

La investigación reportada en esta tesis es parte de los programas de investigación del CICESE (Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California).

La investigación fue financiada por el SECIHTI (Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación).

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México). El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo o titular de los Derechos de Autor.

**Centro de Investigación Científica y de Educación
Superior de Ensenada, Baja California**



**Doctorado en Ciencias
en Electrónica y Telecomunicaciones
con orientación en Telecomunicaciones**

Protocolo de enrutamiento para redes ad-hoc satelitales

Tesis
para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
Doctor en Ciencias

Presenta:

Eduardo García Loya

Ensenada, Baja California, México
2025

Tesis defendida por
Eduardo García Loya

y aprobada por el siguiente Comité

Dr. Salvador Villarreal Reyes
Codirector de tesis

Dr. Gabriel Alejandro Galaviz Mosqueda
Codirector de tesis

Dr. Mario Ángel Siller González Pico

Dr. Aldo Eleazar Pérez Ramos

Dr. José Eleno Lozano Rizk

Dr. Raúl Rivera Rodríguez

Dr. Roberto Conte Galván



Dra. María del Carmen Maya
Coordinadora del Posgrado en Electrónica y
Telecomunicaciones

Dra. Ana Denise Re Araujo
Directora de Estudios de Posgrado

Prohibida su reproducción parcial o total sin la autorización por escrito del CICESE

Resumen de la tesis que presenta **Eduardo García Loya** como requisito parcial para la obtención del grado de Doctor en Ciencias en Electrónica y Telecomunicaciones con orientación en telecomunicaciones.

Protocolo de enrutamiento para redes ad-hoc satelitales

Resumen aprobado por:

Dr. Salvador Villarreal Reyes
Thesis Co-Director

Dr. Gabriel Alejandro Galaviz Mosqueda
Thesis Co-Director

Desde tiempos remotos, el ser humano ha sentido fascinación por el espacio exterior, lo cual ha llevado al desarrollo de tecnologías clave para la exploración y comprensión del universo. Las redes ad-hoc satelitales se presentan como una oportunidad facilitando la comunicación de datos entre el entorno terrestre y el espacio, tomando como base el que nanosatélites sean capaces de comunicarse entre sí. Este enfoque tiene como objetivo habilitar diversas aplicaciones, que van desde la vigilancia remota de la biodiversidad hasta la provisión de servicios de comunicaciones en situaciones de emergencia, como terremotos y tsunamis. Con el fin de alcanzar el objetivo mencionado, se determinó que es fundamental desarrollar protocolos que posibiliten la comunicación entre nanosatélites dispuestos a participar en la red, teniendo en cuenta las particularidades propias de este tipo de nodos. Estas particularidades incluyen la presencia de nodos con limitada potencia de transmisión y carga energética, así como un alto nivel de dinamismo, predictibilidad y la interacción entre nodos de diferentes características. En este estudio de investigación se plantea la propuesta de un protocolo de enrutamiento satelital ad-hoc denominado TLE-Routing. Este protocolo se fundamenta en el uso de los elementos de dos líneas (TLE, por sus siglas en inglés) para el seguimiento de objetos en movimiento en el espacio. La propuesta de TLE-Routing consiste en aprovechar la previsibilidad intrínseca de las redes ad-hoc satelitales para determinar el siguiente salto óptimo de la información entre nodos. En este trabajo de investigación se aplican las lecciones aprendidas del estudio realizado acerca de los protocolos de enrutamiento MANET y los factores de mayor impacto que influyen en su rendimiento en las redes ad-hoc satelitales. Se ha diseñado una metodología de simulación que no requiere la selección previa de una constelación y que permite evaluar el efecto de diferentes protocolos en las redes satelitales en desarrollo. En este estudio se analiza un experimento simulado que contrasta el desempeño en métricas como la tasa de entrega de paquetes (PDR) y el retardo de extremo a extremo (E2E) del protocolo TLE-Routing con protocolos de enrutamiento MANET ampliamente reconocidos en la literatura como posibles opciones para redes ad-hoc satelitales. Los resultados obtenidos en este estudio de investigación indican que el protocolo de enrutamiento TLE-Routing se presenta como una opción viable para ser utilizado en redes ad-hoc satelitales como protocolo de enrutamiento.

Palabras clave: Enrutamiento, Satelital, Ad-hoc, Redes, Cubesats

Abstract of the thesis presented by **Eduardo García Loya** as a partial requirement to obtain the Doctor of Science degree in Electronics and Telecommunications with orientation in telecommunications

Routing protocol for ad-hoc satellite networks

Abstract approved by:

Dr. Salvador Villarreal Reyes
Thesis Co-Director

Dr. Gabriel Alejandro Galaviz Mosqueda
Thesis Co-Director

Since ancient times, humans have been fascinated by outer space, which has led to the development of key technologies for the exploration and understanding of the universe. Ad-hoc satellite networks present an opportunity by facilitating data communication between the Earth and space, based on the ability of nanosatellites to communicate with each other. This approach aims to enable diverse applications, ranging from remote monitoring of biodiversity to the provision of communications services in emergency situations such as earthquakes and tsunamis. To achieve this objective, it was determined that it is essential to develop protocols that enable communication between nanosatellites willing to participate in the network, considering the specific characteristics of this type of nodes. These specificities include the presence of nodes with limited transmission power and energy load, as well as a high level of dynamism, predictability, and interaction between nodes with different characteristics. This research study proposes an ad-hoc satellite routing protocol called TLE-Routing. This protocol is based on the use of two-line elements (TLE) to track moving objects in space. The TLE-Routing approach leverages the intrinsic predictability of satellite ad-hoc networks to determine the optimal next hop for information between nodes. This research applies the lessons learned from the study of MANET routing protocols and the most significant factors influencing their performance in satellite ad-hoc networks. A simulation methodology has been designed that does not require prior constellation selection and allows for the evaluation of the impact of different protocols on developing satellite networks. In this study, a simulated experiment is analyzed that contrasts the performance in metrics such as packet delivery rate (PDR) and end-to-end (E2E) delay of the TLE-Routing protocol with MANET routing protocols widely recognized in the literature as possible options for satellite ad-hoc networks. The results obtained in this research study indicate that the TLE-Routing routing protocol is presented as a viable option to be used in satellite ad-hoc networks as a routing protocol.

Keywords: Routing, Satellital, Ad-Hoc, Networks, Cubesats

Dedicatoria

A mis padres, que siempre me apoyaron no importa cuáles fueran mis planes, proyectos e ideas que les platicara, agradezco sus enseñanzas que siempre me acompañan en los pasos que doy. Siempre me impulsaron a ser mejor en cada cosa que hacía y eso, no solo me formó como individuo ante la sociedad, sino también como hijo, estudiante y ser humano.

A mi hermano que sé que siempre puedo contar con él en cualquier momento y situación, así sea a medianoche cenando tacos y ponernos a platicar o de día en la semana viendo una transmisión en vivo desde un mundial hasta un lanzamiento de un nuevo juego. Yo sé que dices que soy tu inspiración, pero, yo soy creyente firmemente que tú eres capaz de lograr mucho más que yo.

Mi compañera de vida, has estado a mi lado por este ajetreado camino que es la vida, compartiendo momentos únicos de los cuales no cambiaría por nada del universo. Creo firmemente que no habría siquiera pensado en iniciar el camino de la investigación como lo hice si no hubieras estado presente, así como el iniciar todos los proyectos en los cuales tú siempre me has apoyado. Agradezco cada momento que pasamos juntos, todas las enseñanzas, aventuras y descubrimientos que hemos tenido. ¡Te amo, cute Nya Nya!

Agradecimientos

Al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California (CICESE) por la oportunidad de permitirme estudiar en su programa de posgrado, abriendo las puertas a la curiosidad, el descubrimiento y la ciencia.

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por brindarme el apoyo económico para poder realizar mis estudios de doctorado.

A mis directores de tesis Dr. Salvador Villarreal Reyes y Dr. Alejandro Galaviz Mosqueda por su guía, paciencia, apoyo y consejos durante el desarrollo de este trabajo de investigación.

A mi comité tesis Dr. Roberto Conte Galván, Dr. Mario Ángel Siller González Pico, Dr. Aldo Eleazar Pérez Ramos, Dr. José Eleno Lozano Rizk y Dr. Raúl Rivera Rodríguez por su disposición e incontables comentarios ofrecieron a este el trabajo de investigación una perspectiva única.

A la M.C. Cecilia Rodríguez, la oportunidad que me brindó de acercarme a la ciencia en aquella clase de tecnología en la universidad me permitió sumergirme en un mundo el cual yo desconocía y del cual quedé totalmente enganchado. ¡Muchas gracias, profe Ceci!

A mis compañeros del grupo ARTS que siempre estuvieron apoyándome, desde una buena plática hasta una sesión de “tírenle a”, siempre recordaré las noches anteriores a una exposición del laboratorio con cariño.

A mis amigos remotos Frigo, Sebas, NepNepping, Chapow, Kakapo por las incontables horas de juegos, diversiones, desveladas y discusiones filosóficas existenciales de madrugada. Siempre es grato llegar al chat de voz y olvidarse de todo para ponerse a jugar una partida “hasta que ganemos una”.

A Nya Nya, por ser la estructura que me complementa para formar las bases de lo que soy, todo el apoyo, amor, confianza te lo agradezco eternamente, sigo avanzando por ti.

¡Gracias a todos!

Tabla de contenido

	Página
Resumen en español.....	ii
Resumen en inglés.....	iii
Dedicatoria.....	iv
Agradecimientos.....	v
Lista de figuras.....	x
Lista de tablas.....	xiii
Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1 Redes ad-hoc satelitales.....	6
1.2 Planteamiento del problema.....	10
1.2.1 Objetivo general.....	12
1.2.2 Objetivos específicos.....	12
1.3 Organización de la tesis.....	14
1.4 Principales resultados y contribuciones de la tesis.....	15
Capítulo 2. Estado del arte.....	16
2.1 El estándar CubeSat.....	16
2.2 Modelo de perturbación simplificada (SGP) y conjunto de elementos dos líneas (TLE's).....	20
2.3 La tecnología de radios LoRa en CubeSats.....	22
2.4 Introducción a redes ad-hoc móviles (MANETs).....	25
2.4.1 Tipos de protocolos de enrutamiento en redes MANET.....	26
2.4.2 Métricas que se utilizan para comparar desempeños en algoritmos ad-hoc.....	33
2.5 Reportes del trabajo de redes ad-hoc satelitales.....	35
2.6 Conclusiones del capítulo.....	36

Capítulo 3. Desarrollo de un simulador de redes IoT espaciales	38
3.1 OMNET ++.....	38
3.2 Frameworks INET e INETMANET	40
3.3 ST-INETMANET.....	41
3.3.1 Módulos desarrollados que componen a ST-INETMANET.....	41
3.3.2 Conjunto de módulos de movilidad STMobility.....	42
3.3.3 Módulos SatelliteMobility y GSMobility	46
3.3.4 Módulo de cálculo de distancia GP4Updater	48
3.3.5 Modelos de movilidad y modulo TLEUpdater.....	56
3.4 Modificaciones a los módulos “Radio Medium” y “Radio” de INETMANET.....	57
3.5 Implementaciones de capa de acceso al medio de ST-INETMANET	59
3.6 Conclusión del capítulo.....	59
Capítulo 4. Análisis de los factores más relevantes para el enrutamiento en redes de Internet de las cosas espaciales.....	61
4.1 Análisis factorial 2k	61
4.2 Experimento Base.....	63
4.3 Metodología de simulación	65
4.4 Factores considerados en el análisis de estrategias de enrutamiento para redes ad-hoc satelitales	67
4.4.1 Métrica de Evaluación.....	68
4.5 Resultados	69
4.6 Conclusiones del análisis.	74
Capítulo 5. TLE-ROUTING	77
5.1 Introducción.....	77
5.2 Introducción de TLE Routing.....	78
5.3 Zonas de servicio en TLE-Routing y mecanismo de tránsito orbital.....	79
5.3.1 Definición de zonas con poliedros de Goldberg	80

5.4 Mecanismo de descubrimiento de vecinos y propuesta de calendarización en transmisiones tierra-espacio.....	82
5.4.1 Paquete de “Hello”, creación y mantenimiento de una tabla de enrutamiento.....	83
5.4.2 Proceso de comunicación Tierra-espacio	84
5.4.3 Mecanismo de ACK implícito	86
5.5 Algoritmo para la selección del mejor siguiente salto y gestión de paquetes	87
5.5.1 Algoritmo de Selección de Siguiente Salto	87
5.5.2 Transmisión unicast y mecanismos de integridad	89
5.6 Situaciones presentes en el enrutamiento redes ad-hoc satelitales y mecanismos para afrontarlas.....	91
5.6.1 Detección de agrupaciones emergentes de satélites.	92
5.6.2 Mecanismo de detección de agrupamientos aislados de la red y prevención de enlaces redundantes.....	93
5.6.3 Mecanismo de “store & forward” con delimitación de tiempo	94
5.7 Desempeño de TLE-Routing en escenarios estáticos y despliegues dinámicos.	96
5.7.1 Escenarios estáticos tipo malla.	96
5.7.2 TLE-Routing en escenarios de desastres naturales.....	100
5.8 Conclusión del capítulo.....	108
Capítulo 6. Conclusiones y trabajo futuro	110
6.1 Contribuciones del presente trabajo de investigación.....	110
6.1.1 Simulador de redes	110
6.1.2 Análisis de enrutamiento redes ad-hoc	111
6.1.3 TLE-Routing.....	112
6.2 Conclusiones respecto a las contribuciones.....	113
6.2.1 Simulador de redes	113
6.2.2 Enrutamiento en redes ad-hoc	114
6.2.3 TLE-Routing	115

6.3 Áreas de trabajo futuro	116
6.3.1 Simulador de redes espaciales.....	116
6.3.2 Enrutamiento satelital ad-hoc	116
Literatura citada	118
Anexos	124

Lista de figuras

Figura	Página
1. Fotografía de la misión espacial Apollo con instrumentación desplegada en la superficie lunar créditos "NASA"	1
2. Lanzamientos históricos de misiones espaciales que utilizan nanosatélites y su pronóstico(Erick Kulu,2025).	2
3. Painani 1, nanosatélite CubeSat de 3U desarrollado en CICESE por el grupo ARTS.	3
4. Diagrama comparativo de una red de infraestructura y una red Ad-hoc.....	6
5. Representación gráfica de las interacciones para la comunicación en una red ad-hoc satelital. ..	9
6. Metodología seguida para el desarrollo del trabajo.....	14
7. Orbitas aproximadas de misiones CubeSat después de su lanzamiento(Erick Kulu, 2025).....	17
8. Configuraciones de apilado de unidades de CubeSats (NASA,2025).....	18
9. Cantidad de lanzamientos de CubeSats agrupados por su tipo de misión (Erick Kulu, 2025).....	19
10. Ejemplo de decaimiento de la misión Painani 1	19
11. Ejemplo del contenido de un archivo TLE en formato de texto plano.	22
12. Contenido de un paquete generado por OLSR (Jacquet et al., 2001).....	28
13. Contenido de un paquete en AODV.....	30
14. Contenido de un mensaje OGM.....	32
15. Captura de un módulo compuesto que define un punto de acceso Wifi.	39
16. Configuración de ejemplo de un escenario de una red de infraestructura, del lado derecho la representación gráfica del archivo. NEED y del lado izquierdo la configuración de sus parámetros del archivo omnetpp.ini	40
17. Diagrama del conjunto de módulos que conforman STMobility	46
18. Diagrama ilustrativo donde se observa un Great Circle y sus segmentos entre los puntos A y B.	51

19. Representación de las rotaciones y sus efectos en la posición, donde el punto azul es una estación terrena con coordenadas latitud = 31.9675° y longitud = 116.665° y el punto oscuro es el resultado de la primera rotación con ángulo θ_1	54
20. Representación de las rotaciones y sus efectos en la posición. Donde el punto azul es una estación terrena con coordenadas latitud = 31.9675° y longitud = 116.665°, el punto oscuro es el resultado de la primera rotación con ángulo θ_1 y el punto rojo es la segunda rotación sobre el eje Z usando el ángulo θ_2	55
21. Representación de los elementos del sistema tras realizar rotaciones. Donde la estación terrena (punto azul), es trasladada al caso especial (punto rojo) y el satélite en su posición original (punto rozado) se traslada a su posición perspectiva utilizando los ángulos obtenidos por las rotaciones de la primera iteración (punto amarillo).....	56
22. Diagrama de interacción de la comunicación entre dos nodos satelitales en INETMANET.	58
23. Diagrama de interacción de módulos de comunicación en INETMANET entre nodos terrestres y espaciales.....	58
24. Metodología de simulación propuesta para redes ad-hoc satelitales.....	66
25. Comparativa de pesos obtenidos para los distintos factores estudiados.	70
26. Comparativa de densidad de factores entre los mejores escenarios de un enfoque de enrutamiento proactivo y reactivo en redes ad-hoc satelitales con alta y baja conectividad. ...	71
27. Comparativa del número promedio de colisiones en el mejor escenario a partir de los resultados de los factores de un enfoque de enrutamiento proactivo y reactivo en redes ad-hoc satelitales con el factor de densidad (e5). (A) Baja densidad de nodos; (B) alta densidad	72
28. Comparativa entre el porcentaje de colisiones provenientes de resultados de baja frescura y alta frescura.	73
29. Esfera dividida en grupos de meridianos y paralelos donde se observan áreas heterogéneas en las divisiones	79
30. Icosaedro regular junto a un Icosaedro Truncado como balón de juego.	81
31. Representación de un poliedro de Goldberg (4,0).....	81
32. Paquete de "Hello" utilizado en TLE-Routing.	83
33. Diagrama de pasos para la comunicación de una estación terrena y un satélite.....	85
34. Diagrama de definición de ACK implícito.....	86
35. Diagrama de flujo para la selección del mejor siguiente salto.	88
36. Diagrama del contenido de un paquete unicast de TLE-Routing.....	90

37. Captura de un escenario de simulación son swarms.....	92
38. Diagrama de flujo del mecanismo de detección de swarms.	93
39. Diagrama de flujo del mecanismo "Store and Forward"	95
40. Visualización del escenario estático con vistas a sus enlaces.....	97
41. Comparativa de PDR para escenario tipo malla.....	99
42. PDR comparativo.....	103
43. PDR Comparativo sin TLE con mecanismos de store & forward.....	103
44. E2E Comparativo.....	105
45. Comparativa paquetes enviados por nodo desde capa MAC.....	106
46. Comparativa cantidad de paquetes descartados por nodo desde capa MAC.....	107
47. Comparativa de la cantidad de paquetes descartados por nodo desde la capa MAC (SIN OLSR).	107

Lista de tablas

Tabla	Página
1. Comparativa de las características de una red ad-hoc satelital, VANET y FANET, adaptado de (Bekmezci et al., 2013; De Azua et al., 2018; Kafsi et al., 2009; Tao et al., 2019).	7
2. Conjunto de características y su posición en la primera línea de un archivo TLE.....	21
3. Conjunto de características y su posición en la segunda línea de un TLE.....	22
4. Ejemplo de una matriz de diseño $2k$ cuando $k = 3$	62
5. Matriz de diseño expandida con un factor compuesto e12.	63
6. Configuraciones del experimento base.....	64
7. Referencias y valores asignados para los factores simulados.....	69
8. Ejemplo de una “Tabla de Zonas” calculada por un nodo.	80
9. Ejemplo de tabla de enrutamiento de un nodo en TLE-Routing.....	84
10. Configuración de simulaciones del escenario estático.	97
11. Configuración de pilas de protocolos utilizados en las simulaciones.	102

Capítulo 1. Introducción

El interés del ser humano por explorar el espacio ha sido constante a lo largo del tiempo, lo anterior posiblemente nacido a partir de la curiosidad de comprender lo que este miraba cada vez que se hacía de noche y aparecía un cielo estrellado. La curiosidad por el espacio ha estado presente en actividades como la navegación en mares, la generación de leyendas y costumbres alrededor de la aparición de astros, así como el desarrollo de tecnología. Estos desarrollos no solo han facilitado la vida en la Tierra a través de tecnologías que en la actualidad son prácticamente ubicuas, como el sistema de posicionamiento global (GPS), sino también lograron llevar seres humanos hasta la luna terrestre con las misiones Apollo (ver Figura 1).

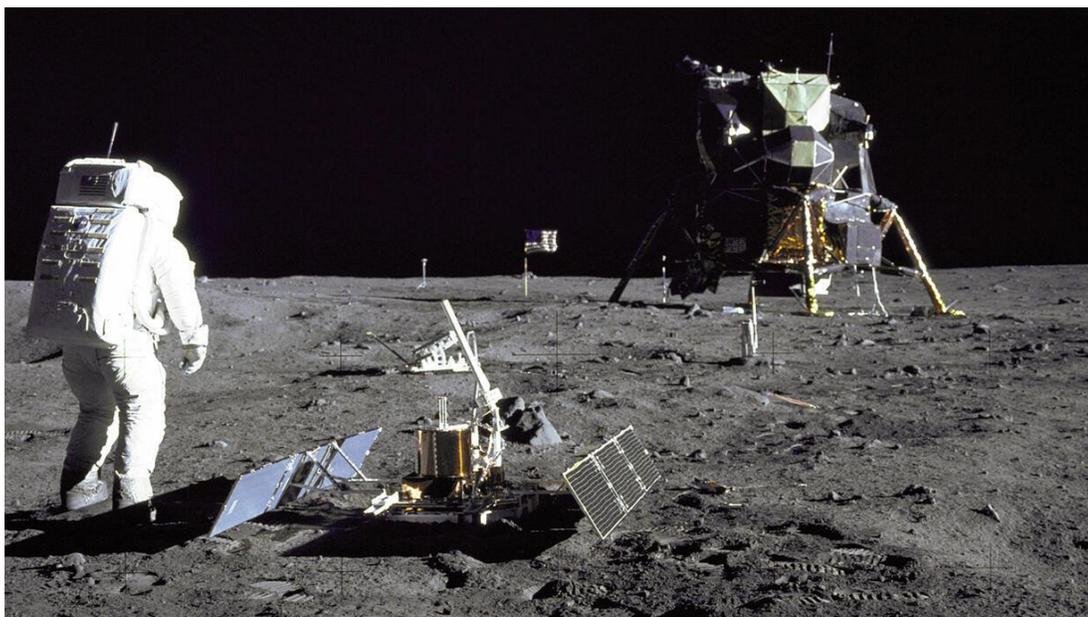


Figura 1 Fotografía de la misión espacial Apollo con instrumentación desplegada en la superficie lunar créditos “NASA”

En la actualidad existen diversas iniciativas alrededor del espacio, desde misiones planteadas para llevar al ser humano a Marte (Palmer, 2021), hasta el despliegue masivo de satélites de órbita baja para el aprovisionamiento de conectividad a la Internet (p.ej. el sistema Startlink) (Duan & Dinavahi, 2021). En este sentido, el desarrollo de misiones basadas en satélites colocados en órbita baja ha tenido un crecimiento significativo en los últimos años, (Vilella et al., 2019), alcanzando niveles históricos en el lanzamiento y operación de misiones espaciales.

Las misiones espaciales con satélites de órbita baja recientes no solamente han sido realizadas por parte de agencias espaciales o empresas privadas con objetivos comerciales, ya que se puede encontrar una cantidad grande de misiones ejecutadas por instituciones educativas, centros de investigación, radioaficionados, etc. Entre otras cosas, el crecimiento en el número de misiones ha sido propiciado principalmente por la adopción estándares de diseño especializado de un tipo de satélites pequeños llamados “nanosatélites”, siendo el estándar "CubeSat" el más extendido en su adopción (CaIPoly, 2009).

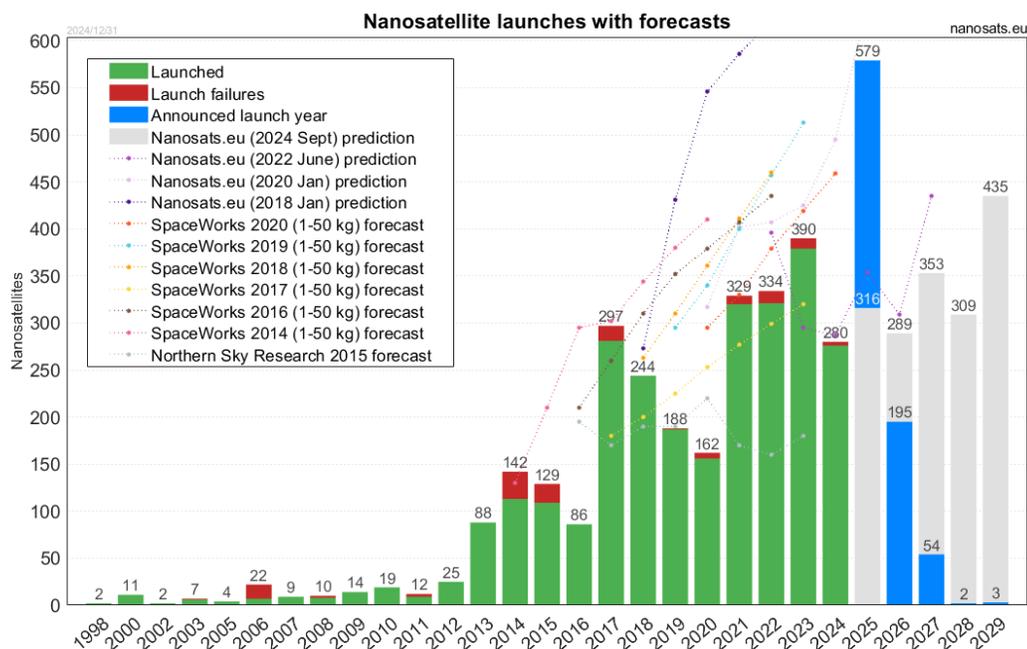


Figura 2 Lanzamientos históricos de misiones espaciales que utilizan nanosatélites y su pronóstico(Erick Kulu,2025).

Los nanosatélites que adoptan al estándar CubeSat son satélites de dimensiones reducidas caracterizados por utilizar como base una forma cúbica de 10 cm x 10 cm x 10 cm, que los asemeja a un cubo de rompecabezas (Lee et al., 2014). De hecho, un satélite que utiliza estas dimensiones es referenciado como CubeSat de 1U (1 unidad), pudiendo existir CubeSats de 2U (10 x 10 x 20 cm), 3U (10 x 10 x 30 cm) o más unidades. En general, los CubeSats están estandarizados con base a sus dimensiones, su masa máxima permitida por unidad (1 kg) y energía almacenada máxima por unidad (1 W). En la **Figura 3** se puede apreciar un CubeSat de 3U desarrollado en el CICESE por el Grupo de Investigación Avanzada en Redes de Telecomunicaciones y Sistemas (ARTS).

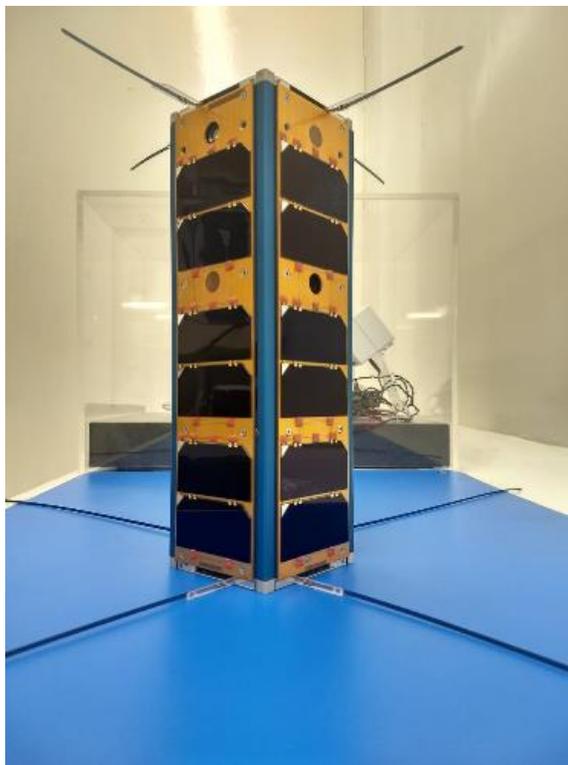


Figura 3 Painani 1, nanosatélite CubeSat de 3U desarrollado en CICESE por el grupo ARTS.

El seguimiento del estándar CubeSat, inherentemente impone restricciones en la capacidad de procesamiento, almacenamiento y carga útil de un nanosatélite que sigue este estándar. No obstante, a través su implementación, ha sido posible alcanzar una implementación rápida de misiones y despliegue de infraestructura espacial, además de facilitar la puesta en órbita de este tipo de nanosatélites al contar con mecanismos de transporte y despliegue estandarizados a través de diferentes lanzadores, (Saeed et al., 2020). A su vez, esto ha tenido como consecuencia una la reducción significativa en el presupuesto requerido para colocar en órbita este tipo de satélites, (Heidt et al., 2013), debido a que varios nanosatélites pueden ser puestos en órbita simultáneamente a través de un solo lanzamiento, o como cargas útiles secundarias de un lanzamiento con otro tipo de misión principal, (Phen, 2022). Esto ha llevado que, aun con las restricciones respecto a almacenamiento de energía y procesamiento, el ejecutar misiones espaciales basadas en nanosatélites sea bastante atractivo para diferentes tipos de organizaciones. En este contexto, es importante mencionar que según “Nanosats Database” (Erick Kulu, 2025) (la base de datos de recopilación de lanzamientos y misiones de nanosatélites) hasta 2025 se suman más de 4400 nanosatélites en funcionamiento orbitando la Tierra, en su mayoría CubeSats.

