

Estudio y simulación de Redes Tolerantes a Retardo en entorno urbano y rural

Angel Baez Suarez

Grado en Ingeniería de
Tecnologías y Servicios de
Telecomunicación

Redes inalámbricas

Tutor/a de TF

Ferran Adelantado Freixer

**Profesor/a responsable de
la asignatura**

Ferran Adelantado Freixer

Fecha Entrega

Enero 2024



Esta obra está sujeta a una licencia de Reconocimiento-
NoComercial-SinObraDerivada [3.0 España de Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/es/)

Ficha del Trabajo Final

Título del trabajo:	Estudio y simulación de Redes Tolerantes a Retardo en entorno urbano y rural
Nombre del autor/a:	Angel Baez Suarez
Nombre del Tutor/a de TF:	Ferran Adelantado Freixer
Nombre del/de la PRA:	Ferran Adelantado Freixer
Fecha de entrega:	Enero 2024
Titulación o programa:	Grado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de Telecomunicación
Área del Trabajo Final:	Redes Inalámbricas
Idioma del trabajo:	Castellano
Palabras clave	DTN, The One Simulator, Redes Tolerantes a Retardo

Resumen del Trabajo

Internet ha triunfado enormemente en conectar dispositivos de comunicación por todo el mundo. Esto se ha logrado gracias al uso de protocolos de comunicación estandarizados, como TCP e IP, y al despliegue de una extensa infraestructura de redes. En el diseño de redes TCP/IP, los principios originales implican alta disponibilidad, control distribuido, conmutación de paquetes, uso de datagramas, independencia de redes y diversidad.

En este contexto, uno de los desafíos es establecer algún tipo de comunicación en entornos hostiles, donde no existe una arquitectura de red disponible que admita algunos de los protocolos de red convencionales. Por lo tanto, la tecnología de Redes Tolerantes a Retardos (Delay Tolerant Networks, por sus siglas en inglés) ha surgido como una solución para operar redes en tales entornos adversos.

Las DTNs se distinguen por carecer de conexiones continuas de punto a punto, lo que conlleva a menudo a una conectividad intermitente, demoras extensas y variables, así como altas tasas de error. El envío de mensajes entre dos puntos puede tomar horas, semanas o incluso meses.

Este documento lleva a cabo una evaluación y comparación de la tecnología DTN en entornos urbano y rural. Para lograr esto, se emplea un entorno de simulación de DTNs ampliamente utilizado en el ámbito académico: The ONE. A través de este simulador, se evalúan aspectos como el protocolo de enrutamiento, la tasa de entrega de mensajes a sus destinos, la latencia de los mensajes y el costo de la transmisión.

Abstract

Internet has succeeded enormously in connecting communication devices worldwide. This has been achieved using standardized communication protocols, such as TCP and IP, and the deployment of an extensive network infrastructure. In the design of TCP/IP networks, the original principles involve high availability, distributed control, packet switching, the use of datagrams, network independence, and diversity.

In this context, one of the challenges is establishing some form of communication in hostile environments where there is no available network architecture that supports some conventional network protocols. Therefore, Delay Tolerant Networking (DTN) technology has emerged as a solution to operate networks in such adverse environments.

DTNs are distinguished by the lack of continuous point-to-point connections, often leading to intermittent connectivity, extensive and variable delays, as well as high error rates. Sending messages between two points can take hours, weeks, or even months.

This document conducts an evaluation and comparison of DTN technology in urban and rural environments. To achieve this, a widely used DTN simulation environment in the academic field, The ONE, is employed. Through this simulator, aspects such as routing protocol, message delivery rate to destinations, message latency, and transmission cost are evaluated.

Índice

1. INTRODUCCIÓN	3
1.1. Contexto y justificación del Trabajo	4
1.2. Objetivos del Trabajo	5
1.3. Impacto en sostenibilidad, ético-social y de diversidad	5
1.4. Enfoque y método seguido	6
1.5. Planificación del trabajo	6
2. ESTADO DEL ARTE	8
2.1. Historia de las DTNs	9
2.2. Líneas de investigación sobre DTNs	10
2.3. Proyectos sobre DTNs	11
2.3.1. Serval Project	12
2.3.2. DieselNet	13
2.3.3. Proyecto Loon	13
2.3.4. Bytewalla	14
2.3.5. KioskNet	15
3. ARQUITECTURA Y PROTOCOLOS DTNS	17
3.1. Tipos de nodos	17
3.2. Método de almacenamiento y reenvío	18
3.3. Tipos de contactos	20
3.4. La Capa Bundle	21
3.5. Protocolos de Enrutamiento	23
3.5.1. Enrutamiento determinista	24
3.5.2. Enrutamiento estocástico	26
4. ENTORNO DE SIMULACIÓN: THE ONE	31
4.1. Estructura del simulador	31

4.2.	Ejecución de la simulación	32
4.3.	Creación de los Mapas	33
4.4.	Definición de escenarios de simulación	34
5.	SIMULACIÓN DEL CASO DE ESTUDIO	35
5.1.	Especificación del escenario a simular	35
5.2.	Configuración de los nodos	36
5.3.	Modelos de movimiento	37
5.4.	Generación de Mensajes	38
5.5.	Reportes	38
6.	RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN	40
6.1.	Variando el número de nodos	40
6.2.	Variando el Buffer de los nodos Vehículos	44
6.3.	Variando el Buffer de los nodos Peatones	48
6.4.	Variando el tamaño de los mensajes	52
6.5.	Variando el TTL de los mensajes	56
6.6.	Variando el intervalo de generación de mensajes	60
6.7.	Optimización de protocolo para entorno rural	64
7.	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	68
7.1.	Conclusiones	68
7.2.	Planificación y objetivos	68
7.3.	Trabajos futuros	69
8.	BIBLIOGRAFÍA	70

Lista de Figuras

FIGURA 1: COMUNICACIÓN DISPOSITIVOS CON INTERNET	4
FIGURA 2: DIAGRAMA DE GANTT	7
FIGURA 3: APLICACIÓN SERVAL MESH PARA SMARTPHONE	12
FIGURA 4: RUTAS RECORRIDAS POR LOS AUTOBUSES DE UMASS DIESELNET	13
FIGURA 5: RED DE GLOBOS DEL PROYECTO LOON	14
FIGURA 6: ARQUITECTURA DE BYTEWALLA	15
FIGURA 7: ESCENARIO TÍPICO DE UN DESARROLLO CON KIOSKNET	16
FIGURA 8: NODOS DE LAS DTNS	18
FIGURA 9: ALMACENAMIENTO Y REENVÍO DE DATOS EMPLEADO POR LOS NODOS EN LAS DTNS	19
FIGURA 10: ARQUITECTURA CAPA BUNDLE	21
FIGURA 11: PROTOCOLOS DE ENRUTAMIENTO	23
FIGURA 12: DESCRIPCIÓN GENERAL DEL ENTORNO DE SIMULACIÓN ONE	31
FIGURA 13: INTERFAZ DE VISUALIZACIÓN DEL SIMULADOR.	32
FIGURA 14: EDICIÓN DE MAPAS. OPENJUMP	33
FIGURA 15: MAPA HELSINKI	35
FIGURA 16: MAPA BELEKO SOBA (MALI)	36
FIGURA 17: MODELOS DE MOVIMIENTO DEL SIMULADOR ONE	37
FIGURA 18: ENTORNOS CON DIFERENTE NÚMERO DE NODOS – PROBABILIDAD DE ENTREGA	41
FIGURA 19: ENTORNOS CON DIFERENTE NÚMERO DE NODOS – LATENCIA	42
FIGURA 20: ENTORNOS CON DIFERENTE NÚMERO DE NODOS – SOBRECARGA	43
FIGURA 21: ENTORNOS CON DIFERENTES TAMAÑOS DE BUFFER DE VEHÍCULOS – PROBABILIDAD DE ENTREGA	45
FIGURA 22: ENTORNOS CON DIFERENTES TAMAÑOS DE BUFFER DE VEHÍCULOS – LATENCIA	46
FIGURA 23: ENTORNOS CON DIFERENTES TAMAÑOS DE BUFFER DE VEHÍCULOS – SOBRECARGA	47
FIGURA 24: ENTORNOS CON DIFERENTES TAMAÑOS DE BUFFER DE PEATONES – PROBABILIDAD DE ENTREGA	49
FIGURA 25: ENTORNOS CON DIFERENTES TAMAÑOS DE BUFFER DE PEATONES – LATENCIA	50
FIGURA 26: ENTORNOS CON DIFERENTES TAMAÑOS DE BUFFER DE PEATONES – SOBRECARGA	51
FIGURA 27: ENTORNOS CON DIFERENTES TAMAÑOS DE MENSAJES – PROBABILIDAD DE ENTREGA	53
FIGURA 28: ENTORNOS CON DIFERENTES TAMAÑOS DE MENSAJES – LATENCIA	54
FIGURA 29: ENTORNOS CON DIFERENTES TAMAÑOS DE MENSAJES – SOBRECARGA	55
FIGURA 30: ENTORNOS CON DIFERENTES TIEMPOS TTL – PROBABILIDAD DE ENTREGA	57
FIGURA 31: ENTORNOS CON DIFERENTES TIEMPOS TTL – LATENCIA	58
FIGURA 32: ENTORNOS CON DIFERENTES TIEMPOS TTL – SOBRECARGA	59
FIGURA 33: ENTORNOS CON DIFERENTES TIEMPOS DE GENERACIÓN DE MENSAJES – PROBABILIDAD DE ENTREGA	61
FIGURA 34: ENTORNOS CON DIFERENTES TIEMPOS DE GENERACIÓN DE MENSAJES – LATENCIA	62
FIGURA 35: ENTORNOS CON DIFERENTES TIEMPOS DE GENERACIÓN DE MENSAJES – SOBRECARGA	63
FIGURA 36: PROTOCOLO SPRAYANDWAIT ENTORNO RURAL	66

Lista de Tablas

TABLA 1: PARÁMETROS DE LA SIMULACIÓN: NUMERO DE NODOS.....	40
TABLA 2: PARÁMETROS DE LA SIMULACIÓN: BUFFER VEHÍCULOS.....	44
TABLA 3: PARÁMETROS DE LA SIMULACIÓN: BUFFER PEATONES.....	48
TABLA 4: PARÁMETROS DE LA SIMULACIÓN: TAMAÑO MENSAJES	52
TABLA 5: PARÁMETROS DE LA SIMULACIÓN: TTL.....	56
TABLA 6: PARÁMETROS DE LA SIMULACIÓN: TIEMPO GENERACIÓN MENSAJES	60
TABLA 7: PARÁMETROS SPRAYANDWAIT - ENTORNO RURAL.....	65

1. Introducción

En los últimos tiempos, el uso de las comunicaciones a distancia ha aumentado debido al desarrollo continuo de aplicaciones que demandan una mayor conexión, lo que representa un reto para las redes existentes. Aunque en países en desarrollo ha habido un progreso notable en el acceso a estas comunicaciones, aún persisten comunidades y áreas remotas que permanecen desconectadas o sin acceso a estos servicios.

La actual arquitectura de Internet y sus protocolos han tenido un éxito notable, pero pueden enfrentar dificultades en entornos con largos retardos y frecuentes pérdidas de servicio, especialmente donde la conectividad es escasa. Las redes actuales, tanto cableadas como inalámbricas, han facilitado la interconexión de una gran cantidad de dispositivos, independientemente de las distancias. A pesar de esto, aún persisten dificultades para alcanzar áreas de difícil acceso.

Estas limitaciones se deben a que la tecnología de redes actual se basa en ciertas suposiciones que pueden no aplicarse en todos los contextos. Principalmente, esta tecnología asume que existe una conexión continua de extremo a extremo desde el origen al destino, posiblemente a través de varios puntos intermedios. Sin embargo, en entornos con problemas de conectividad, como largas distancias o interrupciones frecuentes, estas premisas pueden no ser válidas, lo que resulta en dificultades para establecer y mantener una comunicación fluida y fiable.

Frente a las limitaciones experimentadas en entornos donde el modelo convencional de Internet no es efectivo, han surgido propuestas de redes con protocolos diferentes que no se basan en el protocolo IP tradicional. Este planteamiento de un nuevo modelo de redes está ganando importancia debido a la necesidad de abordar las deficiencias presentes en las situaciones donde la infraestructura actual no es suficiente.

Los expertos en el campo de las redes han intentado adaptar el modelo convencional de Internet a entornos poco comunes o desafiantes. Uno de los enfoques consiste en encontrar maneras de que las conexiones entre diferentes nodos se comporten de manera similar a cómo lo hacen en el protocolo estándar TCP/IP, para el cual fueron diseñadas originalmente. Estos intentos implican esencialmente "engañar" a los protocolos de Internet al simular que operan en una infraestructura de calidad aceptable, aunque esa no sea la realidad del entorno.

Las Redes Tolerantes a Retardo (DTN, Delay Tolerant Networks) se presentan como una respuesta a los problemas de conectividad en situaciones difíciles. Estas redes proponen un enfoque diferente en la forma en que los dispositivos se comunican entre sí.

1.1. Contexto y justificación del Trabajo

En los países desarrollados, como pueden ser países de Europa y Norte América, en torno al 90% de la población accede fácilmente a las Redes de Telecomunicaciones y sus servicios; mientras que algunos países de África, como puede ser Madagascar, apenas el 10% de la población tiene un acceso similar; y además, implica mayores costos y menores prestaciones. [1]

Por otro lado, las Redes de Tolerancia a Retardos están diseñada para operar de manera efectiva en entornos con conectividad intermitente, alta latencia o interrupciones. Esto lo hace particularmente útil en diversas situaciones, incluidas emergencias y condiciones donde pueden ocurrir cortes de red, fallos en energía eléctrica, como por ejemplo en escenarios bélicos.

Por lo tanto, las Delay Tolerant Networks (DTN) o Redes Tolerantes a Retardo se proyectan como una solución a estos problemas e inconvenientes. Las DTNs plantean un nuevo modelo de comunicación, el cual es descentralizado y distribuido sobre múltiples dispositivos que se ajustan dinámicamente a la red.

Un ejemplo de este modelo descentralizado y distribuido sería el considerar un Centro de Ocio, donde cada persona posee un portátil con tarjeta de red inalámbrica pero no una infraestructura de red. Las DTN hacen que la comunicación sea posible, tal y como muestra la Figura 1.

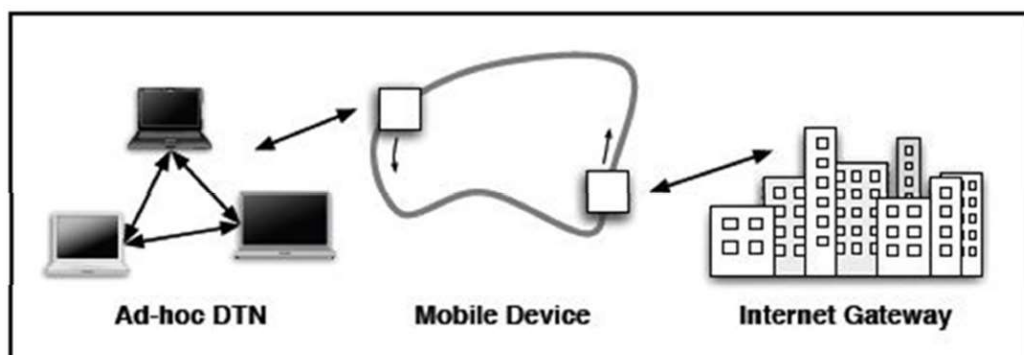


Figura 1: Comunicación dispositivos con Internet [2]

Los equipos se comunican unos con otros para intercambiar información. En caso de que el portátil destino no esté al alcance, la red mantiene el mensaje hasta que el destino se encuentre accesible.

1.2. Objetivos del Trabajo

Los objetivos de este TFG son los siguientes:

- Elaboración de diferentes mapas para simular entornos diferentes. De tal forma, que será posible comparar el comportamiento de las redes DTNs en entorno rural y entorno urbano.
- Evaluación de prestaciones de diferentes protocolos de enrutamiento en DTNs. Para ello, se modificarían los diferentes parámetros de la simulación y compararían los resultados de cada protocolo en los diferentes entornos.
- Estudio de los diferentes protocolos de enrutamiento. De los resultados obtenidos en las diferentes simulaciones de protocolos, optimizar y mejorar el comportamiento de un protocolo en un entorno rural.

1.3. Impacto en sostenibilidad, ético-social y de diversidad

Este Trabajo Fin de Grado, dentro de su alcance y en consonancia con la Guía transversal sobre la Competencia de Compromiso Ético y Global (CCEG) para los estudiantes, adopta los principios asociados a las tres dimensiones delineadas en ese documento.

Dimensión sostenibilidad:

La implementación de DTNs puede contribuir a reducir el impacto ambiental en comparación con otras tecnologías de red.

Dimensión ético-Social:

- Privacidad y Seguridad: este trabajo aborda adecuadamente las cuestiones de privacidad y seguridad asociadas con la transmisión de datos.
- Accesibilidad: se tendrá en cuenta la accesibilidad para diferentes usuarios, incluyendo aquellos con necesidades especiales.

Diversidad:

Este TFG considera las necesidades y perspectivas de diversas poblaciones al abordar problemas de conectividad en entornos adversos. Con este trabajo se contribuye a superar brechas digitales y promover la inclusión.

1.4. Enfoque y método seguido

Con el objetivo de garantizar la correcta ejecución de los objetivos planteados, se planea seguir una metodología que se divida en fases claramente definidas.

La fase inicial se centra en el establecimiento del marco teórico de trabajo. Esto implica la definición teórica de las redes DTNs, comprendiendo su desarrollo e implementación en el entorno de simulación The ONE. Además, se tiene la intención de incorporar en esta fase el diseño del escenario que será simulado.

La segunda fase consiste en llevar a cabo diversas simulaciones de las redes ya implementadas, así como en la evaluación de los resultados obtenidos y la formulación de las conclusiones pertinentes. En otras palabras, esta fase práctica se fundamenta en la solución teórica desarrollada en la primera fase.

1.5. Planificación del trabajo

El Trabajo está planificado en cinco fases. Coincidiendo con cada una de las entregas.

Fase 0: Es el primer hito, y en él se hace la propuesta del TFG, el análisis y la planificación. Se hace un estudio de que es necesario para la implementación y alcance que se puede alcanzar.

Fase 1: Es una fase prácticamente teórica, en ella se concentra la búsqueda de información referente a DTNs. Una vez recopilado y entendido en profundidad el área, se realiza el estudio del Arte. Este consiste en recopilar información sobre proyectos similares al que ocupa este Trabajo.

Fase 2: Es la fase más importante, ya que es la fase que abarca todo lo referente a la simulación y a la gestión de los resultados obtenidos.

Fase 3: Esta fase incluye la elaboración de una primera versión de la memoria del TFG.

Fase 4: En esta fase se hace un chequeo de todo el trabajo realizado. Una vez todo este correcto, se elabora la memoria final.

Además de la última versión de la memoria, se realiza la presentación que posteriormente se usará en la última fase.

Fase 5: Esta fase es la última de TFG y en ella se realiza la defensa del TFG.

A continuación, se muestra diagrama de Gantt con todas las Fases.



Figura 2: Diagrama de Gantt (ToDoList)

2. Estado del Arte

Desde los primeros días de la humanidad, la comunicación ha sido una parte fundamental de la experiencia humana. A lo largo de la historia, hemos desarrollado diversas formas de comunicarnos, desde las pinturas rupestres hasta los modernos lenguajes de programación. Estas formas de comunicación han evolucionado para satisfacer nuestras necesidades cambiantes y han dado lugar a una variedad de tecnologías que han transformado la manera en que nos conectamos y compartimos información.

Las redes de computadoras han estado en implementación durante más de cincuenta años y han experimentado un desarrollo significativo a lo largo del tiempo.

El uso generalizado de redes inalámbricas es más reciente en comparación con las redes cableadas, pero ha experimentado un crecimiento significativo en las últimas décadas. La tecnología inalámbrica ha permitido una mayor flexibilidad y movilidad en la conexión de dispositivos electrónicos, transformando la forma en que interactuamos con la tecnología.

Las tecnologías inalámbricas como Wireless Fidelity (Wi-Fi), Bluetooth y Celular (redes móviles) son ejemplos de tecnologías que se utilizan para la transmisión de datos de manera inalámbrica y que generalmente dependen de una infraestructura centralizada para su funcionamiento. A estas se les conoce comúnmente como redes inalámbricas de infraestructura. Sin embargo, también existen otras redes inalámbricas que operan de manera diferente, no dependiendo de una infraestructura centralizada y ofreciendo ventajas en situaciones específicas

Las Redes Tolerantes a Retardos, o DTN por sus siglas en inglés (Delay Tolerant Networking), son un tipo de red diseñada para manejar entornos donde las conexiones son intermitentes o donde puede haber retardos significativos en la transmisión de datos. Estas redes son especialmente útiles en situaciones en las que las condiciones de la red son impredecibles o en entornos donde las conexiones son esporádicas y pueden tomar un tiempo de varios minutos, horas o incluso días [3].

2.1. Historia de las DTNs

El término "Delay Tolerant Networking" tiene sus raíces en la Internet InterPlanetaria (IPN) [4]. Debido a las extremadamente altas demoras de propagación experimentadas al transferir datos entre diferentes planetas del sistema solar, los investigadores y científicos identificaron la principal diferencia entre las comunicaciones terrestres y espaciales. Los algoritmos y protocolos utilizados para las comunicaciones en el espacio deben ser tolerantes a los retardos. Además, debido a las altas tasas de errores de bits y las desconexiones a largo plazo experimentadas en tales entornos, el campo de investigación también se complementó con el término "disruption" (disrupción).

Una de las primeras referencias conocidas al estudio de la comunicación interplanetaria se remonta a 1954 con el desarrollo del satélite Sputnik 1 por la Unión Soviética y su posterior lanzamiento en 1957 [5]. Por ello, Estados Unidos ingresó en la crisis de Sputnik y, más generalmente, en la Carrera Espacial con la Unión Soviética.

Uno de los resultados directos de la crisis de Sputnik fue la creación de la "Advanced Research Projects Agency" (ARPA), conocida hoy como "Defense Advanced Research Projects Agency" (DARPA) [6]. Y esta agencia, para estimular la investigación en áreas relacionadas con la viabilidad en los vuelos espaciales, creó y asignó numerosas subvenciones gubernamentales a instituciones académicas y a industrias para investigar detalles técnicos de la comunicación.

En la década de 1970, impulsados por el reducido tamaño cada vez mayor de las computadoras, los investigadores comenzaron a desarrollar técnicas para enrutar computadoras entre ubicaciones no fijas. Aunque el campo del enrutamiento ad hoc se desarrolló lentamente durante la década de 1980, en la década de 1990, las redes ad hoc móviles (MANET) y las redes ad hoc vehiculares se convirtieron en áreas de creciente interés, y la proliferación de protocolos inalámbricos revitalizó el campo.

El pionero de Internet Vint Cerf y otros investigadores desarrollaron la arquitectura inicial de la IPN en relación con la necesidad de una tecnología de redes que pudiera hacer frente a la alta latencia y la corrupción de paquetes de las comunicaciones en el espacio [7].

A principios de la década del 2000, Kevin Fall comenzó a aplicar algunas de las ideas de diseño de la IPN a las redes terrestres, acuñando los acrónimos Delay Tolerant Networking [8]. Y ya a mediados de esa misma década, hubo un aumento en el interés en DTN, incluido un número creciente de conferencias académicas sobre Delay Tolerant Networking.

Este nuevo campo de investigación atrajo mucha atención, principalmente debido a sus características desafiantes: La conectividad intermitente, la alta movilidad, los patrones de movilidad desconocidos, el agotamiento de energía y almacenamiento son solo algunos de

los problemas potenciales a los que los investigadores se pueden enfrentar en un entorno de DTNs.

2.2. Líneas de investigación sobre DTNs

El Grupo de Investigación de Redes Tolerantes a Retardos (DTNRG, por sus siglas en inglés) fue hasta el año 2016 una entidad dentro del Foro de la Internet Research Task Force (IRTF) que se enfocaba en investigar y desarrollar protocolos de comunicación para redes que experimentan conectividad intermitente o largos retardos. [9]

Este Grupo de Investigación estuvo activo durante varios años y logró diseños e implementaciones de varios protocolos.

Como final de actividad de este grupo, celebraron una reunión especial en la sede Google para resaltar el trabajo realizado y las direcciones futuras de investigación. El contenido detallado de la reunión se puede encontrar en [10].

El grupo pasa a trabajar de manera similar a un grupo de trabajo del Internet Engineering Task Force (IETF). Este cambio marca un movimiento significativo en la investigación a un enfoque más práctico y orientado a estándares.

El objetivo principal de DTN en el IETF es proporcionar estándares y especificaciones que permitan la interoperabilidad y el desarrollo de implementaciones compatibles que puedan utilizarse en aplicaciones del mundo real, como en aplicaciones gubernamentales, comerciales y de investigación en todo el mundo [11].

Este Grupo de Trabajo se enfoca en trabajos adicionales relevantes al área de Redes Tolerantes a Retardos, dividiendo los elementos de trabajo en 3 categorías amplias:

- Una arquitectura para Nombres, Direcciones y Reenvío.
- Definición de una arquitectura y protocolos en las áreas de Operaciones, Administración y Gestión (OAM), y Gestión de Claves.
- Extensiones y mejores prácticas para protocolos existentes.

Además, el Grupo de Trabajo trabaja con otros Grupos de Trabajo del IETF, especialmente en las Áreas de Seguridad, Enrutamiento, Operaciones y Gestión, para asegurar la calidad de la revisión entre pares, evitar la duplicación de esfuerzos y alinearse con las especificaciones producidas en otros Grupos de Trabajo.

