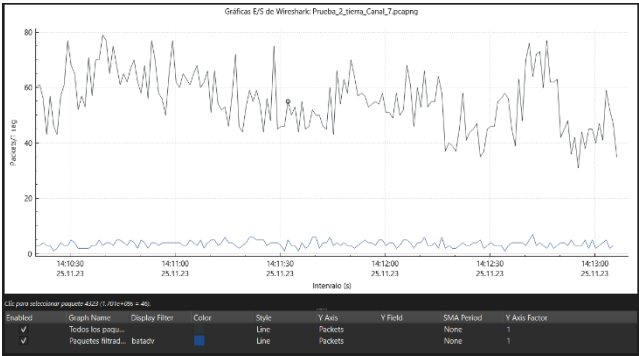


Fig. 13 Cantidad paquetes transmitidos por segundo a 0 metros de altura. En azul los paquetes BATADV, en negro cualquier otro bajo IEEE 802.11. Canal 7 de 2.4Ghz.
Fuente: Autoría propia con herramienta Wireshark.

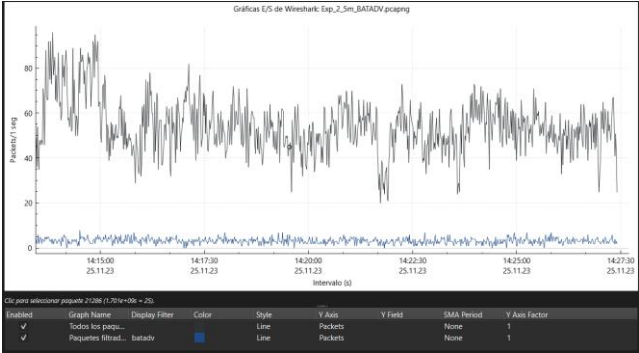


Fig. 14 Cantidad paquetes transmitidos por segundo a 5 metros de altura. En azul los paquetes BATADV, en negro cualquier otro bajo IEEE 802.11. Canal 7 de 2.4Ghz.
Fuente: Autoría propia con herramienta Wireshark.

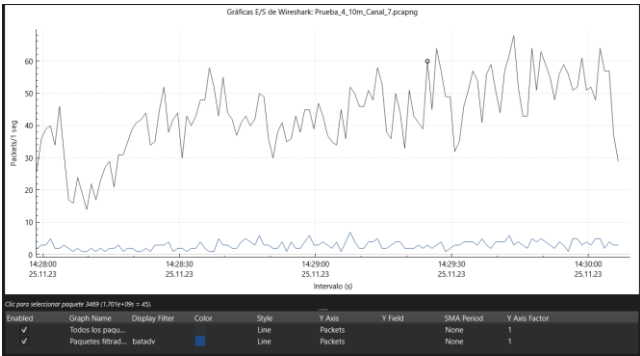


Fig. 15 Cantidad paquetes transmitidos por segundo a 10 metros de altura. En azul los paquetes BATADV, en negro cualquier otro bajo IEEE 802.11. Canal 7 de 2.4Ghz.
Fuente: Autoría propia con herramienta Wireshark.

En cuanto a la calidad del video transmitido por la raspberry se pudo observar que, a cortas distancias, entre 0 y 2 metros de distancia entre nodos se alcanza a visualizar el video con una tasa de refresco de aproximadamente 1 FPS, lo cual indica una baja calidad en la transmisión de señal entre los nodos.



Fig. 15 Servidor Webcam utilizado para probar el canal de comunicación. Fuente: Autoría propia.

Finalmente se realizaron pruebas de comunicación entre los nodos extremos por medio de los comandos ping del sistema operativo y batctl ping de la herramienta batctl proporcionada por OpenMesh.

Tabla 1. Métricas de conectividad bajo comando ‘ping’ del sistema operativo.

Altitude UAV (mt)	Time avg (ms)	Packets transmitted	Packets received	Packet loss
0	44,727	29	25	13,7931%
3	43,110	37	9	75,6757%
4	73,149	43	20	53,4884%
5	67,024	31	13	58,0645%
10	31,226	24	12	50%

Fuente: Autoría propia.

Tabla 2. Métricas de conectividad bajo comando 'batctl ping', herramienta proporcionada por OpenMesh.

Altitude UAV (mt)	Time avg (ms)	Packets transmitted	Packets received	Packet loss
0	52,6377	44	34	22%
3	71,313	43	33	23%
4	49,526	56	28	50%
5	47,313	35	10	71%
10	47,798	30	3	90%

Fuente: Autoría propia.

Conclusiones

Las pruebas realizadas con el experimento de comunicación en 'El Diamante' de la sede Bogotá de la Universidad Nacional de Colombia utilizando batman-adv y un dron como puente entre redes adhoc revelaron hallazgos significativos que plantean desafíos importantes para la efectividad de la transmisión inalámbrica.

En primer lugar, al variar la altura del dron, se observó una relación crítica entre la altura y la calidad de la comunicación. Los resultados muestran una disminución sustancial en la calidad de la transmisión a medida que la altura del dron aumenta. A distancias de entre 0 y 3 metros, se registró una pérdida de paquetes de aproximadamente un 20%, lo cual, si bien es notable, aún se encuentra dentro de límites aceptables. Sin embargo, a alturas de 5 metros, esta pérdida se elevó drásticamente al 50%, y a 10 metros alcanzó un preocupante 90%.