El tipo de entidades y misiones que ha utilizado CubeSats son diversas y pueden abarcar diferentes campos del conocimiento, por ejemplo:

- La misión Painani 1 fue desarrollada por el CICESE como una plataforma experimental inicial para el desarrollo de sistemas de percepción remota en el espectro visible.
- La misión SporeSat de la NASA (Salim et al., 2014) la cual tenía como objetivo principal el analizar las capacidades de un nuevo tipo de mecanismo para el censado de gravedad usando células de plantas.
- La misión WildTrackCube desarrollada por Sapienza University of Rome, Machakos University and University of Nairobi (Marzioli et al., 2022) integro una carga útil capaz de interactuar con la información periódica que mandan los dispositivos de rastreo de fauna en el parque nacional de Kenia y capturar imágenes asociadas a la información recibida, al mismo tiempo que abrió su documentación para poder interactuar parcialmente con radioaficionados.
- La misión S-Net por parte de la Technische Universität Berlin. (Yoon et al., 2014) la cual contaba con 4 prototipos de nanosatélites llamados S-Net con el objetivo de probar servicios de comunicación terrestre y la posibilidad de enlaces inter-satelitales usando radios de banda S.

Cabe notar que existe una gran cantidad de misiones de nanosatélites en órbita baja solamente requieren de un nanosatélite para ejecutar su función principal. Sin embargo, esfuerzos como S-Net e iniciativas como “Operational Network of Individual Observation Nodes” (ONION) propuesta por la agencia espacial de la Unión Europea en 2016, tuvieron como misión principal proponer y probar mecanismos que permitieran la comunicación entre nanosatélites sin capacidades de propulsión, esto con el fin de demostrar viabilidad de plantear misiones basadas en constelaciones de nanosatélites sin capacidades de propulsión. En particular la iniciativa ONION realizó con éxito el lanzamiento y operación de 3 nanosatélites que demostraron el funcionamiento de tecnología de frontera y la factibilidad de establecer enlaces de comunicaciones entre satélites sin propulsión. En ONION se implementaron desde propuestas de diseño para sistemas de radio hasta protocolos de enrutamiento de información, lo cual demostró la viabilidad de establecer redes de comunicaciones donde los nodos participantes en la red son nanosatélites sin propulsión. Este fue un hito importante, ya que los sistemas comerciales que proveen conectividad de voz y datos utilizando redes de satélites de órbita baja (p.ej. Iridium y Starlink) por lo general utilizan satélites

que cuentan con propulsión, los cuales son más costosos que los CubeSats utilizados en misiones académicas como las descritas anteriormente. Es importante mencionar que el hecho de que un satélite cuente con propulsión le permite mantener su posición orbital relativa en una constelación de satélites, lo que a su vez facilita la conectividad entre satélites y el establecimiento de redes intersatelitales equivalentes a las redes de infraestructura terrestres (p.ej. la red celular),(Akyildiz & Kak, 2019). En contraste, los satélites de la iniciativa ONION eventualmente perdieron la capacidad de comunicarse debido al decaimiento y variabilidad natural de la órbita y trayectoria de cada nanosatélite.

Derivado de la iniciativa ONION, en 2024 se propusieron 10 iniciativas basadas en satélites de órbita baja dentro del programa “Horizon 2030”, dentro de las cuales destacan:

- EUSATFINDER – *“European Space, Aerial and Terrestrial Assets Supporting First Responders’ Operations”*. Tiene como objetivo optimizar la respuesta a desastres naturales y emergencias a través de la integración de los programas espaciales europeos GOVSATCOM, Copernicus y Galileo. Mediante la utilización de satélites y drones, el proyecto buscará desarrollar una solución escalable destinada a la optimización del mapeo, la vigilancia y la localización de individuos y bienes en situaciones de crisis.
- SAT2Rescue – *“Secured SATCOM-based solution enhancing emergency services and search & rescue missions”*. SAT2Rescue es una iniciativa orientada a potenciar la utilización de comunicaciones satelitales en la administración de desastres, la optimización de servicios de emergencia y la telemedicina humanitaria, empleando la infraestructura de GOVSATCOM. Se busca desarrollar una terminal satelital de tamaño reducido y funcionamiento automático, capaz de funcionar sin señal celular, resistente a interferencias y adaptable a diversos satélites.

El reciente planteamiento de estas iniciativas destaca la necesidad de contar con redes de comunicación basadas en satélites de órbita baja para situaciones de emergencia que sean redundantes e independientes de las soluciones comerciales y gubernamentales disponibles actualmente. En este sentido, considerando la cantidad de misiones independientes basadas en un solo satélite de órbita baja, una alternativa interesante para establecer redes de respaldo en emergencias es en solicitar la participación intermitente en la red por parte de nanosatélites operados por diferentes entidades y cuya misión principal es otra. Para esto es necesario considerar esquemas de comunicación que permitan no solo la intercomunicación entre pares de nanosatélites, sino el establecimiento de comunicaciones

multisalto, siendo una propuesta interesante para lograrlo, el desarrollo de redes ad-hoc satelitales, el cual es el tema de investigación abordado en esta tesis.

1.1 Redes ad-hoc satelitales

Como se mencionó anteriormente, una alternativa para el establecimiento de redes de emergencia de respaldo basadas en nanosatélites de órbita baja es el establecimiento de redes ad-hoc satelitales. Las redes ad-hoc (**Figura 4**) se caracterizan como redes inalámbricas autónomas que funcionan sin requerir una infraestructura preexistente. Sus nodos se comunican de forma inalámbrica y se organizan de forma autónoma para establecer las rutas que permiten el flujo de información desde su origen hasta su destino. Las características esenciales que las distinguen de las redes de infraestructura radican en que poseen una topología dinámica, una energía limitada proveniente de la batería, un ancho de banda restringido y comúnmente todos los nodos involucrados son heterogéneos. Las redes ad-hoc emplean saltos de nodo a nodo para facilitar el flujo de información.

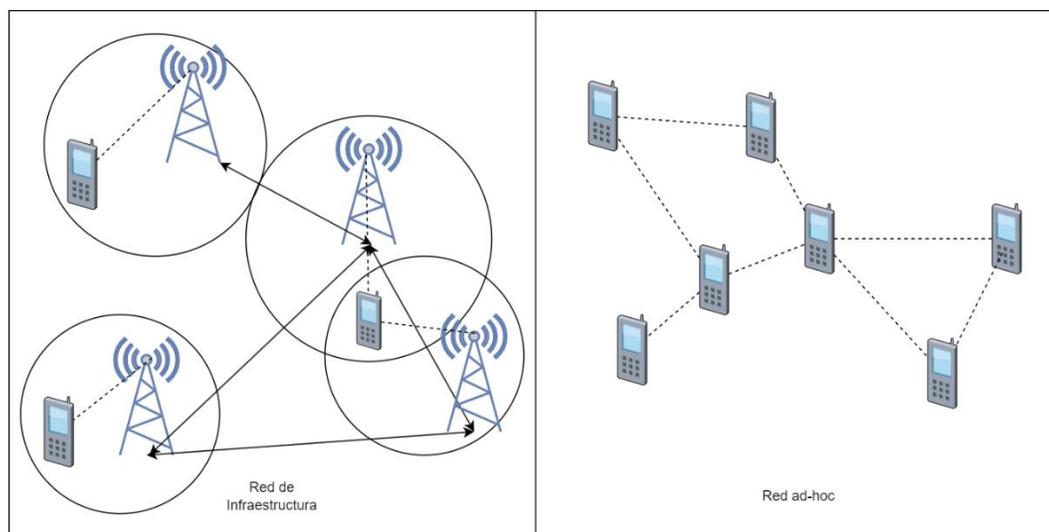


Figura 4 Diagrama comparativo de una red de infraestructura y una red Ad-hoc

Las redes ad-hoc pueden clasificarse en diversas categorías como lo son las redes ad-hoc móviles (MANET del inglés *“Mobile Ad-hoc Network”*), vehiculares (VANET del inglés *“Vehicular Ad-hoc Network”*) (Galaviz-Mosqueda et al., 2014) o aéreas (FANET del inglés *“Flying Ad-hoc Networks”*) (Cabral-Pacheco et al., 2019)

, cada una con aplicaciones específicas, tal cual su nombre lo indica. En el caso de las redes ad-hoc de satélites, estas se plantean como arquitecturas adaptables y distribuidas en las que los satélites son nodos que se despliegan e interconectan de manera dinámica para conformar una red. Se caracterizan por contar con topologías dinámicas atribuibles al movimiento y reconfiguración constante de los satélites, conectividad intermitente derivada de la disponibilidad muchas veces limitada de enlaces inter-satelitales y la habilidad para cubrir extensas regiones geográficas. En la **Tabla 1** se resumen diversas características inherentes a las VANETs, FANETs y redes ad-hoc satelitales.

Tabla 1 Comparativa de las características de una red ad-hoc satelital, VANET y FANET, adaptado de (Bekmezci et al., 2013; De Azua et al., 2018; Kafsi et al., 2009; Tao et al., 2019).

Característica	VANET	FANET	Ad-Hoc Satelital
Conectividad	En este tipo de redes se ha demostrado que una conectividad vehículo - vehículo puede ser realizada aun sin una alta congestión en carreteras.	Estando separados de la tierra a una altura considerable, en la mayoría de sus casos siempre existe línea de vista	Debido al movimiento de los nodos, las conexiones entre estos sufren cambios constantes, esto hace que los satélites no estén en línea de vista constantemente los unos con los otros.
Fallo de nodos	Los nodos en esta red son navegados por usuarios por lo cual cuentan con estándares de seguridad por lo cual el nodo puede dejar de interactuar en la red, pero seguir funcionando para su usuario sin problemas.	El fallo de un componente del nodo puede llevar a la pérdida completa del nodo debido a los riesgos que estos nodos enfrentan como caídas a gran altura	Aunque existen componentes de redundancia en los nodos, la zona espacial puede producir fallos en los subsistemas de un nodo satelital, lo que puede producir el cese de servicios de un nodo.
Trayectorias	Este tipo de redes siempre presenta un comportamiento Aleatorio	Predecible para trayectorias predeterminadas, pero modelos de movilidad especiales para sistemas multi-UAV autónomos	Los nodos en esta red son satelitales por lo que en la mayoría de los casos es posible predecir completamente su trayectoria
Topología	En estas redes la topología no es predecible, pero si estimada utilizando como base la cantidad de flujo en los caminos	Aun conteniendo rápidos cambios en su topología las FANET presentan una topología predecible para trayectorias determinadas	Debido a la naturaleza del movimiento de sus nodos, las trayectorias orbitales pueden ser precedidas con un alto nivel de certeza, sin embargo, la escalabilidad de esta predictibilidad es un problema.

Ciclo de trabajo	El ciclo de trabajo de los nodos de esta red termina cuando el usuario del vehículo termina su recorrido.	Los nodos en una red FANET requieren de una recarga en sus sistemas de reservas de energía para continuar su misión	El movimiento orbital hace posible que los nodos pasen periódicamente sobre una región que no es de interés para la misión por lo cual es posible introducir ciclos de standby
Limitaciones energéticas	Los nodos en este tipo de redes no presentan problemas con limitaciones energéticas	Eficiente en energía para mini UAVs, pero no necesario para UAVs mayores	Los satélites presentan una combinación de paneles solares y baterías por lo cual su energía es limitada y su capacidad es variable en el tiempo.
limitantes en memoria	Los nodos en este tipo de red no presentan limitantes en memoria	Los nodos que se utilizan en estas redes pueden contener alto recursos de memoria y computacional	Un satélite tiene una capacidad limitada de almacenamiento por lo cual el uso volátil de memoria es una necesidad.
Nodos heterogéneos	En este tipo de red siempre se trabaja con nodos heterogéneos	Se busca una homogeneidad en los nodos que se utilizan en este tipo de redes	En una red ad-hoc satelital si se incorporan diferentes misiones los nodos pueden presentar un objetivo específico para su tiempo de vida y de la misma manera pueden contar con diferentes características y limitantes.
Limitantes en seguridad	Los enlaces pueden ser captados por agentes maliciosos los cuales pueden desencadenar en robo de información o accidentes	En la actualidad existen herramientas para captura y pérdida de conexión enfocadas en nodos UAV	Los enlaces de red satelital pueden ser leídos por agentes no deseables en su descarga a tierra o nodos satelitales.
Autoconfiguración de la red	Los nodos de las VANET deben de generar automáticamente una comunicación utilizando los alcances de sus radios sin depender de una infraestructura a priori.	En este tipo de redes la configuración de la red puede estar definida por una configuración tipo estrella no necesariamente autoconfigurable	Los nodos satelitales deben de generar automáticamente una comunicación utilizando ISL, sin depender de una infraestructura a prior

Uno de los desafíos más grandes de las redes ad-hoc en general y en especial en las redes ad-hoc satelitales radica en el desarrollo de protocolos de enrutamiento, los cuales son los responsables de crear rutas en la red por donde fluye la información. Estudios iniciales sobre redes ad-hoc satelitales propusieron como

punto de partida la utilización de protocolos de enrutamiento para MANETs, VANETs y FANTEs bastante conocidos, (Perkins & Royer, 1999) y el protocolo de enrutamiento basado en la optimización del estado de sus enlaces (OLSR por las siglas en inglés “Optimized Link State Routing Protocol”) (Jacquet et al., 2001)). Los resultados reportados en estas investigaciones nos permiten concluir que el diseño de esquemas de enrutamiento para redes ad-hoc satelitales no es una tarea trivial, debido a que en este tipo de redes los nodos son nanosatélites que siguen diferentes trayectorias con una alta velocidad, lo que a su vez conlleva a tener conectividad intermitente, particiones de la red, etc. Además, otro reto surgirá si se considera que una red ad-hoc satelital puede ser formada por satélites cuya misión principal es diferente a las tareas de la red, entonces la red se conformará con nodos heterogéneos con capacidades de energía, procesamiento, conectividad y disponibilidad para participar diferentes. La **Figura 5** es una representación gráfica de las interacciones en la comunicación de una red ad-hoc satelital.

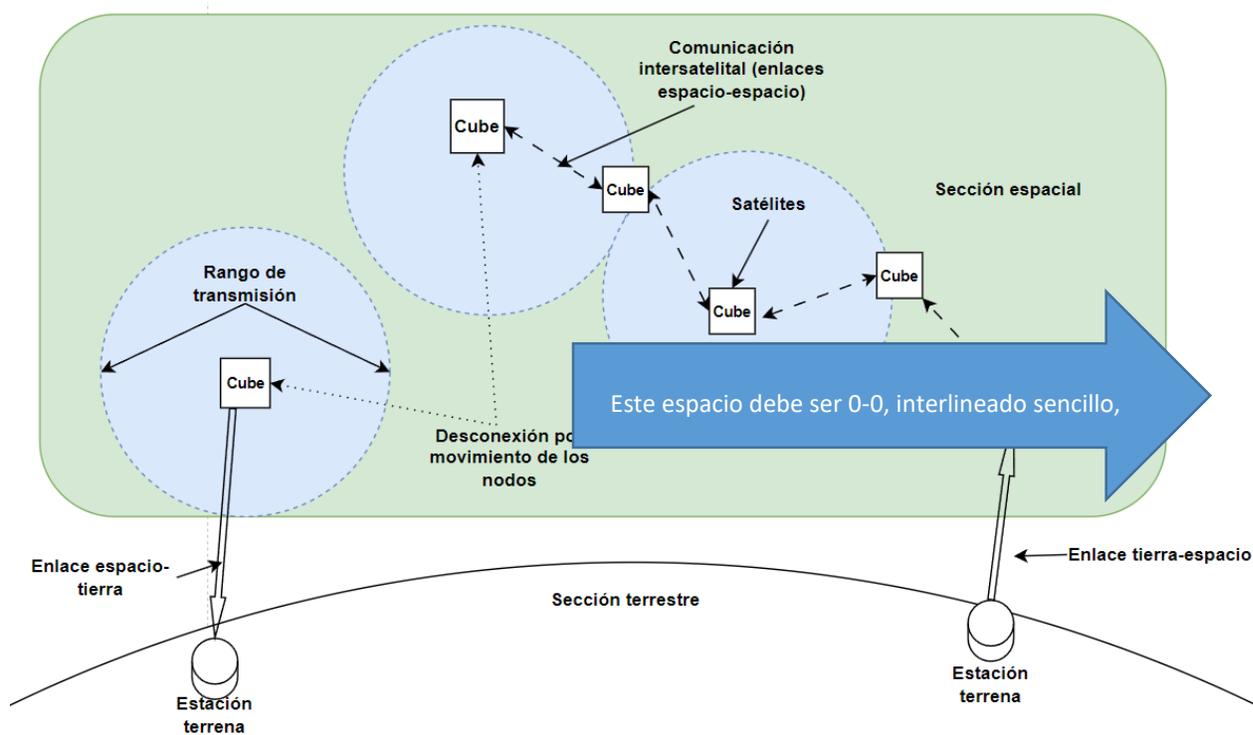


Figura 5 Representación gráfica de las interacciones para la comunicación en una red ad-hoc satelital.

Considerando lo anterior, una iniciativa propuesta recientemente para facilitar la comunicación entre nanosatélites de órbita baja es la utilización de radios LoRa, (Kumar & Vadivukkarasi, 2023). LoRa es una tecnología relativamente reciente desarrollada para comunicación terrestre con baja tasa de datos con distancias de hasta 15 km entre nodos, la cual está teniendo una amplia penetración en aplicaciones relacionadas con la Internet de las Cosas (IoT del inglés “*Internet of Things*”). En lo que respecta a su

utilización en nanosatélites de órbita baja, se ha demostrado que la utilización de estos radios permite la comunicación entre satélites a distancias de hasta 2.200 km. También, es relevante mencionar que en el caso de comunicación Tierra-nanosatélite, la utilización de LoRa ofrece ventajas en términos de consumo de energía (tanto en la estación terrestre como en el espacio), tamaño, costo, etc. (Xuan et al., 2018), en comparación con los requerimientos de otro tipo de tecnologías de comunicación que ofrecen un mayor ancho de banda en comunicaciones satelitales. Bajo estas consideraciones, se puede decir que LoRa es una alternativa atractiva para el establecimiento de redes ad-hoc satelitales cuyo objetivo sea proporcionar redundancia para la transmisión de datos desde localidades remotas con baja cobertura o para el envío de mensaje críticos de baja tasa de datos en situaciones de emergencia.

En esta tesis se estudiará el problema de enrutamiento en redes ad-hoc satelitales de órbita baja cuyos nodos sean nanosatélites habilitados con transceptores LoRa con el fin de proponer un esquema de enrutamiento adecuado para este tipo de redes.

1.2 Planteamiento del problema

Sin bien en la actualidad se tiene esfuerzos de proveer conectividad de datos a través de redes satelitales de órbita baja como las redes Starlink e Iridium, también existe una gran cantidad de satélites en órbita que han sido colocados por entidades educativas, gubernamentales y radioaficionados. Esto genera el potencial de proveer capacidad de conectividad satelital paralelas a los despliegues comerciales antes mencionados. De hecho, iniciativas recientes apoyadas por la “UK Space Agency” y la “European Union Agency for the Space Programme” han propuesto iniciativas como “Space Lacuna”(Gadre et al., 2024) y “ONION”(Ruiz-De-Azua et al., 2018) donde impulsan a que nanosatélites puestos en órbita cuenten con un radio LoRa que permita comunicaciones satélite a satélite además de comunicaciones satélite a estación terrena.

Con estas capacidades se abre una ventana de oportunidad para el establecimiento de redes de satélites donde los nodos sean nanosatélites de órbita baja con diferentes misiones principales y pertenecientes a diferentes entidades y/o países. Esto permitiría tener una red de cobertura global satelital cuya aplicación principal sea en casos de emergencia o desastres, similar a lo que se tiene considerado para los radios de largo alcance utilizados principalmente por radioaficionados. En particular se buscaría que una red de este

tipo funcione principalmente como una red de redundancia y respaldo que transmita información crítica que no requiera grandes anchos de banda.

Para establecer este tipo de redes se considera que se podría contar con la participación de diferentes satélites de manera voluntaria de acuerdo con su disponibilidad respecto a su misión principal, la cual podría ser diferente a proporcionar un servicio conectividad de datos. En este sentido, la red se tendría que formar de manera emergente y dinámica siguiendo el paradigma de una red ad-hoc, con nodos que estén dispuestos a participar en labores de comunicación de manera intermitente. Este argumento nos conduce a la propuesta de una implementación de una red ad-hoc satelital donde los nodos participantes serán nanosatélites que colaborarán en labores de retransmisión de paquetes en función de su disponibilidad en términos de tiempo, energía o capacidad de procesamiento. Además, en este escenario los nanosatélites participantes en la red no necesariamente contarán con la capacidad de propulsión para mantener su órbita, posición relativa y periodo orbital, motivo por el cual no se espera que una red satelital ad-hoc compita en términos de ancho de banda o capacidades con redes comerciales satelitales como Starlink o Iridium. Esto se debe a que dichos sistemas utilizan satélites con capacidades de propulsión, procesamiento y disponibilidad que les permite participar en una red satelital de manera previsible en términos de trayectorias, posición relativa y capacidad para transmitir información, lo que las hace “equivalentes” a una red de infraestructura terrestre.

Si bien, existen esfuerzos previos que han planteado la utilización de protocolos ad-hoc para el establecimiento de redes ad-hoc satelitales, estos se han limitado a analizar el desempeño que protocolos como AODV y OLSR ofrecen cuando son utilizados para desplegar este tipo de redes (Ruiz-De-Azua et al., 2018). Es importante mencionar que el desempeño de los protocolos de enrutamiento en redes ad-hoc está estrechamente relacionado con las características de la red. Por ejemplo, una red ad-hoc donde los nodos sean vehículos impondrá retos muy diferentes a redes ad-hoc formadas por sensores o vehículos aéreos. Por lo que, en el diseño y despliegue de dichas redes, es fundamental tomar en cuenta las características de los nodos de red y su escenario de despliegue.

Los protocolos de enrutamiento para la conformación de redes ad-hoc que han sido propuestos hasta el momento, no fueron diseñados considerando las particularidades que presenta tener como nodos de la red a nanosatélites de órbita baja. En particular, en una red satelital ad-hoc de órbita baja se tendrán altas velocidades de los nodos, alto dinamismo topológico, trayectorias infrecuentes, entre otras características, que son diferentes a las características inherentes encontradas en redes ad-hoc como MANETs, VANETs y

FANETs. Por lo tanto, es necesario desarrollar protocolos que permitan establecer redes ad-hoc satelitales que consideren las particularidades de tener como nodos a satélites de órbita baja.

1.2.1 Objetivo general

Se propone el evaluar diversas estrategias de enrutamiento en redes satelitales ad-hoc basadas en nanosatélites para desarrollar una propuesta de protocolo de enrutamiento satelital tal que se posible habilitar redes ad-hoc emergentes y colaborativas en apoyo a situaciones de emergencia.

1.2.2 Objetivos específicos

- Desarrollar un marco de simulación validado para la evaluación de arquitecturas de comunicaciones basadas en el paradigma de redes ad-hoc satelitales.
- Realizar un estudio del estado del arte de protocolos de enrutamiento para redes ad hoc móviles (MANETs) para seleccionar aquellos que podrán ser utilizados en redes ad-hoc satelitales.
- Implementar los protocolos en un simulador de redes satelitales desarrollado del trabajo de investigación.
- El desarrollo y validación de algoritmos de enfriamiento para redes ad-hoc satelitales.
- Definir las métricas para evaluar el desempeño de protocolos de enrutamiento para redes ad-hoc satelitales.

A continuación, se enlistan los procedimientos que se siguieron para el desarrollo de este trabajo acompañado de una breve descripción (**Figura 6**):

1. **Investigación del estado del arte de las redes ad-hoc satelitales.** Se realizó una investigación sobre los fundamentos necesarios para comprender las redes ad-hoc satelitales, paradigmas

relacionados como las redes MANET y sus protocolos de enrutamiento. Así como la existencia de misiones donde se realizaron pruebas de concepto de redes ad-hoc satelitales y sus resultados.

- 2. Desarrollo de las herramientas de simulación o bibliotecas necesarias para su uso en un simulador de redes ad-hoc satelitales.** Se desarrollaron las herramientas de cómputo para extender las capacidades del simulador basado en eventos (OMNET++). Esto permitió generar redes ad-hoc satelitales en un entorno virtual, estudiarlas y poder desarrollar soluciones especializadas para este tipo de redes.
- 3. Desarrollo de un protocolo de enrutamiento para redes ad hoc satelitales.** Se ideó un protocolo de enrutamiento para redes ad-hoc satelitales el cual contempla las características únicas que tienen los nodos participantes en estas redes llamado TLE-Routing. La idea del funcionamiento del protocolo se acompañó de propuestas de mecanismos utilizados en otros protocolos de enrutamiento que buscan solucionar problemáticas generales como información duplicada, bucles, entre otros. Dentro de esta etapa también se realizaron las definiciones de los escenarios y métricas de evaluación. Se definieron escenarios que se buscan abordar en las redes ad-hoc satelitales. Dichos escenarios toman en cuenta las características únicas de los nodos participantes. De la misma manera se realizó una búsqueda de las métricas de evaluación de desempeño que sirvieron como indicadores para el refinamiento del diseño protocolo de enrutamiento.
- 4. Pruebas de desempeño generales y mejora del protocolo propuesto.** Se realizaron pruebas para conocer el comportamiento del protocolo y observar posibles refinamientos para el protocolo puesto. Se buscó conocer características como estabilidad de las rutas, prevención de bucles y búsqueda y descubrimiento correcta de las rutas de la red.
- 5. Pruebas comparativas contra protocolos de-facto de paradigmas relacionados.** Se realizaron las simulaciones pertinentes donde fue comparado el desempeño del protocolo de enrutamiento propuesto en este trabajo de investigación sobre los escenarios seleccionados y en contra de distintos protocolos de enrutamiento de-facto de las redes ad-hoc.

6. **Elaboración del análisis, discusión y documentación de los resultados.** Una vez realizada la evaluación de los escenarios simulados, se prosiguió a documentar y plasmar las lecciones aprendidas y conclusiones en este trabajo de investigación.

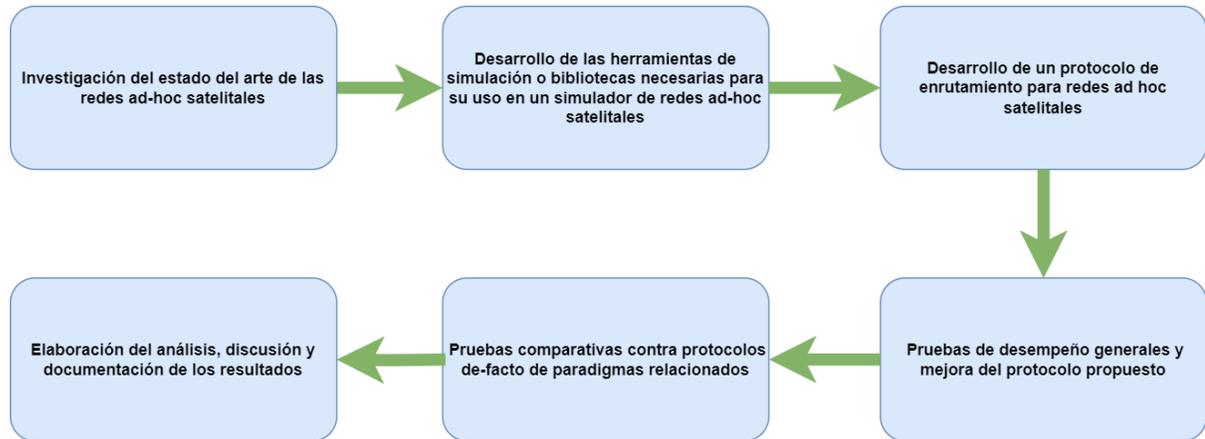


Figura 6 Metodología seguida para el desarrollo del trabajo.

1.3 Organización de la tesis

En el **Capítulo 2.** , se presenta una exploración del estado del arte enfocado hacia tecnología espacial, distintos tipos de redes Ad-Hoc, MANET y protocolos de enrutamiento. En el Capítulo 3. se exponen las herramientas de simulación desarrolladas para este trabajo de investigación, donde se explica su importancia y aplicación, así como la teoría detrás del desarrollo de módulos especializados como movimiento satelital y ángulos de elevación. En el Capítulo 4. se presenta el estudio de la búsqueda del impacto de tipos de enrutamiento, así como la identificación de los factores con mayor impacto que interactúan en el flujo de información de redes ad-hoc satelitales, así mismo se presenta una propuesta de metodología de experimentación para trabajar con redes ad-hoc satelitales de manera simulada. Capítulo 5. presenta la propuesta del protocolo de enrutamiento TLE-Routing, se exploran los mecanismos identificados para su funcionamiento y la razón por la cual son considerados esenciales cuando se trabaja con redes ad-hoc satelitales, así mismo se presenta una comparativa entre los protocolos de facto de redes MANET propuestos en la literatura como propuesta inicial para redes ad-hoc satelitales. Por último, en el Capítulo 6. se presentan la discusión de la conclusión del trabajo de investigación.