2.3. Proyectos sobre DTNs

En la actualidad, existen numerosas aplicaciones en las que los nodos inalámbricos, ya sean móviles o fijos, se enfrentan a condiciones de funcionamiento extremas. Estos nodos tienen que esperar intervalos de tiempo que superan los tiempos de reenvío típicos de las redes IP convencionales, los cuales suelen medirse en milisegundos, antes de poder retransmitir sus datos al siguiente salto.

Algunas de las áreas clave donde los proyectos DTN son relevantes son las siguientes:

- **Entornos Rurales y Remotos:** Se utilizan para proporcionar conectividad en áreas donde la infraestructura de comunicación tradicional es limitada o inexistente. Estos proyectos permiten la comunicación entre comunidades remotas, mejoran el acceso a la información y servicios básicos como la atención médica, educación y desarrollo económico.
- **Asistencia en Desastres:** Los proyectos DTN son cruciales en situaciones de desastres naturales o emergencias, donde las infraestructuras de comunicación pueden estar inoperativas. Estas redes permiten la coordinación de operaciones de rescate, la comunicación entre equipos de ayuda y el acceso a recursos vitales.
- **Exploración y Espacio Exterior:** En misiones espaciales, las DTN se utilizan para la comunicación entre naves espaciales, sondas y estaciones terrestres cuando la conectividad directa no es posible debido a grandes distancias o interrupciones en la línea de visión.
- **Aplicaciones Militares:** Se utilizan para operaciones militares en áreas donde la conectividad tradicional puede ser limitada, intermitente o comprometida. Las DTN proporcionan comunicación segura y confiable entre unidades militares, incluso en entornos hostiles.
- **Redes de Sensores y Monitoreo Ambiental:** Los proyectos DTN se implementan para recopilar datos en entornos remotos o difíciles de alcanzar, como selvas, océanos o regiones árticas. Esto ayuda en la investigación científica, monitoreo ambiental y conservación de la vida silvestre.

A continuación, se muestran algunos de los proyectos destacados sobre DTNs:

2.3.1. Serval Project

El proyecto Serval ofrece software que permite a los dispositivos móviles establecer una red mallada segura, autoorganizada y totalmente distribuida. Su protocolo, llamado Rhizome, permite el funcionamiento de la red incluso en ausencia de conectividad de extremo a extremo. Este protocolo puede ejecutarse sobre un protocolo de datagrama de malla (MDP) para el transporte, proporcionando flexibilidad y adaptabilidad a diversas condiciones de conectividad. El protocolo MDP puede compararse con UDP/IP, pero utiliza SIDs (Subscriber ID, la clave pública de un par de claves asimétricas de curva elíptica) en lugar de direcciones IP ofreciendo funciones de cifrado, autenticación e integridad por defecto [12].

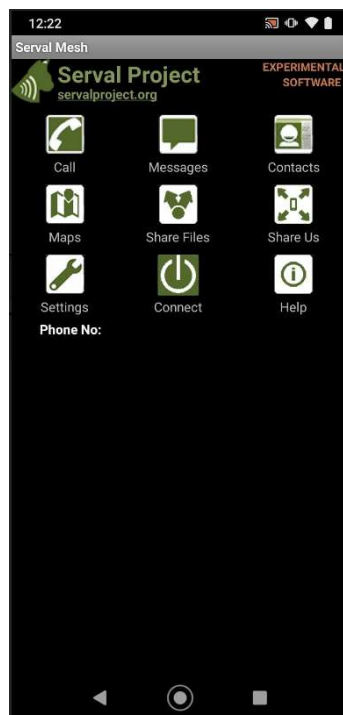


Figura 3: Aplicación Serval Mesh para Smartphone [13]

La capacidad de operar de manera independiente de la conectividad convencional hace que el proyecto Serval sea particularmente útil en situaciones donde la infraestructura de red tradicional no está disponible o es limitada [14].

2.3.2. DieselNet

Es una infraestructura de red vehicular ubicada en el campus de Amherst de la Universidad de Massachusetts, que se extiende hasta el condado vecino. Esta red tiene como objetivo la investigación y el desarrollo de tecnologías para mejorar la eficiencia, la seguridad y la gestión del tráfico en entornos vehiculares.

Consiste en un conjunto de autobuses equipados con computadoras HaCom Open Brick y alimentados por una batería de 24 V. Cada autobús ejecuta Linux y lleva un GPS que registra su posición. Esta red de malla WiFi, llamada UMass DieselNet, incluye autobuses con ordenadores de pequeño tamaño y dispositivos GPS [15].

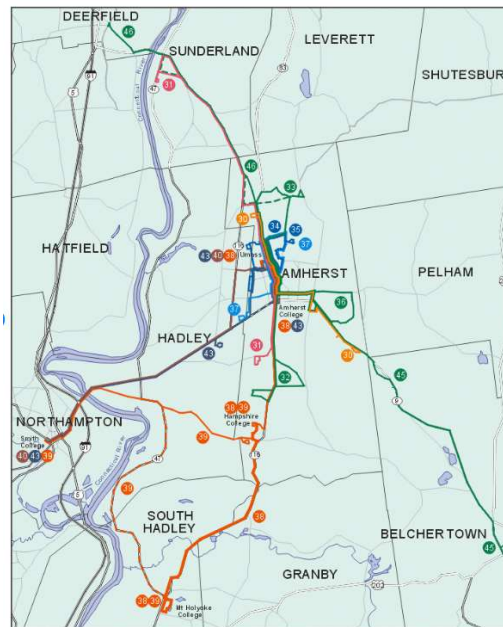


Figura 4: Rutas recorridas por los autobuses de UMass DieselNet [16]

Cada autobús realiza escaneos frecuentes cada 10 segundos en busca de otros vehículos, y la red actúa como un banco de pruebas realista para evaluar redes tolerantes a retardos vehiculares. Las pruebas en DieselNet permiten estudiar los efectos de eventos críticos, como retardos de cálculos, interferencias inalámbricas y retardos del sistema operativo, aspectos que no pueden modelarse perfectamente en simuladores de software [17].

2.3.3. Proyecto Loon

Google desarrolló este proyecto innovador llamado "Loon", con la finalidad de proporcionar banda ancha de forma gratuita en zonas rurales y remotas, así como para mejorar la comunicación durante y después de catástrofes naturales o crisis humanitarias [18]

momentos en los cuales la conectividad es muy importante porque la información en sí misma puede salvar vidas.

"Loon" se basa en el concepto de globos estratosféricos equipados con tecnología de comunicación para crear una red inalámbrica aérea. Estos globos flotan en la estratosfera, a altitudes mucho mayores que las aeronaves tradicionales.



Figura 5: Red de globos del proyecto Loon [18]

Utiliza estaciones base en la Tierra, debajo de la trayectoria del globo, y crea una red de malla entre los globos para transferir mensajes a estas estaciones base terrestres con conectividad a Internet para transmitir respuestas y solicitudes. Los usuarios pueden conectarse a los globos a través de dispositivos LTE (Long Term Evolution).

Para orientar los globos, el proyecto Loon dispone de complejos algoritmos basados en inteligencia artificial para determinar cuándo y hacia dónde deben ir utilizando las corrientes de viento para cambiar dinámicamente la red y con ello satisfacer la demanda, teniendo un ciclo de funcionamiento de 100 días, al final de los cuales descenderán y se someterán a mantenimiento [19].

En la actualidad y tras 9 años de logros y contando con socios potentes como Telefónica, Loon se ha desestimado debido a que los costes operativos del proyecto superaban su rentabilidad.

2.3.4. Bytewalla

La implementación de servicios DTN y protocolos en la plataforma Android se conoce como "Bytewalla", que permite el uso de teléfonos Android para el transporte físico de datos entre nodos de red en zonas en las que no existen infraestructuras de red eficientes [20].

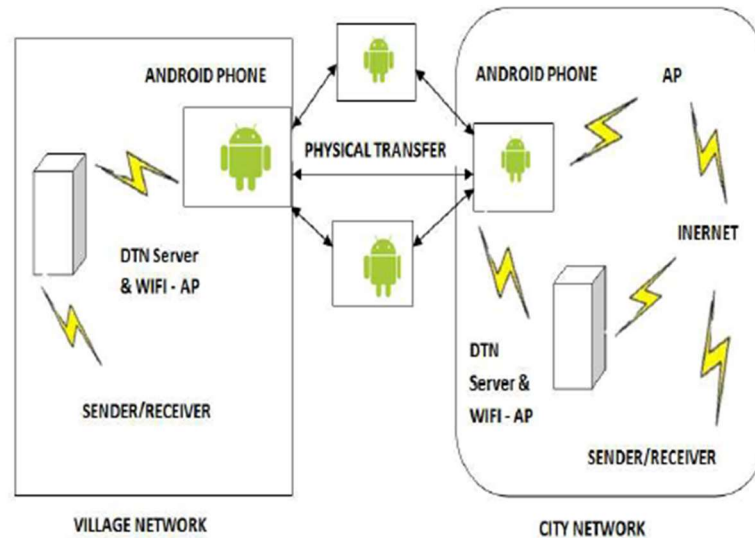


Figura 6: Arquitectura de Bytewalla [20]

La idea principal de este proyecto es permitir a las personas que se desplazan entre una ciudad y un pueblo lleven y transporten datos en sus smartphones móviles Android, funcionando como un portador de mensajes. Al llegar a una ciudad o un lugar que disponga de conexión a Internet, los datos se transmiten al destino a través de Internet.

Bytewalla es una aplicación que facilita el transporte físico de datos entre nodos de red utilizando smartphones con SO Android [21].

Esta solución es especialmente útil en zonas donde no existen otros enlaces disponibles o cuando los enlaces existentes deben evitarse por motivos de seguridad. También puede ser utilizado en situaciones en las que el acceso a Internet está cerrado por una autoridad gubernamental, como sucedió en algunos países árabes durante la primavera de 2011 [22].

2.3.5. KioskNet

El sistema KioskNet, desarrollado por la Universidad de Waterloo, tiene como objetivo proporcionar servicios de red de área de tolerancia a retardos (DTN) a las aldeas más pobres en países en desarrollo a un bajo costo.

Este sistema utiliza vehículos para transmitir datos desde las aldeas a Internet y ofrece diversos servicios a los residentes rurales. Estos servicios incluyen la emisión de certificados de nacimiento, matrimonio y defunción, consultas médicas y asesoramiento sobre problemas agrícolas.

El enfoque de DTN permite la conectividad incluso en entornos con conectividad intermitente o limitada, brindando así servicios esenciales a comunidades remotas [23].

El proyecto Kiosknet se plantea como una red tolerante a retardos que se compone de servidores específicos, sistemas ligeros integrados y ordenadores reciclados. Su propósito es proporcionar a los usuarios finales en áreas rurales acceso a Internet sin conexión, enfocado en transacciones, a través de quioscos rurales. El despliegue potencial de KioskNet en regiones geográficas extensas, donde muchos de sus componentes operan en zonas rurales remotas y sin supervisión, plantea desafíos significativos en términos de seguridad [24].

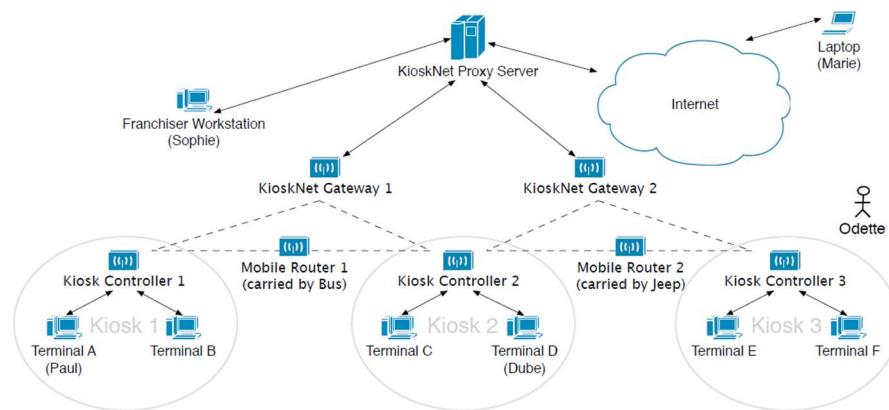


Figura 7: Escenario típico de un desarrollo con Kiosknet [24]

3. Arquitectura y Protocolos DTNs

Este apartado describe las características principales de la arquitectura de Redes Tolerantes a Retardos según lo establecido en la especificación RFC 4838 [25]. Esta arquitectura busca resolver los desafíos de comunicación en entornos difíciles mediante el almacenamiento y reenvío de mensajes, aprovechando un conjunto de capas de red que se adaptan a una amplia gama de tecnologías de transporte subyacentes.

Dentro de la arquitectura normalizada de las Redes Tolerantes a Retardos (DTN), se detallan aspectos fundamentales como los diversos tipos de nodos y conexiones (llamadas "contactos") que pueden presentarse en una DTN. Esto incluye el principio básico de funcionamiento, que se basa en el enrutamiento y reenvío de información, implementado específicamente en la capa de Bundle (estandarizada en la RFC 5050 [26]).

3.1. Tipos de nodos

En una Red Tolerante a Retardos (DTN), existen tres tipos principales de nodos: host, router y Gateway (o alguna combinación de estos), y cada uno desempeña roles específicos en el proceso de comunicación:

- **Host:** Los nodos "host" envían y/o reciben paquetes, pero no los reenvían a otros nodos. Pueden ser tanto el origen como el destino de la transferencia de un paquete. La capa bundle en un host que opera considerando largos retardos y, por tanto, requiere tener capacidad de almacenamiento permanente para encolar los paquetes hasta que se encuentre disponible un enlace de comunicación.
- **Router:** Los nodos "router" reenvían paquetes dentro de una única región DTN y, opcionalmente, pueden funcionar como host. La capa bundle en los routers, al igual que en los hosts, opera considerando largos retardos y también necesita tener capacidad de almacenamiento permanente para encolar los paquetes hasta que se encuentre un enlace disponible.
- **Gateway:** Los nodos "gateway" reenvían paquetes entre dos o más regiones DTN y, opcionalmente, pueden actuar como host. La capa bundle en los gateways debe contar con almacenamiento persistente y ser capaz de manejar la custodia en la transferencia de los mensajes. Los gateways permiten la comunicación entre capas inferiores del protocolo y las regiones en las que operan, facilitando la transferencia de datos entre diferentes áreas de la red DTN.

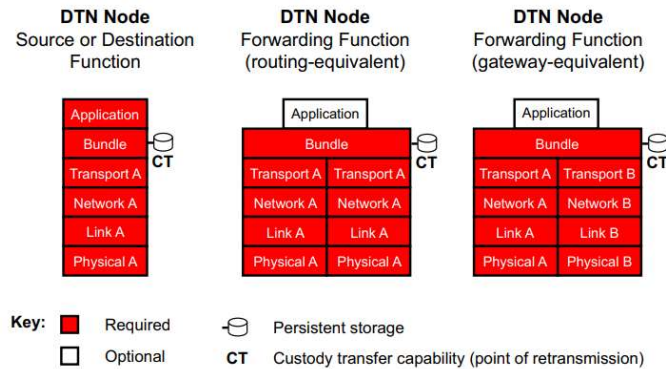


Figura 8: Nodos de las DTNs [27]

3.2. Método de almacenamiento y reenvío

En escenarios donde dos nodos están en movimiento y establecen una conexión entre sí, existe la posibilidad de que esta conexión se interrumpa debido a obstáculos físicos, cambios en la distancia entre los nodos o movimientos impredecibles.

Para preservar la energía y minimizar la utilización de recursos en estas situaciones, los nodos pueden entrar en un estado de "ahorro de energía" o "modo de suspensión" cuando la conexión se pierde o se vuelve inestable. Esto implica desactivar ciertas funciones de comunicación o reducir la potencia de transmisión para conservar la energía de la batería hasta que la conexión vuelva a estar disponible.

Este comportamiento puede causar una conectividad intermitente, ya que los nodos pueden entrar y salir de estos estados de ahorro de energía en función de la disponibilidad y estabilidad de la conexión. La intermitencia en la conectividad puede ser una característica común en entornos donde los nodos están en constante movimiento, lo que puede afectar la consistencia de la comunicación entre ellos.

Para abordar este desafío, se emplean estrategias y protocolos de comunicación específicos en las DTNs para gestionar la intermitencia de la conectividad, como técnicas de almacenamiento temporal de datos en los nodos o el uso de algoritmos de enrutamiento que se adapten a la disponibilidad intermitente de la conexión.

En Internet, la conectividad intermitente provoca la pérdida de datos. Los paquetes que no pueden ser inmediatamente transmitidos son normalmente desechados y el Protocolo de Control de Transmisión (TCP) debe volver a retransmitirlos.

En las DTNs, por el contrario, se soporta la comunicación entre nodos con conexiones intermitentes, mediante una técnica clave para estas redes como lo es la del

almacenamiento y reenvío de datos, con la cual se hace frente al problema de la intermitencia en la conectividad, los retardos variables y tasas de datos asimétricas.

Al contrario del modelo de Internet, donde los routers utilizan chips de memoria para almacenar temporalmente los paquetes mientras se procesan las decisiones de enrutamiento, en las DTNs se requiere un enfoque diferente para el almacenamiento de datos debido a las condiciones de comunicación intermitente y la movilidad de los nodos.

En las DTNs, los dispositivos de almacenamiento de los nodos (como discos duros o memorias físicas), deben ser capaces de mantener y retener los mensajes de forma indefinida o prolongada. Estos nodos con capacidad de almacenamiento permanente se denominan "almacenadores persistentes".



Figura 9: Almacenamiento y reenvío de datos empleado por los nodos en las DTNs [27]

Los routers utilizados en las Redes Tolerantes a Retardos (DTNs) requieren almacenamiento persistente para encolar sus datos debido a varias razones fundamentales:

- **Disponibilidad intermitente de la vía de comunicación:** En entornos donde las conexiones son intermitentes o pueden no estar disponibles durante largos períodos, los routers necesitan almacenar datos de manera persistente. Esto les permite retener los mensajes hasta que se establezca una ruta de comunicación viable hacia el siguiente nodo o destino.
- **Asimetría en la velocidad o confiabilidad de la comunicación:** En ocasiones, un nodo puede enviar o recibir datos a diferentes velocidades o con diferentes niveles de confiabilidad en comparación con otro nodo. En tales casos, el almacenamiento persistente permite a los routers equilibrar o gestionar esta asimetría al retener los datos hasta que sea posible la transmisión o recepción de manera equitativa y eficiente.
- **Necesidad de retransmisión de datos:** En situaciones donde ocurre un error en la transmisión o si un nodo se niega a reenviar un mensaje, los routers necesitan almacenar persistentemente los datos para permitir la retransmisión. Este almacenamiento temporal permite reintentar la transmisión o encontrar un nuevo camino para la entrega del mensaje si surgen problemas en el enlace de comunicación.

3.3. Tipos de contactos

En DTN se supone que no todos los nodos son alcanzables y pueden ser contactados en cualquier momento. Esta característica contrasta fuertemente con el internet convencional, donde se considera que las entidades comunicantes están siempre alcanzables. Un concepto importante que debe ser considerado en esta arquitectura es el “contacto”. Un contacto corresponde a una ocasión favorable para que los nodos intercambien datos. La posibilidad de fallos siempre existirá para cualquier tipo de contacto, pero dependiendo de éste los fallos pueden ser más o menos frecuentes.

Los tipos de contactos en las DTN, definidos por la RFC 4838 [25] se separan en varias categorías, basadas en sus características de rendimiento.

- **Contactos persistentes:** Son conexiones que están siempre disponibles para la transmisión de datos. Estos contactos ofrecen conectividad constante y continua, lo que permite una comunicación sin interrupciones entre los nodos.
- **Contactos bajo demanda:** Requieren una solicitud explícita para establecer la conexión antes de iniciar la transmisión de datos. Por lo general, se inicia una petición de conexión cuando es necesaria la comunicación y se termina cuando finaliza la transmisión.
- **Contactos oportunistas:** En las redes con tolerancia a retardos, los nodos pueden necesitar comunicarse durante contactos oportunistas, donde un emisor y un receptor se encuentran durante un tiempo no planificado. En estos casos, usualmente no existe una ruta completa entre los nodos que desean comunicarse. Sin embargo, la capacidad de las DTNs para utilizar contactos oportunistas permite a estos nodos intercambiar datos entre sí. Esto puede causar un retraso adicional en la entrega de los mensajes, ya que a menudo se almacenan en la red a la espera de una ruta disponible hacia el destino. Ejemplos de contactos oportunistas incluyen interacciones entre vehículos, aeronaves, satélites o personas, que intercambian información cuando coinciden por casualidad dentro de la línea de visión y están lo suficientemente cerca para comunicarse.
- **Contactos programados:** En una DTN donde un origen y un destino, aunque no estén en contacto directo, siguen un patrón de movilidad predecible (por ejemplo, un satélite en órbita alrededor de la Tierra), es posible planificar el envío y/o recepción de datos en cierta medida. Esto permite anticipar momentos específicos en los que se producirán contactos entre los nodos y se pueda llevar a cabo la transmisión de datos

3.4. La Capa Bundle

La arquitectura de las Redes Tolerantes a Retardos (DTNs) está diseñada para proporcionar comunicaciones de extremo a extremo en entornos donde las comunicaciones son desafiantes debido a la conectividad intermitente, retardos variables y altas tasas de error. En estas redes, las capas que la componen se comunican entre sí utilizando sesiones simples donde el acuse de recibo puede variar dependiendo de la clase de servicio seleccionada.

Para que esto sea posible, el grupo de Investigación DTN (Delay-Tolerant Networking Research Group) define una nueva capa, denominada “Bundle Layer” que se encuentra entre la capa de aplicación y transporte, formando una red superpuesta encargada del almacenamiento y reenvío de datos, a causa de las interrupciones constantes [25].

Para proporcionar interoperabilidad entre distintas redes, utiliza un esquema de nombres flexibles (basado en identificadores uniformes), capaz de encapsular diferentes esquemas de nombres y números. También cuenta con un modelo de seguridad básica con el fin de proteger la infraestructura de un uso no autorizado.

La conmutación de mensajes con almacenamiento y reenvío que emplean las DTN se consigue con la introducción la capa bundle tal y como muestra la figura 10, entre la capa de aplicación y la capa de transporte.

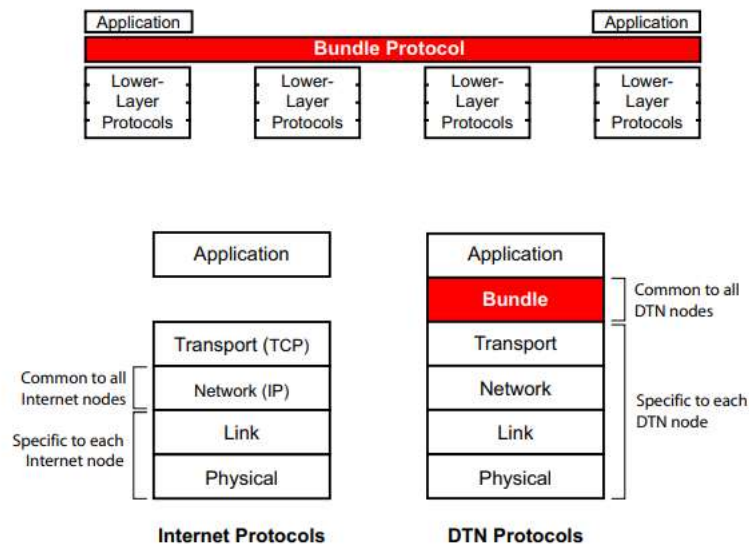


Figura 10: Arquitectura capa Bundle [27]

La funcionalidad de la capa bundle no difiere significativamente de la capa de red en la arquitectura de Internet. Mientras que la capa de red en la arquitectura de Internet se enfoca en la conmutación de paquetes, la capa bundle se centra en el reenvío de mensajes. Esta capa está orientada a mensajes, concentrándose en el almacenamiento y reenvío de información en lugar de en la conmutación de paquetes como lo hace la capa de red convencional.

En la capa de red del modelo actual de Internet, los paquetes se almacenan temporalmente por un breve periodo de tiempo. Por otro lado, en la capa bundle, los mensajes se almacenan de manera persistente, ya sea en disco o memoria flash. Estos mensajes permanecen guardados para ser retransmitidos si llegara a ser necesario, lo que permite un almacenamiento prolongado y una mayor disponibilidad para su reenvío en caso de interrupciones en la comunicación.

Un paquete bundle típico está compuesto por tres elementos:

- **Datos fuente de la aplicación:** Esta sección contiene la información generada por la aplicación o el usuario, es decir, los datos originales que se envían o reciben.
- **Control de la información:** Proporcionado por la propia aplicación, esta parte del paquete bundle indica cómo manejar, almacenar, reenviar y disponer de los datos. Ofrece instrucciones sobre el tratamiento y la gestión de los datos dentro de la red.
- **Encabezado Bundle:** Insertado por la capa bundle, este componente permite la fragmentación de los datos en paquetes más pequeños, si es necesario, para su posterior reensamblaje. Facilita el proceso de dividir y reconstruir los datos para su transmisión eficiente a través de la red.

En el modelo de Internet, el protocolo TCP se encarga de garantizar la integridad en la transmisión de los paquetes desde el origen hasta el destino, asegurando la entrega completa mediante la retransmisión de segmentos que no hayan sido recibidos correctamente. Además de la función de TCP, las capas de red, enlace y física también contribuyen a mantener la integridad de los datos durante la comunicación.