Además, la cantidad de paquetes por segundo se vio significativamente limitada, sin superar los 10 en ninguna de las alturas evaluadas. Esta limitación en la capacidad de transferencia de datos plantea interrogantes sobre la viabilidad de la tecnología utilizada en entornos similares o más desafiantes.

Estos resultados revelan desafíos importantes en la capacidad de mantener una conexión inalámbrica estable y confiable en entornos aislados y dinámicos. Las alturas más elevadas del dron parecen afectar drásticamente la eficiencia de la comunicación, sugiriendo la necesidad de explorar estrategias alternativas o mejoras en la tecnología para enfrentar este tipo de desafíos.

Es esencial considerar estas limitaciones al aplicar esta tecnología en entornos similares, y estos hallazgos podrían servir como punto de partida para futuras investigaciones destinadas a mejorar la efectividad de las redes adhoc en condiciones similares.

Reconocimientos

Se agradece a cada una de las personas que, si bien no se encuentran entre los autores, colaboraron en el proceso de la presente investigación. Entre ellas y ellos se agradece a la Universidad Nacional de Colombia, en su sede Bogotá, por prestar sus instalaciones para el desarrollo de la investigación; al semillero Orbis Tertius por ser el aula en donde se desarrollaron varios avances de la investigación; a Santiago Rodríguez Vallejo por colaborar y motivar la fundación del presente proyecto; a Oscar Agudelo Rojas por su colaboración y motivación constante durante cada sesión del semillero; a Laura Camila Álvarez Anzola por sus correcciones al presente documento y el apoyo emocional

brindado a lo largo de la investigación, y a demás personas que confiaron en la finalización e impacto de la investigación.

Contribución de los Autores

Cristian Camilo Vargas Morales redactó el manuscrito original, realizó la investigación en torno al tema central del documento, y administró el proyecto durante su ejecución. *Henry Zarate Ceballos* proporcionó el software utilizado en el Proyecto, realizó tareas de Revisión y edición de la redacción del presente documento, proporcionó los dispositivos Raspberry PI utilizados durante el experimento. *Jorge Eduardo Ortiz Triviño* concibió la idea, supervisó la investigación, contribuyó con el dispositivo UAV, y proporcionó comentarios críticos para el desarrollo de la investigación. Se hizo uso de ChatGPT 3.5 para corregir estilos y errores gramaticales.

Conflictos de interés

Declaramos que no existe ningún conflicto de interés que altere la validez de la investigación presentada.

Referencias

- Borgelt, K., Siose, T. K., Taape, I. V., Nunan, M., Beek, K., & Craig, A. T. (2022). The impact of digital communication and data exchange on primary health service delivery in a small island developing state setting. *PLOS Digital Health*, 1(10), e0000109. <https://doi.org/10.1371/journal.pdig.0000109>
- Ceballos, H. Z., & Triviño, J. E. O. (2020). S.O.V.O.R.A.: A Distributed Wireless Operating System. *Information*, 11(12), Article 12. <https://doi.org/10.3390/info11120581>
- Checa, A. (2019). Diseño de un mecanismo de clustering en redes ad hoc para sistemas distribuidos en el contexto del sistema TLÖN [Universidad Nacional de Colombia]. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/77382>
- Google Maps. (2023, septiembre 21). Google Maps. <https://www.google.com/maps/@4.6407026,-74.0853572,17.86z?entry=ttu>
- Latorre, J. F., Sánchez, J. F., Zarate Ceballos, H., & Triviño Ortiz, J. E. (2015). Model in an ad-hoc network for data acquisition in sensor networks. 6. <http://tlon.unal.edu.co/files/articles/5.pdf>
- Molano Sanabria, S. Y. (2015). Hacia un comportamiento verde universitario: Un estudio de caso sobre la sostenibilidad en el campus de la Sede Bogotá de la

- Universidad Nacional de Colombia.
<https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/55463>
- Morales Durán, L. M. (2016). Centro cultural y ambiental: Intervención urbana en el Cerro de la Popa como espacio vital para la ciudad de Cartagena de Indias. <https://bibliotecadigital.usb.edu.co/entities/publication/45f6c577-df40-455c-9da4-bc79e39bed20>
- Ortiz Triviño, J. E. (2020, mayo 3). La Social Inspiración como Modelo Computacional. <http://tlon.unal.edu.co/quienes-somos/mision>
- Peñafiel Ricaurte, G. A., & Espinosa Missura, A. F. (2010). Implementación de enlaces de banda ancha usando tecnología satelital VSAT HughesNet (DirecWay) en Ecuador [bachelorThesis, Quito: USFQ, 2010]. <http://repositorio.usfq.edu.ec/handle/23000/844>
- Rueda Dimaté, Ó. D. (2021). Construcción de un módulo de control virtualizado para realizar balanceo de carga en MANETs [Trabajo de grado - Maestría, Universidad Nacional de Colombia]. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/80566>
- Sultan, I., & Banday, M. T. (2023). Ultra-Low Power Microcontroller Architectures for the Internet of Things (IoT) devices. 2023 5th International Conference on Smart Systems and Inventive Technology (ICSSIT), 482-488. <https://doi.org/10.1109/ICSSIT55814.2023.10060949>
- Verónica Giordano Jesús Antuña. (2021). Territorio y memoria. <https://www.teseopress.com/comunidadterritoriofuturo/chapter/territorio-y-memoria-dos-apuestas-por-la-re-existencia/>