1.4 Principales resultados y contribuciones de la tesis.

Los principales resultados de este trabajo de investigación fueron publicados en el siguiente artículo, que aparece en la siguiente revista indexada:

García-Loya, E.; Galaviz-Mosqueda, A.; Villarreal-Reyes, S.; Rivera-Rodríguez, R.; Lozano-Rizk, J.E.; Conte-Galván, R. Analysis of the Most Relevant Factors for Routing in Internet of Space Things Networks. Appl. Sci. 2022, 12, 7726. <https://doi.org/10.3390/app12157726>.

Así mismo una propuesta donde se presenta el desarrollo del protocolo de enrutamiento satelital ad-hoc TLE-Routing se encuentra en etapa de manuscrito, actualmente en la etapa de manuscrito.

Capítulo 2. Estado del arte

Como se explicó anteriormente, un área de relevancia a investigar es el establecimiento de redes satelitales ad-hoc las cuales buscan ser emergentes y colaborativas para escenarios de emergencia. Estas redes se conceptualizan por sus nodos participantes los cuales son nanosatélites utilizando el estándar CubeSat, en su mayoría o totalidad carecen de mecanismos que permitan el control de sus trayectorias. Además, en este trabajo de investigación se asumirá que los nanosatélites que participen en una red ad-hoc tendrán misiones principales diferentes a solo colaborar en la red, por lo cual los nodos que conforman la red tendrán en general diferentes capacidades de procesamiento, almacenamiento de energía y disponibilidad para tareas de la red.

Con lo anterior en mente, en el presente capítulo se examinarán los antecedentes relevantes para este estudio de tesis en relación con CubeSats, la tecnología de radios LoRA, los protocolos de enrutamiento ad-hoc y las investigaciones anteriores realizadas sobre redes satelitales ad-hoc.

2.1 El estándar CubeSat

Como se mencionó en la introducción, el estándar CubeSat (introducido en 1999)(CalPoly, 2009) es el estándar predominante en el diseño de nanosatélites (Villela et al., 2019). Este estándar emergió como una colaboración entre la Universidad Politécnica del Estado de California (Cal Poly) y el Laboratorio de Desarrollo de Sistemas Espaciales de la Universidad de Stanford (SSDL). La motivación principal para el desarrollo del estándar CubeSat fue educativa, con el objetivo de proporcionar a los estudiantes experiencia en actividades espaciales, facilitándoles la participación en el ciclo integral de desarrollo de una misión espacial (Heidt et al., 2000) . Dada la naturaleza con la cual surge el estándar, la minimización de costos en cada fase del ciclo de desarrollo fue crucial, lo que resultó en la adopción de componentes comerciales listos para su uso ("off-the-shelf" o COST, por sus siglas en inglés) como una alternativa atractiva para el desarrollo de un CubeSat (Saeed et al., 2020a). Aunque inicialmente las misiones CubeSat eran conceptualizadas como satélites de entrenamiento destinados a equipos de desarrollo inexperimentados o estudiantes, con el éxito alcanzado diversas entidades científicas, educativas, gubernamentales y radioaficionados comprendieron que los CubeSat pueden ser empleados eficazmente

en misiones de pruebas de concepto en campos como la tecnología espacial de frontera, la astronomía, la percepción remota, entre otros.

El estándar CubeSat es reconocido actualmente como una tecnología revolucionaria en el desarrollo de satélites, donde transformó no solo el proceso de desarrollo de misiones espaciales, sino también la estrategia de su puesta en órbita. A diferencia de los lanzamientos anteriores que implicaban el transporte de un solo satélite al espacio como carga principal, los CubeSat operan principalmente como cargas secundarias (Toorian et al., 2008), posibilitando el lanzamiento de desde uno hasta decenas o cientos de satelitales en un único viaje espacial. Por ejemplo, en 2016 se alcanzó el récord de despliegue más numeroso de satélites por un solo cohete, con un total de 103, de los cuales 101 fueron CubeSats (Villela et al., 2019). En gran medida los nanosatélites se ubican en orbitas bajas (Low-Earth Orbit, LEO, por sus siglas en inglés) las cuales tienen una altura máxima de 2,000 Km. En particular, los CubeSats pueblan la altura alrededor de los 500 A 550 km de altura, con velocidades promedio para dar una vuelta a la Tierra cada 90 minutos. En la **Figura 7** se presenta una distribución de cantidad de CubeSats en órbita según altura (Erick Kulu, 2025).

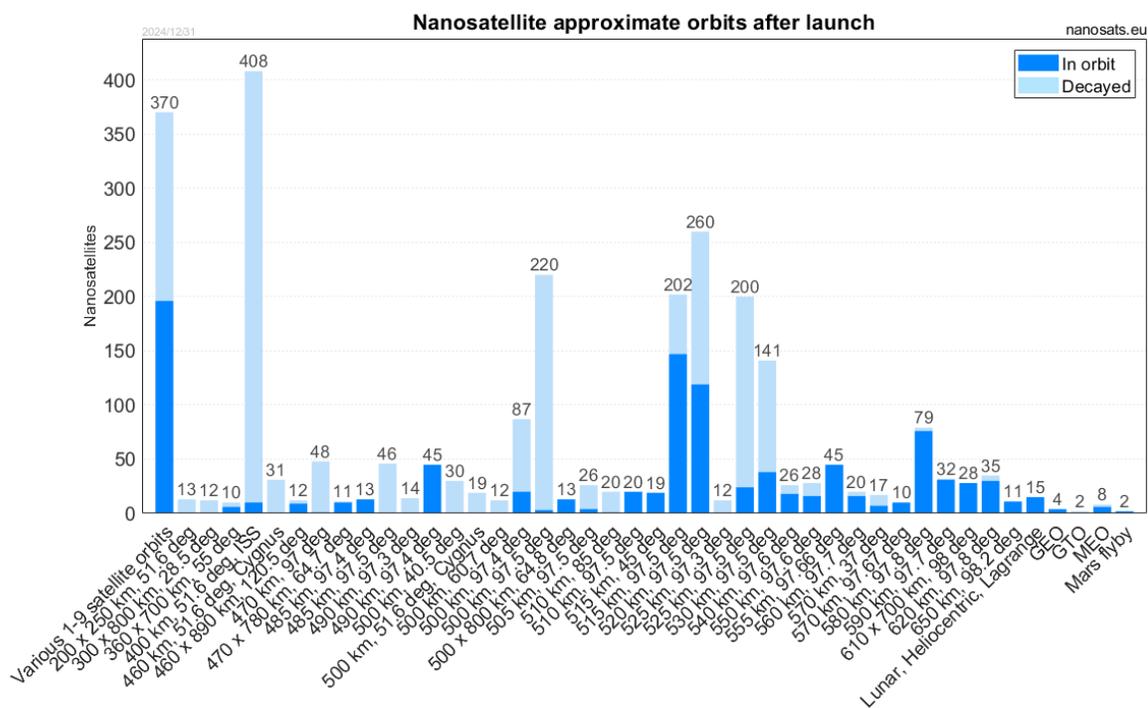


Figura 7 Orbitas aproximadas de misiones CubeSat después de su lanzamiento (Erick Kulu, 2025)

Con la finalidad de comprender los desafíos únicos que presenta el desarrollar soluciones que sean pensadas para nanosatélites CubeSat, es necesario conocer las características únicas que los definen. El estándar CubeSat propone estandarizar el tamaño y morfología de los nanosatélites, caracterizando un CubeSat de 1U como un satélite de configuración cuboidal con dimensiones de 10 cm por lado y una masa que no supera el 1 kg por unidad (Puig-Suari et al., 2001). Estas unidades pueden ser apiladas para formar diferentes configuraciones, limitadas a la tecnología del lanzador del cohete por el cual serán puestos en órbita. En la **Figura 8** se presentan ejemplos de distintas configuraciones de apilados de unidades CubeSat usualmente adoptadas.

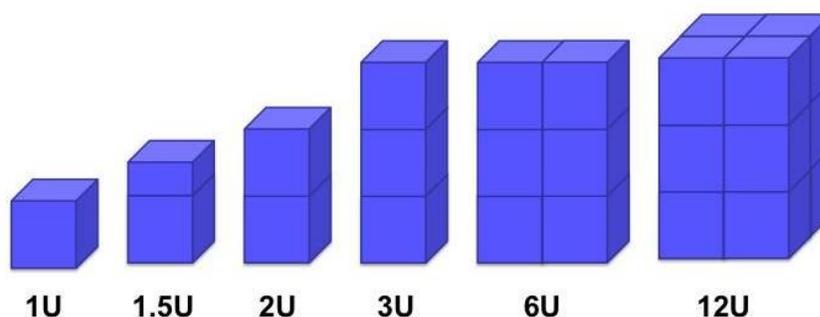


Figura 8 Configuraciones de apilado de unidades de CubeSats (NASA,2025)

Como se mencionó previamente, el desarrollo de un CubeSat utiliza principalmente COTS. No obstante, esta característica presenta una serie de retos técnicos considerables. En particular, la optimización de rutinas y protocolos para su funcionamiento en microcontroladores de bajo nivel de procesamiento, lo anterior debido a las limitantes energéticas y la cantidad de recursos que estos pueden ocupar en memoria (Saeed et al., 2020b). Además del volumen restringido, las capacidades de procesamiento, almacenamiento de energía y conectividad de comunicaciones dependen de la misión principal del CubeSat. De esta manera misiones enfocadas en realizar tareas individuales probablemente no tengan alguna forma de comunicación entre satélites por defecto. Como un ejemplo de misiones actualmente hay CubeSats orbitando la Tierra enfocados a aplicaciones de observación terrestre, educativas, científicas, tecnologías, por mencionar algunos. Para dar una idea de la cantidad de CubeSats realizando misiones de manera individual, en la actualidad hay en órbita más de me 4400 nanosatélites en órbita(Figura 9, Erick Kulu, 2025).

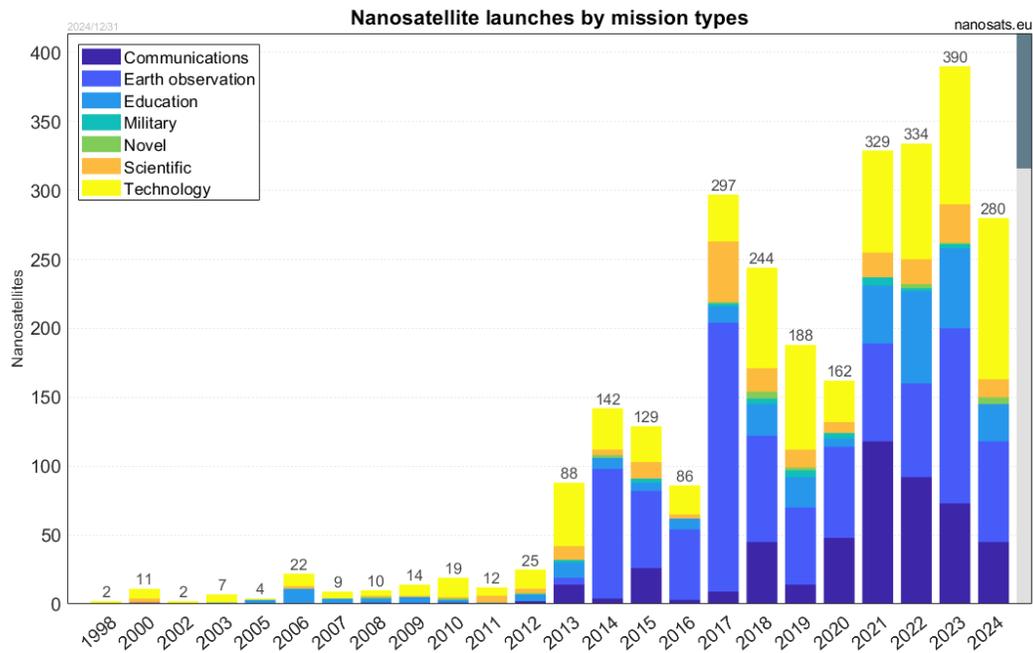


Figura 9 Cantidad de lanzamientos de CubeSats agrupados por su tipo de misión (Erick Kulu, 2025).

Una de las características la mayoría de las misiones es que no cuentan con un sistema de propulsión que les permita controlar su trayectoria una vez que han sido puestos en órbita (Jia-Richards et al., 2020). Por lo tanto, en la mayoría de los satélites la trayectoria que siguen tendrá pequeñas variaciones de manera natural que lo acercaran cada vez más a la superficie terrestre por efectos de la gravedad hasta su reingreso a la Tierra (ver Figura 10).

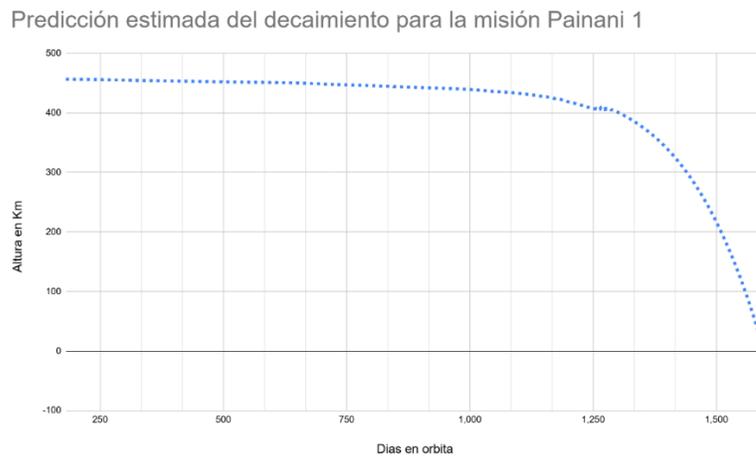


Figura 10 Ejemplo de decaimiento de la misión Painani 1

Debido a la gran cantidad de CubeSats puestos en órbita es atractivo el buscar formar redes de comunicaciones con estos satélites para la transmisión de información, buscando conformar una red satelital en órbita baja (LEO). Sin bien existen redes de comunicaciones satelitales comerciales en órbitas LEO como lo son Iridium y Starlink, los satélites que conforman estas redes cuentan con mecanismos que les permiten mantener trayectorias orbitales estables, lo cual les ha permitido adoptar un paradigma de comunicación equivalente al de las redes de infraestructura terrestre.

Sin embargo, como se mencionó previamente, una gran cantidad de CubeSats no cuentan con mecanismos que les permitan controlar sus trayectorias, lo que sugiere la posibilidad de utilizar un paradigma de red ad-hoc para conformar una red de comunicaciones con este tipo de satélites. En este contexto, cabe mencionar que, si bien muchas veces no se puede controlar la trayectoria de un CubeSat, esta puede predecirse durante una ventana de tiempo corta (de alrededor de 24 horas) (Coffee et al., 2013) utilizando lo que se conoce como conjunto de elementos de dos líneas (TLE's – por sus siglas en inglés “*Two-line element set*”) generados por entidades como el gobierno de los Estados Unidos y publicadas en bases de datos públicas como Celestrak. Los TLEs son proporcionado libremente para seguimiento de este tipo de satélites y son explicados en la siguiente subsección.

2.2 Modelo de perturbación simplificada (SGP) y conjunto de elementos dos líneas (TLE's)

Existe la necesidad de seguir y muchas veces predecir el movimiento de los objetos en el espacio que sean de interés, por ejemplo, satélites (Hong et al., 2016). Para lo anterior existen modelos de propagación, los cuales son alimentados con características del movimiento del objeto a predecir. El modelo más usado es el modelo de perturbación simplificado o SGP (por sus siglas en inglés) ideado para objetos cercanos a la Tierra los cuales presentan periodos de 225 minutos o menos, desarrollado por Ken Cranford en 1970 (Vallado & Crawford, 2008). Actualmente el modelo SGP y sus variantes como el DSPG (para el seguimiento de objetos en el espacio profundo) es mantenido por la “North American Aerospace Defense Command” o NORAD (Hoots & Roehrich, 1980a). La forma de seguir a los objetos en el espacio es haciendo uso de la “Space Surveillance Network” o “SSN”, el cual es una red que combina sensores ópticos y radares para el rastreo de objetos en el espacio.

La NORAD publica rutinariamente características del movimiento de los objetos que rastrea en bases de datos como Celestrak, esto en forma de archivos de “conjunto de elementos de dos líneas” (TLE’s – por sus siglas en inglés “*Two-line element set*”), (Hoots & Roehrich, 1980b), los cuales consisten en dos líneas de 69 caracteres donde se encuentran variables como el numero asignado al satélite según el catálogo interno de la NORAD, su clasificación pública o privada, la primera y segunda derivada del promedio de su movimiento, su época (referencia de tiempo), entro otros.

Un TLE debe de mantenerse actualizado cuando este es usado para alimentar un modelo de propagación dado que presentan un error de hasta 2 Km por día el cual incrementa a su fecha de publicación, Una lista completa de las características que se encuentran en un TLE se proporciona en la **Tabla 2** y

Tabla 3, mientras que un ejemplo de su formato en texto se muestra en la **Figura 11**.

Tabla 2 Conjunto de características y su posición en la primera línea de un archivo TLE

Línea 1	
Posición del Carácter	Descripción
01	Numero de línea en el TLE
03-07	Numero de satélite en la base de datos interna
08	Clasificación
10-11	Designación internacional (Últimos dos dígitos del año de lanzamiento)
12-14	Designación internacional (Numero de lanzamiento en el año)
15-17	Designación internacional (Pieza en el lanzamiento)
19-20	Época (Últimos dos dígitos del año)
21-32	Época (Dia del año y fracción proporcional del día)
34-43	Primera respecto al tiempo de la media del movimiento
45-52	Primera respecto al tiempo de la media del movimiento
54-61	Termino de atracción BSTAR
63	Tipo de efeméride
65-68	Numero de elemento
69	Checksum (Modulo 10)

Tabla 3 Conjunto de características y su posición en la segunda línea de un TLE

Línea 2	
Posición del Carácter	Descripción
01	Numero de línea en el TLE
03-07	Numero de satélite en la base de datos interna
09-16	Inclinación (en grados)
18-25	Ascensión por la derecha en el nodo (en grados)
27-33	Excentricidad
35-42	Argumento del perigeo (en grados)
44-51	Media de la anomalía
53-63	Media del movimiento (revoluciones por día)
64-68	Numero de revolución en su época (revoluciones)
69	Checksum (Modulo 10)

```
NOAA 14
1 23455U 94089A 97320.90946019 .00000140 00000-0 10191-3 0 2621
2 23455 99.0090 272.6745 0008546 223.1686 136.8816 14.11711747148495
```

Figura 11 Ejemplo del contenido de un archivo TLE en formato de texto plano.

Es importante destacar que, aunque los modelos de perturbación para la predicción de trayectorias son públicamente accesibles en sus consideraciones iniciales, las mejoras realizadas a estos son protegidas activamente por la NORAD (Vallado & Crawford, 2008). No obstante, la NORAD proporciona binarios o archivos compilados de programas para cálculo de trayectorias que incluyen dichas mejoras en distintos lenguajes de programación, para lo cual es necesario registrarse ante dicha entidad como usuario. Por otro lado, proyectos de código abierto han adoptado la iniciativa (San-Juan et al., 2017), fundamentándose en la publicación original del modelo de SGP4 y empleando ingeniería inversa de recrear una interpretación del modelo para su aplicación en lenguajes como C++.

2.3 La tecnología de radios LoRa en CubeSats

Como se mencionó en la sección anterior, la gran mayoría de CubeSats lanzados y cuya misión principal

no es referente a comunicaciones, no necesariamente cuentan con un sistema para comunicación entre satélites. Esto se debe en gran medida a que para muchos casos el incluir un transceptor de este tipo puede elevar el consumo de energía e incrementar la complejidad del sistema, sin que su uso sea necesario para ejecutar la misión principal (Arnold et al., 2012). Sin embargo, recientemente ha surgido el interés por promover la inclusión de radios “Long Range” (LoRa) en CubeSats independientemente de su misión principal (Semtech®, 2021). Esto con el objetivo de proveer un canal alternativo para comunicaciones tierra-espacio y habilitar comunicaciones inter-satelitales con un bajo consumo de energía.

Los radios LoRa fueron desarrollados como respuesta a la creciente demanda del paradigma IoT de contar con radios con baja potencia de transmisión (con el fin de ahorrar batería), que fueran capaces de conformar redes de largo alcance (Low-Power Wide Area Networks, LPWAN) y tuvieran soporte de una alta densidad de nodos (Haxhibeqiri et al., 2018). El área de aplicación de radios LoRa incluye: ciudades inteligentes en aplicaciones como el monitoreo de alumbrado público; agricultura enfocada en el reporte de características del suelo; cuidados de la salud fungiendo como sumidero y proporcionando saltos a larga distancia de información crítica de pacientes remotos; el seguimiento de objetos o sujetos de interés como vida animal en especies en peligro de extinción; entre otros.

Los radios Lora utilizan una técnica de modulación llamada “Chirp Spread Spectrum” o CSS, la cual es una técnica donde se utiliza una frecuencia que abarca todo su ancho de banda en base a pulsos o “chirp” para codificar la información (Sardar et al., 2018). LoRa tiene varios parámetros que agregan robustez a su capa física como:

- **Factor de Ensanchamiento (“Spreading Factor” o SF):** Los factores de ensanchamiento buscan incrementar el alcance y la solidez de la señal, no obstante, disminuyen la velocidad de transmisión de datos. Cada incremento en SF duplica la duración de lo que es conocido como un símbolo, lo que optimiza la relación señal-a-ruido (SNR) y facilita la el alcanzar mayores distancias de comunicación.
- **Ancho de banda variable (“Bandwidth” o BW):** LoRa funciona con anchos de banda que oscilan entre los 7.8 kHz y 500 kHz. El ancho de banda influye en la velocidad de transmisión de datos y en la duración de cada Chirp. Un ancho de banda menor incrementa el alcance del rango de comunicación, pero disminuye la velocidad de transmisión de datos. Los anchos de banda mayores proveen una tasa de transmisión de datos mayor, pero a distancias reducidas.

- **Tasa de Código (“Code Rate” o CR):** LoRa emplea la función de corrección de errores de reenvío (“forward error correction” o FEC) con tasas de código que oscilan entre 4/5 y 4/8. La tasa del código establece el grado de redundancia que es incorporada en los datos, lo cual afecta a la corrección de errores máximos que pueden ocurrir durante el proceso de transmisión.
- **Potencia de transmisión (“Transmission Power”TX):** Los radios LoRa tienen la capacidad de transmitir niveles de potencia que oscilan entre 2 dBm y 20 dBm. Un incremento en la potencia de transmisión incrementa el alcance, no obstante, también demanda una mayor cantidad de energía.

Una parte importante de la tecnología LoRa (y tecnologías de capa física en general) es su mecanismo de control de acceso al medio (MAC – por sus siglas en inglés “*Medium Access Control*”), el cual dicta el cómo un dispositivo comparte el medio de transmisión inalámbrico con sus pares. Dado que la acción más costosa en términos energéticos para un radio es transmitir, un mecanismo de acceso al medio debe de procurar reducir colisiones con transmisiones de otros dispositivos (Gummalla & Limb, 2009), evitando así reintentar una transmisión. En el caso de LoRa se utilizan variaciones del protocolo ALOHA (Syed et al., 2007). En ALOHA se plantea inicialmente que los nodos tienen una ventana abierta para transmitir la información sin restricción por el canal. Sin embargo, el nodo que recibe la información debe de responder al nodo que origino la información, de lo contrario se dispara una retransmisión. ALOHA “Ranurado” es una variante donde se agregan ventanas de tiempo fijas dentro de las cuales los nodos pueden seleccionar una de manera aleatoria para poder transmitir, buscando reducir la posibilidad de una colisión de paquetes de información en el canal.

Las características que ofrece LoRa para el sector de dispositivos IoT ha llamado la atención de organizaciones e iniciativas a nivel mundial que han realizado pruebas de concepto exitosas en el ámbito de los nanosatélites CubeSat. Por ejemplo, Semtech (la empresa desarrolladora de LoRa) ha promovido el uso de la tecnología LoRa en aplicaciones de IoT satelitales (Semtech, 2021); Lacuna Space (Gadre et al., 2024) con el apoyo de la agencia espacial de UK busca establecer y mantener una red satelital con transceptores LoRA. TinyGS (TinyGS, 2025) es una organización de radioaficionados donde cientos de personas se unen a una red de estaciones terrenas que incluyen la tecnología LoRa para capturar transmisiones de misiones espaciales que utilizan transceptores de esta tecnología. La inclusión de radios LoRa en CubeSats abre la posibilidad de establecer redes de comunicaciones inter-satelitales ad-hoc, empatando con las características limitadas que presentan los nodos que interactúan en estas redes.

2.4 Introducción a redes ad-hoc móviles (MANETs)

Como se ha mencionado previamente este trabajo de investigación se enfoca en la propuesta de protocolos que faciliten el establecimiento de rutas en redes ad-hoc satelitales. Sin embargo, antes de entrar a detalles sobre trabajos que han abordado el tema, ((Toorian et al., 2008), (Saeed et al., 2020a), (Marzioli et al., 2024)), es conveniente revisar brevemente las bases sobre las cuales realizan sus planteamientos. Por lo cual a continuación se presentan los protocolos que se utilizan como referencia en redes ad-hoc móviles (MANETs).

Una red MANET es una red auto configurable que procede de las redes ad-hoc, ideada para ser empleada en nodos móviles los cuales se comunican exclusivamente usando enlaces inalámbricos (Miao et al., 2015). Estas redes no utilizan una infraestructura definida a priori, lo que permite a sus nodos reorganizarse de manera dinámica en la red, lo que implica que su topología es dinámica. En las redes MANET cada nodo no solo funciona como un posible host que genera tráfico, también puede funcionar como un posible enrutador. Este rol dual es necesario dado que la información en este tipo de redes viaja en saltos de “nodo en nodo” hasta encontrar su destino. Dado lo anterior existen desafíos intrínsecos que se presentan la desarrollar redes MANET, sobre todo en sus algoritmos de enrutamiento. Principalmente se plantea que cada nodo debe ser capaz de mantener la información mínima necesaria para poder enrutar el tráfico de la red y los protocolos de enrutamiento deben ser capaces de detectar los cambios dinámicos que ocurren en la topología de la red y adecuarse a estos.

Los protocolos de enrutamiento en redes MANET se dividen en dos vertientes principales, los protocolos reactivos los cuales comienzan a descubrir las posibles rutas justo después de que un nodo necesita enviar información; y los protocolos proactivos los cuales buscan conocer y mantener las rutas de la red a priori de que los nodos necesiten enviar información. Los protocolos considerados estándar de facto son el protocolo reactivo AODV(Perkins & Royer, 1999) y OLSR(Jacquet et al., 2001) como protocolo proactivo. Estos protocolos son utilizados como primeros pasos de validación cuando se diseñan protocolos especializados en redes emergentes, como en los casos de redes FANTEs(Singh & Verma, 2015) y VANETs (Toutouh et al., 2012).

2.4.1 Tipos de protocolos de enrutamiento en redes MANET

Una tarea importante en los algoritmos de enrutamiento en redes MANET es intercambiar información entre los nodos participantes para descubrir a los nodos vecinos. Para esto, los paquetes "Hello" son un elemento básico de un protocolo de enrutamiento MANET. A través de los "Hello" se da el intercambio de información para que los nodos pueden encontrar rutas hacia un destino específico, mantenerlas o reconstruirlas. Los paquetes "Hello" o paquetes de descubrimiento, son tipo broadcast y pueden ser transmitidos a un salto o diseminarse para recorrer toda la red, lo anterior dependiendo del protocolo de enrutamiento.

La forma general en que los protocolos proactivos basan su funcionamiento es en el envío periódico de paquetes de "Hello", y contienen la información de por ejemplo vecinos del nodo que genero el paquete de Hello hasta la batería con la que cuenta el nodo, etc. La información de los paquetes de Hello es procesada por el protocolo de enrutamiento y este comienza a generar o llenar las tablas de enrutamiento, de tal manera que cuando un nodo necesite enviar información o retransmitir se refiera a las tablas para saber que nodo buscar para realizar el salto de la información.

En el caso de los protocolos reactivos, estos se caracterizan por iniciar su proceso de descubrimiento de rutas solo cuando un nodo necesita comunicarse con otro nodo. Usualmente estos protocolos implementan mecanismos como un numero de secuencia en sus paquetes y un identificador de broadcast los cuales buscan disminuir la sobrecarga que un proceso de descubrimiento broadcast ejerce sobre la red.