En cambio, en el modelo de las DTNs, la capa bundle se apoya en los protocolos de capas inferiores (capa de enlace, física, etc.) para asegurar la fiabilidad en la comunicación. En lugar de depender exclusivamente de un protocolo como TCP, las DTNs confían en la funcionalidad y características proporcionadas por los protocolos de capas inferiores para garantizar la entrega y la integridad de los datos.

Para asegurar que los mensajes no se pierdan durante interrupciones en la comunicación, se implementa el concepto de custodia de mensajes. Este proceso asegura que, una vez

que un gateway decide retener un mensaje debido a la falta de conectividad o a otras condiciones de la red, dicho mensaje permanecerá almacenado hasta que se garantice su entrega segura. Solo cuando se confirma la recepción por parte del destino o cuando otro nodo intermedio acepta la responsabilidad, el mensaje puede ser eliminado o transferido a otro nodo para su posterior retransmisión. Esto ayuda a mantener la integridad y la entrega confiable de los mensajes.

3.5. Protocolos de Enrutamiento

Los protocolos de enrutamiento en redes tradicionales asumen una conectividad permanente y condiciones estables, lo que no es aplicable en las DTNs. Las DTNs enfrentan desafíos debido a la falta de conectividad constante, altas tasas de pérdida de paquetes y variabilidad en los retardos de transmisión.

Los protocolos de enrutamiento en DTNs deben adaptarse a estas condiciones cambiantes y a menudo hostiles. En lugar de rutas predefinidas, utilizan estrategias como el enrutamiento basado en oportunidades, donde los nodos se comunican y almacenan datos para retransmitirlos cuando encuentran un nodo con el que pueden establecer conexión.

La RFC 4838 describe los desafíos y requisitos para las DTNs pero no especifica un protocolo de enrutamiento estándar debido a la diversidad de situaciones en las que pueden aplicarse estas redes. Por lo tanto, se promueve la investigación y el desarrollo de nuevas tecnologías y protocolos adaptativos que puedan funcionar de manera eficiente en entornos de red disruptivos y dinámicos.

La arquitectura DTN permite una gran flexibilidad para los protocolos de enrutamiento en estas redes en base a sus requisitos específicos.

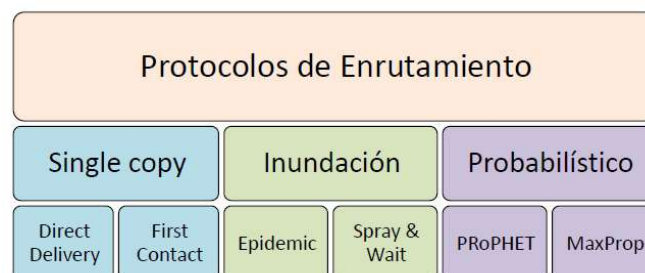


Figura 11: Protocolos de Enrutamiento

3.5.1. Enrutamiento determinista

La hipótesis fundamental del enrutamiento determinista en las DTNs es que se conoce o se puede predecir completamente el movimiento futuro de los nodos, así como sus conexiones con otros nodos (la topología de la red). Los métodos utilizados en este tipo de enrutamiento se apoyan en la creación de modelos para representar los cambios en la estructura de la red a lo largo del tiempo y buscan encontrar la ruta más corta en el espacio-tiempo.

Estas técnicas son especialmente útiles en escenarios donde la topología de la red es predecible, como en redes espaciales, o en entornos donde la movilidad de los nodos está altamente controlada, como en vehículos aéreos no tripulados (UAV) o vehículos submarinos autónomos.

Sin embargo, los protocolos de enrutamiento determinista enfrentan desafíos significativos, especialmente en entornos donde la conectividad es esporádica, existen retardos y los recursos disponibles son escasos. Uno de los problemas principales es la distribución del estado de la red y la movilidad de los perfiles en un entorno donde la conectividad no es constante. La falta de información actualizada sobre el estado de la red y la movilidad de los nodos puede dificultar la planificación precisa de rutas y la toma de decisiones de enrutamiento.

3.5.1.1. Encaminamiento espacio-tiempo

Los algoritmos de enrutamiento que se construyen en el gráfico de espacio-tiempo se desarrollan utilizando programación dinámica y algoritmos para hallar la ruta más corta además de buscar la mejor ruta para los mensajes de cara al futuro.

3.5.1.2. Enfoque basado en árboles (*Tree-Based Approach*)

Este método de enrutamiento se basa en la estructura jerárquica de árboles para establecer rutas de comunicación entre nodos. En este enfoque, los nodos dentro de la red pueden actuar como raíces o nodos principales que inician la transmisión de datos hacia abajo en la jerarquía del árbol.

En este enfoque, se puede enviar mensajes a destinos que se encuentran a varios saltos de distancia. Sin embargo, si los parámetros de reenvío son demasiado conservadores, se harán tantas copias adicionales como sean necesarias para llegar al destino. Por el contrario, si son demasiado agresivos, entonces el mensaje podría no propagarse hasta su destino.

3.5.1.3. *Basado en la ruta más corta*

El enfoque basado en la ruta más corta en DTNs se apoya en el conocimiento disponible sobre la topología de la red y la demanda de tráfico para determinar rutas óptimas para la transmisión de datos. Bajo este contexto, se han propuesto diferentes algoritmos que utilizan ciertos "oráculos" para representar diferentes tipos de conocimiento sobre la red.

Estos oráculos son herramientas que proporcionan información clave para tomar decisiones de enrutamiento más informadas:

- **Resumen de Contactos:** Este oráculo ofrece estadísticas acerca de los contactos que ha tenido un nodo específico en la red. Proporciona información sobre la frecuencia o la cantidad de encuentros o interacciones que han ocurrido entre nodos en un período de tiempo determinado.
- **Oráculo de Contactos:** Contiene datos sobre el número de contactos posibles entre dos nodos a lo largo del tiempo de estudio. Este oráculo ofrece información sobre la posible conectividad o interacciones entre nodos específicos en la red.
- **Oráculo de Encolado:** Proporciona detalles sobre el estado del buffer o la cola de mensajes en un nodo en cualquier momento dado. Esto incluye información sobre la cantidad de datos almacenados, la priorización de los mensajes y el estado del almacenamiento temporal de datos en el nodo.
- **Oráculo de Demanda de Tráfico:** Este oráculo ofrece información sobre la demanda actual de tráfico en la red y puede predecir la posible demanda de tráfico en el futuro. Ayuda a comprender las necesidades de transmisión de datos y las tendencias de tráfico en la red.

Estos oráculos son utilizados por los algoritmos de enrutamiento para tomar decisiones más inteligentes sobre la selección de rutas en la red. Al tener conocimiento sobre la topología de la red, la cantidad y frecuencia de contactos entre nodos, el estado de los buffers y la demanda de tráfico, los algoritmos pueden calcular rutas más eficientes y adaptativas para la transmisión de datos.

3.5.1.3.1. *Direct Delivery Routing*

El enrutamiento de entrega directa, conocido como "Direct Delivery", es un método de enrutamiento en DTNs en el cual un mensaje se transmite únicamente cuando el nodo origen ha establecido contacto directo con su destino final. Bajo este enfoque, el mensaje se retiene

en el nodo origen hasta que se identifica una oportunidad de comunicación directa con el nodo destino [28].

El enfoque de entrega directa se utiliza cuando se espera que el nodo origen pueda establecer un contacto con el nodo destino en algún momento futuro. Es eficiente en situaciones donde la movilidad o la programación de los nodos sugieren que existe una alta probabilidad de que se establezca una conexión directa entre ellos en algún momento.

Sin embargo, este método puede tener limitaciones en situaciones donde la conectividad directa entre el nodo origen y el destino sea poco probable o altamente improbable, lo que resultaría en retrasos prolongados o incluso en la falta de entrega del mensaje si no se logra el contacto directo.

3.5.1.3.2. *First Contact Routing*

El enrutamiento de "First Contact" (Primer Contacto) es un método de enrutamiento utilizado en DTNs donde un mensaje se reenvía al primer nodo con el que el nodo origen entra en contacto. Una vez que se ha transmitido el mensaje, este se elimina de la cola de mensajes del nodo origen, lo que permite que el mensaje sea manejado por múltiples nodos durante su trayecto hacia el nodo destino.

Debido a esta naturaleza de reenvío a múltiples nodos, el mensaje puede seguir un camino no lineal hacia el nodo destino y podría ser manejado por varios nodos intermedios antes de llegar a su destino final.

El enrutamiento de "First Contact" es útil en entornos donde la conectividad es intermitente y la probabilidad de contacto directo entre el nodo origen y el destino es baja. Permite aprovechar cualquier oportunidad de transmisión, aunque pueda generar cierta duplicación o reenvío del mensaje a través de múltiples nodos en la red [29].

3.5.2. Enrutamiento estocástico

El enrutamiento estocástico se basa en la premisa de que el comportamiento de la red no sigue un patrón predefinido o fácilmente predecible, sino que es más bien aleatorio o probabilístico. En estos protocolos de enrutamiento, las decisiones sobre dónde y cuándo reenviar mensajes se toman en función de datos históricos, patrones de movilidad o cualquier otra información disponible en ese momento.

A diferencia de los enfoques deterministas, donde se intenta establecer rutas precisas basadas en información concreta o predefinida, los protocolos de enrutamiento estocástico son más adaptables a entornos dinámicos y cambiantes. Estos protocolos toman decisiones basadas en la probabilidad y en datos históricos para retransmitir mensajes, ya que la conectividad y los encuentros entre nodos pueden ser impredecibles en redes como las DTNs.

3.5.2.1. *Basado en la difusión*

Consiste en realizar múltiples copias de cada mensaje a un conjunto de nodos, con el fin de aumentar la velocidad de entrega. Puesto que todos los nodos reciben una copia del mensaje, esta categoría tiene la mejor probabilidad de entrega. Los nodos almacenan los mensajes hasta que se conecten con el destino, momento en el que se entrega el mensaje.

Tradicionalmente, estas tácticas se han estudiado en el contexto de las redes ad-hoc móviles, donde la movilidad al azar tiene una buena oportunidad de llevar la fuente en contacto con el destino.

A continuación, se mencionan alguna de las estrategias que se clasificarían dentro de este contexto:

3.5.2.1.1. *Epidemic routing*

El enrutamiento epidémico es una estrategia de enrutamiento en DTNs que se basa en la replicación del mensaje para aumentar la velocidad de entrega. En este enfoque, cada nodo que recibe un mensaje lo replica y lo transmite a todos los nodos con los que entra en contacto, lo que lleva a una propagación masiva del mensaje por toda la red [30].

Esta estrategia tiene la mejor probabilidad de entrega en comparación con otros métodos, ya que al replicar el mensaje y difundirlo a todos los nodos, aumenta la posibilidad de que el mensaje llegue a su destino eventualmente. Sin embargo, este aumento en la velocidad de entrega viene acompañado de un alto costo en términos de recursos consumidos, ya que la red se satura con múltiples copias del mismo mensaje.

El costo, medido por el número de copias o mensajes creados, puede ser extremadamente alto, lo que puede ser un problema ya que los usuarios podrían no estar dispuestos a compartir todo su espacio de almacenamiento para llevar mensajes que no son de interés para ellos. En escenarios donde la cola de mensajes está llena, los mensajes más antiguos se descartan para dar paso a nuevos mensajes, y se sigue una política de envío basada en FIFO (primero en entrar, primero en salir).

Una desventaja significativa del enrutamiento epidémico es que el mensaje sigue propagándose incluso después de haber llegado a su destino, lo que puede generar desperdicio de recursos y saturación de la red con mensajes innecesarios.

A pesar de sus desventajas, el enrutamiento epidémico es relativamente sencillo y no requiere un conocimiento profundo de la red. Es más adecuado para redes pequeñas donde la sobrecarga de mensajes replicados puede ser gestionada de manera más eficiente.

3.5.2.1.2. *Spray and Wait*

El protocolo "Spray and Wait" es un método de enrutamiento diseñado para DTNs que consta de dos fases distintas: "Spray" (rociar) y "Wait" (esperar). Este protocolo tiene como objetivo optimizar la entrega de mensajes con una cantidad limitada de replicaciones y, al mismo tiempo, minimizar el uso de recursos [31].

- **Fase de Spray (Rociar):** En esta fase inicial, cada mensaje que se origina en un nodo de origen se replica L veces (donde L es un parámetro fijo). Estas L copias del mensaje se transmiten a todos los nodos. Si el destino es encontrado durante esta fase, se considera que la transmisión se ha completado con éxito.
- **Fase de Wait (Esperar):** Si el mensaje no alcanza su destino durante la fase de Spray, se inicia la fase de Wait. Durante esta fase, si los nodos que llevan una copia del mensaje se encuentran con el nodo destino, pueden transmitir directamente el mensaje. Esto significa que los nodos pueden hacer entrega directa si se encuentran con el nodo destino sin necesidad de replicar más el mensaje.

El parámetro L , que determina la cantidad de replicaciones (copias) iniciales del mensaje, está relacionado con la densidad de nodos, la distribución y los perfiles de movilidad en la red. Este parámetro se ajusta para equilibrar la eficiencia en la entrega del mensaje y la utilización de recursos. Si la densidad de nodos es alta, se pueden usar menos copias para optimizar el uso de recursos; mientras que, en entornos con baja densidad de nodos, es posible que se necesiten más copias para asegurar la entrega.

El manejo de la cola en este protocolo sigue una política FIFO (primero en entrar, primero en salir), lo que significa que los mensajes se transmiten en el orden en que ingresan a la cola de espera.

El "Spray and Wait" es un protocolo que busca equilibrar la eficiencia de entrega y el uso eficiente de recursos al limitar la cantidad de replicaciones iniciales y permitir la transmisión directa si se encuentra el nodo destino durante la fase de espera. Esto lo hace una estrategia adaptable a diferentes densidades de nodos y movilidades en las DTNs.

3.5.2.2. Basado en estimaciones

Las estrategias basadas en estimaciones en DTNs utilizan información de la topología de la red para seleccionar la mejor ruta de transmisión para los mensajes. Estos enfoques se centran en determinar rutas de manera más tradicional, utilizando diferentes métodos para encontrar el camino óptimo y luego enviar el mensaje a lo largo de esa ruta.

Algunas de las estrategias que se clasificarían dentro de este contexto son:

- **Enrutamiento Basado en la Ubicación:** Este enfoque utiliza la información de ubicación de los nodos para determinar las rutas de transmisión. Los mensajes se envían siguiendo caminos basados en la proximidad física de los nodos, aprovechando la geolocalización o coordenadas espaciales para tomar decisiones de enrutamiento.
- **Asignación de Parámetros a los Nodos:** En esta estrategia, se asignan parámetros específicos a los nodos en función de ciertas métricas, como la velocidad de movimiento, la capacidad de almacenamiento, la disponibilidad de energía, entre otros. Estos parámetros se utilizan para determinar las rutas óptimas para la transmisión de mensajes.
- **Asignación de Parámetros para Enlaces:** En lugar de asignar parámetros a los nodos, esta estrategia se enfoca en atribuir características a los enlaces entre nodos. Se utilizan métricas como la estabilidad de la conexión, la capacidad de transmisión o la probabilidad de encuentro entre nodos para seleccionar las mejores rutas de comunicación.

3.5.2.2.1. PROPHET

El protocolo de enrutamiento PROPHET (PRObabilistic and Hierarchical routing Protocol for DTNs) es un enfoque basado en el intercambio de información de predicción probabilística entre nodos para tomar decisiones de enrutamiento [32].

La premisa principal de PROPHET es que los nodos mantienen información de probabilidades sobre la entrega exitosa de mensajes a otros nodos de la red. Estas probabilidades se actualizan dinámicamente según las interacciones entre los nodos y se utilizan para tomar decisiones de enrutamiento.

Los nodos intercambian mensajes de control para compartir información sobre sus historiales de encuentros y las probabilidades asociadas con los nodos vecinos.

Cada nodo mantiene una lista de los contactos recientes con otros nodos y calcula probabilidades de entrega para los mensajes basadas en estos encuentros pasados. Estas probabilidades se actualizan a lo largo del tiempo a medida que se producen nuevos contactos. PROPHET utiliza las probabilidades aprendidas para predecir la probabilidad de futuros encuentros entre nodos. Esta predicción se usa para tomar decisiones de reenvío de mensajes de manera más efectiva, priorizando aquellos nodos con una alta probabilidad de contacto en el futuro.

3.4.2.2.2. *MaxProp*

El protocolo MaxProp opera con la premisa de que cada nodo en la red mantiene una tabla de enrutamiento que predice la probabilidad de alcanzar otro nodo en el futuro a través de sus vecinos actuales. Estas tablas de enrutamiento se actualizan continuamente utilizando la información obtenida de los vecinos.

Cuando dos nodos se encuentran, intercambian estos vectores de probabilidad de entrega. Este intercambio de información permite que cada nodo calcule la ruta más probable o el camino con mayor probabilidad de entrega hacia el destino. Posteriormente, los mensajes se ordenan y se envían siguiendo la ruta que ofrece la mayor probabilidad de entrega.

La idea fundamental es que cada nodo utiliza la información recopilada sobre las probabilidades de entrega desde su propia perspectiva y la de sus vecinos para tomar decisiones sobre el camino más probable para que los mensajes lleguen a su destino. Este proceso ayuda a maximizar las posibilidades de éxito en la entrega de los mensajes al priorizar rutas que, según la información disponible, tienen mayores probabilidades de llevar al destino final [33].

4. Entorno de Simulación: The One

Se ha elegido el simulador "ONE" (Opportunistic Network Environment) [34] como la herramienta para realizar la simulación de los escenarios propuestos. Este Simulador es ampliamente utilizado en la comunidad académica para llevar a cabo experimentos y pruebas de concepto en el campo de las redes DTN, permitiendo a los investigadores explorar y desarrollar nuevas soluciones para mejorar la comunicación en entornos donde la conectividad es limitada o no garantizada.

4.1. Estructura del simulador

El simulador ONE es un entorno de simulación basado en Java que se utiliza para realizar experimentos y simulaciones en entornos de redes DTN (Disruption Tolerant Networks). Ofrece la posibilidad de configurar y ejecutar simulaciones con diversos escenarios que involucran la movilidad de nodos, la transmisión de datos, cambios en el tamaño de los mensajes, ajustes en el tamaño del buffer, y la evaluación del rendimiento de los protocolos de enrutamiento, entre otros parámetros.

El núcleo The One se basa como un simulador de eventos discretos basados en agentes, lo que es adecuado y suficientemente eficiente para el movimiento simultáneo y la simulación del enrutamiento.

El enrutamiento se implementa a través de módulos que toman decisiones sobre qué mensajes deben transmitirse a través de los contactos disponibles en la red simulada. Y, por otro lado, los mensajes en la simulación se generan mediante generadores de eventos, lo que permite simular la creación y transmisión de mensajes en la red.

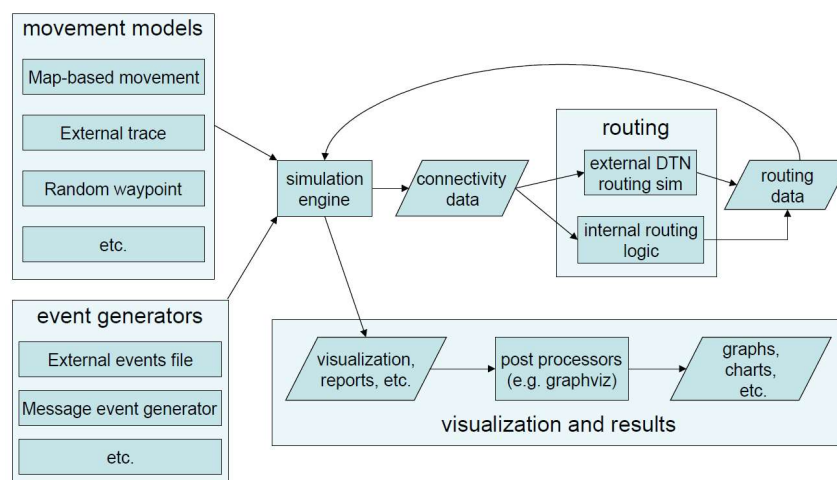


Figura 12: Descripción general del entorno de simulación ONE [35]

4.2. Ejecución de la simulación

El modo GUI (Interfaz Gráfica de Usuario) en The ONE es útil para propósitos de prueba, depuración y demostración. Proporciona una interfaz visual que facilita la interacción con la simulación, lo que permite a los usuarios monitorear el progreso de la simulación, ajustar parámetros en tiempo real y observar los resultados de manera gráfica.

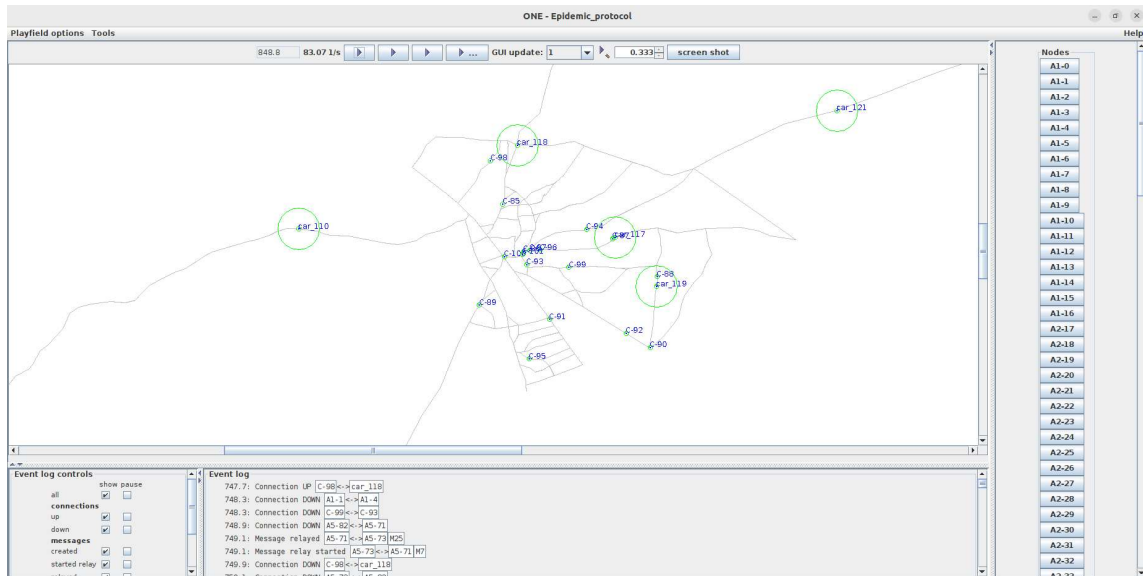


Figura 13: Interfaz de visualización del simulador.

Por otro lado, el modo por lotes (batch mode) es especialmente útil cuando se necesitan realizar numerosas simulaciones con diferentes conjuntos de parámetros de manera automatizada. Este modo permite ejecutar simulaciones sin la interfaz gráfica, lo que puede ser más eficiente para ejecutar un gran número de simulaciones de forma secuencial o simultánea, sin la necesidad de interacción directa del usuario.

Ambos modos de ejecución, ya sea GUI o por lotes, tienen la capacidad de generar reportes y estadísticas de la simulación. Estos reportes proporcionan información detallada sobre el rendimiento, el comportamiento de la red, métricas de enrutamiento, uso de recursos, entre otros datos relevantes que pueden ser útiles para analizar y comprender el funcionamiento de la red simulada.

4.3. Creación de los Mapas

Para simular la movilidad de nodos en una red DTN, es esencial tener mapas que representen las calles, avenidas, y otras características relevantes del entorno. Estos mapas son los que se utilizan para definir las rutas que seguirán los nodos durante la simulación.

Para generar archivos de extensión Well-Known Text (WKT), que describen las rutas y características geospaciales, se pueden utilizar diferentes herramientas. Las herramientas usadas para la creación de mapas de la simulación son:

osm2wkt [36]: Esta herramienta está diseñada específicamente para trabajar con datos de OpenStreetMap (OSM). OpenStreetMap [37] es una fuente de datos geospaciales gratuita y de código abierto que puede utilizarse para obtener información detallada sobre mapas. osm2wkt convierte archivos OSM de OpenStreetMap a formato WKT, facilitando así la conversión de datos de mapas para su uso en la simulación.

OpenJUMP [38]: Es un Sistema de Información Geográfica de código abierto que permite la visualización, edición y manipulación de datos geospaciales. Puede utilizarse para crear y editar mapas que luego se exportarán en formato WKT para su uso en la simulación.

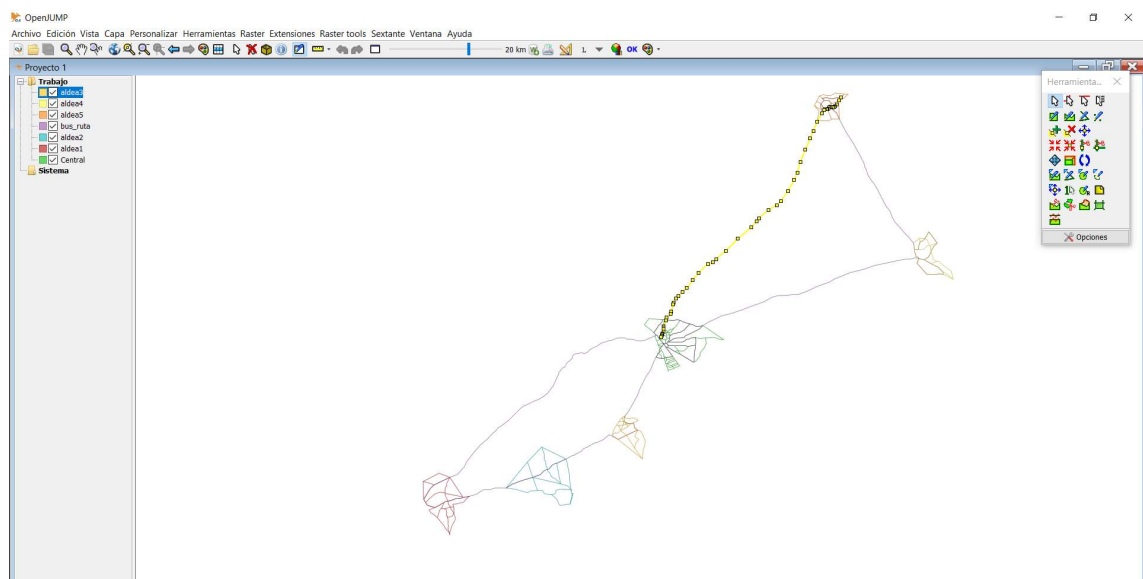


Figura 14: Edición de mapas. OpenJUMP

Estos programas y herramientas te permiten crear o convertir datos geospaciales en formatos compatibles con la simulación en el simulador ONE. Es posible utilizarlos para definir las rutas y características del entorno que serán utilizadas por los nodos durante la simulación.

Es importante contar con datos precisos y relevantes en los mapas para obtener simulaciones realistas que reflejen adecuadamente los escenarios de movilidad y comunicación en redes DTN.

4.4. Definición de escenarios de simulación

La construcción de escenarios de simulación en el simulador ONE implica definir y configurar diferentes aspectos que son fundamentales para simular de manera precisa el comportamiento de la red DTN. Esto incluye la definición de los parámetros básicos tales como capacidad de almacenamiento, rango de transmisión, velocidad, tasas de bits, etc. así como la selección del movimiento específico y modelos de enrutamiento.

El simulador ONE se configura a través de los parámetros configurables en un texto plano básico, archivos que contienen la simulación, interfaz de usuario, la generación de eventos y los parámetros de la presentación de informes. Todos los módulos tienen su alto nivel de comportamiento definido por la aplicación del código Java, pero los detalles del comportamiento se pueden ajustar en el subsistema de configuración.

Muchos de los parámetros de simulación pueden configurarse de forma independiente para cada grupo de nodos. Esto significa que los diferentes conjuntos de nodos pueden tener configuraciones específicas que se ajusten a sus necesidades. Sin embargo, también es posible que los grupos compartan un conjunto de parámetros comunes y únicamente modifiquen aquellos que son específicos para cada grupo en particular.

5. Simulación del caso de estudio

En este apartado describiremos las dos propuestas de escenarios de simulación. Por un lado, un escenario urbano, y por otro un escenario rural. Básicamente consiste en un numero de nodos llamados peatones, y otro grupo de nodos llamados vehículos que se mueven por ambos escenarios.

5.1. Especificación del escenario a simular

Para el entorno urbano, se ha utilizado un escenario de la ciudad de Helsinki. Este escenario ya está creado en el simulador, por lo que se reutiliza los mapas ya creados.

El escenario consiste en un conjunto de nodos llamados peatones, que pueden moverse libremente por la ciudad. Para este grupo de nodos se ha aplicado un modelo de movilidad llamado: ShortestPathMapBasedMovement, este modelo básicamente utiliza el algoritmo de Dijkstra para encontrar los caminos más cortos entre dos nodos del mapa del azar.

Además de los nodos peatones, existen los nodos vehículos; estos solamente pueden circular por las rutas asignadas. En este tipo de nodos se aplica el modelo de movimiento MapBasedMovement, que simplemente limita el movimiento del nodo en rutas predefinidas. De esta manera, por ejemplo, los vehículos pueden evitar conducir en interiores o en los caminos peatonales.

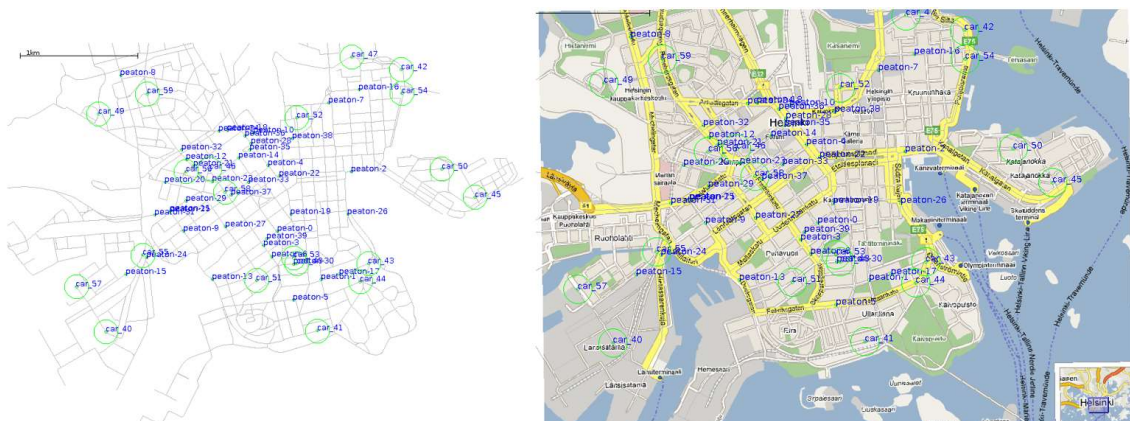


Figura 15: Mapa Helsinki

Por otro lado, el escenario rural elegido consiste en un conjunto de aldeas ubicadas alrededor de Beleko Soba (Mali). De tal manera, que el pueblo Beleko Soba es el nodo central, seguido de un conjunto de 5 aldeas alrededor.

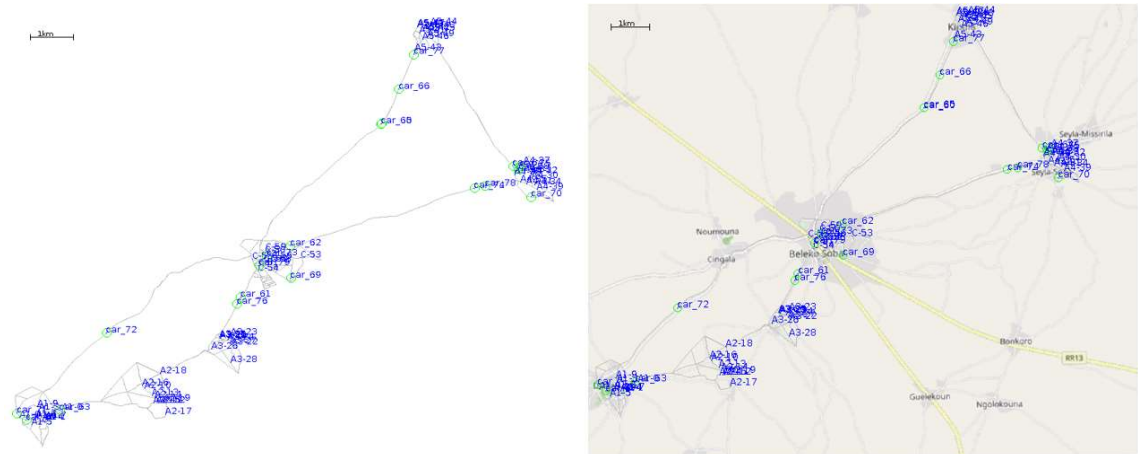


Figura 16: Mapa Beleko Soba (Mali)

En este caso, el diseño del escenario permite a los peatones moverse exclusivamente por la aldea a la que pertenecen, no pudiendo visitar otras aldeas. El movimiento asignado a estos peatones, al igual que en el entorno urbano, es ShortestPathMapBasedMovement. Los nodos con movilidad entre las diferentes aldeas, y pueblo centro son los vehículos; estos, pueden circular libremente por la ruta predefinida. Al igual que el entorno urbano, el modelo de movimiento de los vehículos es MapBasedMovement.

5.2. Configuración de los nodos

Uno de los objetivos principales de este trabajo es la simulación y comparación de los diferentes protocolos de enrutamientos vistos anteriormente. Estos protocolos irán cambiando en los nodos en cada simulación, obteniendo los reportes correspondientes.

Tal y como se ha explicado anteriormente, existen dos tipos de nodos diferentes. Y, por lo tanto, cada uno de ellos tiene una configuración diferente.

Por un lado, los nodos peatones utilizan una comunicación entre los demás nodos a través de teléfonos smartphone, utilizando una versión Bluetooth 5.0 a una velocidad de datos de 2 Mbps y con un rango de transmisión de 10 metros como máximo.

Y, por otro lado, los nodos vehículos utilizan además de la interfaz Bluetooth de los peatones, otra interface Wi-Fi 5 (802.11ac) de alta velocidad, con una velocidad de 80 Mbps y un rango máximo de transmisión de 100 metros.

Además de los sistemas de comunicación, cada tipo de nodo se mueve a velocidades distintas, los peatones se mueven a una velocidad aleatoria de entre 0,5 y 1,5 metros/segundo, y los vehículos a una velocidad entre 7 y 10 metros/segundo.

Otro de los parámetros importante en los nodos es el tamaño del buffer para almacenar mensajes de la red. El buffer de los peatones es de 5 Mbytes, mientras que el buffer de los vehículos es de 50 Mbytes. Este valor de buffer será uno de los parámetros a simular y comparar.

Los nodos peatones del entorno urbano y del entorno rural son idénticos en cada simulación, al igual que los nodos vehículos. Por defecto, se establecen 100 nodos peatones y 20 nodos vehículos, a excepción de la simulación que se realiza variando este número.

5.3. Modelos de movimiento

El movimiento de los nodos se lleva a cabo bajo modelos de movimiento que vienen prestablecidos en el programa. El simulador One tiene varios modelos de movilidad [39], estos dictan a los nodos como deben moverse. Definimos los dos modelos utilizados en este trabajo:

- Map-based movement:** Es el modelo de movimiento definido para los nodos vehículos. Este modelo de movimiento basado en mapas limita el movimiento del nodo en rutas predefinidas. Los diferentes tipos de caminos se pueden definir a través de mapas y el simulador One es el quien define las rutas válidas a seguir por el nodo. De esta manera, por ejemplo, los vehículos pueden evitar circular en interiores o en los caminos peatonales.
- ShortestPathMapBasedMovement:** Esta es la versión más sofisticada del modelo basado en mapas, utiliza el algoritmo del camino más corto (Dijkstra) para encontrar su camino a través del mapa. Una vez que un nodo llega a su destino, y ha esperado el tiempo de pausa (120 seg max) , elige un nuevo punto del mapa aleatorio y se mueve hacia ese punto, tomando la ruta más corta que se pueda encontrar usando sólo caminos validos del mapa. Este modelo de movimiento es el utilizado por los nodos peatones.

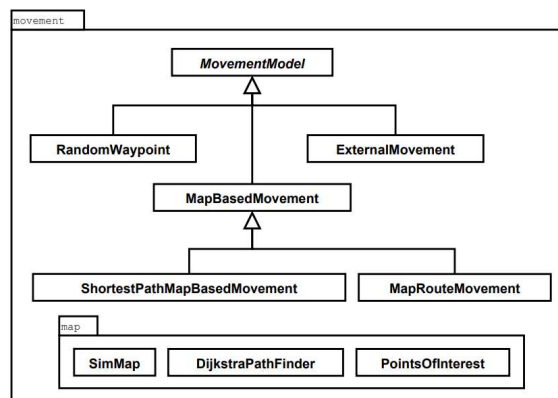


Figura 17: Modelos de movimiento del simulador The One [40]

5.4. Generación de Mensajes

Los mensajes producidos por los diferentes nodos se originan de manera aleatoria gracias a la clase `MessageEventGenerator`. Esta clase establece patrones equitativos para la creación de mensajes. Además, se pueden ajustar distintos parámetros de estos mensajes, tales como su tamaño, el lapso entre la creación de cada mensaje (medido en segundos), así como el remitente y destinatario de los mensajes.

Para nuestra simulación en ambos entornos, todos los nodos pueden generar mensajes, y el destino es generado de forma aleatoria por el simulador a otro nodo de la red. Estos mensajes son creados por cada nodo en intervalos aleatorios de entre 25 a 35 segundos con una distribución uniforme, de tal manera que en la simulación se inyectan una cantidad importante de mensajes a la red simulada. Con la variación de estos intervalos de tiempo, se podrá observar el comportamiento de la red en función de la carga de tráfico.

Y, por otro lado, otro parámetro configurable en los mensajes es el tamaño de estos. De tal manera, que para ambos entornos los mensajes tienen un tamaño aleatorio de entre 500 Kbytes y 1 Mbyte. Este parámetro será otro de los objetivos de comparación.

5.5. Reportes

Básicamente con la simulación se analizará la información de los mensajes almacenados en cada uno de los nodos luego de haber transcurrido el tiempo designado para ello. Para obtener esta información el simulador `One` posee varias clases llamadas reportes con las cuales generan archivos de texto.

Para nuestras simulaciones, vamos a extraer algunos Key Performance Indicators (KPI) de estos reportes, tales como:

Delivery_prob (Probabilidad de entrega): Es la relación entre la cantidad de mensajes recibidos con éxito y el número total de mensajes creados por el nodo emisor.

$$Delivery\ Probability = \frac{D_S}{Total_M}$$

$D_S =$ Mensajes recibidos con éxito
 $Total_M =$ Numero total de mensajes creados

Overhead_ratio (Ratio de Sobrecarga): La proporción de sobrecarga es una de las métricas más importantes que muestra la eficacia de un protocolo en términos de decisiones de retransmisión precisas. Indica el número total de copias de mensajes que se retransmiten en la red antes de llegar a su destino real.

$$\text{Overhead ratio} = \frac{\text{Relay}_M - \text{Total}_M}{\text{Total}_M}$$

Relay_M = Numero total de mensajes transmitidos, incluyendo mensajes originales y réplicas

Total_M = Numero total de mensajes entregados con éxito

Latency_avg (Latencia promedio): Es el tiempo promedio que tardan los mensajes desde su creación hasta su entrega en el nodo de destino final.

$$\text{latency avg} = \frac{\sum_{i=1}^n (R_i - C_i)}{n}$$

R_i = Tiempo en el que un mensaje i llega a su destino,

C_i = Tiempo en el que el mensaje i es creado

n = Numero total de mensajes entregados

6. Resultados de la simulación

En esta sección se expondrán los resultados obtenidos de todas las simulaciones, con sus respectivas comparaciones de los diferentes entornos. De tal forma, que se pueda observar el comportamiento y nivel de eficacia de los diferentes protocolos de enrutamiento en cada caso.

La simulación para la evaluación de los protocolos se ha realizado en seis partes para poder determinar la respuesta de los protocolos bajo distintas condiciones. En las diferentes simulaciones se varía el número de nodos en la red, el tamaño de buffer (peatones y vehículos), tamaño de los mensajes, tiempo TTL (time to live) y por último la frecuencia de generación de mensajes.

En el último apartado de esta sección, se hace un estudio de uno de los protocolos, enfocándose especialmente en el entorno rural.

6.1. Variando el número de nodos

En esta simulación lo que se pretende es ver el comportamiento de la red variando el número de nodos que intervienen. De tal manera, que se va aumentando en número de nodos peatones en cada escenario, manteniendo en 20 el número de nodos vehículos.

Como ya se explicó anteriormente, en el entorno rural los peatones no pueden salir de la aldea asignada, por lo que se divide el número total de peatones por las 6 zonas (5 aldeas más pueblo central).

Parámetro	Peatón	Vehículo
Movimiento	ShortestPathMapBasedMovement	Map-based movement
Numero de nodos	40,80,120,160,200	20
Velocidad de Peatones (m/s)	U [0.5,1.5]	U [7,10]
Interface	Bluetooth	Bluetooth + Wifi
Tx Rango radio (m)	10	100
Tx Velocidad	2 Mbps	80 Mbps
Tamaño de Mensajes	U [500KB,1MB]	U [500KB,1MB]
Tamaño de Buffer	5 Mbytes	50 Mbytes
TTL (seg)	18000 (5h)	18000 (5h)
Tiempo de Simulación (seg.)	86400 (24h)	86400 (24h)
Spray and Wait (L)	6 copias	6 copias

Tabla 1: Parámetros de la simulación: Numero de nodos

En cuanto a la probabilidad de entrega, en la siguiente figura podemos comparar ambos escenarios.

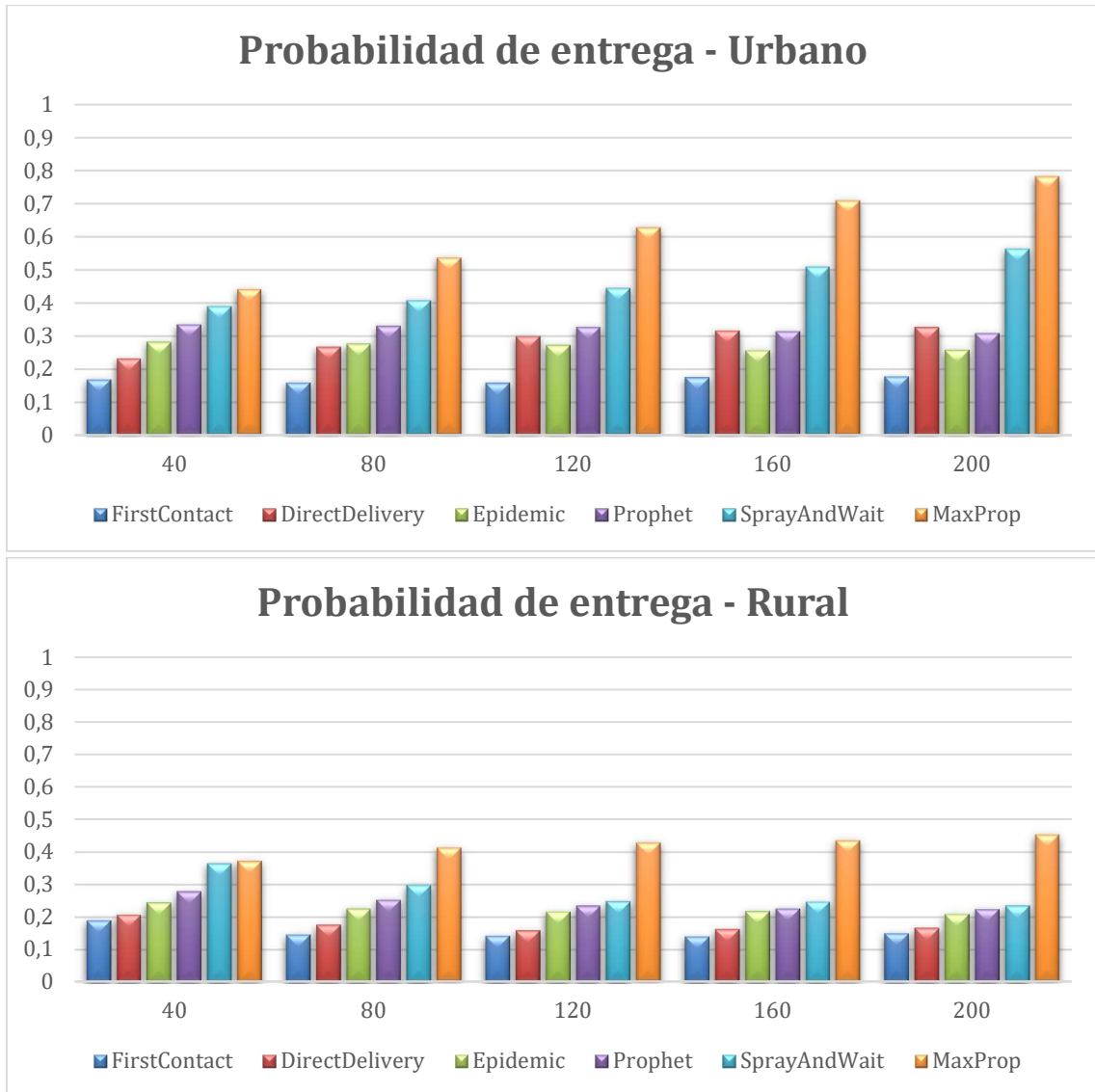


Figura 18: Entornos con diferente número de nodos – Probabilidad de entrega

Tal y como se puede observar en la figura 18, existe una diferencia de comportamiento según se aumenta el número de nodos peatones. Dentro del entorno urbano, se observa que los protocolos SprayandWait y MaxProp desarrollan mejor probabilidad de entrega al aumentar el número de nodos, mientras otros protocolos apenas hay diferencia, incluso puede haber probabilidades de entrega mas baja, como es el caso del protocolo Prophet.

En cuanto el entorno rural, se puede observar que el único protocolo que mejora la probabilidad de entrega es el MaxProp, todos los demás disminuyen esta probabilidad; y esto es debido a que las aldeas son pequeñas, y los peatones dentro de ellas, tienen muchos encuentros dentro de su aldea, pero ningún contacto con nodos de otras aldeas. Por lo que, básicamente dependen de los vehículos para distribuir los mensajes entre las diferentes aldeas.

En entornos con zonas discontinuas y movilidad limitada entre ellas, la comunicación directa entre nodos puede ser poco usual y, por tanto, la probabilidad de encuentros entre nodos que pertenecen a diferentes zonas disminuye. Esto afecta negativamente a la oportunidad de transferir mensajes de una zona a otra de manera eficiente.

En la siguiente figura comparamos la latencia para ambos escenarios:

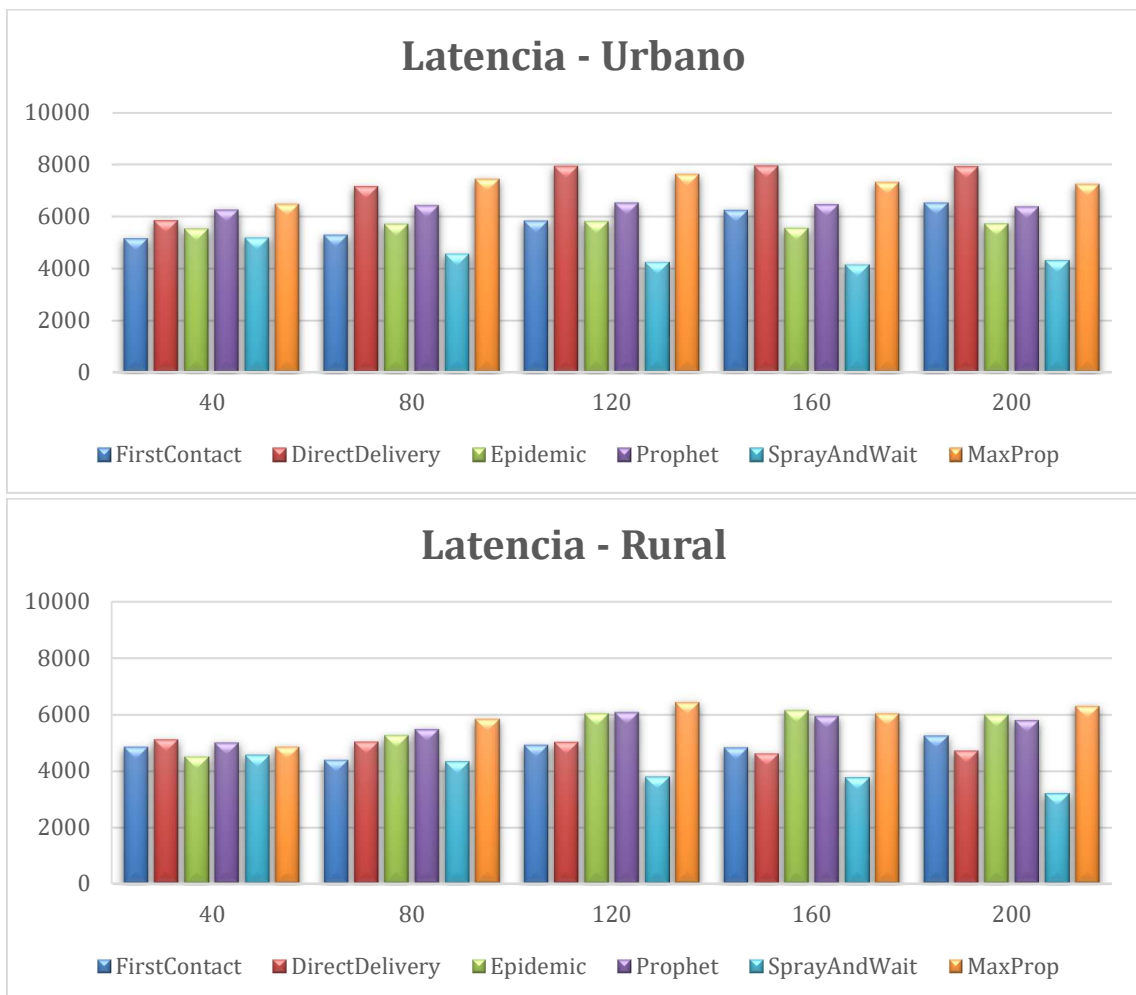


Figura 19: Entornos con diferente número de nodos – Latencia

En este caso la latencia en el caso de entorno rural es más baja, y esto es debido a que, al tratarse de una media, los mensajes creados con origen y destino dentro de la misma aldea son entregados rápidamente.

Como excepción, con el protocolo de enrutamiento Epidemic, la latencia aumenta en el entorno rural, y esto se debe a que la inundación de réplicas de mensajes puede llenar rápidamente los buffers de los nodos. El aumento de la latencia se produce porque los nodos están ocupados gestionando y almacenando múltiples réplicas de mensajes, lo que puede retrasar la entrega de mensajes y afectar la eficiencia de la red.