Existen también protocolos de enrutamiento de redes ad-hoc los cuales implementan mecanismos y técnicas de ambas vertientes de enrutamiento, por ejemplo, el protocolo de enrutamiento "Better Approach to Mobile Ad-hoc Networking" o B.A.T.M.A.N. (Gehreke et al., 2022). El cual, si bien hace uso de paquetes de Hello, no busca que todos los nodos participantes tengan el conocimiento de toda la red, si no que estos solo consideran la dirección de la cual proviene la información que están recibiendo para retransmitir y seleccionan el mejor siguiente salto en base al conocimiento individual de cada nodo.

A continuación, se describen los protocolos de enrutamiento a profundidad considerados de-facto que en las redes ad-hoc

2.4.1.1 Optimized Link State Routing Protocol” (OLSR)

En el año 2001, durante el desarrollo de protocolos de enrutamiento para redes ad-hoc, surgió el protocolo proactivo “Optimized Link State Routing Protocol” (OLSR) (Jacquet et al., 2001). OLSR se basa en el conocimiento del estado de sus enlaces para conocer las mejores rutas de la red para enviar información. Es denominado un protocolo proactivo dado que este intercambia información con otros nodos participantes en la red de manera periódica utilizando mensajes llamados “HELLO”. Es necesario remarcar que OLSR considera que un paquete de información enviado por la red puede contener uno o más mensajes dentro.

La lógica para seleccionar el siguiente salto de la información se basa en la selección de los mejores de nodos vecinos los cuales son categorizados como “Multipoint Relays” o MPRS. En OLSR los nodos que son categorizados como MPRS son los únicos responsables de retransmitir información, no solo la que utiliza la red para viajar si no también la necesaria para el control de tráfico y control de topología.

La técnica o mecanismo de categorizar nodos como MPR busca minimizar la cantidad de sobrecarga que pueden causar las inundaciones de mensajes de control topología y tráfico al ser generados. Por lo cual OLSR define ciertos los cuales solo pueden ser retransmitidos y generados por nodos categorizados como MPR, por ejemplo, los de control de topología (TC), mientras que mensajes de HELLO se mantienen en todos los nodos sean considerados MPRs o no. Por lo anterior, en un escenario ideal la información necesaria que necesitan conocer los nodos para poder enviar un paquete hacia cualquier parte de la red se obtiene cuando todos los nodos seleccionados como MPRs comparten su información sobre el estado de sus enlaces. OLSR utiliza principalmente dos tipos de mensajes, mensajes de “HELLO” y mensajes de control de topología (mensajes de TC), estos últimos para indicar cambios que sufren los enlaces de un MPR a sus nodos vecinos. Una forma de comprender el protocolo OLSR es el conocer el contenido de sus paquetes y los campos que estos contienen (**Figura 12**), estos campos se encuentran ligados a rutinas que se ejecutan buscando dar características al mensaje como aumento de redundancia o descarte de información duplicada, estas rutinas también son llamadas mecanismos. El análisis de un mensaje de OLSR análisis otorga una visión general de los mecanismos que emplea.

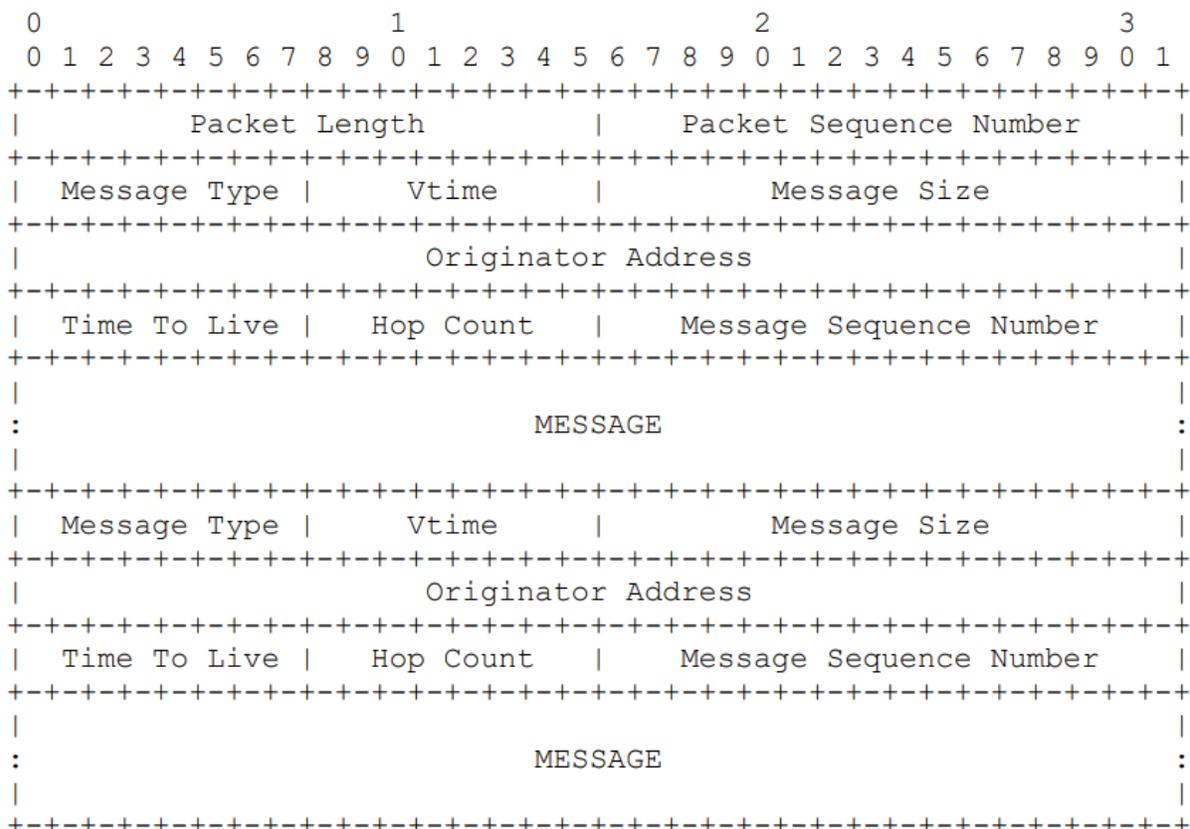


Figura 12 Contenido de un paquete generado por OLSR (Jacquet et al., 2001)

OLSR contiene un número relativamente alto de mecanismos dentro del contenido de sus paquetes, comparado con las alternativas de protocolos como AODV. Los mecanismos usualmente son identificados en un paquete en forma de su propia sección y esta se encuentra definida por la cantidad de Bytes que abarca. Dentro de los mecanismos que están embebidos dentro de los paquetes de OLSR se encuentran:

- Longitud del paquete: Este campo sirve para conocer si un paquete fue recibido completamente.
- Numero de secuencia: Al incluir este campo se puede saber si un paquete fue recibido contiene información desactualizada.
- Tipo de mensaje: indica si el paquete es un Hello o TC.
- Vtime: Este campo indica por cuanto tiempo después de ser recibido el paquete debe de considerarse como válido.

- **Tamaño del mensaje:** En caso de contener más de un mensaje de información contenido en un paquete, este indica donde acaba el mensaje siguiente a este campo.
- **Dirección del originador:** Este campo indica la dirección IP del nodo que origino el mensaje.
- **Time To Live (TTL):** Este campo tiene la cantidad máxima de saltos que un mensaje puede ser retransmitido, con cada salto que del mensaje este debe ser reducido en un 1, cuando el TTL llega a 0 este es descartado.
- **Hop Count:** Indica la cantidad de saltos que ha dado el mensaje, en cada retransmisión este debe de ser incrementado en 1.
- **Message Sequence Number:** Cada nodo que genera un mensaje de información y genera un numero de secuencia asociado únicamente a ese mensaje.

El algoritmo de retransmisión de paquetes y procesamiento de "Hello" de OLSR se puede generalizar en los siguientes pasos:

1. Si el destino que el nodo busca no se encuentra registrado en su tabla de enrutamiento el paquete es descartado.
2. Si se recibe un paquete de Hello que contenga el mismo nodo de origen y la misma secuencia este es descargado.
3. De no haber sido descartado por los pasos anteriores se prosigue a la retransmisión y en caso de ser un paquete de "Hello" este pasa a un proceso de actualización de la tabla de enrutamiento.
4. Antes de ser retransmitido el contador de TTL es reducido en una unidad y el contador de saltos incrementado en una unidad.
5. Se retransmite en broadcast el mensaje.

2.4.1.2 AODV

"Ad-hoc On-Demand Distance Vector" (AODV) (Perkins & Royer, 1999) es el protocolo de-facto en el

enrutamiento reactivo en redes MANET. Este protocolo propone el solo buscar establecer rutas cuando sea requerido, al contrario de OLSR que intenta conocer todas las rutas posibles de la red todo el tiempo. Esta propuesta busca minimizar la sobrecarga que pueden causar los protocolos de enrutamiento proactivos sobre la red y conservar ancho de banda.

AODV opera principalmente con tres tipos de mensajes:

- Route Request (RREQ): Un mensaje de tipo broadcast el cual inicia cuando un nodo necesita descubrir una ruta nueva hacia un destino, estos viajan por toda la red, siendo retransmitidos por lo menos una vez por cada nodo que los escucha.
- Route Reply (RREP): Un mensaje de tipo unicast originado por el nodo destino el cual buscar llegar al nodo que origino un RREQ para la búsqueda de la ruta, este mensaje viaja por los nodos intermedios que permitieron encontrar al nodo destino.
- Route Error (RERR): Este mensaje se inicia como una notificación cuando se detecta que uno de los enlaces entre nodos se ha perdido y por lo tanto los nodos que reciben un REER deberán de marcar la ruta como invalida.

En la **Figura 13**, se observa el contenido de un mensaje en AODV, a comparación de un mensaje de OLSR este tiene una cantidad inferior de campos definidos, no contempla que puedan existir más de un mensaje por paquete enviado y es explícitamente compatible con el protocolo IP a comparación de OLSR el cual solo define un apartado donde se encuentra una dirección sin especificar el protocolo que utiliza.

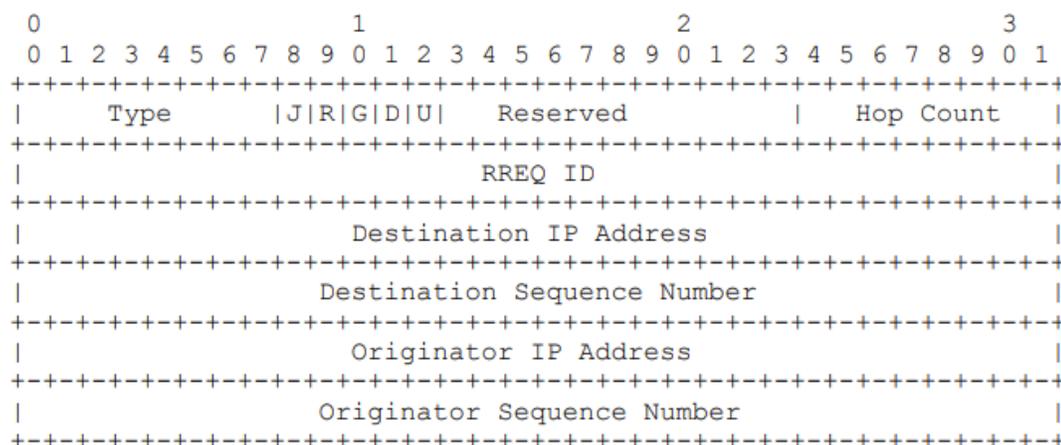


Figura 13 Contenido de un paquete en AODV

Una problemática derivada del uso de un mensaje de broadcast para describir rutas como lo propone AODV es la posibilidad de la creación de bucles, lo anterior dado que, existe una posibilidad de escuchar retransmisiones no recientes y por lo tanto un nodo intente considerar una ruta que ya no sea válida. Para resolver esta problemática cada nodo usa un número de secuencia interno lo que asegura que al momento de un vecino recibir información de otro solo considera como válida aquel que tenga el número de secuencia mayor.

Para el mantenimiento de sus rutas AODV una vez realizado el procedimiento de búsqueda comienza a monitorizar el estado de sus rutas escuchando mensajes de Hello limitados de sus nodos vecinos, cuando este detecta que deja de escuchar sus nodos inicia él envío de mensajes REER. Los nodos que reciben un REER y aun necesitan la ruta invalidada inician un nuevo proceso de RREQ. En los casos donde un nodo detecte un REER erróneo, por ejemplo, por colisiones, este puede iniciar un proceso de reparación donde actualiza desde su posición en la ruta un RREQ con un TTL limitado.

2.4.1.3 B.A.T.M.A.N

Como se mencionó anteriormente en la **sección 2.4.1**, existen protocolos que toman características de ambas vertientes del enrutamiento de redes MANET en busca de ofrecer lo mejor de ambas soluciones en una sola implementación. Tal es el caso del protocolo de enrutamiento "The Better Approach to Mobile Ad hoc Networks" o B.A.T.M.A.N. (Gehreke et al., 2022) el cual fue desarrollado específicamente para redes MANET con el objetivo de priorizar la descentralización y la gestión de conexiones poco estables. B.A.T.M.A.N emplea mensajes periódicos a un salto, los cuales denomina "Originator Messages" (OGMs en inglés), para mantener actualizada la información de enrutamiento de los nodos participantes en la red. Esto le confiere atributos propios de un protocolo proactivo, aunque a diferencia de estos, no persigue el conocimiento total de la red en todos los nodos. Si no, este se enfoca el cálculo de las rutas en asignar responsabilidades individuales a los nodos en forma de la selección del mejor siguiente salto.

En su contenido, un mensaje de tipo OGM incluye la dirección del nodo emisor, una secuencia única, un tiempo de vida y la dirección global o específica de un nodo vecino. Al recibir un paquete OGM, un nodo modifica la dirección del emisor en el contenido del paquete por la suya propia y lo reenvía al nodo emisor de regreso. Esta operación tiene como objetivo verificar la capacidad de establecer un enlace bidireccional con el nodo emisor del mensaje original, al contrario de OLSR que busca enlaces unidireccionales. El

número de secuencia se emplea para evaluar la calidad del enlace, estos son acumulativos y por lo tanto un mayor número de paquetes recibidos exitosamente indica un enlace más estable. Una de las características que B.A.T.M.A.N toma de los protocolos reactivos es que los OGM poseen la capacidad de propagarse por toda la red, como los RREQ de AODV, sin embargo, la información que los nodos albergan de manera interna solo se limita a la necesaria para identificar el siguiente salto en la red.

Uno de los desafíos que surge al intercambiar información periódica al igual que como se presenta en OLSR es el control de la sobrecarga de información por parte del protocolo de enrutamiento para garantizar el funcionamiento adecuado de la red. En el protocolo BATMAN busca resolver esta problemática limitando la generación de paquetes OGM a solo aquellos nodos en los cuales existe una conexión bidireccional.

En la **Figura 14** podemos encontrar el contenido definido para un paquete OGM. Estos paquetes incluyen en una métrica de "Time To Live" (TTL), como se describió en secciones pasadas esta se reduce en una unidad en cada salto para descartar el paquete cuando su contador llegue a 0 e impedir que el paquete circule indefinidamente en la red. Además, para evitar posibles interferencias de mecanismos de capas inferiores como aquellos que generan retransmisiones, los paquetes OGM son identificados por su número de secuencia, y por lo tanto todo número inferior al registrado o duplicado son descartados sin ser retransmitidos.

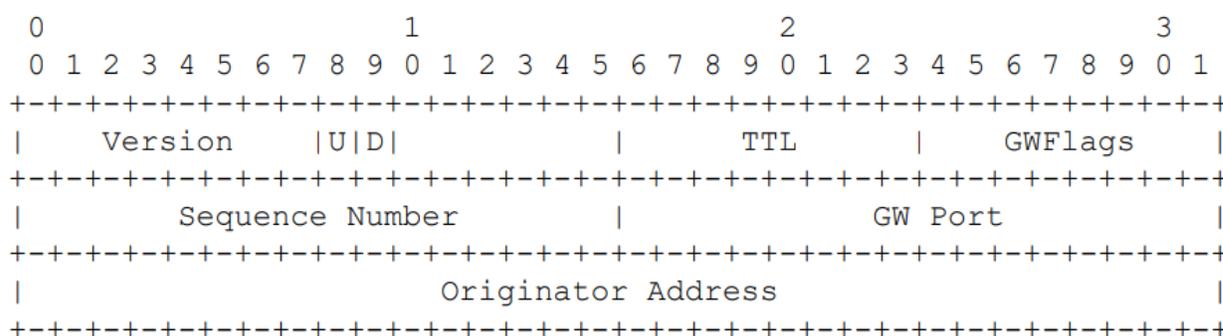


Figura 14 Contenido de un mensaje OGM

En conclusión, el protocolo de enrutamiento BATMAN presenta un diseño que combina las fortalezas de los enfoques proactivo y reactivo en redes MANET, entre un conocimiento general periódico de la red en base al estado bidireccional de sus enlaces y la descentralización de la decisión del siguiente mejor salto de la red. Ambas propuestas que empatan con los desafíos que se presentan en las redes ad-hoc

satelitales, como por ejemplo un alto dinamismo en sus nodos, lo que dificulta el conocimiento completo de la red y empata con una descentralización de la decisión del mejor siguiente salto. Por lo anterior es interesante el considerar que un protocolo híbrido podría ser una opción atractiva para el desarrollo de protocolos de enrutamiento ad-Hoc.

2.4.2 Métricas que se utilizan para comparar desempeños en algoritmos ad-hoc

Una parte importante del refinamiento de cualquier diseño es el entender y definir como medir su desempeño para poder proponer mejoras que permitan superar una métrica establecida. Para los protocolos de enrutamiento no es diferente, la principal propuesta es el uso de métricas las cuales involucran usualmente tiempo de retardo punto a punto, generación de paquetes (sobrecarga) o mensajes y gasto energético.

A continuación, se presentan las métricas más utilizadas para evaluar los protocolos de enrutamiento en redes MANET (Rana et al., 2016):

- Packet Delivery Ratio (PDR): Se determina como el número total de paquetes obtenidos en un destino específico y dividido entre el total de paquetes enviados a este destino (ecuación 1). El resultado se puede presentar en forma de porcentaje (ecuación 2) y esta métrica nos otorga una visión del estado general de la red, por lo general un resultado de porcentaje mayor lleva a indicar que un protocolo es más beneficioso para utilizarse en una red que otro o puede responder las peculiaridades presentes en la red mejor o que otro.

$$PDR = \frac{\text{Paquetes Recibidos en el destino}}{\text{Paquetes enviados}} \quad (1)$$

$$PDR \% = \frac{\text{Paquetes Recibidos en el destino}}{\text{Paquetes enviados}} * 100\% \quad (2)$$

- Average Throughput: Se refiere a la cantidad media de información, usualmente expresados en bits y los cuales son adquiridos en el nodo receptor, esto respecto a un periodo definido (ecuación (3)). Esta métrica es importante dado que otorga una referencia de la cantidad de información que puede navegar por la red y es la métrica base para identificar el “overhead” o sobrecarga que produce un protocolo en la red.

$$\text{Average Throughput} = \frac{(\text{Paquetes recibidos})(\text{Tamaño de los paquetes})}{\text{Tiempo}} \quad (3)$$

- Overhead: También conocida como sobrecarga, es el porcentaje de paquetes de control o mantenimiento generados por un protocolo, respecto a la cantidad de paquetes totales generados en la red (ecuación (4)). Esta métrica nos indica el impacto que genera un protocolo el emplearse sobre la red, por ejemplo, puede presentarse el caso donde se tenga un Average Throughput de 100Mb/s pero en Overhead indicarnos que 80Mb/s del total son de paquetes de control y no de información, por lo que realmente solo tendríamos 20Mb/s de caudal eficaz para aplicaciones.

$$\text{Overhead} = \frac{\text{Paquetes generados} - \text{Paquetes de mantenimiento}}{\text{Paquetes generados}} * 100 \quad (4)$$

- End to end delay (E2E): Se refiere al periodo de tiempo que toma un paquete transmitido desde un nodo de origen hasta un nodo destino (ecuación 5). Esta métrica es un indicador de la capacidad de respuesta de la red para entregar paquetes y ofrecer información sobre la sumatoria de

distintos retardos como de propagación, retardo de procesamiento en el algoritmo de enrutamiento y de colas entre protocolos.

$$E2E = \textit{Tiempo de recido del paquete} - \textit{Tiempo de envio del paquete} \quad (5)$$

2.5 Reportes del trabajo de redes ad-hoc satelitales

Como se indicó en la introducción de este trabajo, existen propuestas actuales en el estado del arte que investigan soluciones y proyectos en el campo de las redes satelitales ad-hoc, centradas en la factibilidad de la utilización de radios como LoRa, protocolos de enrutamiento MANET y diseños de estaciones terrenas.

La investigación de (Ruiz-De-Azua et al., 2018) ofrece un análisis específico en el contexto de las redes ad-hoc satelitales, específicamente en el contexto de las redes federadas. El propósito principal del trabajo es sugerir una solución para las comunicaciones polares para el cual se propone a OLSR como protocolo de enrutamiento a investigar en los escenarios propuestos. La investigación evaluó la factibilidad de implementar un protocolo proactivo en redes ad-hoc satelitales. Es necesario destacar que la principal distinción entre las redes federadas y una red ad-hoc pura radica en que la determinación de rutas de enrutamiento se basa primordialmente en consensos entre los administradores de segmentos de la red, que pueden variar desde un nodo único hasta la totalidad de la red. En este contexto, a pesar de la existencia de una ruta valida identificada por el protocolo de enrutamiento, esta puede ser descartada, dado que los administradores de los nodos podrían carecer de un acuerdo previo, usualmente ligado al costo asociado de sus enlaces entre nodos. El escenario de simulación comprende agrupaciones de nodos con orbitas polares y tres categorías de enlaces inter-satelitales, cada uno con velocidades de transmisión distintas. No se establece una estación terrena específica, sino que se caracteriza una región terrestre entre dos meridianos como una zona de recepción. El trabajo concluye que el rendimiento de un protocolo

de enrutamiento proactivo como OLSR sugiere que el estudio de protocolos de enrutamiento en redes ad-hoc satelitales debería enfocarse en protocolos híbridos.

Una prueba de concepto es presentada en (Ruiz-de-Azua et al., 2019) donde documenta una de las primeras evaluaciones efectuadas por la Unión Europea entre dos satélites CubeSat, en la que se señala la implementación de un protocolo de enrutamiento proactivo MANET no especificado. Se emplearon radios de la banda de UHF, esto evidencia la factibilidad de implementar protocolos de enrutamiento MANET en redes ad-hoc, con un enlace inter-satelital de 1000 km entre nodos.

En relación con las misiones que investigan la utilización de radios LoRa para establecer conexiones terrestres y espaciales, se encuentra un trabajo reportado por (Marzioli et al., 2024). Esta misión evidencia la capacidad de establecer una conexión terrestre-espacio entre un dispositivo LoRa y un CubeSat, centrada en el seguimiento de animales salvajes.

Existen iniciativas colaborativas sin ánimo de lucro, administradas por radioaficionados con un enfoque en radios LoRa, como TinyGS(Kumar & Vadivukkarasi, 2023). Se trata de una red de estaciones terrenas colocadas en torno al globo terráqueo, operando bajo un esquema de comunicación abierta tanto en hardware como en software. Su propósito principal es la recopilación de datos provenientes de satélites utilizando radios LoRa, que abarcan desde mensajes periódicos de actividad hasta información climatológica. Estas redes colaborativas no solo consolidan la adopción de tecnología en las misiones espaciales, sino que también evidencian el empeño comunitario en la promoción de la tecnología. En marzo de 2025, TinyGS cuenta con un total de más de 6900 miembros que gestionan más de 1793 estaciones terrenas.

2.6 Conclusiones del capítulo

La asequibilidad al espacio obtenida por la adopción de estándares de diseño como el CubeSat ha impulsado una oleada de misiones espaciales desarrolladas por entidades como gobiernos, universidades, centros de investigación y aficionados a las telecomunicaciones. Lo anterior ha traído oportunidades y desafíos en el ámbito de las redes espaciales, en particular en el área de redes ad-hoc satelitales colaborativas.

El realizar despliegues de redes ad-hoc satelitales colaborativas trae consigo la oportunidad de permitir aplicaciones que van desde resolver necesidades de sectores industriales como el monitoreo de hielo en las regiones polares para la identificación de rutas viables de comercio en las zonas árticas, necesidades del sector científico como el seguimiento de movimiento de fauna, hasta apoyar en las necesidades que surgen tras situaciones de emergencia como el intercambio de información en zonas azotadas por un tsunami o un terremoto donde las redes de infraestructura terrestre fueron devastadas. Para lograr habilitar las aplicaciones anteriormente mencionadas es necesario el desarrollar protocolos de red que soporten los servicios para estas aplicaciones. En particular protocolos de enrutamiento que consideren las características únicas presentes en este tipo de redes como su movilidad, dinamismo de su topología, predictibilidad, entre otros. Considerando lo anterior, estudios en la literatura exploran la posibilidad de habilitar protocolos de enrutamiento sobre redes ad-hoc satelitales utilizados en redes MANET, por ejemplo, como se presentó anteriormente en (Ruiz-De-Azua et al., 2018) se propone el uso de OLSR sobre un escenario de redes para comunicaciones polares buscando habilitar aplicaciones de monitorización del estado de hielo, y el trabajo posterior en (Ruiz-de-Azua et al., 2019) reporta una prueba de concepto exitosa utilizando las mismas bases. Revisiones generales como (De Azua et al., 2018) analiza las características de protocolos de enrutamiento satelitales concluyen que aún es necesario el desarrollo de un protocolo especializado para redes satelitales que utilicen el estándar CubeSat.

Es necesario mencionar que un paso previo la propuesta de diseño de un protocolo de enrutamiento es el desarrollo de herramientas que permitan analizar su desempeño, esto implica muchas veces realizar desde simulaciones y hasta obtenciones de métricas abordado en el siguiente capítulo 3.

Capítulo 3. Desarrollo de un simulador de redes IoT espaciales

Como se mencionó en capítulos anteriores, la adopción del estándar el CubeSat ha vuelto más accesible el acceso al espacio. Sin embargo, el realizar pruebas de concepto, en especial aquellas que involucran redes de comunicaciones satelitales, aun sale de las posibilidades de entidades públicas o de investigación que buscan iniciar en el estudio y desarrollo de protocolos para este tipo redes. Una herramienta a la cual se ha recurrido para solucionar la problemática anterior es la simulación por computadora. En particular los simuladores de redes como herramienta ofrecen la flexibilidad para idear y probar nuevos protocolos de red o propuestas de cambios en los protocolos existentes en un entorno controlado y reproducible.

En el caso del presente trabajo de investigación, no se encontró un simulador disponible de código abierto que permitiera la simulación de diferentes protocolos de enrutamiento para redes satelitales ad-hoc. El contar con una herramienta de este tipo no solamente es necesaria para lograr los objetivos planteados en esta investigación, sino también es una herramienta que será de gran utilidad la comunidad académica que se encuentre estudiante el área de redes ad-hoc satelitales.

Bajo la premisa anterior, una de las principales contribuciones de este trabajo de tesis consiste en el desarrollo de un simulador para redes ad-hoc satelitales basado en la plataforma OMNET++, (Varga & Hornig, 2008) el cual se describe a continuación.

3.1 OMNET ++

Desde 1997, OMNET++ (Varga & Hornig, 2008) ha estado disponible al público como un simulador de entornos basados en eventos de código abierto. Este software se ha utilizado en diversos campos, como el análisis de colas en redes de computadoras, redes terrestres inalámbricas ad-hoc, simulaciones de procesos industriales, equipos de conmutación óptica y redes de almacenamiento (Varga & Hornig, 2008). En un principio, el diseño de OMNET++ se basó en la necesidad de simular sistemas distribuidos en escenarios donde se asumía que los nodos contaban con multiprocesadores. Sin embargo, la filosofía y diseño inicial de OMNET++ no se enfocó en abordar este escenario exclusivamente, ya que se incluyó la capacidad de integrar conjuntos de librerías especializadas, conocidas como frameworks, y no solamente componentes especializados para un solo tipo de escenario a simular (Virdis, 2019).

OMNET++ proporciona las funciones base para interactuar con un administrador de eventos interno, de tal modo que se pueden incluir diferentes modelos contenidos en módulos para simular un escenario particular. Por ejemplo, para simular un escenario de red MANET existen diferentes módulos para simular transceptores, mecanismos de acceso al medio, protocolos de enrutamiento, protocolos de sesión, modelos de movilidad, estado de los nodos, capas de aplicación, etc. La metodología de simulación que propone OMNET++, es emplear un intercambio de mensajes entre los distintos módulos con la finalidad de recrear eventos en un escenario. Por ejemplo, un módulo que contenga un modelo de velocidad puede comunicarse con un módulo que contenga un modelo de viento y en respuesta modificar su velocidad o dirección.

Los módulos pueden ser simples o compuestos, un módulo simple es la entidad más pequeña que define OMNET++ para representar un modelo y se busca que definan por completo un fenómeno en particular. Por ejemplo, desde un simple proceso de prendido o apagado, hasta definir comportamientos basados en de procesos estocásticos, (p.ej. modelos de canal radio). Un módulo compuesto agrupa un conjunto de módulos simples, un ejemplo de un módulo compuesto que representa un punto de acceso de Wifi se muestra en la **Figura 15**. Este módulo compuesto incluye módulos que simulan movilidad (mobility), el tipo de conector (eth), interfaces inalámbricas (WlanInterfaces), entre otros. Esta posibilidad de combinar módulos facilita la creación de escenarios con redes complejas mediante la reutilización de módulos simples.

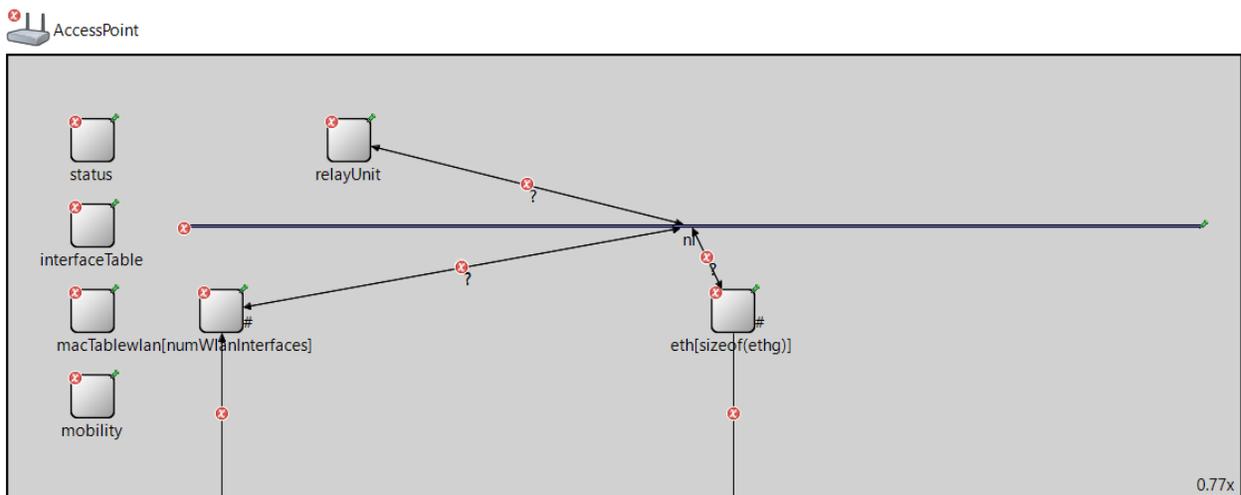


Figura 15 Captura de un módulo compuesto que define un punto de acceso Wifi.

Los módulos de OMENT++ se desarrollan en dos lenguajes de programación en conjunto. El primero es NEED el cual es el lenguaje de OMNET++ usado principalmente en su ambiente gráfico y donde se establecen las características e interconexiones de los módulos presentes en un escenario. El segundo es C++ usado para la programación de las rutinas y comportamientos del módulo.

Un experimento en OMNET++ está contenido en un directorio donde se encuentra un archivo NEED donde se define un escenario y dentro de este, se colocan los módulos que interactuarán en el experimento. Las características de los módulos, como la tasa de envío de paquetes de una aplicación pueden ser modificadas través de las definiciones un archivo de configuración de nombre "Omnetpp.ini" (Figura 16).

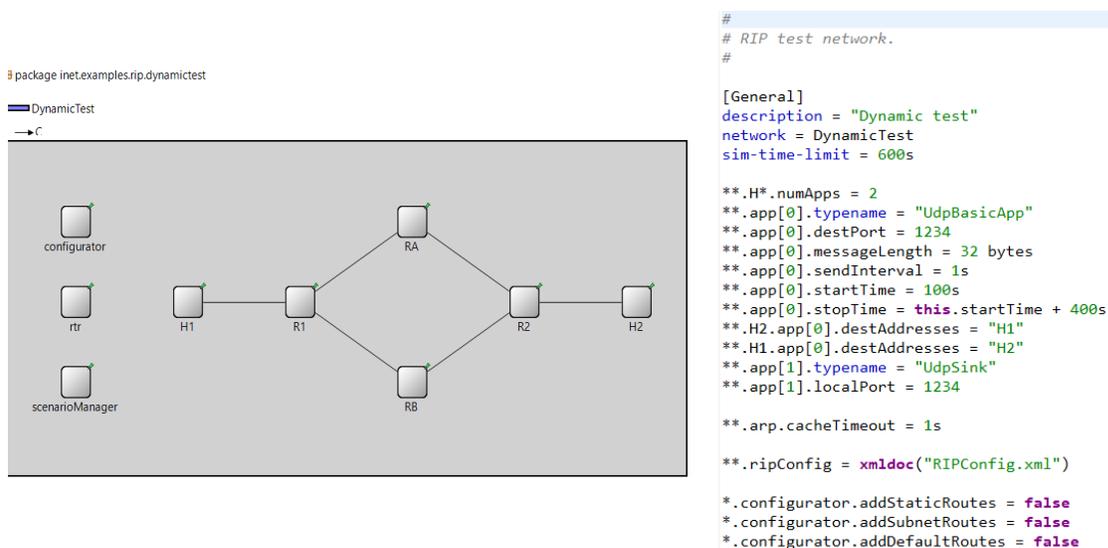


Figura 16 Configuración de ejemplo de un escenario de una red de infraestructura, del lado derecho la representación gráfica del archivo. NEED y del lado izquierdo la configuración de sus parámetros del archivo omnetpp.ini

3.2 Frameworks INET e INETMANET

Dentro del conjunto de frameworks desarrollados para OMNET++ existe uno especializado en redes MANET llamado INET (Mészáros et al., 2019). INET es el framework más popular y de mayor antigüedad que agrupa modelos de protocolos de comunicación y movilidad diseñados para redes inalámbricas. INET utiliza la integración de módulos simples que operan en diferentes niveles de la especificación de capas definidas por el modelo OSI. Dentro de las capas integradas en INET se encuentran las capas: física, de

enlace de datos, de red, de transporte y de aplicación. Así, dentro de los módulos incluidos en INET podemos encontrar implementaciones de protocolos como IPv4 e IPv6, TCP, UDP, y tecnologías de comunicación inalámbrica como 802.11.

INET sigue la filosofía de OMNET++ al ser de código abierto, lo que permite que la comunidad realice contribuciones externas usando propuestas en un repositorio en línea. Algunas de estas contribuciones han dado lugar al desarrollo de frameworks especializados en variaciones de redes MANET, como el framework SimuLTE (Viridis et al., 2014) para redes celulares y el framework INETMANET (Ariza & Inzillo, 2019) para redes ad-hoc con enfoque en protocolos de enrutamiento.

INETMANET tiene como objetivo proporcionar herramientas para simular y evaluar el desempeño de redes MANETs. De esta forma INETMANET incluye módulos que permiten simular el comportamiento elementos que van desde los transceptores utilizados para la formación de este tipo de redes, hasta algoritmos de enrutamiento especializados para la formación de redes ad-hoc. Así, INETMANET integra en el entorno de OMNET++ e INET diversos modelos de tecnologías de comunicación como el IEEE 802.11a/g/e y el IEEE 802.15.4, junto con protocolos de enrutamiento como AODV, DYMO, OLSR, DSR, BATMAN, SAOS y DSDV.

3.3 ST-INETMANET

Considerando que no se encontró disponible una herramienta de código libre que permitiera la simulación de redes ad-hoc satelitales una de las principales aportaciones de este trabajo de tesis es el desarrollo de dicha herramienta. Así, en este trabajo se desarrolló un framework para simulación de redes satelitales basado en INETMANET al cual se llamó ST-INETMANET. En este framework se incluye el desarrollo de módulos que permiten comunicación inter-satelital, módulos de movilidad satelital, así como módulos compuestos que representan nodos con características del estándar CubeSat orientados a ser utilizados en redes satelitales ad-hoc. A continuación, se describen dichos módulos.

3.3.1 Módulos desarrollados que componen a ST-INETMANET

Cuando se habla de un modelo de capa física en redes satelitales, es necesario tomar en consideración ángulos de elevación para los nodos que se encuentren sobre la superficie terrestre, así como distancias

de entre nodos satelitales que representen el esparcimiento de los nodos en el espacio. Para resolver la problemática anterior se realizó el desarrollo de un módulo compuesto de tres módulos simples. El primero es un módulo de comunicación basado en distancia del tipo Unit-disk (Clark et al., 1990), en donde se calculan las distancias usando proyecciones en tres dimensiones sobre un plano. Esta estrategia se sigue debido a que ha demostrado ser una abstracción válida cuando el objetivo principal de la simulación es el análisis de comportamientos y desempeño de protocolos de comunicación y no el desempeño específico ofrecido por una solución de capa física particular (Kuhn et al., 2003). El segundo es un módulo de cálculos de distancia en base a Geodesy (Lu et al., 2014), la ciencia que estudia el trasfondo de mediciones conforme las características de orientación, fuerza gravitacional y morfología del planeta tierra. El tercero es un módulo de cálculo de ángulos de elevación entre los nodos terrestres y espaciales, buscando conocer la viabilidad de los enlaces de comunicación entre nodos.

3.3.2 Conjunto de módulos de movilidad STMobilty

Un desafío al trabajar con redes en el espacio y en general con satélites a través de simulación, es el poder modelar adecuadamente la peculiaridad del movimiento de los objetos orbitando la Tierra. Un acercamiento simple que se podría implementar en OMNET++ es el definir en primera instancia una esfera en un ambiente tridimensional de OMNET++ y representar a la Tierra. Después se podría definir una segunda esfera con el mismo centro y mayor radio, sobre cuya superficie se colocaría el nodo espacial para que al darle movimiento se cree la ilusión de que el nodo está en órbita sobre la esfera menor. Sin embargo, esta no sería una aproximación adecuada debido que no se estaría considerando la complejidad del movimiento de objetos en órbita. Es por esta razón que ha sido necesario el desarrollo de modelos como SGP4 y sus variantes, tal cual se mencionó en el Capítulo 2. Por ejemplo, dentro de las variables que se consideran en estos modelos se encuentran la velocidad del satélite, su inclinación, su altura, la atracción gravitatoria, entre muchas otras.

Con el mejor de nuestro conocimiento, hasta el desarrollo del este trabajo de investigación, no existen implementaciones en algún simulador de redes de código libre que incluya algún modelo de movilidad espacial para objetos en órbita dentro de sus módulos. Por esta razón, una de las contribuciones de este trabajo de tesis consistió en la integración del modelo SGP4 dentro de un conjunto de módulos de OMNET++, tal que con dichos módulos es posible representar nodos de red cuyo patrón de movilidad sigue una representación realista de objetos en órbita.

Como se mencionó en el Capítulo 2, SGP4 funciona a través de archivos TLE para calcular el movimiento de un objeto que tiene una órbita alrededor de la Tierra. Los TLE se actualizan en periodos de 24 horas como máximo para mantener su validez. Para obtener los datos de movilidad de un objeto en el espacio es necesario alimentar en una implementación del modelo SGP4 la información contenida en su TLE correspondiente. Con esta información, una implementación de SGP4 arroja como resultado parámetros que pueden ser utilizados para simular la movilidad del nodo en un simulador como OMNET++, tales como:

- Altitud respecto al centro de la Tierra.
- Latitud y longitud de la proyección del objeto sobre la superficie terrestre.
- Velocidad del objeto en el espacio.
- Inclinación del objeto respecto a su órbita.
- Periodo de órbita (“epoch”).

Como se mencionó en el Capítulo 2, la implementación del modelo SGP4 más utilizada se publica por la parte de la NORAD en la forma de un programa ejecutable y librerías compiladas en lenguaje C para diferentes sistemas operativos. Esto no hace posible la incorporación directa de la implementación de la NORAD++ en un simulador como OMNET++. Sin embargo, existen proyectos de código abierto que, a través de la documentación original de SGP4 e ingeniería inversa, recrean efectivamente el comportamiento de este modelo. La implementación de código abierto más referida es la publicada por David Vallado (Vallado & McClain, 2001) y su variante por Michael F. Henry - Orbit Tools. Esto abre la oportunidad de incorporar nativamente el modelo SGP4 en simuladores como OMNET++.

El implementar un modelo de movilidad en OMNET++ no es una tarea trivial, ya que es necesario considerar tres puntos importantes. El primero es que en OMNET++ los nodos tienen de manera individual un módulo dedicado a su movilidad, por lo cual no es viable programar un módulo central que se encargue de la movilidad de todos los nodos participantes en una simulación. El segundo punto es que debido a la filosofía seguida en INETMANET (en la cual se basa nuestro desarrollo), los módulos de movilidad correspondientes a nodos diferentes deben de ser capaces de comunicarse entre sí dentro del ambiente de simulación. Esto con el objetivo de calcular distancias, posicionamiento relativo, etc., lo cual es

necesario para que otros módulos puedan determinar parámetros como la conectividad entre nodos. Un tercer punto es considerar la eficiencia en tiempo de procesamiento del cálculo de posición, esto debido a que la movilidad es una característica de los nodos que se busca sea calculado lo más frecuente posible. Por ejemplo, en nodos terrestres no motorizados la velocidad pudiera considerarse despreciable para realizar cálculos de conectividad entre nodos. Sin embargo, en el espacio los nodos se mueven a más de 7 km/s (cuando se tienen alrededor de 500 km de altura) lo cual implica que dos nodos pueden salir de su rango de transmisión válido de un segundo a otro.

En este trabajo de investigación se desarrolló un conjunto de módulos que interactúan entre sí para incorporar el modelo SGP4 en OMNET++ el cual ha sido nombrado STMobility. A continuación, se presenta una descripción breve de los módulos que integran el conjunto STMobility acompañado de un diagrama que muestra su interacción básica (**Figura 17**) cuando un nodo en la simulación requiere transmitir un paquete:

- **Módulos SatelliteMobility y GSMobility:** Estos módulos deben de estar incorporados en los nodos para hacer los cálculos pertinentes respecto a sus distancias con otros nodos de acuerdo con el modelo de movilidad SGP4. Estos módulos son invocados cuando un evento de simulación es disparado debido a la transmisión de un paquete por parte de un nodo, una estación terrena o ambos. Los módulos SatelliteMobility y GSMobility son los responsables de cargar el TLE correspondiente para nodos espaciales y estaciones terrenas respectivamente. Estos TLE son recuperados de una tabla que tiene los TLEs de los nodos considerados en una simulación y son alimentados en forma de texto plano al módulo GP4Updater. El módulo GP4Updater le regresa a cada nodo su posición actual en el tiempo virtual actual de la simulación siguiendo el modelo SGP4. Estos módulos también son responsables de las actualizaciones en el ambiente gráfico del simulador. El funcionamiento y consideraciones de estos módulos se proporcionan en la Subsección 3.3.3.
- **Modulo GP4Updater:** Cuando un evento de transmisión de paquete es disparado por uno de los nodos, este módulo se encarga de invocar las rutinas necesarias para los cálculos de distancias tanto espacio-espacio como espacio-tierra o tierra-espacio. Para esto, el módulo recibe como entrada los TLEs de los nodos en la simulación de manera secuencial (entregados por los módulos SatelliteMobility y GSMobility), para a su vez alimentar secuencialmente al módulo TLEUpdater para recalcular las posiciones de los nodos para atender el evento disparado. El módulo regresa

las posiciones al módulo SatelliteMobility (o GSMobility) de cada nodo en la simulación. Se refiere al lector a la Subsección 3.3.4 en donde se describe con mayor detalle el funcionamiento y consideraciones de este módulo.

- **Módulo TLEUpdater:** Este módulo gestiona la actualización dinámica de las variables de movilidad de los nodos (posición, velocidad, entre otros parámetros orbitales) en función del tiempo virtual de la simulación. Para ello, utiliza el tiempo de inicio de la simulación y el tiempo transcurrido desde dicho instante como referencia temporal. El módulo opera bajo demanda: cuando el módulo GP4Updater detecta un evento de transmisión de paquete, envía una solicitud al módulo TLEUpdater para recalcular las variables. Esta solicitud incluye como respuesta los TLEs de los nodos, obtenidos previamente de los módulos SatelliteMobility y GSMobility.
- El TLEUpdater coordina entonces con los modelos de movilidad anteriormente precargados y devuelve un conjunto estructurado de datos (coordenadas ECI, vectores de velocidad, etc.), el TLEUpdater consolida en un formato estandarizado. Finalmente, estas variables actualizadas se envían de vuelta al GP4Updater para su uso en los cálculos de distancia o ser entregadas a los módulos SatelliteMobility/GSMobility para actualizar el ambiente gráfico. Para un análisis detallado de los algoritmos y restricciones de este módulo, véase la Subsección 3.3.5.
- **Modelos de movilidad STNoradSGP4, STVallado y STOrbitTools:** Estos módulos encapsulan las implementaciones específicas de los modelos matemáticos y herramientas necesarias para calcular las variables de movilidad orbital. El módulo STNoradSGP4, STVallado y STOrbitTools cargan en memoria rutinas de una implementación diferente del modelo de movilidad NORAD SGP4 para predecir posiciones y velocidades de satélites en órbitas LEO a partir de un TLE. Estas rutinas son utilizadas por el módulo TLEUpdater para actualizar las variables de movilidad de los nodos en la simulación. Para detalles técnicos sobre la configuración y parámetros de estos modelos, consúltese la subsección 3.3.5.

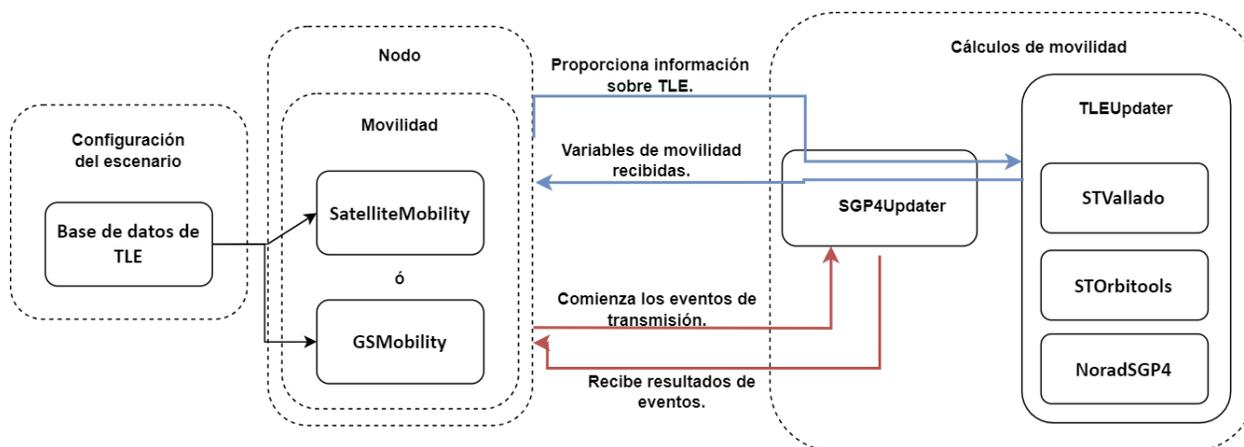


Figura 17 Diagrama del conjunto de módulos que conforman STMobility

3.3.3 Módulos SatelliteMobility y GSMobility

Como se mencionó anteriormente la implementación del modelo de movilidad SGP4 en el simulador requiere como primer paso fundamental la disponibilidad de un archivo TLE que alimente las rutinas relacionadas al cálculo de movilidad. Este requisito inicial se integra con la metodología de interacción de INET/INETMANET, la cual se basa en abstracciones generales que permiten homogeneizar las interacciones entre nodos y sus módulos. Por ejemplo, para cálculos de distancia o posicionamiento, se invocan los módulos específicos de movilidad designados en cada participante de la simulación. En este trabajo, cuando un nodo requiere hacer uso del módulo SGP4, es necesario incorporar los módulos SatelliteMobility para nodos espaciales y GSMobility para nodos del tipo estaciones terrenas, obteniendo compatibilidad con la metodología de simulación de INET/INETMANET.

Estos módulos, al estar definidos en los nodos, poseen la capacidad para interactuar con el directorio raíz de ejecución de la simulación, lo que facilita el acceso a archivos externos como bases de datos no definidos nativamente en el entorno de OMNENT++. El funcionamiento de los módulos con archivos TLE se puede definir para dos escenarios:

1. **Caso de un TLE contenido en un archivo único:** El módulo correspondiente (SatelliteMobility o GSMobility) localiza el archivo de TLE configurado en las variables del nodo dentro del directorio raíz, carga su contenido en un objeto C++, y lo envía al módulo SGP4Updater para su procesamiento posterior por parte de TLEUpdater. El módulo almacena las variables de movilidad

resultantes tras la respuesta del módulo TLEUpdater proporcionada a través de SGP4Updater para su posible visualización en el ambiente gráfico.

2. **Caso de múltiples TLE contenidos en un archivo:** En este caso los módulos SatelliteMobility y GSMobility no cargan la información de los TLEs y la mandan al módulo SGP4Updater directamente. En su lugar, el sistema enumera los TLEs según su orden de aparición en el archivo y asigna cada entrada encontrada con el nodo correspondiente haciendo uso del ID asignado durante la carga automática de un escenario (propio de OMNET++). Mediante iteraciones secuenciales sobre los TLEs, se envía cada conjunto de líneas al módulo TLEUpdater a través del módulo SGP4Updater. Los resultados se envían al módulo SatelliteMobility (o GSMobility) de cada nodo correspondiente conservando los datos para su posible visualización.

Cabe notar que en ambos casos los módulos SatelliteMobility y GSMobility guardan los datos de posición calculados tras cada actualización por TLEUpdater entregados a través de SGP4Updater. La posición de cada nodo se actualiza tras un evento en la simulación, por lo cual estos módulos proporcionan la información de posición requerida por módulos como el de radio y por el ambiente gráfico para actualizar la posición de los nodos en el entorno visual.

La actualización grafica de posiciones se realiza mediante una proyección tridimensional simplificada en el plano Z. Considerando la resolución del entorno visual (por ejemplo, 1080x1920 px.), y conociendo las variables del nodo a insertar en el ambiente grafico (*latitud* y *longitud*) es posible realizar transformaciones escalares adaptadas a las dimensiones del área de visualización de la siguiente manera:

$$PosicionEnAmbienteGrafico_x = \left(\frac{Pantalla_x}{360}\right) * longitud + \left(\frac{Pantalla_x}{2}\right) \quad (6)$$

$$PosicionEnAmbienteGrafico_y = -\left(\frac{Pantalla_y}{180}\right) * latitud + \left(\frac{Pantalla_y}{2}\right) \quad (7)$$

3.3.4 Módulo de cálculo de distancia GP4Updater

Siguiendo la metodología de INETMANET para implementar modelos de movilidad, fue entonces necesario el desarrollar un módulo cuya función principal es ejecutar las rutinas de cálculo de distancias entre nodos y actualizar sus variables de movilidad. Estas métricas de distancia son fundamentales para los modelos de transmisión, ya que permiten determinar, por ejemplo, la atenuación de una señal al ser recibida por un nodo basándose en la distancia al nodo emisor. En particular, para el modelo UnitDisk utilizado en esta investigación, esta es una variable esencial. Cabe destacar que, en escenarios espaciales, una única ecuación de distancia no es suficiente debido a la diversidad de nodos involucrados. Por ejemplo, la distancia entre un nodo terrestre y uno espacial implica consideraciones distintas que para la distancia entre dos nodos espaciales. Además, en estos escenarios es crucial calcular el ángulo de elevación de un nodo espacial desde la perspectiva de un nodo terrestre.

Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores, en este trabajo se desarrolló el módulo GP4Updater, integrado dentro del grupo de módulos de STMobility. Las consideraciones que guiaron el diseño e implementación de GP4Updater se detallan en las siguientes subsecciones.

3.3.4.1 Cálculo de distancia para nodos en el caso espacio-espacio.

Cuando dos nodos se encuentran en el segmento espacial y es necesario determinar la distancia entre ellos, pueden aplicarse cálculos de trigonometría tridimensional. Este enfoque es válido porque estos nodos pueden considerarse en espacio libre, sin obstrucciones como las que podría presentar la curvatura terrestre en el caso de nodos terrestres. Por lo tanto, al conocer sus posiciones dentro de un marco de referencia cartesiano, es posible calcular directamente la distancia entre ambos nodos.

Como se mencionó en el Capítulo 2, el modelo SGP4 utiliza un marco de referencia con origen en el centro terrestre, donde el sistema de coordenadas está fijo respecto a las estrellas y define cada punto mediante latitud, longitud y altitud. Para calcular la distancia entre dos nodos espaciales, es necesario primero convertir las coordenadas geodésicas (lat, long, alt) a un sistema cartesiano equivalente (X, Y, Z), tal cual se describe en (Vallado & McClain, 2001). En particular, el módulo GP4Updater utiliza las siguientes ecuaciones para la transformación de coordenadas geodésicas a cartesianas:

$$X = (\text{RadioTerrestre} * \cos(\text{latitud}) * \cos(\text{longitud})) \quad (8)$$

$$Y = (\text{RadioTerrestre} * \cos(\text{latitud}) * \text{sen}(\text{longitud})) \quad (9)$$

$$Z = (\text{RadioTerrestre} * \text{sen}(\text{latitud})) \quad (10)$$

$$d = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2} \quad (11)$$

3.3.4.2 Uso de Geodesy para la obtención de distancias tierra-espacio.

Como se mencionó en la Subsección 3.3.4, las consideraciones para el cálculo de distancias varían dependiendo del tipo de nodos que están interactuando entre si dentro del marco de una simulación. Para el caso específico del cálculo entre estaciones terrenas y nodos satelitales, este trabajo propone el uso de Geodesy (Lu et al., 2014), ciencia que estudia la forma geométrica, orientación espacial y campo gravitacional de la Tierra. En el contexto del diseño satelital, la Geodesia resulta particularmente útil para calcular coordenadas sobre la superficie terrestre y determinar distancias entre puntos geográficos, considerando la curvatura planetaria en un espacio tridimensional cerrado y cíclico.

El enfoque geodésico plantea que todo cálculo de distancias, incluyendo entre puntos en la superficie terrestre, debe realizarse mediante sistemas de referencia esféricos tridimensionales. En este trabajo de investigación, los fundamentos de trigonometría esférica de Geodesy se aplican para dos escenarios principales: el cálculo de distancias entre estaciones terrenas; y el cálculo de distancias entre estaciones terrenas y satélites. Este último caso se basa en el principio cual que, si se conoce la distancia entre una estación terrena y la proyección de un satélite sobre la superficie terrestre, entonces es posible determinar la distancia real al satélite mediante trigonometría de triángulos. La metodología propuesta consta de tres etapas:

1. Obtención de posiciones

- a. Para estaciones terrenas: latitud y longitud.
 - b. Para satélites: latitud, longitud y altitud.
2. Cálculo de la distancia entre la estación terrena y la proyección del satélite en la superficie de la Tierra.
 3. Determinación de la distancia estación-satélite mediante funciones trigonométricas triangulares.

Las posiciones requeridas se obtienen invocando el módulo SatMobility/GSMobility dentro de cada nodo en cualquier instante de la simulación. Estos datos se proporcionan en coordenadas de latitud, longitud y altitud (respecto a la superficie terrestre). La proyección de un satélite sobre la superficie de la Tierra se define considerando su posición con altitud cero almacenadas en el módulo de SatMobility/GSMobility de cada nodo. La distancia entre esta proyección y una estación terrena se calcula mediante el concepto geodésico fundamental del "Great Circle".

El "Great Circle" permite calcular la distancia más corta entre dos puntos sobre una superficie esférica, considerando que en Geodesia existen dos posibles distancias entre puntos según la dirección de cálculo (Figura 16). Matemáticamente, un "Great Circle" se define como la intersección de una esfera con un plano que contiene su centro, generando arcos que conectan puntos sobre la esfera. Cuando se consideran dos puntos (A y B), se generan dos arcos posibles ($A \rightarrow B$ y $B \rightarrow A$) correspondientes a las diferentes direcciones de recorrido sobre la superficie esférica. Para el caso de una estación terrena (A) y la proyección de un satélite (B), se selecciona siempre el arco de menor longitud. Un ejemplo de varios Great Circle se puede observar en la **Figura 18**.

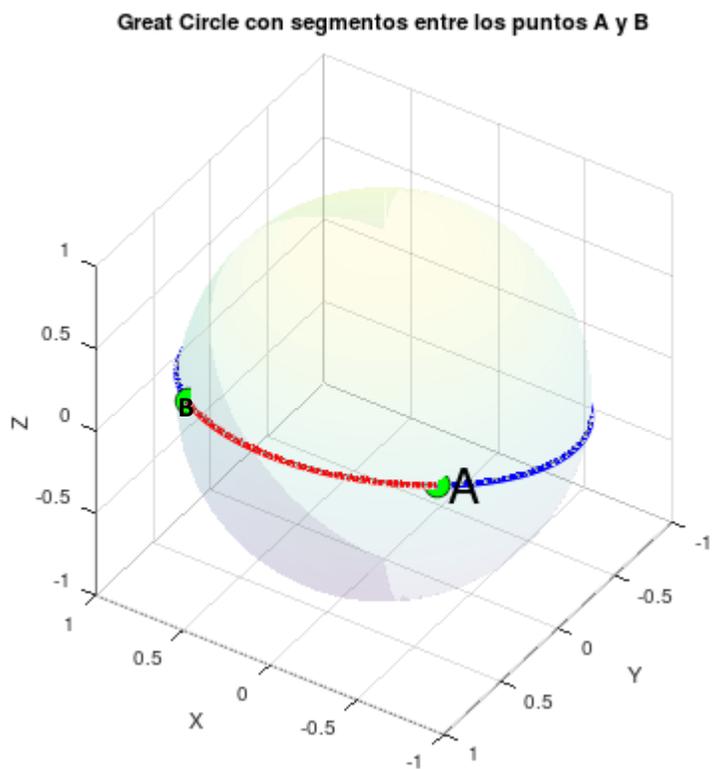


Figura 18 Diagrama ilustrativo donde se observa un Great Circle y sus segmentos entre los puntos A y B.