En la siguiente figura se comparan los Ratios de Sobrecarga de ambos entornos:

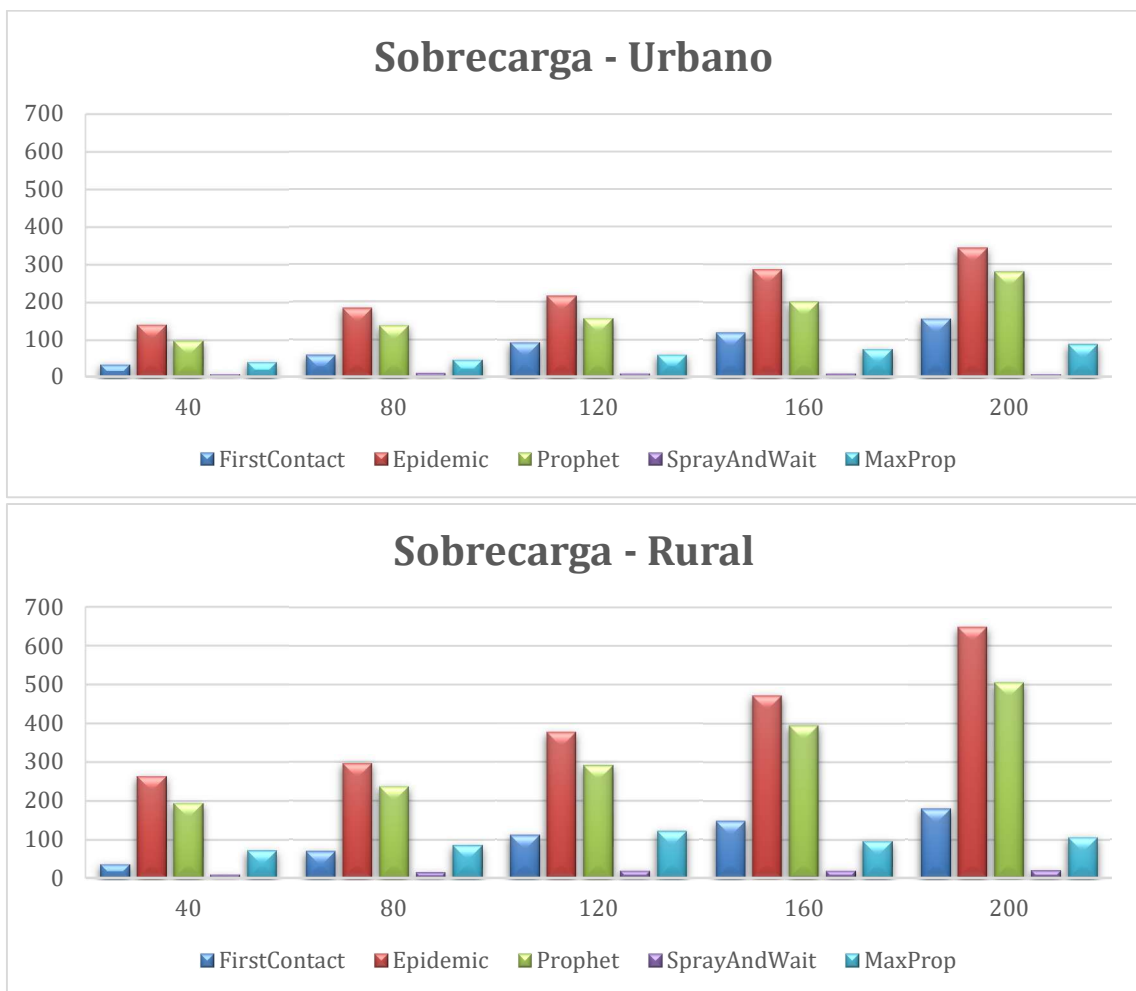


Figura 20: Entornos con diferente número de nodos – Sobrecarga

En este caso, se ha eliminado de la simulación el protocolo de enrutamiento Direct Delivery, ya que el valor de sobrecarga es 0 al ser entrega directa entre nodo origen y nodo destino.

En esta comparación se puede observar que la sobrecarga es mucho mayor en algunos protocolos en el entorno Rural, tales como Epidemic y Prophet. Y tal como se puede comparar en la figura 20, la sobrecarga en entorno rural es prácticamente el doble que en el entorno urbano. Y esto se debe a que, aunque en ambos escenarios se generan el mismo número de mensajes, en el entorno urbano se entregan mas mensajes, por lo que la sobrecarga baja.

La inundación de mensajes, por ejemplo, para el caso de Epidemic, hace uso de una mayor cantidad de recursos en la red, ya que como se sabe, el mensaje es reenviado a todos los nodos vecinos y además de eso, el mensaje continúa propagándose incluso después de que este ha llegado a su destino. Esto puede ser innecesario y contribuir a la congestión de la red.

En general, el protocolo que mejor comportamiento desarrolla con un numero alto de nodos es el MaxProp, con un porcentaje de entrega elevado a la vez que tiene una sobrecarga baja. Pero en cambio, si se quiere usar un numero bajo de nodos, orientado a entorno rural, el protocolo de enrutamiento de SprayandWait, es el protocolo que posee un nivel de sobrecarga muy bajo.

6.2. Variando el Buffer de los nodos Vehículos

En esta simulación se realiza una comparación de los diferentes escenarios variando el tamaño del buffer de los vehículos, de tal forma que, con un mayor tamaño de buffer, podrá almacenar más mensajes para la posterior entrega.

Parámetro	Peatón	Vehículo
Movimiento	ShortestPathMapBasedMovement	Map-based movement
Numero de nodos	100	20
Velocidad de Peatones (m/s)	U [0.5,1.5]	U [7,10]
Interface	Bluetooth	Bluetooth + Wifi
Tx Rango radio (m)	10	100
Tx Velocidad	2 Mbps	80 Mbps
Tamaño de Mensajes	U [500KB,1MB]	U [500KB,1MB]
Tamaño de Buffer	5 Mbytes	5,10,50,100,250 Mbytes
TTL (seg)	18000 (5h)	18000 (5h)
Tiempo de Simulación (seg.)	86400 (24h)	86400 (24h)
Spray and Wait (L)	6 copias	6 copias

Tabla 2: Parámetros de la simulación: Buffer vehículos

Para esta simulación, el buffer de los peatones no se modifica, por lo que todos los peatones, tanto del entorno urbano, como del entorno rural, tienen un buffer de 5MB. En la siguiente figura, se muestra la probabilidad de entrega en los diferentes escenarios.

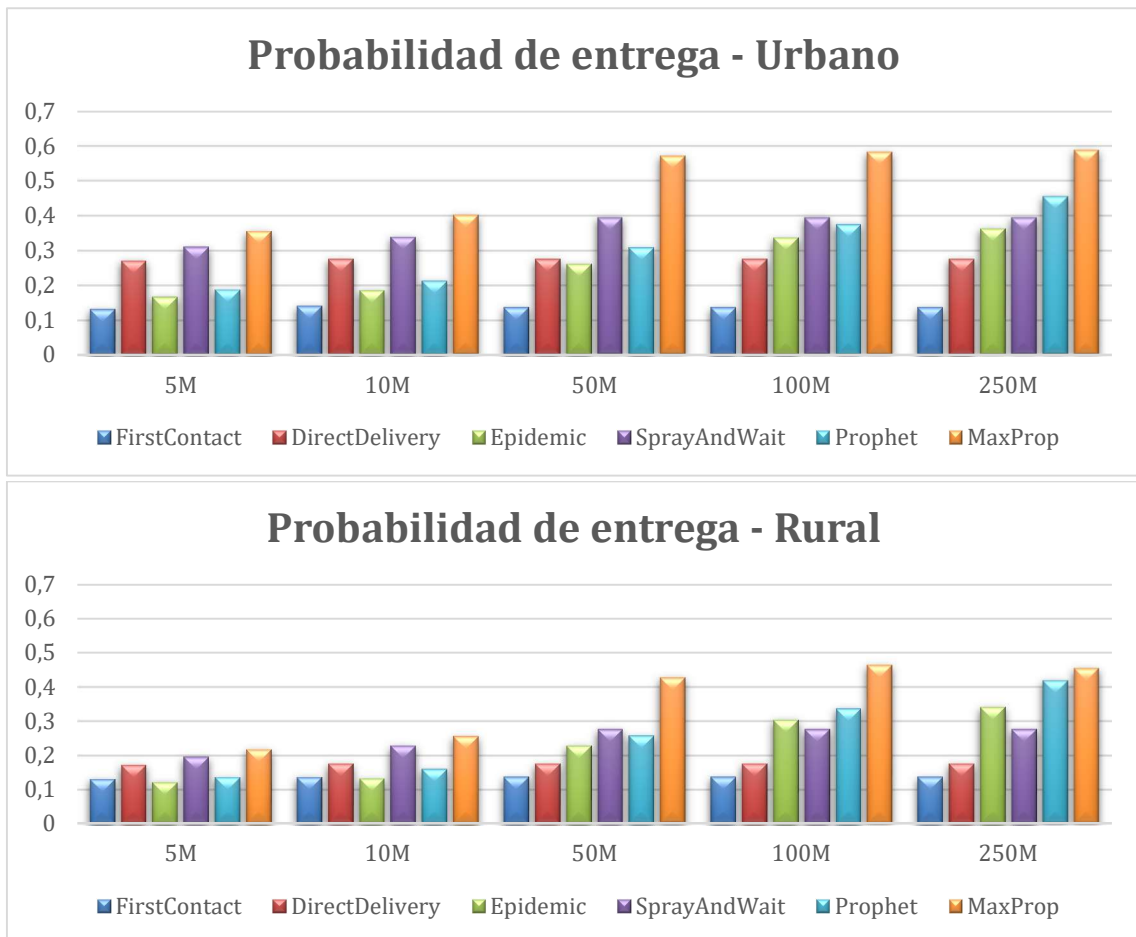


Figura 21: Entornos con diferentes tamaños de buffer de vehículos – Probabilidad de entrega

Como se puede observar, en general las probabilidades de entrega son mayores en el entorno urbano, y eso se debe que los todos los nodos pueden tener contacto entre ellos, mientras que, en el entorno rural, los peatones no pueden salir de su aldea.

La baja probabilidad de entrega para tamaños de buffer pequeños, especialmente en el entorno rural, se atribuye a las limitaciones en la capacidad de almacenamiento de mensajes en los nodos, especialmente en vehículos que actúan como portadores de mensajes entre aldeas.

En algunos casos, como pueden ser los protocolos FirstContact y DirectDelivery, tanto en entorno urbano como en entorno rural, aumentar el tamaño del buffer puede no conducir a mejoras sustanciales si la red ya está cerca de la saturación. Si la generación de tráfico no

es lo suficientemente alta para aprovechar al máximo el tamaño del buffer, es posible que las diferencias en la probabilidad de entrega no sean tan notorias.

Un aspecto crítico en las redes DTNs es la gestión del tamaño del buffer. Existe un equilibrio delicado entre el tamaño del buffer y la cantidad de tráfico en la red. Aumentar el buffer puede ser beneficioso hasta cierto punto, pero una vez que se supera el nivel óptimo, la capacidad adicional del buffer puede no ser aprovechada eficientemente si la generación de tráfico es limitada.

En la siguiente figura comparamos la latencia en los mismos escenarios:

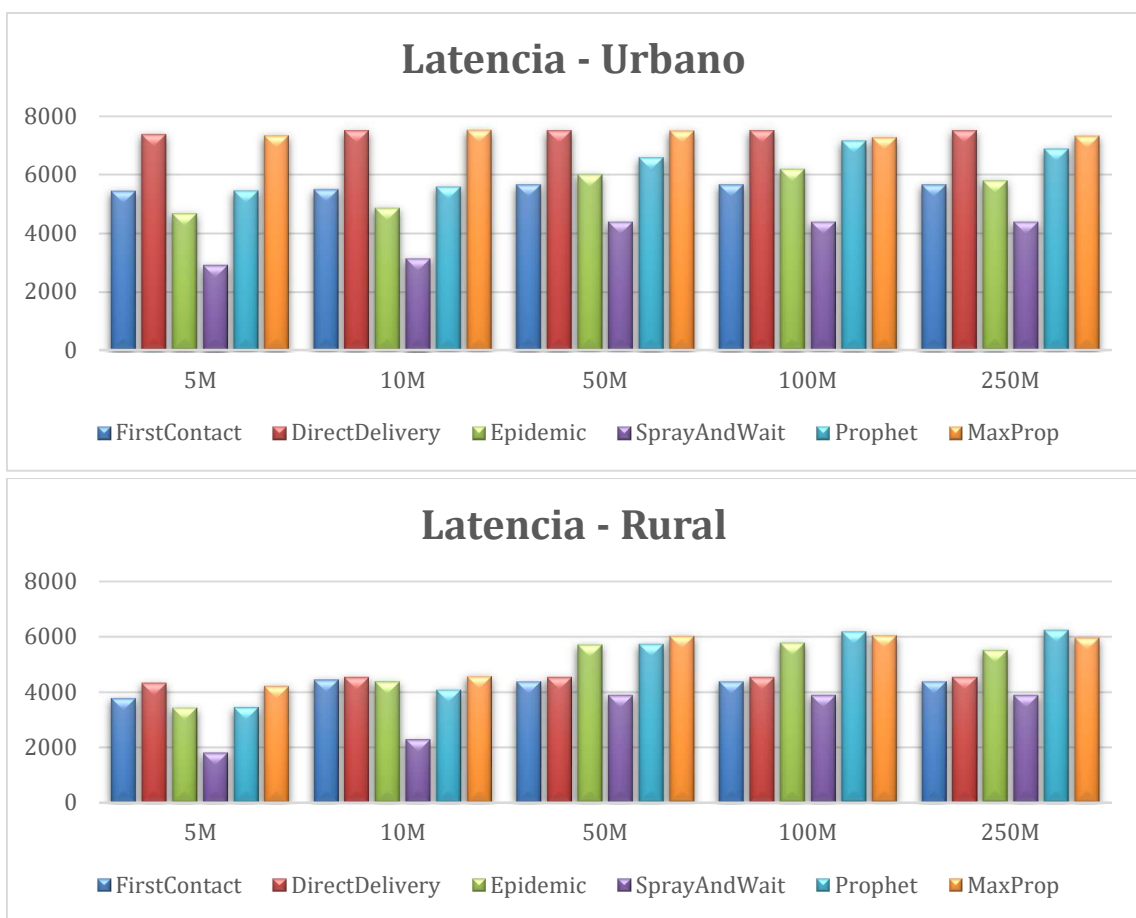


Figura 22: Entornos con diferentes tamaños de buffer de vehículos – Latencia

Aunque un buffer más grande mejora la probabilidad de entrega, también introduce una mayor latencia. Los mensajes almacenados en un buffer más grande pueden experimentar retardos más elevados antes de ser entregados. Esto se debe a que, con un mayor almacenamiento, es posible que los mensajes tengan que esperar más tiempo antes de ser transferidos a su destino.

A continuación, se compara la sobrecarga en ambos entornos:

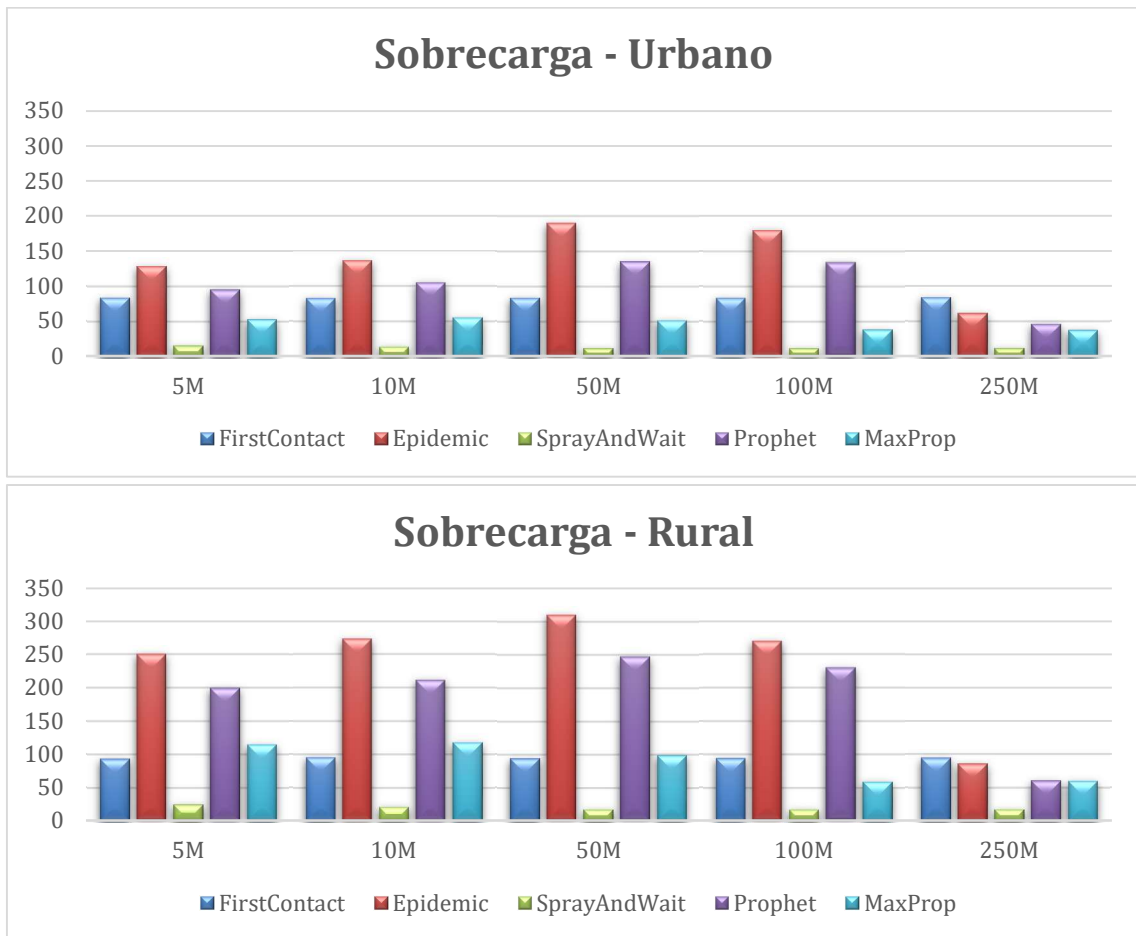


Figura 23: Entornos con diferentes tamaños de buffer de vehículos – Sobrecarga

Al igual que en la simulación anterior con numero de nodos, los dos protocolos que mayor sobrecarga tienen son Epidemic y Prophet. Con un buffer de vehículo más grande, existe una mayor capacidad para retener mensajes antes de que se tomen decisiones de descarte. En los protocolos Epidemic y Prophet, que tienden a replicar mensajes para aumentar las oportunidades de entrega, un buffer más grande podría ayudar a reducir la necesidad de descartar mensajes antes de que tengan la oportunidad de ser entregados.

Por otro lado, también se observa que esta sobrecarga es mayor en el entorno rural, y esto es debido a que, dentro de cada aldea, al estar más concentrados los peatones, y por tanto, mayor densidad, hay más reenvíos de mensajes, que sumando el total de todas las aldeas, hay muchos más reenvíos que en el entorno urbano.

De nuevo, en esta simulación el protocolo que mejor rendimiento obtiene es el MaxProp, ya que tiene las mayores tasas de entrega y poca sobrecarga. Pero si lo que se desea es un protocolo con poca sobrecarga, y la latencia no sea un factor importante, como podría ser

en el entorno rural, el más indicado es el SprayandWait. Eso sí, con una capacidad de buffer en los vehículos relativamente alta.

6.3. Variando el Buffer de los nodos Peatones

En esta simulación se ha simulado los diferentes entornos modificando el tamaño del buffer de los peatones, manteniendo en todo momento el buffer de los vehículos en 50MB.

Parámetro	Peatón	Vehículo
Movimiento	ShortestPathMapBasedMovement	Map-based movement
Numero de nodos	100	20
Velocidad de Peatones (m/s)	U [0.5,1.5]	U [7,10]
Interface	Bluetooth	Bluetooth + Wifi
Tx Rango radio (m)	10	100
Tx Velocidad	2 Mbps	80 Mbps
Tamaño de Mensajes	U [500KB,1MB]	U [500KB,1MB]
Tamaño de Buffer	1,5,15,25,50 Mbytes	50 Mbytes
TTL (seg)	18000 (5h)	18000 (5h)
Tiempo de Simulación (seg.)	86400 (24h)	86400 (24h)
Spray and Wait (L)	6 copias	6 copias

Tabla 3: Parámetros de la simulación: Buffer peatones

Esta capacidad de buffer de los peatones es sumamente importante, ya que son los nodos que más cantidad hay, y por tanto lo que más opciones tienen de entregar los mensajes.

En la siguiente figura se muestra la probabilidad de entrega dependiendo del tamaño del buffer de los peatones.

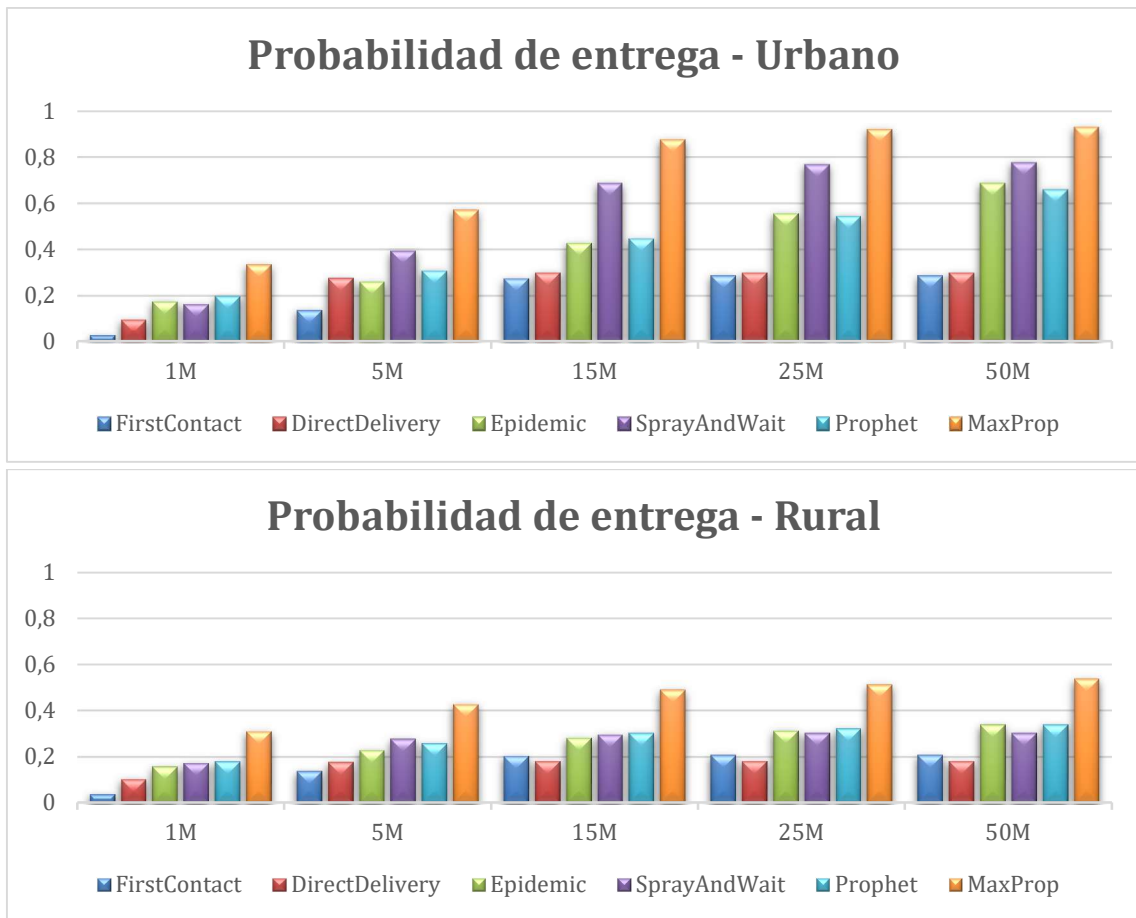


Figura 24: Entornos con diferentes tamaños de buffer de peatones – Probabilidad de entrega

Como se puede observar, en el entorno urbano el incremento del tamaño del buffer de los peatones aumenta la probabilidad de entrega en todos los protocolos debido a que a medida que aumenta el tamaño del buffer es posible un mayor almacenamiento de paquetes, lo que hace que se descarten en un menor número por desbordamiento.

En un entorno rural, un porcentaje significativo de los paquetes está destinado a usuarios de fuera de la aldea, lo que hace que la entrega de estos mensajes dependa en gran medida de los vehículos. En este contexto, aumentar el tamaño del buffer de los peatones, manteniendo constante el tamaño del buffer de los vehículos, no parece tener un impacto sustancial en la mejora de la entrega de mensajes.

Como punto a destacar en esta simulación, es el alto porcentaje de entrega (92%) utilizando el protocolo MaxProp en el entorno urbano.

En la siguiente figura se muestra la latencia para esta simulación:

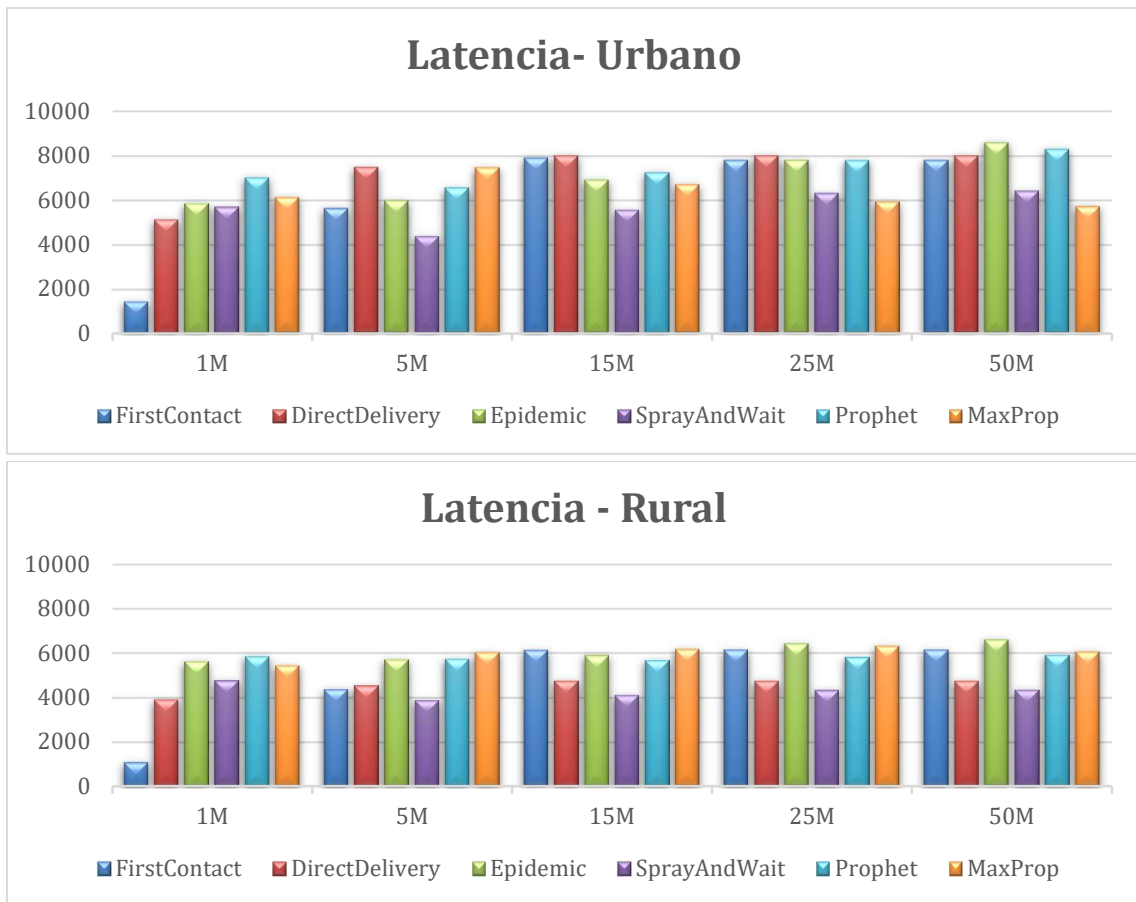


Figura 25: Entornos con diferentes tamaños de buffer de peatones – Latencia

En el entorno rural donde las entregas son principalmente dentro de la aldea, la baja latencia se debe a que los destinatarios están cerca entre sí, resultando una probabilidad de entrega baja. Sin embargo, si la probabilidad de entrega aumentara significativamente, indicaría que los paquetes también se están entregando a otros pueblos con la ayuda de los vehículos. Este aumento en la probabilidad de entrega a destinos más alejados podría llevar a un aumento en la latencia media debido a las distancias mayores involucradas en las entregas inter-aldeas.

Por ejemplo, en ambos entornos, con un tamaño de buffer pequeño de 1MB, que apenas puede albergar un mensaje, la latencia con el protocolo FirstContact es muy baja. Y esto es debido a que hay muy poca probabilidad de entregar el mensaje, pero si solamente hay un mensaje que se entrega y es rápido en entregarse, bajará la latencia.

A continuación, se muestra la sobrecarga para esta simulación:

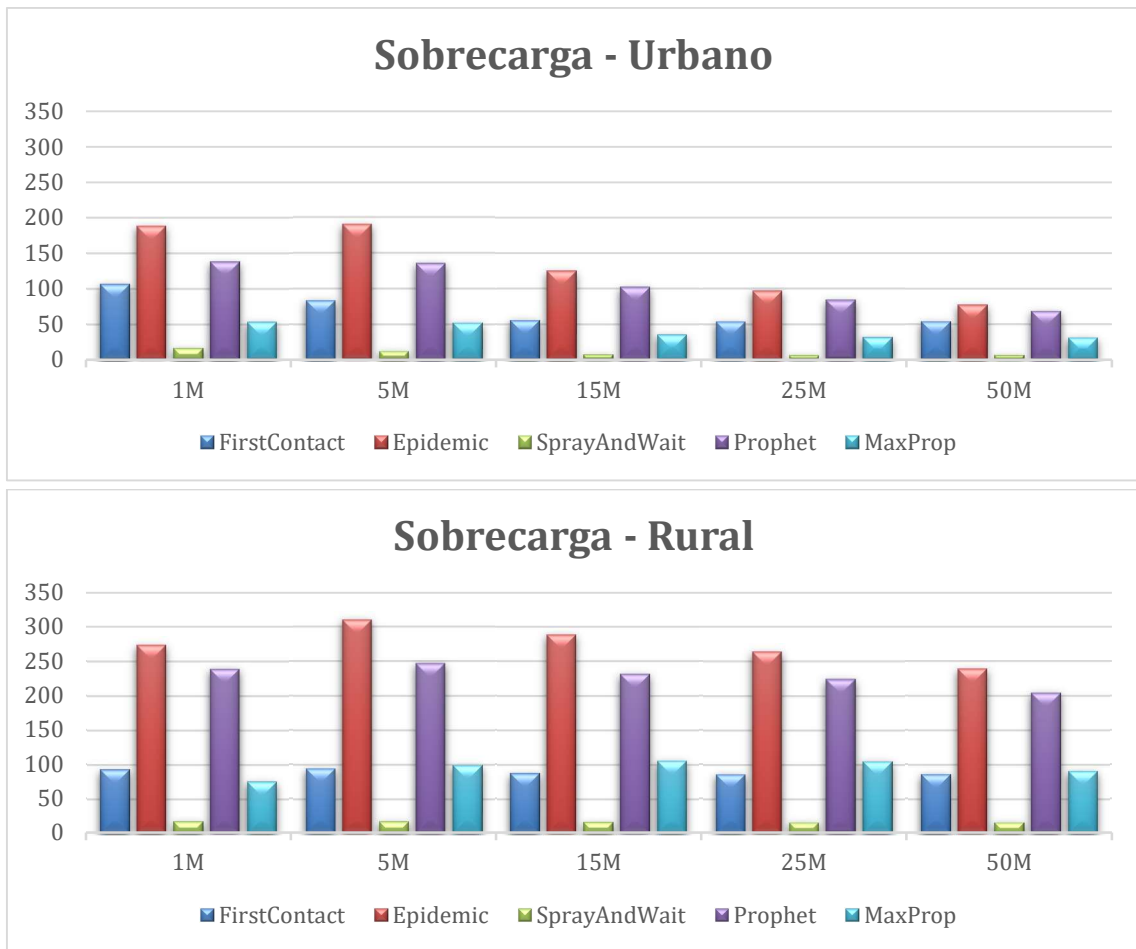


Figura 26: Entornos con diferentes tamaños de buffer de peatones – Sobrecarga

Al igual que en anteriores escenarios, se ha eliminado de estas estadísticas el protocolo DirectDelivery, por ser nula la sobrecarga.

Un mayor tamaño de buffer implica que los nodos pueden almacenar más mensajes, reduciendo la probabilidad de descartar mensajes debido a la falta de espacio. Esto lleva a que más nodos tengan la oportunidad de retransmitir mensajes, lo que podría aumentar la sobrecarga debido a la replicación de mensajes. Pero si se comparamos la figura 24 y figura 26, a medida que aumenta la probabilidad de entrega, la sobrecarga disminuye. Esto podría deberse al hecho de que, aunque más nodos tienen la oportunidad de retransmitir mensajes (lo que podría aumentar la sobrecarga), un mayor porcentaje de mensajes se entrega con éxito, lo que contrarresta ese aumento en la replicación, y por tanto, la sobrecarga.

Como tendencia general en ambos entornos, la sobrecarga va disminuyendo a medida de aumenta el buffer de los peatones; pero sin olvidar, como se comentó anteriormente, que en todas las simulaciones se genera una gran cantidad de mensajes, por lo que los buffer, aunque sean grandes, van a tener sobrecarga.

En general y una vez más, el protocolo MaxProp es el que mejores resultados obtiene, y esto es debido a que es un protocolo que actúa bajo tablas de enrutamiento y esto proporciona un mejor desempeño con respecto a protocolos como FirstContact o DirectDelivery donde no se tienen en cuenta los contactos anteriores con otros nodos y se basan básicamente en realizar el reenvío del mensaje.

6.4. Variando el tamaño de los mensajes

En esta simulación se comparan los dos entornos modificando el tamaño de los mensajes que los nodos generan.

Parámetro	Peatón	Vehículo
Movimiento	ShortestPathMapBasedMovement	Map-based movement
Numero de nodos	100	20
Velocidad de Peatones (m/s)	U [0.5,1.5]	U [7,10]
Interface	Bluetooth	Bluetooth + Wifi
Tx Rango radio (m)	10	100
Tx Velocidad	2 Mbps	80 Mbps
Tamaño de Mensajes (bytes)	1K,5K,100K,500K,2M,6M	
Tamaño de Buffer	5 Mbytes	50 Mbytes
TTL (seg)	18000 (5h)	18000 (5h)
Tiempo de Simulación (seg.)	86400 (24h)	86400 (24h)
Spray and Wait (L)	6 copias	6 copias

Tabla 4: Parámetros de la simulación: Tamaño mensajes

Hasta ahora, los mensajes generados pueden tener un tamaño aleatorio que va entre los 500 KBytes y 1 MByte.

En esta simulación se pone a prueba el buffer de los nodos, sobre todo los buffers de los peatones (5 MBytes).

A continuación, se muestran los datos obtenidos para la probabilidad de entrega.

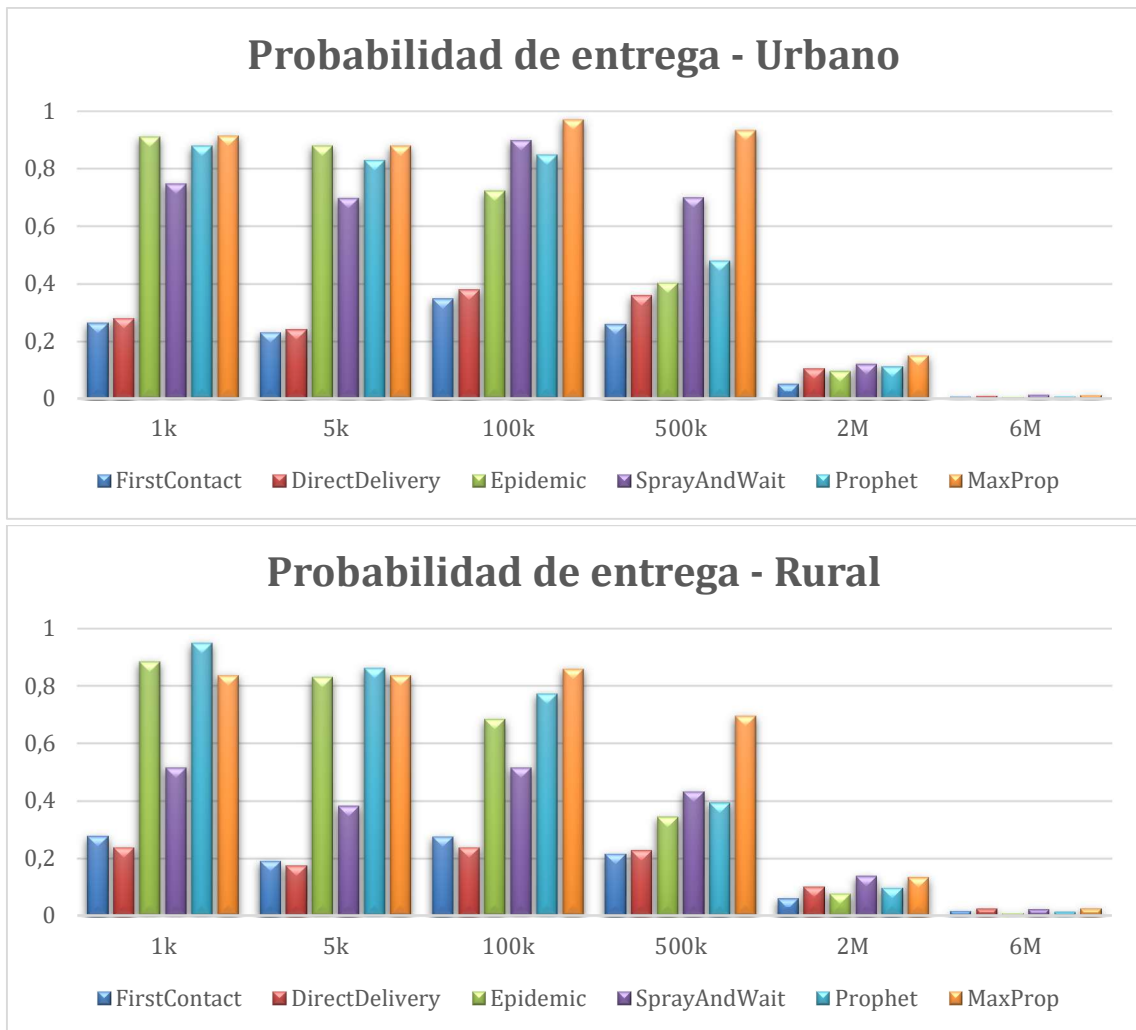


Figura 27: Entornos con diferentes tamaños de mensajes – Probabilidad de entrega

Para esta simulación, para mensajes pequeños se obtiene una probabilidad de entrega alta, por encima de 90% en varios protocolos y ambos entornos. Y esto se debe a que los nodos pueden almacenar una cantidad muy elevada de mensajes. Pero también hay baja probabilidad en los protocolos FirstContact y DirectDelivery, y esto es debido a que estos protocolos se limitan a reenviar y al final, son descartados debido a que se llena el buffer antes de entregar el mensaje. Aunque sean mensajes de 1 Kbyte, en la simulación se generan muchos mensajes y pueden llenar los buffers.

Dado que los peatones tienen dificultades para almacenar mensajes grandes, la probabilidad de entrega se vuelve más dependiente de los vehículos. En el caso extremo de mensajes de 6 MBytes, donde los peatones no pueden almacenar ninguno, la red prácticamente se convierte en una red de vehículos, ya que son los principales responsables de la probabilidad de entrega.

A continuación, se muestran los resultados de la latencia para este escenario.

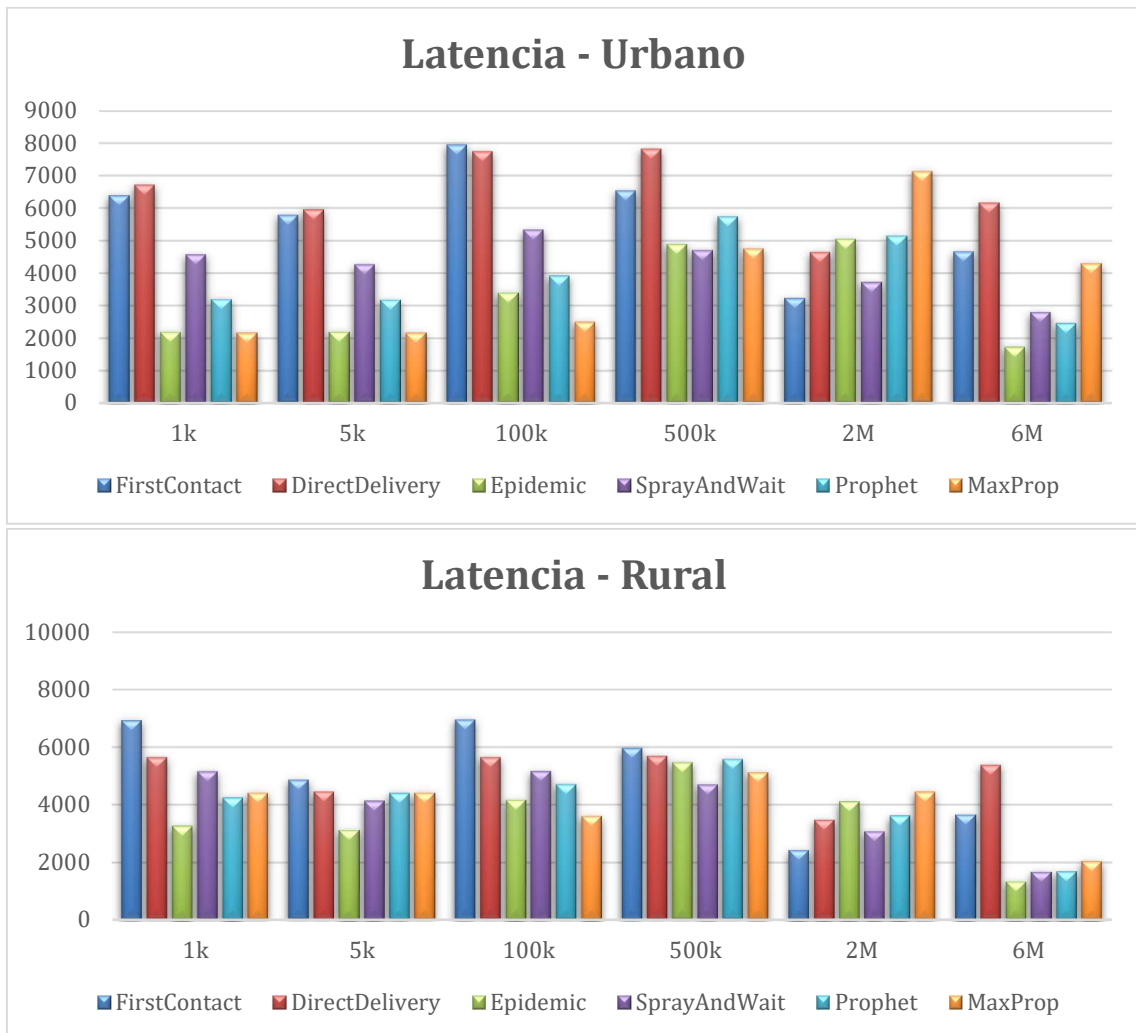


Figura 28: Entornos con diferentes tamaños de mensajes – Latencia

Corroborando lo comentado sobre la baja probabilidad de entrega, podemos ver la alta latencia de los protocolos FirstContact y DirectDelivery, por lo que se entiende que muchos peatones llenan sus buffers y empiezan a descartar mensajes.

A continuación, se muestra los resultados sobre la sobrecarga para esta simulación:

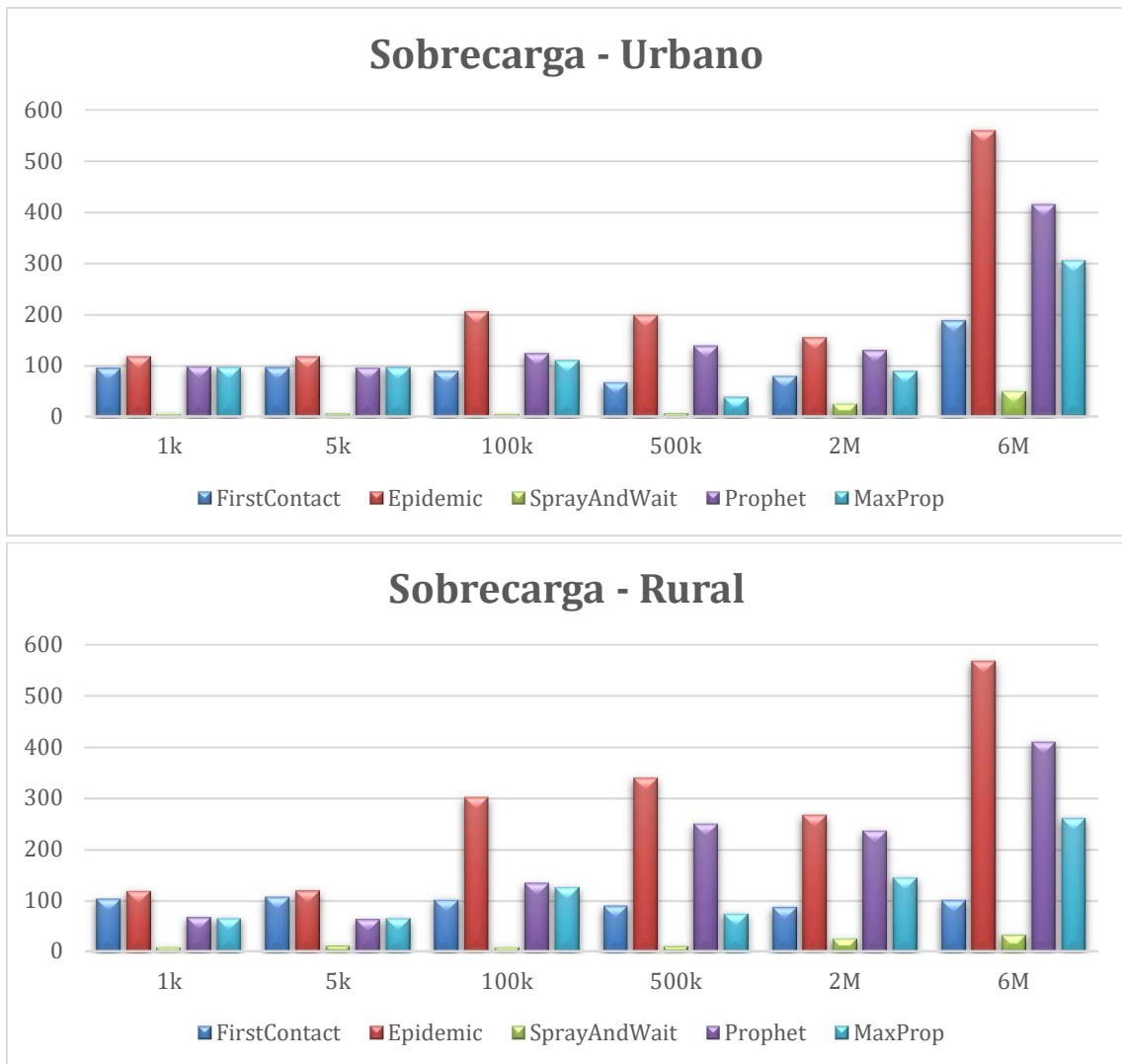


Figura 29: Entornos con diferentes tamaños de mensajes – Sobrecarga

Como era de esperar, la sobrecarga para los mensajes de gran tamaño se dispara en los protocolos Epidemic, Prophet y MaxProp. Es decir, usando estos protocolos hace falta generar muchos mensajes, para que al final pocos lleguen a su destino.

Como en otras simulaciones realizadas, el protocolo SprayandWait es el mejor se comporta en cuanto a sobrecarga, tanto en entorno urbano como en entorno rural. Y este comportamiento se debe a que este protocolo contrala el número de copias que se hace de los mensajes.

En general, revisando las diferentes métricas obtenidas con los diferentes tamaños de mensajes, que la red simulada es mucho más eficiente con mensajes pequeños. Pero esto es un cuello de botella, ya que hoy en día pocos mensajes son del tamaño de un 1 KByte o 5 KBytes, y más si lo que se quiere transmitir es algún archivo multimedia.

También hay que destacar el buen comportamiento del protocolo Prophet en entornos rurales, con probabilidades de entrega entorno al 90%, superando al protocolo MaxProp.

6.5. Variando el TTL de los mensajes

La siguiente simulación trata de simular los diferentes entornos modificando el tamaño del TTL, desde tiempos de 30 minutos hasta infinito, es decir, sin TTL.

Parámetro	Peatón	Vehículo
Movimiento	ShortestPathMapBasedMovement	Map-based movement
Numero de nodos	100	20
Velocidad de Peatones (m/s)	U [0.5,1.5]	U [7,10]
Interface	Bluetooth	Bluetooth + Wifi
Tx Rango radio (m)	10	100
Tx Velocidad	2 Mbps	80 Mbps
Tamaño de Mensajes	U [500KB,1MB]	U [500KB,1MB]
Tamaño de Buffer	5 Mbytes	50 Mbytes
TTL (seg)	1800, 3600, 10800, 32400. infinito	
Tiempo de Simulación (seg.)	86400 (24h)	86400 (24h)
Spray and Wait (L)	6 copias	6 copias

Tabla 5: Parámetros de la simulación: TTL

En la siguiente figura se muestra el resultado obtenido en la simulación sobre la probabilidad de entrega.