Finalmente, con la distancia del "Great Circle" determinada, la distancia real entre la estación terrena y el satélite en órbita se calcula aplicando trigonometría básica al triángulo formado por: (1) la distancia superficial, (2) la altitud del satélite, y (3) la línea recta que los conecta en el espacio tridimensional.

3.3.4.3 Cálculos de ángulos de elevación

Como se mencionó anteriormente, el ángulo de elevación entre una estación terrena y un satélite es una variable crítica para los modelos de transmisión en redes satelitales. Aunque un satélite pueda estar dentro del rango de transmisión de una estación, un ángulo de elevación inadecuado puede impedir la correcta recepción de información. Por ejemplo, en estaciones terrenas LoRa típicas exploradas en la literatura el ángulo mínimo de elevación requerido es de 10° . Por lo tanto, las transmisiones durante los pases de un satélite sobre una estación terrena con ángulos inferiores no deberían considerarse exitosas en una simulación.

Mientras que calcular distancias entre puntos en un mismo sistema de referencia es un caso bastante estudiado, el determinar el ángulo de elevación respecto al horizonte no es trivial. Por ejemplo, trabajos como (Gongora-Torres et al., 2023) y (Guo & Wang, 2025) continúan explorando definiciones. Lo anterior motivó el desarrollo de un módulo especializado capaz de determinar cuándo una estación terrena tiene línea de vista con un satélite, el cual se basa en calcular los ángulos mínimos y máximos de elevación. Dado que se utilizan archivos TLE para calcular la movilidad satelital en las herramientas de simulación desarrolladas, es posible conocer en cada evento atendido la posición (latitud, longitud y altitud) de cada satélite. De igual forma sucede con las estaciones terrenas definidas en un escenario. Esta información permite trasladar el sistema de referencia usado por el modelo SGP4 (“True Equator Mean Equinox”) hacia marco de referencia tridimensional centrado en la Tierra, donde el punto $P(0,0,0)$ es el centro de la Tierra, para después utilizar herramientas de rotación para lograr calcular los ángulos de elevación de un nodo respecto a una estación terrena.

Una herramienta fundamental para el propósito expresado anteriormente son las matrices de rotación, que permiten girar sistemas en un marco cartesiano tridimensional. Estas matrices están definidas como:

$$\mathbf{R}_x(\theta) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\text{sen } \theta \\ 0 & \text{sen } \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \quad (12)$$

$$\mathbf{R}_y(\theta) = \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 & \text{sen } \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\text{sen } \theta & 0 & \cos \theta \end{pmatrix} \quad (13)$$

$$\mathbf{R}_z(\theta) = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\text{sen } \theta & 0 \\ \text{sen } \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (14)$$

y son ampliamente utilizadas en geometría, física e informática para calcular rotaciones antihorarias alrededor de cada eje principal.

3.3.4.4 Metodología para la obtención de ángulos de elevación

Se desarrolló una estrategia que consiste en aplicar rotaciones secuenciales para posicionar cada estación terrena en un caso especial que simplifique los cálculos del ángulo de elevación de cada nodo satelital respecto a dicha estación. Estos cálculos se encuentran embebidos en rutinas del módulo GP4Updater, el cual puede ser llamado por los módulos SatelliteMobility/GSMobility y por los módulos de radio de cada nodo. En particular los módulos de radio requieren la distancia y ángulos de elevación entre nodos terrestres y satelitales para calcular posibles pérdidas por propagación y en su caso las probabilidades de recepción de un paquete correspondientes. Note que la probabilidad de recepción de paquetes entre una estación terrena un nodo espacial será igual a cero si el ángulo de elevación del nodo satelital respecto a la estación terrena es inferior a 10° .

Bajo las consideraciones anteriores, el cálculo del ángulo de elevación se realiza obteniendo en primera instancia los ángulos de rotación, θ_1 y θ_2 , necesarios para trasladar la estación terrena hacia una posición la cual permita simplificar el cálculo del ángulo de elevación respecto al horizonte de la estación terrena. En particular, este caso específico se obtiene al posicionar la estación terrena justo sobre el polo norte $P(90^\circ \text{ lat.}, 90^\circ \text{ long.})$. Una vez que se obtienen estos ángulos, los mismos son utilizados para rotar cada nodo espacial de tal manera que mantengan sus posiciones relativas respecto a la estación terrena una vez que está ha sido trasladada al $P(90^\circ \text{ lat}, 90^\circ \text{ long})$. Finalmente se calculan los ángulos de elevación de los nodos espaciales respecto a la estación terrena. En particular, este procedimiento se realiza ejecutando los siguientes pasos:

1. **Primera rotación.** Traslado del punto que representa a la estación terrena (ES_{vector}) para que se posicione sobre el eje x . En primera instancia se hace la conversión de coordenadas geodésicas hacia coordenadas cartesianas para la estación terrena obteniendo el vector:

$$ES_{\text{vector}} = (x_{\text{vectorES}}, y_{\text{vectorES}}, z_{\text{vectorES}}) \quad (15)$$

Después, el ángulo de rotación θ_1 se calcula como se presenta en la ecuación 16 y se aplica la primera rotación como se presenta en la ecuación 17:

$$\theta_1 = -\text{atan} \frac{y_{\text{VectorES}}}{x_{\text{VectorES}}} \quad (16)$$

$$\mathbf{R}_z(\theta_1) \text{ES}_{\text{Vector}} = \text{ESRZ}_{\text{Vector}} \quad (17)$$

Donde \mathbf{R}_z es la matriz dada en la ecuación (13), y $\text{ESRZ}_{\text{Vector}}$ es el vector resultante de aplicar la primera rotación. En la **Figura 19** se muestra el efecto de esta rotación para una estación terrena en Latitud = 31.9675° y Longitud = 116.665°.

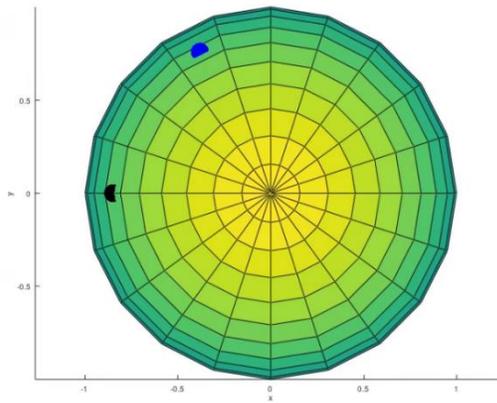


Figura 19 Representación de las rotaciones y sus efectos en la posición, donde el punto azul es una estación terrena con coordenadas latitud = 31.9675° y longitud = 116.665° y el punto oscuro es el resultado de la primera rotación con ángulo θ_1 .

2. **Segunda rotación:** Traslado del nuevo punto $\text{ESRZ}_{\text{Vector}}$ para que se posicione sobre el eje Z. El ángulo de rotación θ_2 se calcula como se presenta en la ecuación 18 y se aplica una segunda rotación como se presenta en la ecuación 19:

$$\theta_2 = -\text{atan} \frac{x_{\text{ESRZ}_{\text{Vector}}}}{z_{\text{ESRZ}_{\text{Vector}}}} \quad (18)$$

$$R_y(\theta_2) \text{ESRZ}_{\text{Vector}} = \text{ESRZY}_{\text{Vector}} \quad (19)$$

La **Figura 20** se ilustra este proceso, donde el punto final queda en Latitud = 90° y Longitud = 90° . Cuando la latitud de la estación terrena es menor a cero grados, es necesario restar 180° a θ_2 .

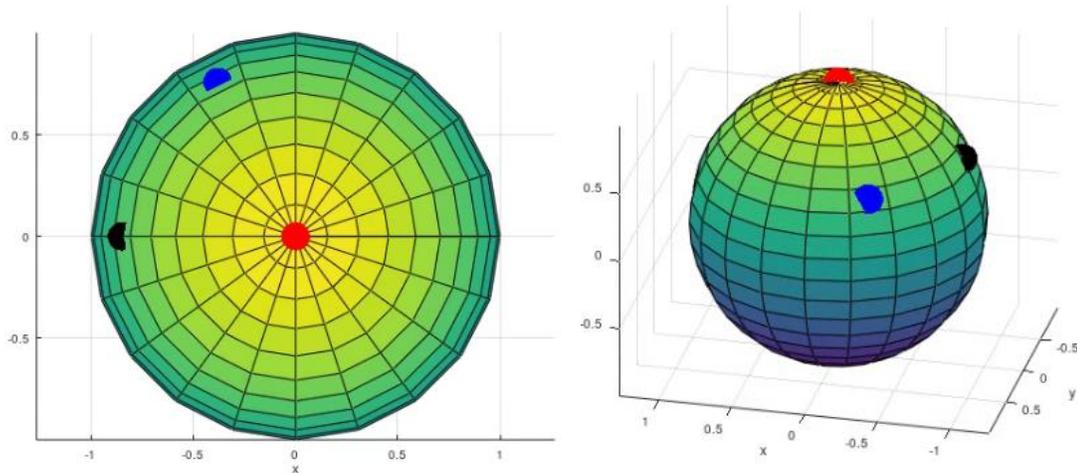


Figura 20 Representación de las rotaciones y sus efectos en la posición. Donde el punto azul es una estación terrena con coordenadas latitud = 31.9675° y longitud = 116.665° , el punto oscuro es el resultado de la primera rotación con ángulo θ_1 y el punto rojo es la segunda rotación sobre el eje Z usando el ángulo θ_2 .

3. **Aplicación de los ángulos de rotación resultantes al satélite:** Una vez que se obtienen los ángulos de rotación necesarios (θ_1 y θ_2) para llevar la estación terrena hacia la posición $P(90^\circ \text{ lat}, 90^\circ \text{ long})$, es necesario aplicar a los nodos satelitales las mismas rotaciones y de la misma manera secuencial que ocurrieron en la estación terrena, como se muestra a continuación:

$$S_{\text{Vector}} = (x_{\text{VectorTS}}, y_{\text{VectorTS}}, z_{\text{VectorTS}}) \quad (20)$$

$$R_z(\theta_1)S_{\text{Vector}} = SRZ_{\text{Vector}} \quad (21)$$

$$R_y(\theta_2)SRZ_{\text{Vector}} = SRZRY_{\text{Vector}} \quad (22)$$

Calculo final del ángulo de elevación: Una vez aplicadas las rotaciones a ambos puntos, el ángulo de elevación θ_3 , donde si el ángulo resultante es negativo indica que el satélite se encuentra debajo del horizonte visible de la estación terrena, θ_3 se calcula como:

$$\theta_3 = \text{atan} \frac{Z_{SRZRY_{\text{vector}}}}{X_{SRZRY_{\text{vector}}}} \quad (23)$$

En la **Figura 21** es posible observar el resultado final de las rotaciones de una estación terrena y un satélite tras encontrar los ángulos θ_1 y θ_2 y aplicar las rotaciones a la estación terrena y nodos satelitales.

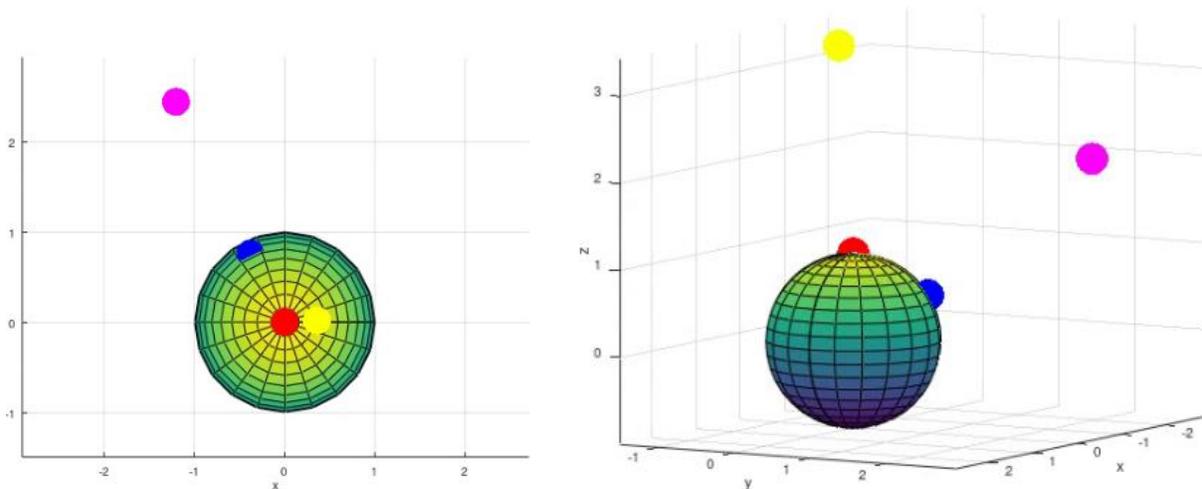


Figura 21 Representación de los elementos del sistema tras realizar rotaciones. Donde la estación terrena (punto azul), es trasladada al caso especial (punto rojo) y el satélite en su posición original (punto rozado) se traslada a su posición perspectiva utilizando los ángulos obtenidos por las rotaciones de la primera iteración (punto amarillo).

3.3.5 Modelos de movilidad y modulo TLEUpdater

Como se mencionó anteriormente, el modelo de movilidad SGP4 cuenta con implementaciones publicadas y mantenidas por la NORAD (en forma de ejecutables y librerías compiladas), por Vallado y Orbit Tools (como proyectos de código abierto en C++). Sin embargo, estas implementaciones no fueron diseñadas para un simulador como OMNET ++, por lo que, a pesar de estar desarrolladas en el mismo lenguaje base, no son necesariamente compatibles con él. Por ello, un paso indispensable es proponer un diseño que permita su inclusión como modelos de movilidad. En este trabajo se propone el desarrollo de módulos

simples que interpreten dichas implementaciones y carguen en memoria rutinas invocables por un único módulo denominado TLEUpdater, responsable de actualizar las variables de movilidad.

El módulo TLEUpdater recibe como entrada, la información de los TLE y el tiempo actual del escenario proporcionados por el módulo SGP4Updater. Con esta información TLEUpdater calcula la posición actual en la simulación del nodo correspondiente al TLE proporcionado, la cual es enviada de regreso al módulo SGP4Updater para que este a su vez se la mande al módulo SatelliteMobilty del nodo correspondiente.

Para las implementaciones de Vallado y Orbit Tools (en C++), su código puede importarse a OMNET ++ como librerías externas. No obstante, para ser invocadas por un módulo de OMNET ++, deben vincularse primero a un módulo simple que actúe como puente entre ambos entornos. Con este fin, se desarrollaron los módulos STVallado y STOrbitTools. Estos módulos no requieren entradas, pero durante su inicialización cargan las implementaciones correspondientes y proporcionan como salida las funciones del modelo en forma de clase al módulo TLEUpdater.

La incorporación de la implementación de la NORAD a OMNET ++ presenta un desafío distinto. Si se optara por un módulo tipo “envoltorio” o “wrapper” que virtualice las entradas y salidas del ejecutable, surgiría un cuello de botella determinado por la eficiencia del ejecutable en la simulación. Para evitarlo, en este trabajo se exploró una alternativa para el módulo STNoradSGP: el desarrollo de funciones que abstraigan las librerías compiladas en C, logrando compatibilidad con OMNeT++. Aunque estas librerías son ejecutables de rutina única, sus entradas y salidas pueden homogenizarse para coincidir con las de los módulos STVallado y STOrbitTools, permitiendo su uso transparente por parte de TLEUpdater.

Antes de iniciar una simulación, se debe seleccionar la implementación a utilizar por parte de TLEupdater en el archivo de configuración de la simulación.

3.4 Modificaciones a los módulos “Radio Medium” y “Radio” de INETMANET

En los frameworks INET e INETMANET, los cálculos de propagación de señales son gestionados por un módulo denominado “Radio Medium”, responsable de modelar los efectos que sufre una señal durante su transmisión a través del medio mientras ocurre una simulación. Este módulo interactúa con el módulo

“Radio” incluido en cada nodo participante, el cual encapsula las características específicas de sus interfaces de radio.

Como se mencionó anteriormente en esta investigación, se propone utilizar el modelo UnitDisk para las simulaciones. Si bien INETMANET ya incluye una implementación de este modelo, su módulo de “Radio Medium” carece de la funcionalidad necesaria para interactuar con el módulo GP4Updater desarrollado en este trabajo, esto es particularmente necesario para realizar cálculos de distancia en escenarios satelitales. Para resolver la limitación anterior, se implementaron las rutinas de comunicación correspondientes en el módulo “Radio Medium”. La **Figura 22** muestra el diagrama de flujo que describe la lógica para detectar comunicaciones exitosas entre nodos satelitales. Por otro lado, en la **Figura 23** se presenta el flujo lógico de una comunicación espacio-tierra.

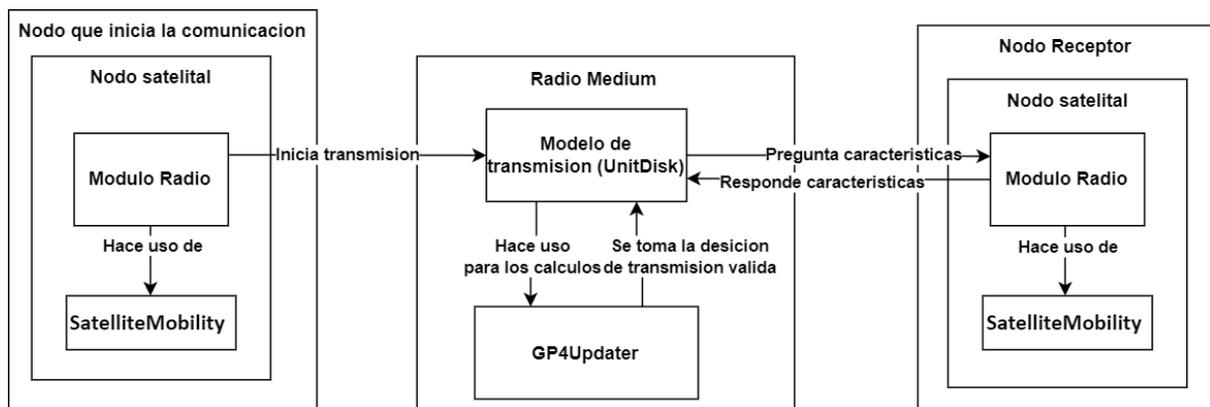


Figura 22 Diagrama de interacción de la comunicación entre dos nodos satelitales en INETMANET.

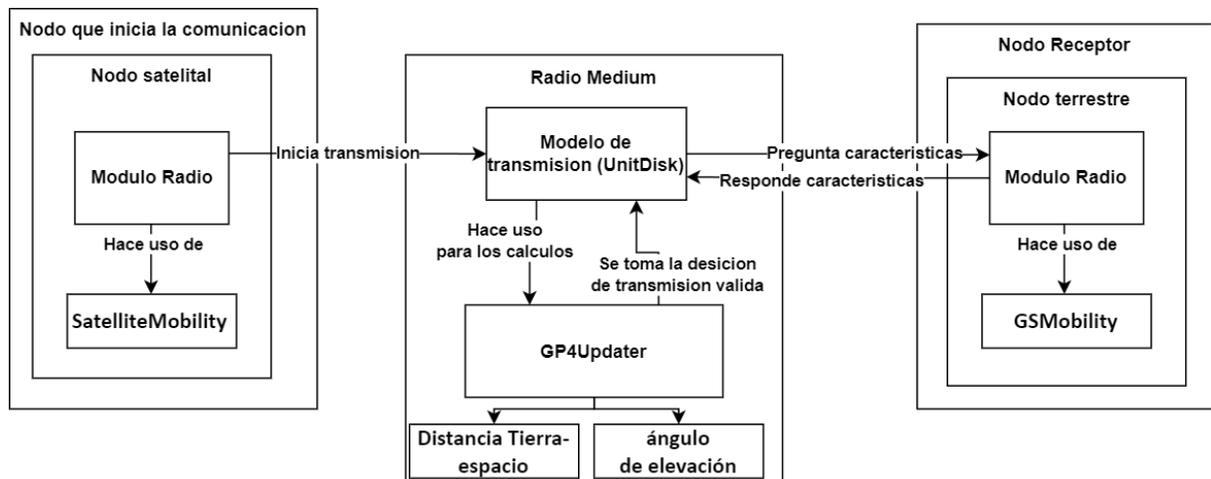


Figura 23 Diagrama de interacción de módulos de comunicación en INETMANET entre nodos terrestres y espaciales.

La arquitectura presentada en las figuras anteriores ofrece una ventaja significativa al no depender de una implementación específica de tecnología satelital. Esto permite que sea posible incorporar cálculos teóricos o modelos reportados para diferentes tecnologías. En el caso específico de este trabajo de investigación se utilizó la distancia máxima de detección reportada la cual es de (Alvarez et al., 2022), (Kumar & Vadivukkarasi, 2023) para radios LoRa en escenarios de comunicaciones satelitales.

3.5 Implementaciones de capa de acceso al medio de ST-INETMANET

En redes inalámbricas, el diseño de protocolos de acceso al medio (MAC) adquiere relevancia estratégica debido al uso compartido del canal de comunicación. Estos protocolos regulan cómo los nodos inyectan paquetes al medio y buscan garantizar oportunidades de transmisión a todos los participantes (Gummalla & Limb, 2009). En general los protocolos de acceso al medio están intrínsecamente ligados a la tecnología de comunicación utilizada en un escenario o implementación, como ocurre con CSMA para IEEE802.11. En el contexto de comunicaciones LoRa, suele implementarse utilizando el protocolo ALOHA (Baccelli et al., 2006). Sin embargo, no existe una implementación de ALOHA compatible para INET O INETMANET, por lo cual se desarrolló el módulo `alohaWirelessInterface` que contiene una implementación de ALOHA en su versión ranurada y no ranurada. Se refiere al lector al libro (Tanenbaum & Wetherall, 2010) para revisar los detalles del protocolo ALOHA.

El módulo desarrollado además de implementar ambas variantes del protocolo ofrece parámetros configurables como el número máximo de reintentos, la duración/cantidad de ventanas (en su versión ranurada), y los intervalos de espera aleatorios, adaptándose así a las posibles necesidades de redes LoRa en órbita.

3.6 Conclusión del capítulo

Esta sección se presentó el desarrollo de ST-INETMANET, una herramienta de simulación especializada en redes ad-hoc satelitales, diseñada para solventar la carencia de entornos que modelen escenarios con movilidad y restricciones inherentes a estas redes. Se detalló la arquitectura del grupo de módulos llamado ST-Mobility, compuesto por:

- *SatelliteMobility/GSMobility*: Movilidad para nodos espaciales y estaciones terrenas.
- *SGP4Updater*: Actualización en el escenario simulado y encargado de los cálculos de distancia entre los nodos participantes.
- *TLEUpdater*: Cálculos de trayectorias basados en archivos TLE.
- *STVallado*, *STOrbitTools* y *NoradSGP4*: Implementaciones del modelo SGP4 utilizadas para cálculo de posiciones.

Además, se estableció una metodología para:

1. Calcular distancias entre nodos espaciales y terrestres, considerando la curvatura terrestre y coordenadas geodésicas.
2. Determinar ángulos de elevación el cual es un cálculo esencial para validar la visibilidad satelital en estaciones terrenas.

Finalmente, se desarrollaron protocolos de acceso al medio adaptados a comunicaciones LoRa en satélites, en particular ALOHA (Ranurado/No Ranurado). Estas implementaciones, incorporadas en el módulo *alohaWirelessInterface*, son pensadas para abordar el análisis de soluciones pensadas para desafíos únicos que enfrentan protocolos sobre estas redes como la alta movilidad de la red ad-hoc satelital y la asimetría de recursos.

Capítulo 4. Análisis de los factores más relevantes para el enrutamiento en redes de Internet de las cosas espaciales

En este capítulo, se exponen detalladamente los análisis y los resultados obtenidos al poner en práctica la herramienta de simulación presentada en el Capítulo 3. Estos elementos se emplean para llevar a cabo la evaluación de las redes satelitales ad-hoc, las cuales fueron presentadas en el Capítulo 2. El objetivo principal es identificar y estudiar a fondo los factores más significativos que influyen en el rendimiento del enrutamiento en este tipo para redes ad-hoc satelitales. Para esto, se utilizó el análisis factorial 2^k , la cual se describe con más detalle en un subapartado posterior, así como las consideraciones que se tomaron en cuenta para adaptarlo hacia el contexto de redes ad-hoc satelitales.

Identificar los factores críticos que inciden en el desempeño de una red no es una tarea trivial, dada la complejidad que implica analizar las variables que tienen influyen durante el proceso de enrutamiento y el escenario que se está considerando, por esta razón en este trabajo de investigación se decidió por el uso de utilizar una herramienta estadística empleada para el uso de identificar el “peso” que tiene una variable sobre otra sobre el impacto de una métrica en particular llamada análisis factorial 2^k .

4.1 Análisis factorial 2^k

El análisis factorial 2^k sido empleado en investigaciones del estado del arte como una herramienta estadística para identificar los factores más significativos que influyen en la difusión de paquetes, por ejemplo, en el contexto de redes VANET (Yousif et al., 2019). El análisis factorial 2^k se inicia con un conjunto de elementos fundamentales con el objetivo de cubrir un amplio rango de posibles combinaciones denominadas factores. El análisis 2^k se caracteriza por tener "k" factores distintos, cada uno con dos niveles, denominados comúnmente alto y bajo. En la mayoría de los casos, los factores suelen ser de naturaleza determinista y cuantitativa, como el número de nodos involucrados en la red, el escenario y la cantidad de paquetes enviados. Sin embargo, en ocasiones, estos factores pueden ser cualitativos, como el enfoque de enrutamiento empleado por una red ad-hoc, ya sea reactivo o proactivo.

La representación tabular de un diseño factorial 2^k se conoce como "matriz de diseño", la cual simplifica la determinación de los efectos y las interacciones entre los factores. Para el caso en que $K = 2$, el valor

de la respuesta (variable R_i) para cada $i = 1 \dots 4$ corresponde al parámetro de interés obtenido al realizar la simulación con la combinación i -ésima de niveles de factores. El tratamiento de la variable e_j consiste en calcular la disparidad entre la media de la respuesta cuando el factor j se encuentra en su nivel máximo establecido y la media de la respuesta cuando se halla en su nivel mínimo. Para realizar el cálculo, se deben multiplicar los valores de la columna "Factor j " por los valores de R_i correspondientes. Posteriormente, se suman todos los resultados obtenidos en dicha columna y se divide el total entre 2^{k-1} . En la Tabla X2 se exhibe una matriz de diseño con un total de $K = 3$ elementos, mientras que la expresión para la variable está detallada en la ecuación

(24).

Tabla 4 Ejemplo de una matriz de diseño 2^k cuando $k = 3$.

Combinación	Factor 1 (e1)	Factor 2 (e2)	Factor 3 (e3)	Respuesta
1	-	-	-	R1
2	+	-	-	R2
3	-	+	-	R3
4	+	+	-	R4
5	-	-	+	R5
6	+	-	+	R6
7	-	+	+	R7
8	+	+	+	R8

$$e_1 = \frac{-R_1 + R_2 - R_3 + R_4 - R_5 + R_6 - R_7 + R_8}{2^{k-1}} \quad (24)$$

Para evaluar la interacción de dos o más factores en un estudio, es fundamental comprender la disparidad entre el efecto medio del factor j_x cuando el factor j_y se encuentra en su nivel máximo establecido y el efecto medio del factor j_x cuando el factor j_y está en su nivel mínimo. Este fenómeno se conoce como el efecto de interacción de dos factores. Mediante el uso de la matriz de diseño, es posible realizar la

multiplicación de las columnas que representan los factores de interés, lo que resulta en la generación de una nueva columna donde se pueden multiplicar las respuestas correspondientes. En la **Tabla 5** se muestra el diseño para este procedimiento, mientras que en

(25) se expone la ecuación para calcular un peso compuesto e_{12} .

Tabla 5 Matriz de diseño expandida con un factor compuesto e12.

Combinación	Factor (e1)	Factor (e2)	Factor (e3)	Factor compuesto (e12)	Respuesta
1	-	-	-	+	R1
2	+	-	-	-	R2
3	-	+	-	-	R3
4	+	+	-	+	R4
5	-	-	+	+	R5
6	+	-	+	-	R6
7	-	+	+	-	R7
8	+	+	+	+	R8

$$e_{12} = \frac{R_1 - R_2 - R_3 + R_4 + R_5 - R_6 - R_7 + R_8}{2^{k-1}} \quad (25)$$

4.2 Experimento Base

El experimento plantea la hipótesis de que un nodo situado en una ubicación remota envía datos a un centro urbano a través de una red ad-hoc satelital. Para su implementación, el nodo remoto se encuentra en el Océano Pacífico, específicamente en las coordenadas (9°35'42.0" N, 95°08'37.2" W). Dentro de un centro urbano se encuentra ubicado el sumidero en las coordenadas (31°52'07.7" N, 116°39'59.1" W). En los sistemas de alerta temprana, se presenta la situación en la que una boya ubicada en mar abierto envía

datos sobre las condiciones meteorológicas y las mareas a un centro metropolitano costero. Las redes ad-hoc satelitales podrían desempeñar el papel de la comunicación principal o de respaldo.

La selección entre los enfoques de enrutamiento reactivo y proactivo puede tener un impacto significativo en la distribución de paquetes de información en redes ad-hoc satelitales. En este estudio se aplican los enfoques reactivo y proactivo mediante el uso de protocolos de enrutamiento ampliamente reconocidos como estándar para cada enfoque, en particular AODV (Chakeres & Belding-Royer, 2004) y OLSR (Jacquet et al., 2001).

En esta sección se detallan las características principales del experimento fundamental que se empleó en nuestra revisión. En la **Tabla 6** se detallan los parámetros utilizados en los algoritmos de red, movilidad y enrutamiento.

Tabla 6 Configuraciones del experimento base

Capa	Configuración
Transporte	Simple Transport Layer (Not ACKS or Retransmissions mechanisms enabled)
Red	OLSR and AODV for routing.
Enlace (MAC)	Simple MAC.
Física (PHY)	750 kbps with 1500 km of radio range
Parámetros orbitales	Configuración
Altura máxima	2000 km (LEO)
Parámetros del escenario	Valor asignado
Número de nodos (densidad)	20 nodos hasta 240
Número de grupos con 20 y 240 nodos	30 en cada grupo
Número de ejecuciones por escenario y por grupo	10
Día del periodo orbital seleccionado para las simulaciones	Lunes 3 de mayo del 2021
Tiempo simulado por ejecución	600s
Numero de paquetes enviados por simulación	100

Modelo de satélite utilizado	ONION CubeSat Small platform
------------------------------	------------------------------

Este estudio, se enfoca en la evaluación del desempeño de las estrategias de enrutamiento en redes ad-hoc satelitales. En la configuración experimental, se emplean capas de transporte y MAC fundamentales. La capa de control de acceso al medio (MAC) se encarga de realizar la encapsulación y de encapsulación de manera explícita, así como de ofrecer la opción de reconocimiento fuera de banda. La capa de transporte emplea datagramas y un enfoque sencillo sin establecer conexión, sin realizar saludos iniciales, sin confirmaciones ni retransmisiones (por ejemplo, como en UDP).

La capa de red asigna un identificador exclusivo a cada nodo. En esta capa se incluye la implementación de un módulo de enrutamiento. En este módulo de enrutamiento se configuran los parámetros de los distintos protocolos de enrutamiento específicos que usan en cada nodo. En esta contribución, se implementó el protocolo de enrutamiento OLSR en el módulo correspondiente con el fin de evaluar el enfoque de enrutamiento proactivo, tal como se ha mencionado previamente. De forma análoga, se llevó a cabo la implementación del protocolo de enrutamiento AODV con el propósito de analizar el enfoque de enrutamiento reactivo. Los protocolos podrían intercambiarse en el banco de pruebas experimental una vez que hayan sido implementados y según sea requerido.

4.3 Metodología de simulación

La metodología propuesta para analizar el desempeño de los protocolos de enrutamiento ad hoc en redes ad-hoc satelitales se resume en la **Figura 24**. En la metodología propuesta, se define un "experimento base" partiendo de un caso a analizar con lo cual se desarrollan los archivos de configuración base de un experimento en los cuales se definen los factores que se desean variar en el experimento. Posteriormente los archivos de configuración alimentan el módulo de generación de orbitas el cual se encarga de producir una cantidad N de experimentos según el número de factores así como el número de grupos a evaluar, este a su vez hace uso de un módulo de obtención de archivos TLE para generar grupos de nodos aleatorios obtenidos de bases de datos reales de satélites en este caso se selecciona Celestrak dado que ofrece una alta frecuencia de actualización al mismo tiempo que es totalmente público su acceso. Posteriormente la salida del módulo de generación de orbitas alimenta al simulador OMNET++ con ST-INETMANET el cual

comienza a realizar las simulaciones de los experimentos. Los resultados de los experimentos pasan a un módulo de formato el cual prepara los resultados para ser procesador por las herramientas estadísticas en este caso 2^k para al final obtener una gráfica comparativa de los pesos de los factores definidos de interés.

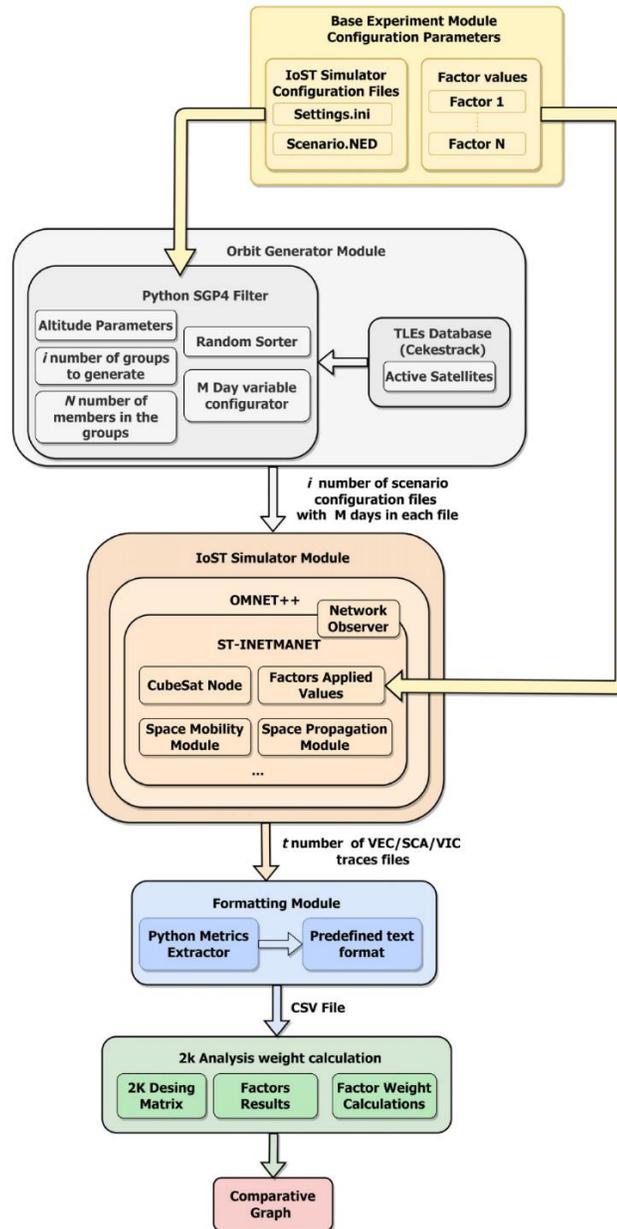


Figura 24 Metodología de simulación propuesta para redes ad-hoc satelitales.

4.4 Factores considerados en el análisis de estrategias de enrutamiento para redes ad-hoc satelitales.

La evaluación de la eficiencia de los algoritmos de enrutamiento en redes ad hoc se logra al medir su rendimiento en términos de la efectividad en el establecimiento y la conservación de las rutas. El rendimiento del protocolo de enrutamiento puede verse afectado por diversos factores, tales como el tipo de enfoque de enrutamiento utilizado (activo o reactivo), la densidad de nodos en la red, el comportamiento de los nodos, entre otros. A continuación, se describen específicamente los factores considerados para el análisis de la tarea de enrutamiento en redes ad-hoc satelitales.

- **Esquema de enrutamiento:** La selección del enfoque de enrutamiento no es un asunto sencillo, ya que requiere la consideración de las características de los nodos involucrados y los cambios en la topología de la red. Los dos enfoques principales en el campo son el enfoque reactivo y el enfoque proactivo, siendo los protocolos más representativos AODV y OLSR, respectivamente.
- **Densidad:** La reducción de la contención en la red se produce cuando hay un bajo número de nodos participantes, lo que se conoce como baja densidad de nodos. No obstante, esta circunstancia también limita las posibilidades de establecer nuevas rutas. En consecuencia, la cantidad de nodos en la red (densidad) es un factor significativo en el análisis planteado. Como se mencionó previamente, en nuestro análisis se tomaron en cuenta densidades de 20 y 240 nodos.
- **Comportamiento de los nodos:** En las redes ad-hoc satelitales, los satélites podrían dejar de participar eventualmente debido a situaciones como la disminución de energía o la priorización de la misión principal. Por consiguiente, resulta esencial investigar el efecto que tiene la disponibilidad de los nodos para involucrarse en actividades habituales. En particular, se analizó el impacto que tiene la incapacidad del 20% de los satélites de un grupo para participar en actividades de interconexión.
- **Período de mensaje de "Hello" (HMP):** Los Hello's son paquetes de transmisión empleados por los protocolos de enrutamiento con el fin de intercambiar de manera regular datos de control con nodos vecinos, tales como la cantidad de nodos vecinos y el estado de la batería. Los nodos emplean dicha información con el fin de actualizar a los nodos adyacentes y estos a sus tablas de

enrutamiento internas, así como para llevar a cabo acciones vinculadas a la estrategia de enrutamiento específica que se ha implementado. La fiabilidad de la información vecinal guarda una estrecha relación con el HMP. No obstante, se presenta un compromiso entre la fiabilidad de la información del nodo y la carga de información adicional generada por los mensajes periódicos que viajan por la red. Dado el impacto significativo de los mensajes de "Hello", en este estudio se incorporó el saludo "HMP" como una variable relevante en el análisis factorial de dos factores.

- **Tiempo de actualización del vecino (NRT):** Cada nodo en una red mantiene una tabla de vecinos que almacena las rutas previamente descubiertas y los nodos vecinos en el salto. Es importante considerar que el tiempo de la información en la tabla de vecinos refleja la vigencia de los datos de enrutamiento. El presente estudio establece el concepto de Tiempo de actualización del vecino (NRT) como el lapso durante el cual un nodo permanece registrado en la tabla de vecinos luego de la última actualización. Un NRT corto facilita la detección temprana de enlaces rotos por parte del protocolo de enrutamiento. No obstante, es posible que se produzca la pérdida de paquetes a causa de interferencias o dificultades en la propagación. De esta manera, un fragmento de ARN no codificante corto podría activar de manera innecesaria los procesos de reparación celular, lo que resultaría en una ineficiente utilización de recursos. Por consiguiente, resultaba pertinente examinar la influencia de la variación del Número de Rutas de Transmisión (NRT) en el desempeño del enrutamiento.
- **Número de reintentos (retransmisiones):** La retransmisión de paquetes es una estrategia eficaz y sencilla para abordar errores en las capas MAC y PHY. No obstante, dicho procedimiento puede ocasionar una mayor saturación en la red. Dado que las retransmisiones pueden ocasionar demoras en la identificación de rutas ante cambios en la topología de la red, este aspecto fue tomado en cuenta durante el análisis.

4.4.1 Métrica de Evaluación

En este experimento, el principal indicador de enrutamiento utilizado para evaluar el efecto de los diversos factores considerados fue el "índice de entrega de paquetes" (PDR), tal como se describió previamente.

La métrica mencionada evalúa la proporción entre los paquetes recibidos y enviados, tal como se ilustra a continuación:

$$PDR = \frac{\text{Paquetes Recibidos en el destino}}{\text{Paquetes enviados}} \quad (26)$$

Es importante considerar que, aunque hay otras métricas de rendimiento de enrutamiento relevantes, como el retraso de extremo a extremo o la sobrecarga, el “Porcentaje de Paquetes Entregados” (PDR) ofrece una evaluación integral del rendimiento de enrutamiento. Un algoritmo de enrutamiento que opere de manera adecuada resultará en un PDR elevado.

4.5 Resultados

Los valores de los parámetros empleados en el análisis de estrategias de enrutamiento para redes ad-hoc satelitales se encuentran detallados en la **Tabla 7**. En la **Figura 25** se muestran los resultados del análisis factorial 2^k realizados mediante el uso del algoritmo proactivo OLSR y el algoritmo reactivo AODV. En ambos enfoques, la **Figura 25** evidencia que la densidad (e5) es el factor de mayor relevancia. La razón de este hallazgo radica en la estrecha relación que guarda este factor con la conectividad de la red, la disponibilidad y calidad de las rutas de enrutamiento, así como el PDR.

Tabla 7 Referencias y valores asignados para los factores simulados.

Referencias de los factores	Nombre del factor	Valor bajo (-)	Valor alto (+)
e1	Tiempo de actualización del vecino (NRT)	2 x (HMP)	3 x HMP
e2	Número de reintentos (RET)	2	7
e3	Período de mensaje de “Hello” (HMP)	0.1s (AODV) 0.2s (OLSR)	1s (AODV) 2s (OLSR)
e4	Comportamiento de los nodos (NBH)	0% Porcentaje de nodos no disponibles para participar	20% Porcentaje de nodos no disponibles para participar
e5	Densidad	20 nodos	240 nodos

Reactive and Proactive Routing Factors Weight Comparison

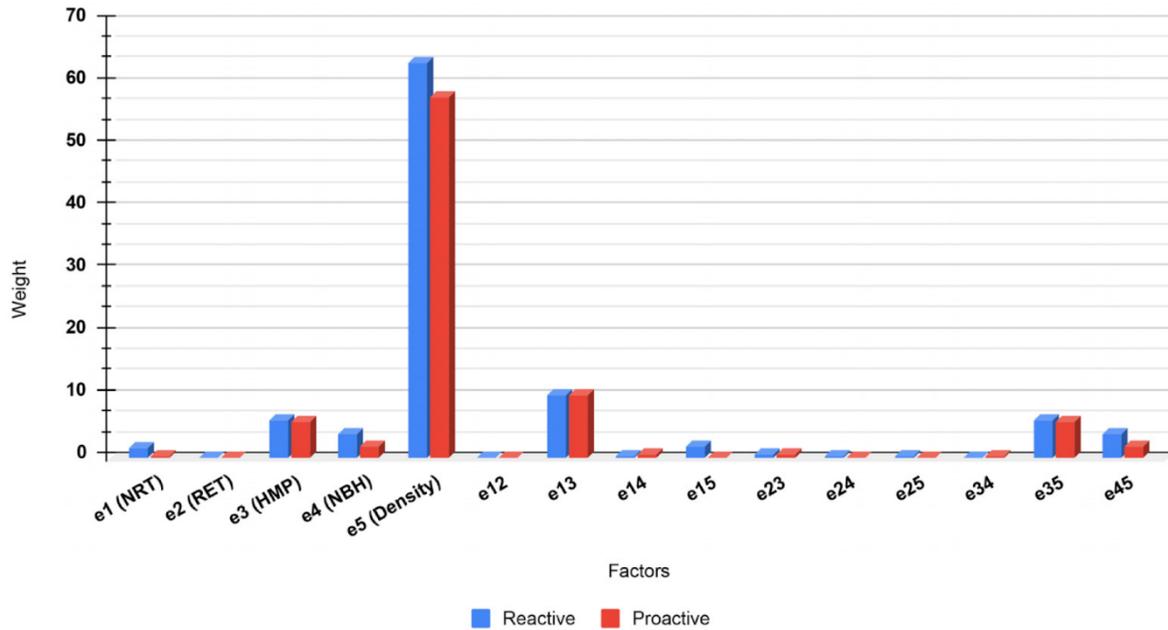


Figura 25 Comparativa de pesos obtenidos para los distintos factores estudiados.

Se puede observar que la combinación de los factores NRT y HMP (e_{13}) muestra ser la segunda en prioridad en términos de peso, lo que la convierte en la combinación más relevante. La información de enrutamiento se basa en dos factores, NRT y HMP, cuya combinación permite reflejar de manera dinámica la topología de la red en función de los enlaces disponibles en ese momento. El HMP se posiciona como el segundo factor individual más relevante por sí mismo. Considerando estos aspectos, así como la importancia de la combinación de NRT y HMP, se concluye que es fundamental abordar de manera apropiada la dinámica de la topología de la red en las redes IoT ad-hoc al desarrollar protocolos de enrutamiento para este tipo de redes.

Los resultados que se muestran en la **Figura 26** corresponden a los valores de densidad bajos y altos. Los resultados del estudio indican que la densidad tiene un impacto significativo en el funcionamiento de la red. El aumento de la densidad de baja a alta resulta en un incremento del porcentaje de paquetes correctamente recibidos en destino (PDR) del 9,8% al 84% para el enfoque reactivo y del 14,6% al 80% para el enfoque proactivo.

PDR Performance Comparison of Factor Density (Factor e5)

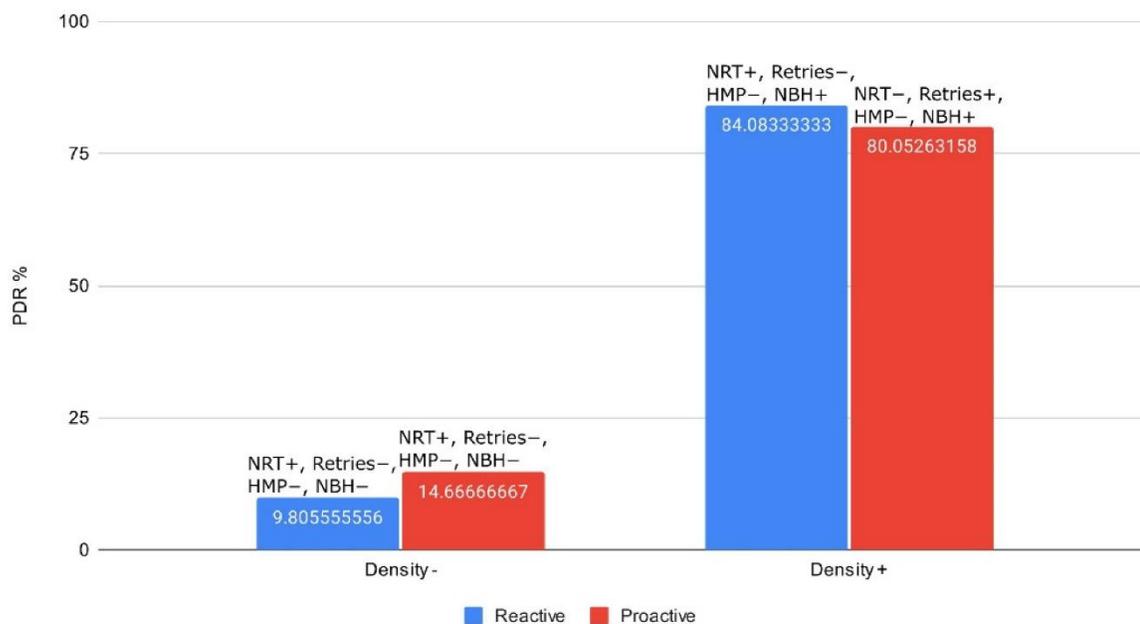


Figura 26 Comparativa de densidad de factores entre los mejores escenarios de un enfoque de enrutamiento proactivo y reactivo en redes ad-hoc satelitales con alta y baja conectividad.

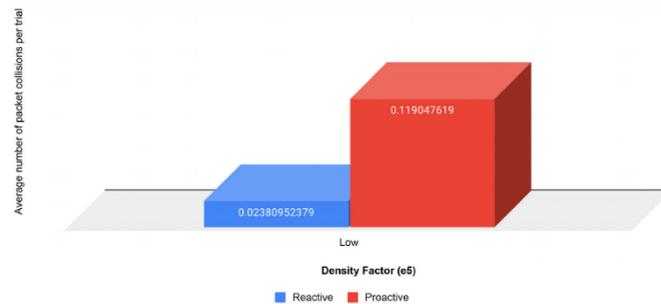
En escenarios de baja conectividad, los parámetros que brindan el rendimiento óptimo son comunes para ambos enfoques de enrutamiento. Estos incluyen NRT en su valor alto, retransmisiones en su valor bajo, un HMP corto y NBH-. Los resultados destacan la importancia de priorizar en las implementaciones NRT en valor alto con un HMP corto para el despliegue de redes ad-hoc satelitales de baja densidad de nodos. El resultado previo sugiere que es imprescindible contar con la información actualizada de los vecinos de manera inmediata bajo este caso. Es fundamental disponer de más tiempo para cada vecino, tal como se establece en la tabla de enrutamiento. No obstante, la escasa participación de nodos sugiere que es más conveniente dirigir los paquetes a través de los nodos más antiguos en lugar de no contar con nodos en la tabla de enrutamiento. Es importante tener presente que esta consideración es válida para ambas estrategias de enrutamiento examinadas.

En escenarios de redes ad-hoc satelitales con una alta densidad de nodos, es importante destacar que el enfoque reactivo supera al enfoque proactivo. En contraste, el algoritmo proactivo muestra un rendimiento superior en situaciones donde la densidad de nodos es baja. El aumento de la información de control para el enfoque proactivo puede explicarse por la presencia de un HMP corto (valor bajo) y una NRT corto (valor bajo). En consecuencia, en una red ad-hoc satelital con una alta densidad de nodos, se

espera que el número de colisiones de paquetes sea significativamente mayor en el enrutamiento proactivo que en el reactivo.

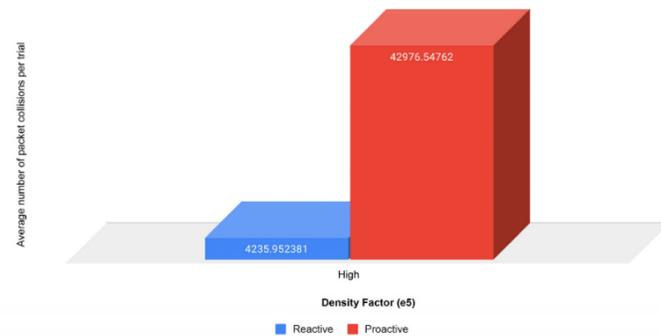
Los resultados presentados en la **Figura 27** confirman esta afirmación al comparar el promedio de colisiones de paquetes por ensayo entre los enfoques proactivos y reactivos examinados en este estudio. Es importante considerar que los resultados mostrados en la **Figura 27** fueron obtenidos empleando los factores que ofrecen el mejor rendimiento obtenido para cada estrategia de enrutamiento. Los resultados obtenidos confirman que en una red ad-hoc satelital con una alta densidad de nodos, el número promedio de colisiones de paquetes es considerablemente mayor en el enfoque proactivo en comparación con el enfoque reactivo. De esta manera, se puede explicar el motivo por el cual se logró un mayor índice de entrega de paquetes (PDR) en una red ad-hoc satelital con una alta densidad de nodos al emplear el enfoque de enrutamiento reactivo.

Number of Packet Collisions Comparison when Using the Factors Providing the Best Performance



(A)

Number of Packet Collisions Comparison when Using the Factors Providing the Best Performance



(B)

Figura 27 Comparativa del número promedio de colisiones en el mejor escenario a partir de los resultados de los factores de un enfoque de enrutamiento proactivo y reactivo en redes ad-hoc satelitales con el factor de densidad (e5). (A) Baja densidad de nodos; (B) alta densidad

En el segundo experimento, se establecieron los parámetros NRT y HMP con el propósito de examinar la influencia de la actualización (frescura) de la información de la ruta en el desempeño del protocolo de enrutamiento. Es de gran relevancia encontrar una ruta estable en entornos dinámicos, como los que se presentan en las redes ad-hoc satelitales. Por lo tanto, la identificación de enlaces rotos en la red se convierte en un aspecto crucial. Los resultados mostrados en la **Figura 28** reflejan valores elevados en NRT y HMP, lo cual indica una baja frescura de la información de enrutamiento, así como valores bajos en NRI y HPM, lo que sugiere una alta frescura de la información de encaminamiento, junto con sus combinaciones intermedias.

Number of Packet Collisions Comparison when Using the Factors Providing the Best Performance

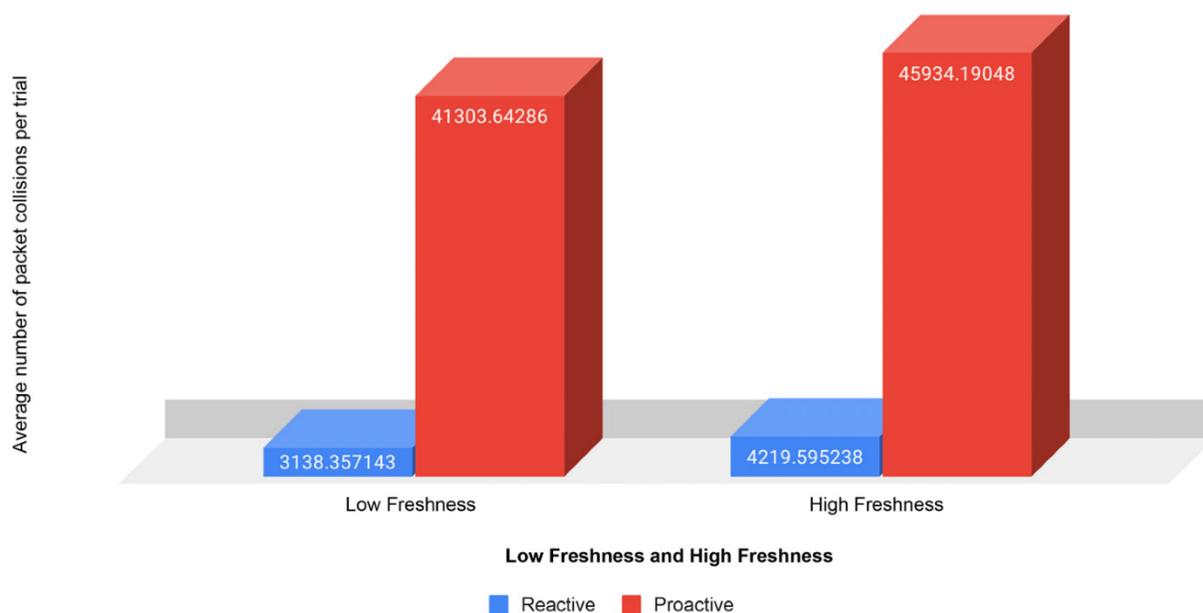


Figura 28 Comparativa entre el porcentaje de colisiones provenientes de resultados de baja frescura y alta frescura.

En términos generales, todas las combinaciones presentan una mayor densidad de nodo ($e_5 = \text{Densidad}+$) y un menor porcentaje de vecinos ($e_4 = \text{NBH}-$) que resultan beneficiosos. Para el escenario de alta frescura, ambos enfoques de enrutamiento mejoran su rendimiento. En la mayoría de las situaciones, el protocolo reactivo muestra un rendimiento superior al del protocolo proactivo. Según se puede apreciar en la **Figura 28**, esta situación se origina por el incremento en la cantidad de colisiones de paquetes en el método proactivo, lo cual repercute de manera desfavorable en su eficacia de enrutamiento.

Para lograr una actualización eficiente de la información de enrutamiento, es necesario realizar numerosos ensayos y utilizar un alto porcentaje de vecinos más cercanos en ambos enfoques de enrutamiento. La combinación que incluye un 66% de tasa de entrega de paquetes (PDR) confirma que la frescura de la información es esencial para el desempeño óptimo del enfoque proactivo en enrutamiento. Este enfoque muestra su peor rendimiento cuando se configura de esta manera.

La combinación óptima para el enfoque de enrutamiento reactivo consiste en un tamaño de tabla de rutas no deterministas (NRT) grande y un período de mantenimiento de tablas (HMP) corto, lo que resulta en un porcentaje de entrega de paquetes (PDR) del 84.08%. En contraste, este enfoque muestra un bajo rendimiento en una situación donde el tiempo de respuesta es corto y la memoria de alta velocidad es grande, obteniendo un 68% de tasa de detección de errores. Esta observación refuerza la idea de que, en situaciones de baja densidad, es más conveniente, en el contexto reactivo, dirigir los paquetes a través de nodos más antiguos en lugar de carecer por completo de nodos en la tabla de enrutamiento.

En contraste con la estrategia reactiva, la óptima combinación para el enfoque proactivo consiste en utilizar un tiempo de respuesta no retrasado (NRT) breve y un tiempo de preparación mínimo (HMP) reducido. La razón de esto radica en que la estrategia proactiva se ve favorecida por la disponibilidad de datos actualizados en las tablas de enrutamiento.

4.6 Conclusiones del análisis.

En este estudio se planteó una metodología fundamentada en el análisis factorial 2^k con el objetivo de identificar los factores más significativos que inciden en el desempeño del protocolo de enrutamiento en las redes ad-hoc satelitales.