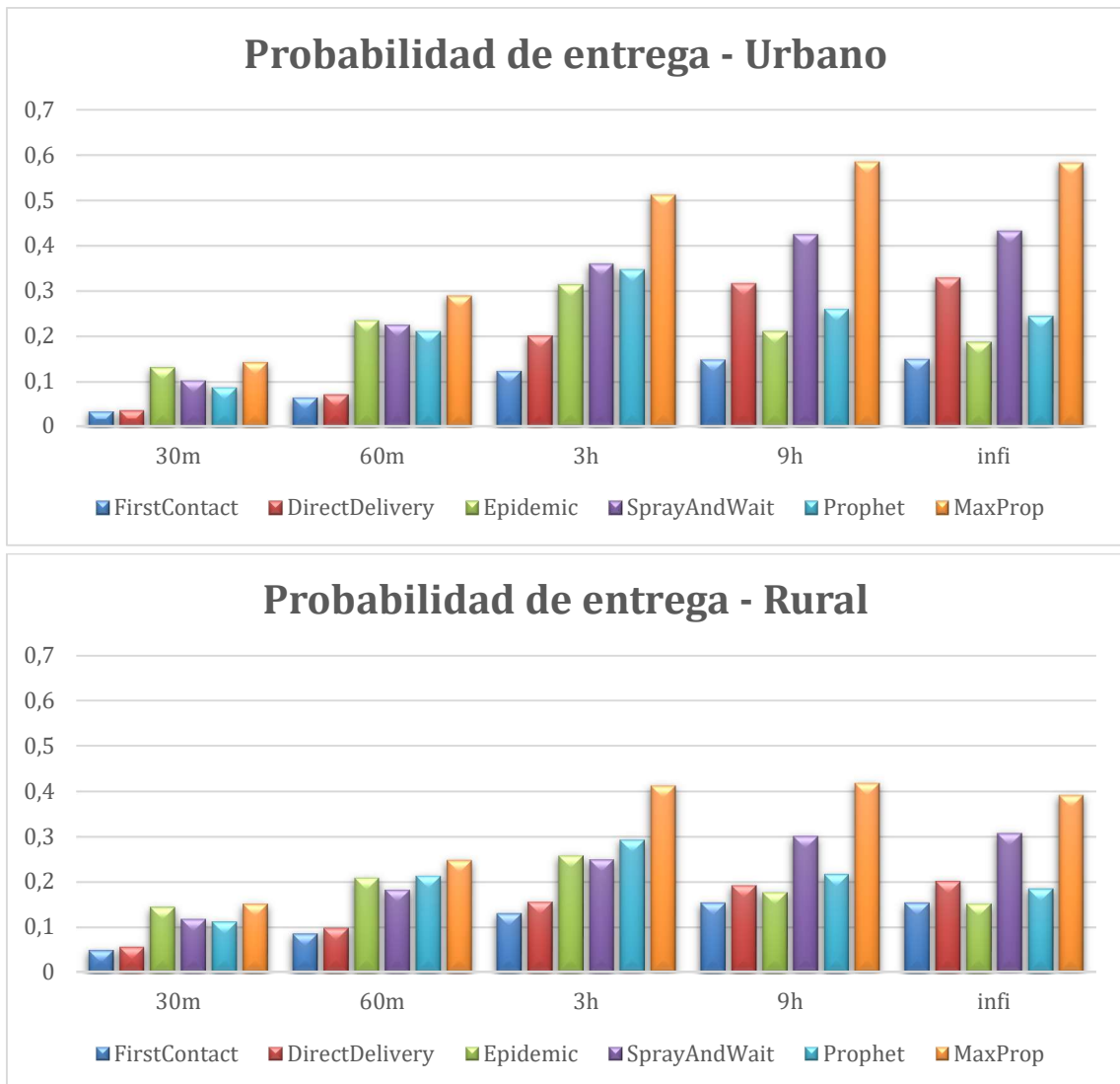


Figura 30: Entornos con diferentes tiempos TTL – Probabilidad de entrega

Al observar en la figura 30 una probabilidad de entrega baja, incluso con TTL infinito, es evidente que hay un problema relacionado con el tamaño del buffer, el cual parece ser demasiado pequeño para manejar eficientemente los ambos escenarios. Este bajo rendimiento indica la necesidad de considerar ajustes en el tamaño del buffer para mejorar la capacidad de retención y, por ende, la probabilidad de entrega en la red.

Con TTLs a partir de 3 horas, la probabilidad de entrega apenas sufre variaciones. Con TTLs más largos, los mensajes tienen una vida útil más extensa y no expiran tan rápidamente. En consecuencia, los nodos pueden retener los mensajes por períodos más largos, lo que contribuye a una mayor probabilidad de entrega al proporcionar más oportunidades para encuentros oportunistas.

En la siguiente figura se muestra los valores de latencia para esta simulación.

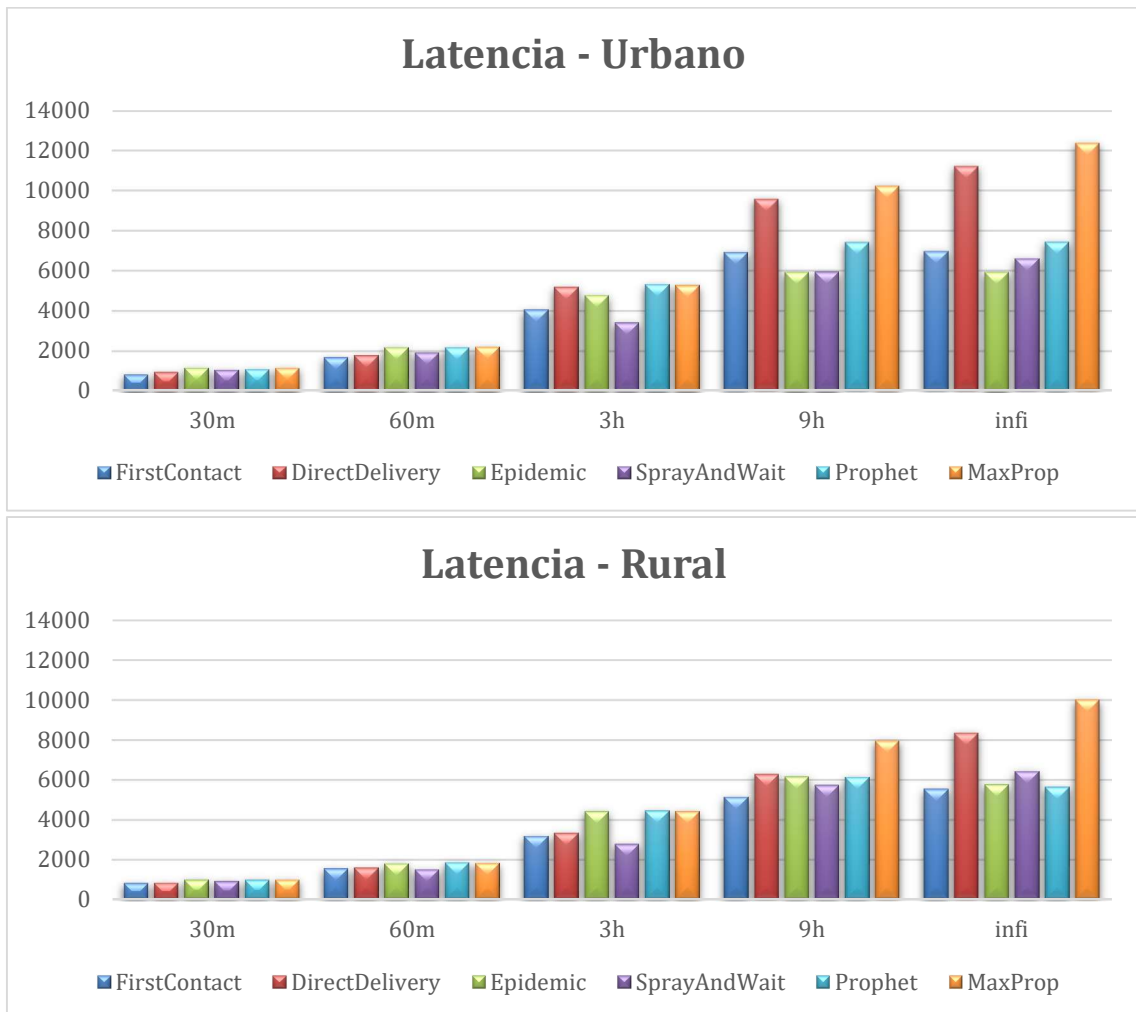


Figura 31: Entornos con diferentes tiempos TTL – Latencia

Como se puede observar en la figura, a medida que aumenta el valor de TTL, la latencia aumenta. Esto está relacionado con la probabilidad de entrega, ya que con TTLs bajos, la probabilidad de entrega es baja, y por tanto, lo pocos mensajes que consigan entregarse, se entregaran de forma rápida, antes de que el TTL expire y por tanto se descartado.

Para finalizar esta simulación, se muestra en la siguiente figura la sobrecarga.

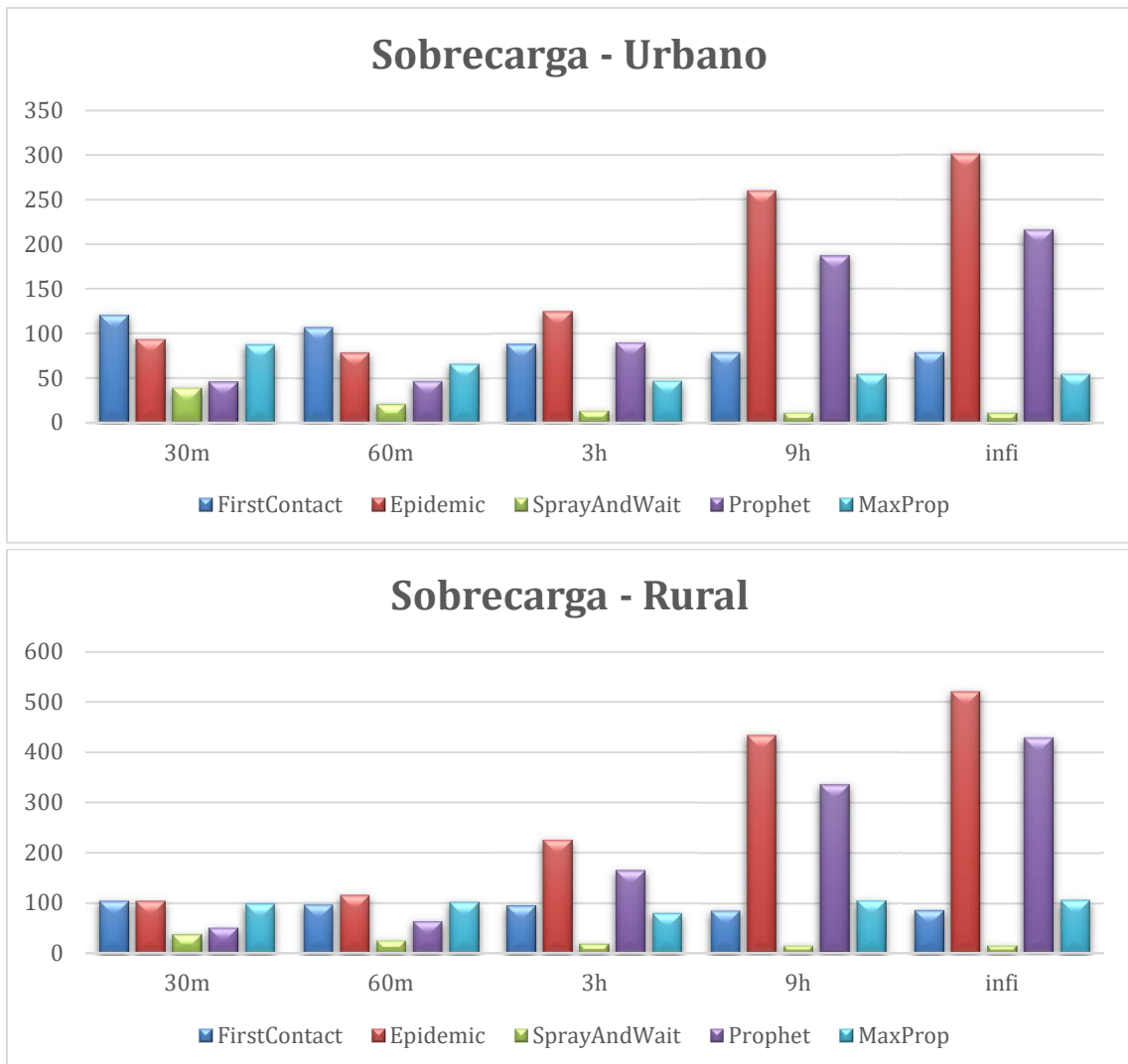


Figura 32: Entornos con diferentes tiempos TTL – Sobrecarga

En línea con las anteriores métricas, para valores de TTLs bajos, en los que los mensajes son descartados de forma rápida, la sobrecarga es baja. Esta sobrecarga aumenta a medida que se aumenta el valor de TTL.

Aunque los TTLs más largos pueden mejorar la probabilidad de entrega al retener mensajes por más tiempo, también pueden aumentar la sobrecarga al ocupar más espacio en los buffers. El equilibrio entre estos factores puede variar según el protocolo específico y la dinámica de la red.

Y en la misma línea, el protocolo SprayAndWait, con valores mínimos de sobrecarga.

En todas las simulaciones hemos quitado el protocolo DirectDelivery ya que la sobrecarga es cero, pero esto puede ser también un buen aspecto para considerar al diseñar una red con cero sobrecargas.

6.6. Variando el intervalo de generación de mensajes

La siguiente simulación que se realiza consiste en modificar el tiempo en el que se generan los mensajes. Como se vio anteriormente, los mensajes son generados de forma aleatoria por cualquier nodo de la red, pudiendo ser generado por peatones o por vehículos. Este es uno de los factores importantes a la hora de definir la capacidad de una red.

Hasta ahora, los mensajes se generaban de forma aleatoria en el intervalo de 25 a 35 segundos con una distribución uniforme. En este caso, se hace la simulación configurando un tiempo específico para la creación de cada mensaje.

Parámetro	Peatón	Vehículo
Movimiento	ShortestPathMapBasedMovement	Map-based movement
Numero de nodos	100	20
Velocidad de Peatones (m/s)	U [0.5,1.5]	U [7,10]
Interface	Bluetooth	Bluetooth + Wifi
Tx Rango radio (m)	10	100
Tx Velocidad	2 Mbps	80 Mbps
Tamaño de Mensajes	U [500KB,1MB]	U [500KB,1MB]
Tiempo generación mensajes (seg)	360,144,72,36,6	
Tamaño de Buffer	5 Mbytes	50 Mbytes
TTL	18000 (5h)	18000 (5h)
Tiempo de Simulación (seg.)	86400 (24h)	86400 (24h)
Spray and Wait (L)	6 copias	6 copias

Tabla 6: Parámetros de la simulación: Tiempo generación mensajes

En la siguiente figura se muestra el resultado obtenido en la simulación sobre la probabilidad de entrega.

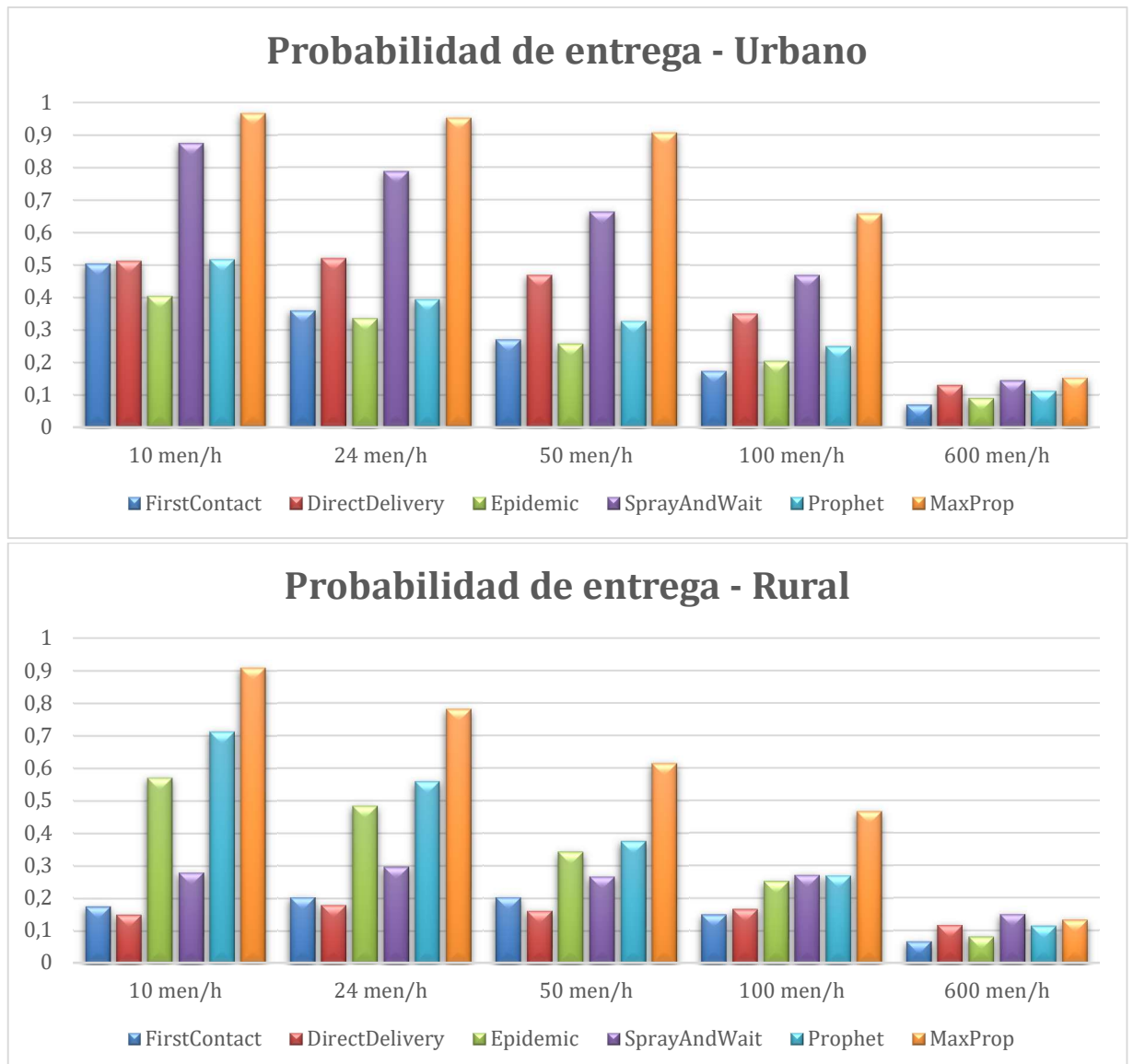


Figura 33: Entornos con diferentes tiempos de generación de mensajes – Probabilidad de entrega

A medida que se inyectan más mensajes en la red, los nodos acumulan estos mensajes en sus buffers de almacenamiento. Sin embargo, si los buffers se llenan, los nodos deben tomar decisiones sobre qué mensajes conservar y cuáles descartar para dar paso a nuevos mensajes entrantes. Esto genera descartes de mensajes, reduciendo así la probabilidad de entrega, especialmente en protocolos como Epidemic, Prophet y MaxProp, que dependen en gran medida de almacenar y transmitir mensajes a lo largo de múltiples nodos en la red.

Como en simulaciones anteriores, el protocolo MaxProp es que mayor probabilidad de entrega tiene, tanto en entorno urbano como en entorno rural. Llegando a más del 90% de entrega cuando hay pocos mensajes en la red. Y esto es debido a su capacidad para tomar decisiones de enrutamiento más inteligentes y eficientes.

En la siguiente figura se muestra la latencia para esta simulación:

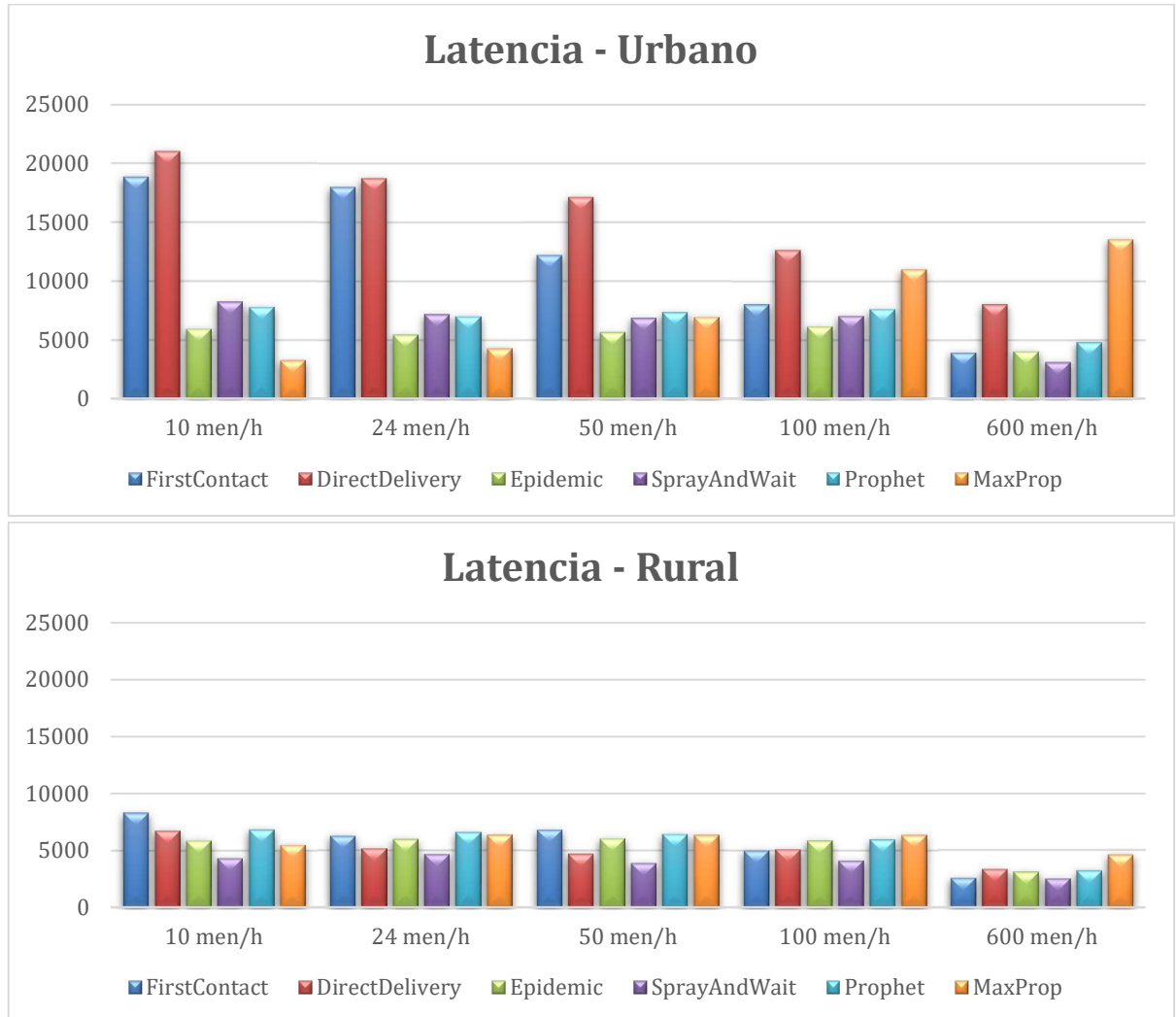


Figura 34: Entornos con diferentes tiempos de generación de mensajes – Latencia

La observación de una latencia más baja en entornos rurales, especialmente en los protocolos FirstContact y DirectDelivery, sugiere una menor demora en el tiempo que tardan los mensajes en ser entregados en comparación con entornos urbanos. Sin embargo, esta disminución significativa en la latencia puede venir acompañada de una probabilidad de entrega más baja, lo que plantea un equilibrio entre la rapidez en la entrega y la eficacia en la entrega exitosa de mensajes.

En la siguiente figura, se muestra la sobrecarga obtenida para ambos escenarios:

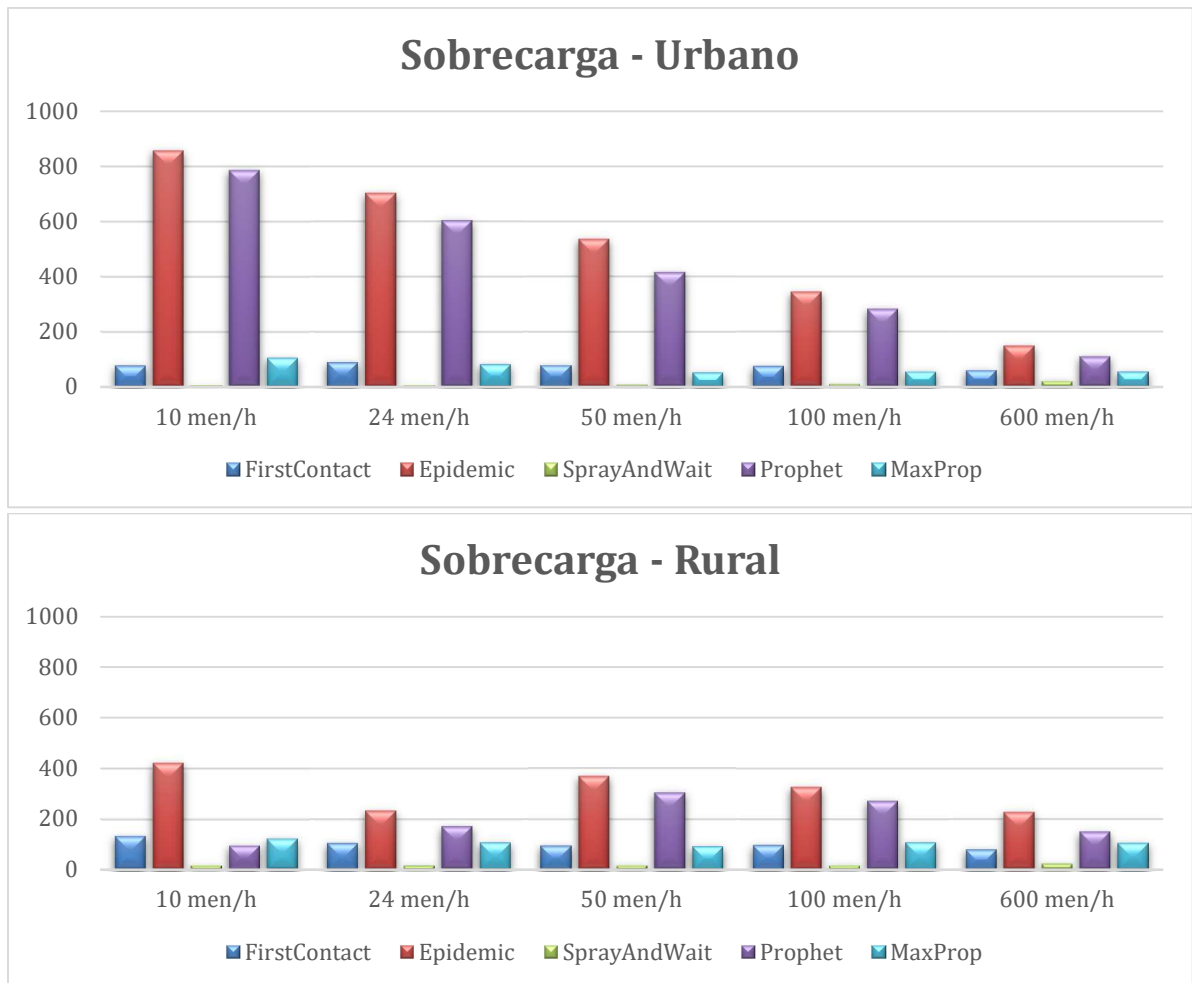


Figura 35: Entornos con diferentes tiempos de generación de mensajes – Sobrecarga

La sobrecarga en el escenario urbano es mayor en comparación con el escenario rural, pero va disminuyendo a medida que se inyectan más mensajes en la red. Esto se observa especialmente en los protocolos Epidemic y Prophet. Y esto es debido a una distribución más eficiente de los mensajes entre los nodos a medida que la red se vuelve más activa, es decir, con más mensajes.

Por el contrario, el protocolo SprayAndWait tiende a exhibir menor sobrecarga en comparación con otros protocolos, tanto en entornos urbanos como en entornos rurales. Esta característica se debe a su estrategia específica de control de mensajes.

En general el aumento en la cantidad de mensajes puede no ser directamente proporcional a una mejora en la probabilidad de entrega. Aunque la latencia no se vea gravemente afectada, parece haber una tendencia a una disminución en la probabilidad de entrega a medida que se incrementa la carga de mensajes, mientras que la sobrecarga tiende a reducirse, posiblemente debido a estrategias de control implementadas por los protocolos. Este análisis sugiere que encontrar un equilibrio entre la cantidad de mensajes transmitidos

y la efectividad en la entrega puede ser crucial para optimizar el rendimiento de la red en escenarios de alta carga de mensajes.

Y como en otras simulaciones, los resultados obtenidos destacan que el protocolo MaxProp continúa sobresaliendo, especialmente cuando la carga de mensajes es baja. Su enfoque inteligente de enrutamiento y priorización de mensajes parece ser una ventaja significativa en la optimización de la probabilidad de entrega en situaciones con una cantidad limitada de mensajes en la red.

6.7. Optimización de protocolo para entorno rural

En este apartado se realiza una optimización de uno de los protocolos anteriormente estudiado, SprayandWait. Se ha elegido este protocolo para estudio debido al buen comportamiento en cuanto a sobrecarga se refiere.

Este estudio de protocolo se enfoca en entorno rural, ya que es donde menores valores de probabilidad de entrega se ha obtenido. Por lo tanto, se intenta obtener los valores óptimos posibles para usar este protocolo de Sprayandwait en un entorno rural.

Por lo tanto, se trata de optimizar el protocolo SprayandWait para mejorar la probabilidad de entrega en entornos rurales mediante la manipulación del número de copias iniciales de un mensaje (sprays). Este enfoque es estratégico ya que busca ajustar un parámetro específico del protocolo para mejorar su rendimiento en áreas con menor densidad de nodos.

A modo de resumen, el protocolo SprayandWait utiliza un número de copias que se refiere a la cantidad de replicaciones iniciales que se hacen de un mensaje cuando este ingresa a la red. Cada una de estas réplicas se conoce como "spray" y se distribuye a nodos vecinos en la red.

La función principal del número de copias iniciales es ampliar las oportunidades de entrega del mensaje en la red. Al enviar múltiples copias iniciales a diferentes nodos en la red, se incrementan las posibilidades de que al menos una de estas copias alcance su destino final. Por lo tanto, ajustar este parámetro puede ser crucial para optimizar la probabilidad de entrega de mensajes.

Para llevar a cabo esta optimización, se realizan los siguientes pasos:

Selección de parámetros previos: Identificar los parámetros de simulación más óptimo posible. Esto incluye configuraciones como tamaño de los buffers de los nodos, tiempo de simulación, tiempo de generación de los mensajes, entre otros.

Parámetro	Peatón	Vehículo
Movimiento	ShortestPathMapBasedMovement	Map-based movement
Numero de nodos	40	20
Velocidad de Peatones (m/s)	U [0.5,1.5]	U [7,10]
Interface	Bluetooth	Bluetooth + Wifi
Tx Rango radio (m)	10	100
Tx Velocidad	2 Mbps	80 Mbps
Tamaño de Mensajes	U [500KB,1MB]	U [500KB,1MB]
Tiempo Generacion mensajes (seg)	144	144
Tamaño de Buffer	100 Mbytes	500 Mbytes
TTL	infinito	infinito
Tiempo de Simulación (seg.)	259200 (3 días)	259200 (3 días)
Spray and Wait (L)	2,5,10,20,35,50,100 copias	

Tabla 7: Parámetros SprayandWait - Entorno Rural

Configuración del escenario de simulación: Utiliza las condiciones de simulación previamente identificadas como las más efectivas para el entorno rural y mantener constantes todos los parámetros excepto el número de copias iniciales de un mensaje.

Realización de simulaciones: Realizar múltiples simulaciones variando el número de copias iniciales (sprays) de un mensaje. Probar con diferentes valores de este parámetro, incrementando gradualmente el número de copias y observar cómo afecta la probabilidad de entrega, entre otros KPIs.

Análisis de resultados: Después de la simulación, analizar los resultados obtenidos en términos de probabilidad de entrega, latencia y sobrecarga. Observar cómo varía la probabilidad de entrega a medida que se ajusta el número de copias iniciales.

A continuación, se muestra el resultado obtenido para la probabilidad de entrega con los diferentes números de copias.

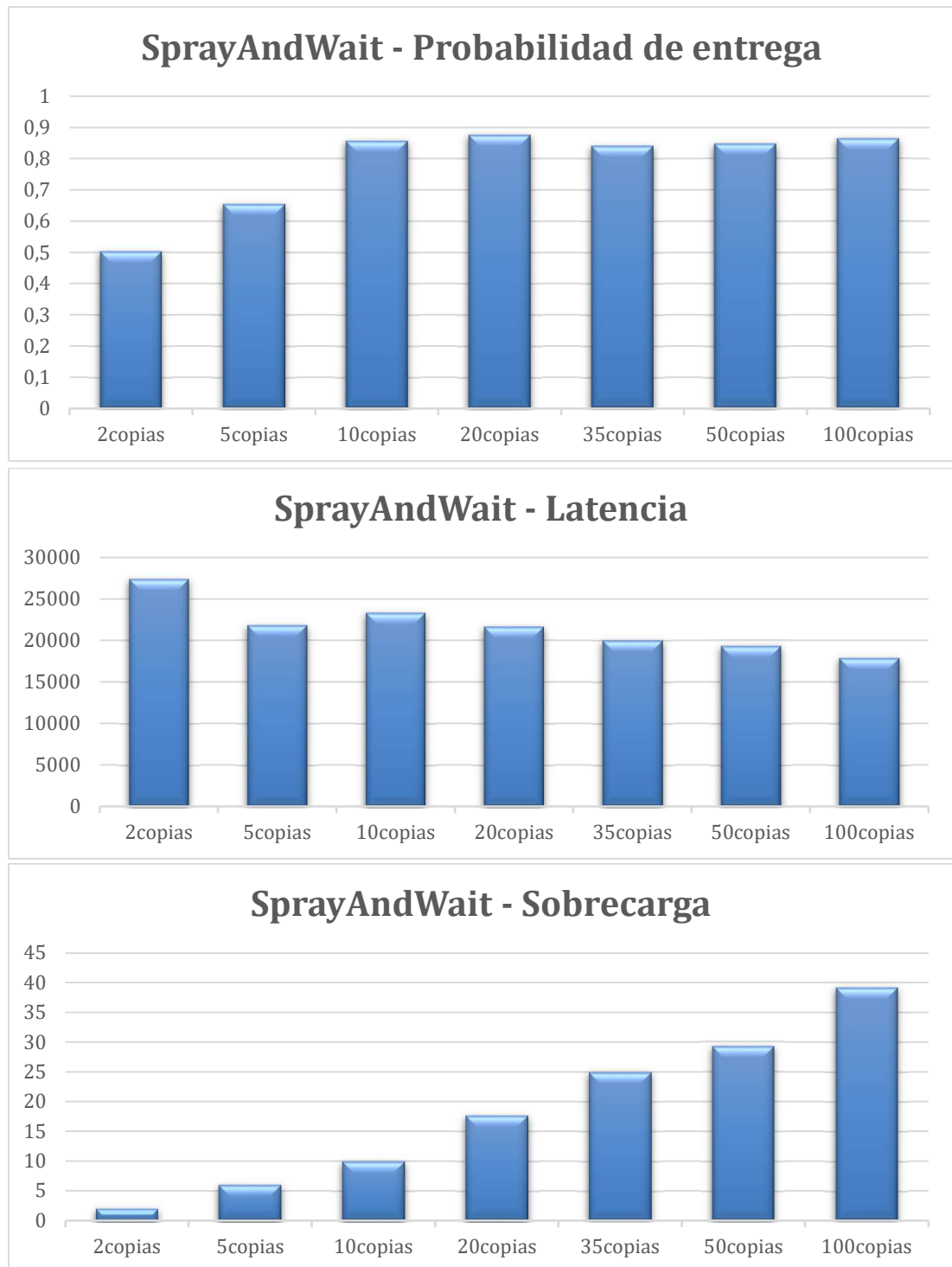


Figura 36: Protocolo SprayandWait entorno Rural

De los resultados obtenidos en la simulación, se puede observar claramente la compensación entre la probabilidad de entrega, la sobrecarga y la latencia. Un número bajo de copias reduce la sobrecarga, pero a expensas de una mayor latencia y una probabilidad

de entrega más baja. A medida que se aumenta el número de copias, la probabilidad de entrega mejora, pero la sobrecarga también aumenta.

Al adaptar la simulación a un entorno rural, donde la conectividad puede ser más complicada y la latencia no es un factor crítico, se ha encontrado que mantener entre **10 y 20 copias** de los mensajes es beneficioso. Este rango óptimo mejora de manera significativa las posibilidades de que los mensajes se entreguen con éxito, al tiempo que evita una carga excesiva en la red.

Con una alta probabilidad de entrega del 90%, el protocolo SprayandWait se presenta como una opción efectiva en entornos rurales, especialmente cuando la latencia no es una preocupación prioritaria. Este protocolo destaca en situaciones donde garantizar la entrega confiable de mensajes es más crucial que lograr una entrega rápida. Esto puede ser especialmente valioso en aplicaciones donde la integridad y la fiabilidad de la entrega son prioritarias sobre la velocidad de entrega.

En general, estos hallazgos resaltan la importancia de ajustar los parámetros del protocolo según las necesidades específicas de la red y del entorno. La optimización continua y la adaptabilidad son esenciales para garantizar un rendimiento óptimo en diferentes condiciones y escenarios.

7. Conclusiones y trabajos futuros

7.1. Conclusiones

Las lecciones aprendidas en este proyecto están directamente relacionadas con los objetivos establecidos. Uno de los aspectos más destacados ha sido sumergirse en el proceso de ingeniería y diseño que comienza con la identificación de una necesidad hasta la simulación de esa solución.

En cuanto a las redes DTNs, se ha demostrado que las DTNs son altamente adaptables, mostrando eficacia tanto en entornos rurales con contactos entre nodos limitada, como en entornos urbanos con redes en los que los nodos tienen mayor número de contactos.

En entornos rurales, las DTNs han destacado como una solución efectiva para mejorar la conectividad en áreas remotas, superando las limitaciones de las infraestructuras de red convencionales.

Y en entornos urbanos, han demostrado ser eficientes, por ejemplo, en caso de congestión de la red convencional; y, por tanto, proporcionando una alternativa viable para mantener la conectividad en áreas densamente pobladas.

La revisión y análisis de los resultados de las simulaciones permiten tomar decisiones sobre la eficacia de los parámetros seleccionados y proporcionan una base sólida para realizar ajustes que mejoren el rendimiento global de la red.

7.2. Planificación y objetivos

En cuanto a la planificación, esta evaluación resalta la eficacia de la planificación inicial, destacando que los intervalos de fechas propuestos se adaptaron adecuadamente a la realidad del proyecto. Aunque se realizaron algunos pequeños ajustes necesarios, se logró mantener la coherencia en los plazos de entrega. No obstante, se reconoce que, en los últimos días previos a cada entrega, la carga de trabajo se intensifica.

Siguiendo los objetivos establecidos en el punto 1.2, es posible evaluar cada uno de ellos en distintos grados de alcance, pero de tal forma que se ha trabajado en todos ellos. Las

habilidades aplicadas y el tiempo dedicado para abordar los objetivos han influido directamente en la configuración de los resultados obtenidos.

El objetivo que ha sido mejor desarrollado y ejecutado de manera más efectiva ha sido el estudio de los diferentes protocolos. Este logro se fundamenta en la realización de simulaciones utilizando los parámetros y configuraciones establecidas previamente

Por otro lado, se ha enfrentado una mayor dificultad en la creación de mapas y la evaluación de los protocolos dentro del simulador The ONE. Este desafío ha surgido principalmente debido a las complicaciones experimentadas al intentar ejecutar las primeras simulaciones.

7.3. Trabajos futuros

Como trabajos futuros, las Delay Tolerant Networks (DTN) puede abrir puertas a diversas líneas de trabajo, algunas posibles áreas de investigación pueden ser:

Optimización de Protocolos de Enrutamiento: Investigar y mejorar los protocolos de enrutamiento utilizados en este trabajo para lograr una mayor eficiencia en la entrega de mensajes en los diferentes entornos.

Mejora de la Eficiencia Energética: Explorar formas de optimizar el consumo de energía en dispositivos de red para hacerlas más eficientes desde el punto de vista energético.

Aplicaciones Específicas: Explorar aplicaciones específicas para DTNs en áreas como la atención médica, la monitorización ambiental, o la comunicación en entornos rurales y remotos.

Desarrollo de Herramientas y Simuladores: Contribuir al desarrollo de herramientas y simuladores más avanzados para el análisis y la simulación de DTNs, permitiendo investigaciones más detalladas y precisas.

Eficiencia en la Transferencia de Datos Grandes: Investigar cómo mejorar la eficiencia en la transferencia de grandes volúmenes de datos en entornos con conectividad intermitente.

Diversidad en la Implementación: Explorar cómo la diversidad en los nodos y las tecnologías de comunicación puede afectar la robustez y el rendimiento de las DTNs.

Impacto Ambiental: Analizar y cuantificar el impacto ambiental de las DTNs en comparación con otras tecnologías de red, considerando aspectos como el consumo de energía y la producción de residuos electrónicos.

8. Bibliografía

- [1] Internet World Stats (2023) Internet World Stats Usage and Population Statistics. Disponible en: <https://www.internetworldstats.com/stats1.htm> [Consultado: Octubre de 2023].
- [2] Jones, E. and Ward, P. (2006). Routing strategies for delay-tolerant networks. Submitted to ACM Computer Communication Review (CCR). Disponible en: <https://www.netlab.tkk.fi/opetus/s383151/articles/dtn-routing-survey.pdf> [Consultado: Octubre de 2023].
- [3] IETF Community Wiki (2023) DTN Use Cases Space Systems Communications. Disponible en: <https://wiki.ietf.org/group/dtn/DtnUseCases> [Consultado: Octubre de 2023].
- [4] IPNSIG (2023) Internet Society Interplanetary Chapter. Disponible en: <https://www.ipnsig.org/> [Consultado: Octubre de 2023].
- [5] Wikipedia (2023) Sputnik 1. Disponible en: https://en.wikipedia.org/wiki/Sputnik_1 [Consultado: Octubre de 2023].
- [6] DARPA Defense Advanced Research Projects Agency (2023) The Sputnik Surprise. Disponible en: <https://www.darpa.mil/about-us/timeline/creation-of-darpa> [Consultado: Octubre de 2023].
- [7] Burleigh, S. and Hooke, A. and Torgerson, L. and Fall, K. and Cerf, V. and Durst, B. and Scott, K. and Weiss, H. (2003) "Delay-tolerant networking: an approach to interplanetary Internet," in IEEE Communications Magazine, vol. 41, no. 6, pp. 128-136. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1204759> [Consultado: Noviembre de 2023].
- [8] Fall, K. (2003). A Delay-Tolerant Network Architecture for Challenged Internets. Computer Communication Review. Disponible en: <http://kfall.com/papers/p27-fall.pdf> [Consultado: Noviembre de 2023].
- [9] IRTF Research Group (2016) "Delay-Tolerant Networking Research Group DTNRG". Disponible en: <https://www.irtf.org/concluded/dtnrg.html> [Consultado: Noviembre de 2023].
- [10] DTNRG Meeting (2012). Disponible en: <https://down.dsg.cs.tcd.ie/dtnrg-at-google-12/> [Consultado: Noviembre de 2023].
- [11] Datatracker IETF (2016). Delay/Disruption Tolerant Networking (dtn). Disponible en: <https://datatracker.ietf.org/wg/dtn/about/> [Consultado: Noviembre de 2023].
- [12] Sterz, A. and Baumgärtner, L. and Mogk, R. and Mezini, M. and Freisleben, B., "DTN-RPC: Remote procedure calls for disruption-tolerant networking," *2017 IFIP Networking Conference (IFIP Networking) and Workshops*, Stockholm, Sweden, 2017. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8264848> [Consultado: Noviembre de 2023].

- [13] Mensajería sin conexión a internet (2021) Malavida, 16 de marzo. Disponible en: <https://www.malavida.com/es/soft/serval-mesh/android/> [Consultado: Noviembre de 2023].
- [14] Graubner, P. and Lampe, P. and Höchst, J. and Baumgärtner, L. and Mezini, M. and Freisleben, B. (2018) "Opportunistic named functions in disruption-tolerant emergency networks." In Proceedings of the 15th ACM International Conference on Computing Frontiers (CF '18). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 129–137. Disponible en: <https://dl.acm.org/doi/pdf/10.1145/3203217.3203234> [Consultado: Noviembre de 2023].
- [15] Li, Y. and Hui, P. and Jin, D. and Chen, S. "Delay-tolerant network protocol testing and evaluation," in IEEE Communications Magazine, vol. 53, no. 1, pp. 258-266, January 2015. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7010543> [Consultado: Noviembre de 2023].
- [16] Burgess, J. and Gallagher, B. and Jensen, D. and Levine, B. N., "MaxProp: Routing for Vehicle-Based Disruption-Tolerant Networks," Proceedings IEEE INFOCOM 2006. 25TH IEEE International Conference on Computer Communications, Barcelona, Spain, 2006. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4146881> [Consultado: Noviembre de 2023].
- [17] Goldman, A. and Floriano, P. and Ferreira, A. "A tool for obtaining information on DTN traces". 4th Extreme Conference on Communication (ExtremeCom 2012), Mar 2012, Zurich, Switzerland. Disponible en: <https://inria.hal.science/hal-00742993/> [Consultado: Noviembre de 2023]
- [18] Soujanya, K. (2014) "Google Project Loon". InSight: RIVIER ACADEMIC JOURNAL, VOLUME 10, NUMBER 2. Disponible en: https://www2.rivier.edu/journal/ROAJ-Fall-2014/J855-Katikala_Project-Loon.pdf [Consultado: Noviembre de 2023]
- [19] Burr, J. "The Feasibility of Google's Project Loon". Disponible en: https://users.cecs.anu.edu.au/~u3951377/student_work/example_work/15_2226_lp_jamesb.pdf [Consultado: Noviembre de 2023]
- [20] Vaishali.S.Raj (2013), "DELAY – Disruption Tolerant Network (DTN), its Network Characteristics and Core Applications", International Journal of Computer Science and Mobile Computing Vol.2 Issue. 9, September- 2013, pg. 256-262. Disponible en: <https://ijcsmc.com/docs/papers/September2013/V2I9201368.pdf> [Consultado: Noviembre de 2023]
- [21] Ntareme, H and Domancich, S. (2011) "Security and performance aspects of Bytewalla: A Delay Tolerant Network on smartphones," IEEE 7th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob), Shanghai, China, 2011. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6085360> [Consultado: Noviembre de 2023].
- [22] Ntareme, H., Zennaro, M. and Pehrson, B. (2011) "Delay tolerant network on smartphones: applications for communication challenged areas". In Proceedings of the 3rd Extreme Conference on Communication: The Amazon Expedition (ExtremeCom '11). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Article 14, 1–6. Disponible en: <https://dl.acm.org/doi/pdf/10.1145/2414393.2414407> [Consultado: Noviembre de 2023].

- [23] Guo, S., Falaki, M.H., Oliver, E.A., Rahman, S., Seth, A., Zaharia, M., and S. Keshav. (2007). "Very low-cost internet access using KioskNet". SIGCOMM Comput. Commun. Rev. 37, 5, 95–100. Disponible en: <https://dl.acm.org/doi/pdf/10.1145/1290168.1290181> [Consultado: Noviembre de 2023].
- [24] Ur Rahman, S., Hengartner, U., Usman, I. and Keshav, S. (2007). "Securing KioskNet: A Systems Approach". Disponible en: <https://cs.uwaterloo.ca/research/tr/2007/CS-2007-43.pdf> [Consultado: Noviembre de 2023].
- [25] Network Working Group. Burleigh, S., Hooke, A., Torgerson, L., Durst, R., Scott, K., Fall, K., Weiss, H. (2007). Request for Comments: 4838. "Delay-Tolerant Networking Architecture". Disponible en: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc4838> [Consultado: Noviembre de 2023].
- [26] Network Working Group. Burleigh, S., Scott, K., (2007). Request for Comments: 5050. "Bundle Protocol Specification". Disponible en: <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc5050> [consultado: 9 de diciembre de 2023].
- [27] Forrest Warthman, Warthman associates. (2015). "Delay- and Disruption-Tolerant Networks (DTNs). A Tutorial". Disponible en: <https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2023/09/dtn-tutorial-v3.2-0.pdf> [Consultado: Noviembre de 2023].
- [28] Spyropoulos, T. Psounis, K. Raghavendra, C.S. (2004). "Single-copy routing in intermittently connected mobile networks". Proceedings of IEEE Conference of Sensor and Ad Hoc Communications and Networks. 235 - 244. Disponible en https://www.researchgate.net/publication/4117459_Single-copy_routing_in_intermittently_connected_mobile_networks [Consultado: Noviembre de 2023].
- [29] Spyropoulos, Thrasylvoulos and Psounis, Konstantinos and Raghavendra, Cauligi S, (2008). "Efficient Routing in Intermittently Connected Mobile Networks: The Single-Copy Case," in *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 16, no. 1, pp. 63-76. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4430783> [Consultado: Noviembre de 2023]
- [30] Vahdat, A. and Becker, D. (2000). "Epidemic routing for partially-connected ad hoc networks". Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/2633330_Epidemic_Routing_for_Partially-Connected_Ad_Hoc_Networks [Consultado: Noviembre de 2023]
- [31] Spyropoulos, T., Psounis, K. and Raghavendra, C. S., (2005) "Spray and wait: An efficient routing scheme for intermittently connected mobile networks". Disponible en: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/1080139.1080143> [Consultado: Noviembre de 2023]
- [32] IRTF Internet Research Task Force. Lindgren, A. , Doria, A. (2012). Request for Comments: 6693. "Probabilistic Routing Protocol for Intermittently Connected Networks". Lulea University of Technology. Disponible en: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc6693> [Consultado: Noviembre de 2023]

- [33] Burgess, J., Gallagher, B., Jensen, D. and Levine, B., "BMaxProp: Routing for veicle-based disruption-tolerant networks" Disponible en: <https://pdfs.semanticscholar.org/ebe6/a12fd8ff4525d1694580039a8c59c9bb2121.pdf> [Consultado: Noviembre de 2023].
- [34] THE ONE: The Opportunistic Network Environment simulator. Disponible en: <https://akeranen.github.io/the-one/> [Consultado: Diciembre de 2023].
- [35] Keränen, A. and Kärkkäinen, O.(2009). "The ONE simulator for DTN protocol evaluation". ICST (Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering). Disponible en: https://www.netlab.tkk.fi/tutkimus/dtn/theone/pub/the_one_simutools.pdf [Consultado: Diciembre de 2023].
- [36] THE ONE: A program for converting OpenStreetMap maps into WKT files that are compatible with the ONE simulator. Disponible en: <https://github.com/julianofischer/osm2wkt> [Consultado: Diciembre de 2023].
- [37] OpenStreetMap. Disponible en: <https://www.openstreetmap.org/> [Consultado: Diciembre de 2023].
- [38] OpenJump. Disponible en: <http://www.openjump.org/> [Consultado: Diciembre de 2023].
- [39] Netlab TKK. Package Class. Disponible en: https://www.netlab.tkk.fi/tutkimus/dtn/theone/javadoc_v141/ [Consultado: Diciembre de 2023].
- [40] A. Keranen. (2008). "Opportunistic Network Environment simulator". Helsinki University of Technology Department of Communications and Networking Special assignment. Disponible en https://www.researchgate.net/profile/Mohammadhossein-Homaei/post/What-is-the-best-simulator-for-Opportunistic-Networks/attachment/59d6217379197b807797fd65/AS%3A296644898770944%401447737063078/download/the_one.pdf [Consultado: Diciembre de 2023].