El análisis factorial 2^k presentado revela que la Densidad es el factor crucial entre los factores investigados para la función del enrutamiento en redes ad-hoc satelitales. En segundo lugar, se encuentra la combinación de NRT y HMP, seguida por el uso exclusivo de HMP en tercer lugar. En el presente análisis, se abordará cuáles combinaciones de factores resultan en el mejor desempeño encontrado para el enrutamiento en los enfoques proactivo y reactivo.

La elección del enfoque de enrutamiento en diversos escenarios de redes ad-hoc satelitales varía según las condiciones de conectividad presentes. En escenarios de baja densidad de nodos, el enfoque proactivo logra el rendimiento óptimo cuando se establecen en valores bajos los parámetros de NRT y HMP. No obstante, en un entorno con una alta densidad de nodos, la congestión generada por los mensajes de control (evidenciada por el incremento en la cantidad de colisiones de paquetes en la red) restringe la eficacia del enrutamiento. En esta situación, el enfoque de enrutamiento reactivo demuestra un rendimiento superior. No obstante, una mayor conectividad se traduce en un mejor desempeño para ambas estrategias.

La frescura de la información de enrutamiento es un elemento fundamental en el establecimiento de redes ad-hoc satelitales. Un período de mantenimiento más bajo resulta en una mejora en rendimiento en el escenario evaluado, tanto para los enfoques de enrutamiento proactivo como reactivo. No obstante, la frecuencia con la que se ajusta el parámetro NRT debe ser determinada en función del enfoque de enrutamiento seleccionado. Una NRT de corta duración facilita la detección rápida de enlaces rotos, aunque existe la posibilidad de que incremente los errores al confundir una pérdida temporal de paquetes con un enlace roto permanente. La utilización de un enfoque de enrutamiento proactivo en una red ad-hoc satelital podría desencadenar de manera innecesaria el mecanismo de reparación. Por consiguiente, se debe seleccionar con cuidado el valor de NRT para este enfoque, a fin de detectar los enlaces rotos sin incrementar de manera innecesaria la carga en el servidor. El enfoque proactivo se beneficia principalmente de la alta frescura de la información de enrutamiento, con un aumento del 14%.

Es fundamental destacar que, en el caso de densidades de nodo altas (Densidad +), el enfoque de enrutamiento reactivo supera al enfoque de enrutamiento proactivo para la mayoría de las combinaciones de frescura analizadas. La alta incidencia de colisiones entre paquetes en la red ad-hoc satelital al emplear el enfoque de enrutamiento proactivo puede explicar este fenómeno. Esta comparación se realiza con base en la cantidad de colisiones de paquetes registradas al implementar el enfoque de enrutamiento reactivo.

A partir del análisis y la discusión realizados en este estudio, se pueden establecer las siguientes pautas para abordar las tareas de enrutamiento en las ad-hoc satelitales:

- En el caso de que la cantidad prevista de nodos que forman parte de la red ad-hoc satelital sea reducida, es posible que un enfoque de enrutamiento proactivo ofrezca un desempeño superior al enrutamiento reactivo.
- No obstante, al emplear el enrutamiento proactivo, es necesario ser precavido al modificar los parámetros de actualización de la información con el fin de alcanzar una eficiente ejecución del enrutamiento.
- El mejor rendimiento para ambos enfoques se logra cuando todos los nodos considerados están dispuestos a participar en la red ad-hoc satelital (NBH-) en situaciones de baja densidad de nodos.
- En redes ad-hoc satelitales con baja densidad de nodos, se debe preferir un NRT mayor junto con un HMP corto. La afirmación anterior es válida para ambas estrategias de enrutamiento.
- En una red ad-hoc satelital con una alta densidad de nodos (Densidad +), se observó que el enfoque reactivo ofreció el mejor rendimiento de entrega de paquetes (PDR) y la menor cantidad de colisiones de paquetes en comparación con otras estrategias.
- En consecuencia, si se prevé que la densidad de los nodos en una red ad-hoc satelital sea elevada, sería más apropiado emplear un enfoque de enrutamiento reactivo en lugar de uno proactivo para la tarea de enrutamiento.

Es importante considerar que estas pautas pueden servir como punto de partida para desarrollar estrategias de enrutamiento particulares en las redes ad-hoc satelitales. El análisis y la discusión presentados en este documento pueden servir como fundamento para el diseño de estrategias de enrutamiento híbrido en redes ad-hoc satelitales muestra una variabilidad significativa en la densidad de nodos, que va desde baja a alta densidad del nodo. En investigaciones posteriores, se analizará el diseño de protocolos híbridos para la red ad hoc de Internet de las cosas.

A partir de los resultados expuestos y su respectiva discusión, se estima que la metodología propuesta en este estudio para evaluar y analizar estrategias de enrutamiento en redes ad-hoc satelitales, el análisis comparativo entre enrutamientos proactivos y reactivos llevado a cabo, y la identificación de los factores críticos para la tarea de enrutamiento, establecen un punto de partida que la comunidad académica puede utilizar para investigar el diseño e implementación de nuevas estrategias de enrutamiento en redes ad-hoc satelitales.

Capítulo 5. TLE-ROUTING

5.1 Introducción

Los desafíos particulares y únicos asociados con las redes ad-hoc satelitales requieren que los protocolos de comunicación utilizados para este tipo de redes aborden estas peculiaridades. Dentro de los aspectos más relevantes para considerar se encuentran el alto dinamismo de la red y las limitaciones particulares de los nodos diseñados para formar parte de estas redes. El dinamismo de la red se manifiesta no solo en la velocidad, sino también en la altura y en los retardos por distancia que son intrínsecos al tener como nodos satélites orbitando la Tierra. A modo de ejemplo, se puede concebir una red satelital como una estructura tridimensional, segmentada en diferentes niveles de altitud que categorizan a los satélites en órbita baja, media y alta donde cada segmento contiene retrasos distintos solo por la distancia hasta la superficie terrestre. Es importante destacar que, en las redes satelitales, la comunicación entre nodos no se limita a un solo tipo de enlace, como suele ocurrir en las redes terrestres convencionales. En estas redes, existen al menos dos tipos de nodos: los nodos terrestres, también llamados estaciones terrenas, y los nodos espaciales o satélites. Cada uno de estos nodos puede emplear tecnologías de comunicación distintas para interactuar tanto entre sí como con otros nodos, dependiendo de sus capacidades de procesamiento, disponibilidad para participar en la red y energía disponible para el proceso de comunicación.

Considerando que el desempeño de los algoritmos de enrutamiento ad-hoc se ve fuertemente afectado por la movilidad de los nodos, para diseñar un algoritmo de enrutamiento para establecer redes ad-hoc satelitales es conveniente identificar un conjunto de atributos que describan la movilidad del satélite. Esto permitiría predecir la posición de los nodos que conformarán la red en un momento futuro o pasado. Como se mencionó en los capítulos 2 y 3, los archivos de TLE proporcionan la posibilidad de estudiar las características de desplazamiento de los satélites en relación con el centro de la Tierra. Por lo tanto, si en una red satelital ad-hoc se le concede al nodo la capacidad de calcular su conjunto de elementos orbitales (TLE) interno, sería factible que el nodo pudiera determinar su posición en relación con el centro de la Tierra en cualquier momento. Esto permitiría que cada nodo calcule su ubicación de referencia para establecer las rutas que permitan la transmisión de la información de un punto a otro a través de la red.

Anteriormente se llevó a cabo una exploración inicial que proporcionó factores sólidos para tener en cuenta en el desarrollo de protocolos de enrutamiento en redes as-hoc satelitales, como tener una alta tasa de actualización de información y la búsqueda de alta disponibilidad de nodos vecinos. Basados en estos requerimientos, en este trabajo de investigación se propone un nuevo protocolo de enrutamiento para la formación de redes ad-hoc satelitales que aprovecha la información que cada nodo satelital puede tener de su posición relativa al utilizar la información contenida en los archivos TLE. En las siguientes secciones se explican los detalles del funcionamiento de dicho protocolo el cual ha sido llamado TLE-Routing.

5.2 Introducción de TLE Routing

El protocolo TLE-Routing es un protocolo de enrutamiento desarrollado para redes ad-hoc satelitales. En este se combinan elementos de un descubrimiento proactivo de los miembros de la red con la responsabilidad del mejor siguiente salto otorgada al nodo que contiene la información salto a salto. Se busca que el protocolo lleve a cabo labores de mantenimiento de manera distribuida y descentralizada, sin depender de una entidad central. El protocolo también permite la distinción entre los distintos tipos de nodos que participan en una red satelital como son estaciones terrenas del lado terrestre y satelitales del lado espacial.

Para el conocimiento y descubrimiento de la red se utiliza un mecanismo proactivo de descubrimiento de vecindarios mediante el envío de mensajes broadcast con difusión de un salto, denominados "Hello Packet" (tal cual se hace típicamente para protocolos ad-hoc) y a los vecinos descubiertos se les agrega a una tabla de enrutamiento. La tabla de enrutamiento contiene sus propias rutinas de mantenimiento como, por ejemplo, purgas según las últimas interacciones con nodos vecinos.

En lo que respecta al envío de mensajes unicast y descubrimiento de rutas, TLE-Routing utiliza como una herramienta principal las características de movimiento obtenidas por los Elementos de Dos Líneas (TLE) de cada nodo participante en la red. De manera individual cada nodo realiza cálculos de su órbita utilizando su TLE propio para determinar el momento en que pasará por segmentos terrestres específicos durante periodos de 24 horas. Estos segmentos terrestres son definidos por la división de la superficie de la Tierra en zonas de servicio específicas fijas. Con esta información, un nodo espacial registrará los resultados de los pases sobre las diferentes zonas de servicio en una tabla siguiendo un orden tal que la primera entrada

se corresponderá con la siguiente zona de servicio que será transitada por el nodo. Como se describirá con mayor detalle en las siguientes secciones, para hacer la selección del siguiente salto cuando se transmite un paquete de información, en TLE-Routing se utiliza la ubicación de la zona de servicio destino, la información contenida en la tabla de zonas de servicio de cada nodo y la ubicación relativa calculada de cada nodo. A continuación, se explica la manera en la que se definieron las zonas de servicio utilizadas en TLE-Routing.

5.3 Zonas de servicio en TLE-Routing y mecanismo de tránsito orbital

Como se mencionó anteriormente, TLE-Routing requiere de la definición de zonas de servicio para llevar a cabo sus procesos de enrutamiento. Tradicionalmente, la forma de localizar un punto sobre la superficie terrestre es utilizando su latitud y longitud. Por lo tanto, una propuesta directa para hacer una división de la superficie de la Tierra en zonas de servicio podría basarse en una malla de meridianos y paralelos. Sin embargo, esta propuesta para la división terrestre presenta inconvenientes como el área cambiante de las posibles divisiones (**Figura 29**). Además, crea un fenómeno peculiar en las zonas polares, donde en un punto no existe una posible división luego de que convergen los paralelos. Por esta razón es necesario buscar alternativas de división terrestre tales que el área de las divisiones sea lo más uniforme posible y no presente puntos singulares como es el caso de los polos en una división basada en paralelos y meridianos.

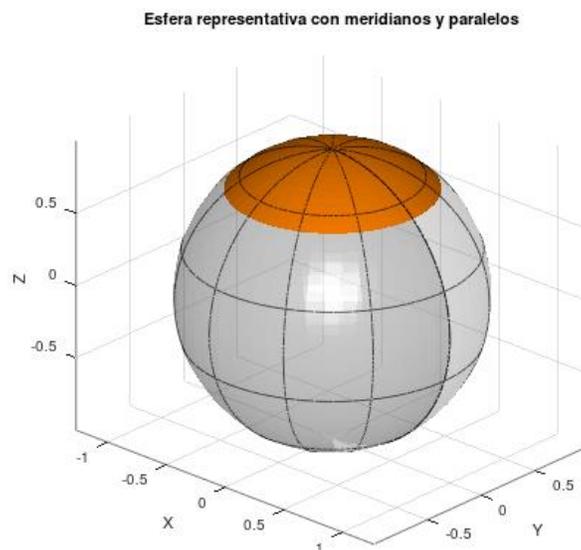


Figura 29 Esfera dividida en grupos de meridianos y paralelos donde se observan áreas heterogéneas en las divisiones

Por lo anterior, en TLE-Routing se propone el desarrollo e implementación de un mecanismo el cual permita a cada nodo conocer en que instante de tiempo se encontrara dentro de una zona determinada y cuando pasara a la siguiente, este mecanismo es llamado “Mecanismo de Transito Orbital” (se refiere al lector al anexo B, “Diagrama de flujo del mecanismo de tránsito orbital”). La relación de zonas y tiempo obtenidas por el mecanismo se almacenará en una tabla denominada “Tabla de Zonas” (se muestra un ejemplo en la **Tabla 8**) la cual estará organizada en orden descendente con la zona de servicio actual como primer elemento en la tabla y los elementos inferiores serán las zonas de servicio futuras, con un registro de la última zona a la cual se le dio servicio.

Tabla 8 Ejemplo de una “Tabla de Zonas” calculada por un nodo.

Zona actual	Tiempo inicio (s)	Tiempo Final (s)
160	1000	1499
163	1500	1599
162	1600	1699

Con lo anterior en mente, en el diseño de TLE-Routing se propone uso de construcciones geométricas alternativas para la delimitación de las zonas de servicio en la superficie de la Tierra, tal cual se explica a continuación.

5.3.1 Definición de zonas con poliedros de Goldberg

Una propuesta para dividir la superficie de una esfera de tal manera que se obtengan zonas con alto grado de regularidad y simetría es mediante el uso de un icosaedro truncado (Murakami & Nishimura, 2001), popularizado por Buckminster Fuller (Sieden, 2000). El icosaedro truncado se construye a partir de un icosaedro regular al “cortar” sus vértices, para obtener una forma geométrica en 3 dimensiones que se acerca a la forma de una esfera. En particular, el resultado de la operación de truncado resulta en un patrón de hexágonos y pentágonos regulares localizados de tal manera que se sigue una forma esférica, como en el caso de los balones de fútbol mostrado en la (**Figura 30**).

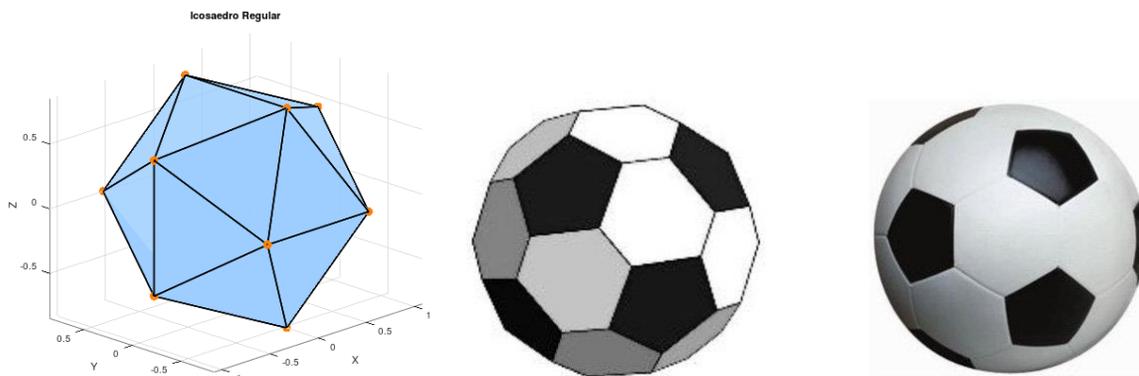


Figura 30 Icosaedro regular junto a un Icosaedro Truncado como balón de juego.

El icosaedro truncado se clasifica como un poliedro de Goldberg, GP (1,1), y como un domo geodésico, construido a partir de 20 hexágonos y 12 pentágonos regulares (se refiere al lector a (Goldberg, 1935) para más información acerca de los poliedros de Goldberg y su notación). Por lo tanto, esta forma geométrica se puede utilizar para dividir una esfera en 32 zonas regulares (en comparación con una división basada en meridianos y paralelos) con 90 aristas y 60 vértices. Es importante notar que si se utiliza el icosaedro truncado para definir las zonas de servicio en la superficie de la Tierra empleadas por TLE-Routing, se tendría como resultado que la distancia de centro a centro entre zonas adyacentes sería de más de 4,500 km. Si bien esta distancia es fácilmente abarcada por satelitales GEO y algunos MEO, los satelitales LEO podrían tener dificultades para realizar comunicaciones definiendo zonas tan extensas. Por la razón anterior, en este trabajo de tesis se propone utilizar el poliedro de Goldberg GP (4,0) mostrado en **la Figura 31**.

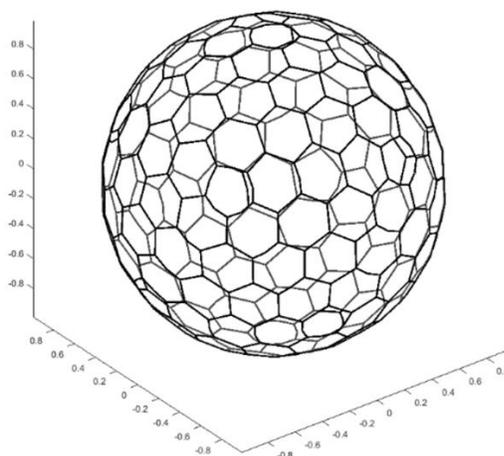


Figura 31 Representación de un poliedro de Goldberg (4,0)

La división de la superficie terrestre en 162 zonas mediante el poliedro anteriormente mencionado no solo proporciona un marco para organizar la cobertura satelital, sino que también establece las bases estructurales para definir el contenido de los mensajes utilizados, por ejemplo, mecanismos de descubrimiento de vecinos en TLE-Routing. Al asignar identificadores fijos a cada zona (desde el polo norte, zona 1, hasta el polo sur, zona 162), se habilita un sistema de referencia unificado que los nodos espaciales pueden utilizar para:

1. **Predecir trayectorias:** Anticipar transiciones entre zonas basadas en TLEs, optimizando el intercambio de paquetes "Hello" con información de zona actual, futura y pasada.
2. **Estimar proximidad:** Calcular distancias inter-zona para identificar vecinos potenciales, incluso en órbitas LEO.
3. **Programar ventanas de servicio:** Coordinar comunicaciones tierra-espacio durante sobrevuelos predecibles de zonas específicas.

5.4 Mecanismo de descubrimiento de vecinos y propuesta de calendarización en transmisiones tierra-espacio.

En redes satelitales dinámicas, la movilidad de los nodos y la intermitencia de los enlaces son desafíos críticos por lo cual es necesario contar con mecanismos enfocados en el descubrimiento y mantenimiento de vecinos que estén diseñados para afrontar los desafíos topológicos de este tipo de redes. Asimismo, estos mecanismos deben de servir como base para otras funciones dentro del protocolo, como lo son la selección del siguiente mejor salto y el mantenimiento de las tablas de enrutamiento.

En TLE-Routing se utiliza el mecanismo de envío de paquetes "Hello" para las siguientes tareas principales:

- Descubrimiento de vecinos.
- Creación y mantenimiento de tablas de enrutamiento, para lo cual se utiliza la información dentro tabla de zonas para identificar características de los nodos vecinos como la zona actual de servicio.

- Calendarización de la comunicación Tierra-espacio, donde la predictibilidad orbital permite identificar ventanas de transmisión aprovechables por estaciones terrenas.

Estas tareas se describen a continuación.

5.4.1 Paquete de “Hello”, creación y mantenimiento de una tabla de enrutamiento.

TLE-Routing emplea paquetes periódicos "Hello" en sus nodos para intercambiar información con su vecindad a un salto de distancia. Estos paquetes contienen tres elementos clave en su contenido, los cuales son obtenidos desde la “Tabla de Zonas”: la zona actualmente en servicio por el nodo; la próxima zona de servicio según su “Tabla de Zonas”; y la última zona atendida en su historial. Adicionalmente, incorporan un identificador único para su uso por estaciones terrenas y un contador de vecinos activos detectados. Este contador es utilizado por el mecanismo de selección del siguiente mejor salto. Para el identificador único se utiliza el nombre único del TLE, eliminando la necesidad de direcciones generadas por protocolos de direccionamiento convencionales como IP. El diagrama del contenido de un paquete de Hello puede observarse en la **Figura 32**.

Identificador unico (2 Byte)	Zona actual (1 Byte)	Zona futura (1 Byte)	Zona pasada (1 Byte)	Numero de vecinos (1 Byte)	Identificador de estacion terrena (1 bit)
---------------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	----------------------------------	-------------------------------------------------

Figura 32 Paquete de “Hello” utilizado en TLE-Routing.

La recepción de un paquete "Hello" actualiza la “Tabla de Enrutamiento” interna en cada nodo, la cual incluye todos los campos anteriormente descritos, y se agrega un estado binario el cual representa un estado activo o inactivo para cada ruta. Este último es utilizado por el mecanismo de mantenimiento o purga de la “Tabla de Enrutamiento”, en el cual las rutas se marcan como inactivas tras dos intervalos de envíos de paquetes de “Hello” consecutivos sin actualización, y se eliminan definitivamente después de diez períodos. La Tabla 9 presenta un ejemplo operativo de esta tabla.

Tabla 9 Ejemplo de tabla de enrutamiento de un nodo en TLE-Routing.

Identificador único	Zona actual	Zona futura	Zona pasada	Número de vecinos	Identificador de estación terrena	Tiempo registro	Ruta activa
01	16	52	53	1	0	1000	1
02	17	18	16	3	0	1002	0
03	58	58	58	1	1	1004	1

5.4.2 Proceso de comunicación Tierra-espacio

La información obtenida de los TLE y vaciada en la “Tabla de Zonas” permite conocer si un satélite volverá a dar servicio a la misma zona y en cuanto tiempo es que volverá a realizar un pase. Por esto en TLE-Routing se propone añadir a las estaciones terrenas la capacidad de generar una “tabla de pases”, en donde se registre un pase reportado por un nodo espacial. Esto busca aumentar la probabilidad de éxito para transmitir información a través de la red. En TLE-Routing el nombre del mecanismo descrito anteriormente se denomina mecanismo de “Búsqueda de nodos satelitales”.

Cuando una estación terrena requiere de iniciar un envío de datos pueden presentarse dos escenarios. En el primero la estación ya cuenta con registros en su tabla de enrutamiento creados al momento de escuchar paquetes de “Hello” provenientes de nodos satelitales. En el segundo, la estación no cuenta con registros en su tabla de enrutamiento. En este caso, para identificar satélites que se encuentren en rango de comunicación y puedan dar servicio a la zona donde se ubica la estación terrena, se hace uso de paquetes “Hello” disparados por el mecanismo de “Búsqueda de nodos satelitales” de la estación terrena. De esta manera la estación terrena puede crear una tabla de enrutamiento a partir de la respuesta que los nodos satelitales en rango den a dichos paquetes. Adicionalmente, el mecanismo de “Búsqueda de nodos satelitales” inicia un proceso para conocer si un nodo satelital con el cual existe comunicación volverá a pasar sobre la zona de servicio de la estación terrena, esta técnica usualmente se conoce como “Scheduling”(Ehsanfar & Grogan, 2020). Para esta última parte del proceso se desarrolló una propuesta para el descubrimiento y su registro en cuatro pasos (**Figura 33**):

1. Un paquete es transmitido desde una estación terrenal iniciando una búsqueda a un nodo satelital.

2. El dispositivo satelital recibe el paquete y examina los datos de la zona actual en su "tabla de zonas".
3. El nodo satelital proporciona una respuesta a la estación terrenal mediante un "ACK".
4. El nodo satelital transmite un paquete de "scheduling" que incluye los tiempos de los pases subsecuentes registrados en la "table de zonas" del nodo para la zona de servicio actual.
5. La estación terrenal tiene la capacidad de efectuar la transmisión de información si es necesario o finalizar el proceso.

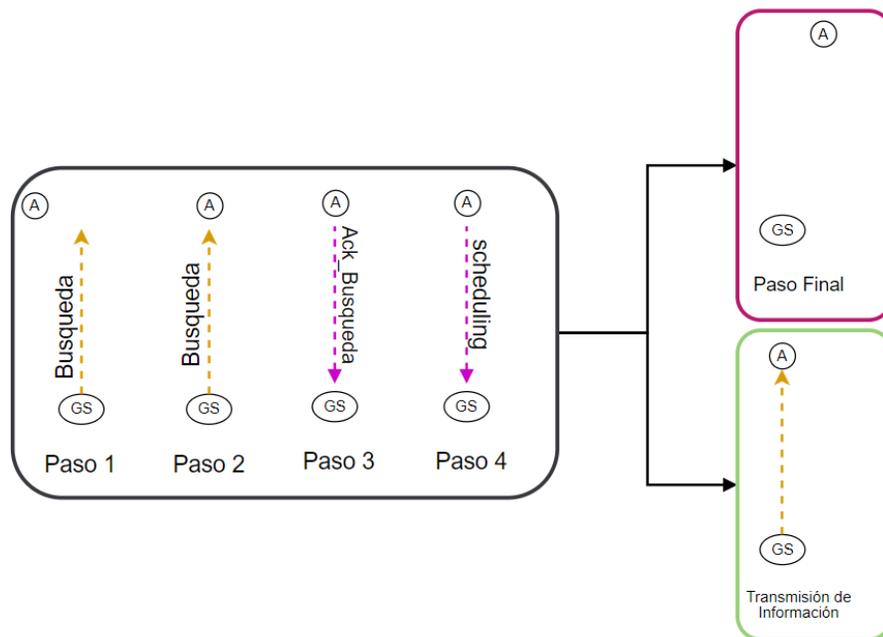


Figura 33 Diagrama de pasos para la comunicación de una estación terrenal y un satélite.

Cabe destacar que el proceso no restringe a la estación al uso exclusivo de los registros en la "tabla de pases" para iniciar una comunicación, sino que genera posibles oportunidades adicionales de transmisión exitosas, las cuales pueden ser adaptables a los requisitos específicos de alguna aplicación.

5.4.3 Mecanismo de ACK implícito.

El uso de confirmaciones (Acknowledgement - ACK) es un mecanismo fundamental en protocolos de red para garantizar la entrega confiable de paquetes unicast. Sin embargo, en entornos con recursos limitados y alta congestión del medio, el enfoque tradicional de usar una confirmación explícita (en la cual el nodo receptor de un paquete envía un mensaje de respuesta al nodo transmisor) tiene los inconvenientes de que cada transmisión de paquete ACK consume energía adicional y aumenta la contención por el medio inalámbrico, lo que puede degradar el rendimiento global de la red.

Como alternativa, TLE Routing hace uso de un mecanismo de ACK implícito, el cual permite confirmar la recepción de un paquete al realizar una inferencia indirectamente. Para explicar este mecanismo considere la **Figura 34**, donde se muestran sus 3 etapas o pasos:

1. **Paso 1:** Nodo A envía el paquete M al nodo B (siguiente salto)
2. **Paso 2:** Nodo B retransmite M hacia el nodo C (destino final)
3. **Paso 3:** Nodo A, al detectar la retransmisión de B, infiere ACK implícito

Note que el mecanismo de ACK implícito opera bajo el principio de que cuando un nodo intermedio (B) retransmite un paquete hacia el siguiente salto (C), el nodo transmisor original (A) puede detectar dicha retransmisión siempre que permanezca dentro del rango de cobertura de (B). Esto le permite al nodo (A) asumir la recepción exitosa sin requerir la transmisión de paquete ACK adicional.

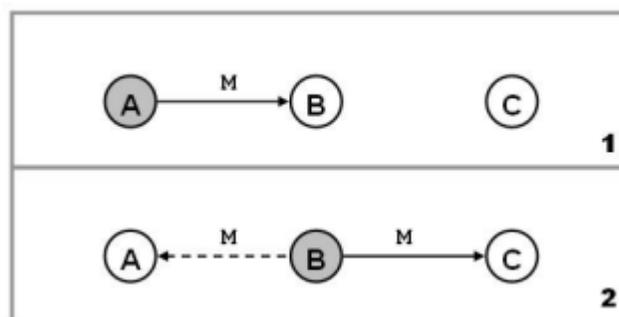


Figura 34 Diagrama de definición de ACK implícito.

Si bien la implementación del mecanismo de ACK implícito parece ideal para redes estáticas o de baja movilidad, estudios recientes (Yamamura & Miwa, 2014 y de Andrade et al., 2018) demuestran su viabilidad en redes vehiculares dinámicas, abriendo posibilidades para su adaptación en redes ad-hoc satelitales. Por esta razón se decidió utilizar ACK implícito en TLE Routing, lo cual naturalmente derivó en implementar una rutina de ACK implícito en ST-INETMANET que fuera compatible con la implementación del protocolo ALOHA introducida en el Capítulo 3.

5.5 Algoritmo para la selección del mejor siguiente salto y gestión de paquetes

Como se mencionó anteriormente, TLE-Routing no se basa en la selección de nodos exclusivos como método principal de retransmisión de información (como lo son nodos MPR en OLSR), si no en identificar el mejor nodo dentro de los posibles nodos vecinos para delegarle la responsabilidad de la retransmisión de la información para llegar a su destino.

5.5.1 Algoritmo de Selección de Siguiete Salto

En TLE-Routing el algoritmo para decidir el siguiente salto se compone de cinco decisiones iniciales secuenciales (¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.), y van de acuerdo con el uso de la nformación disponible en la “Tabla de enrutamiento de cada nodo”.

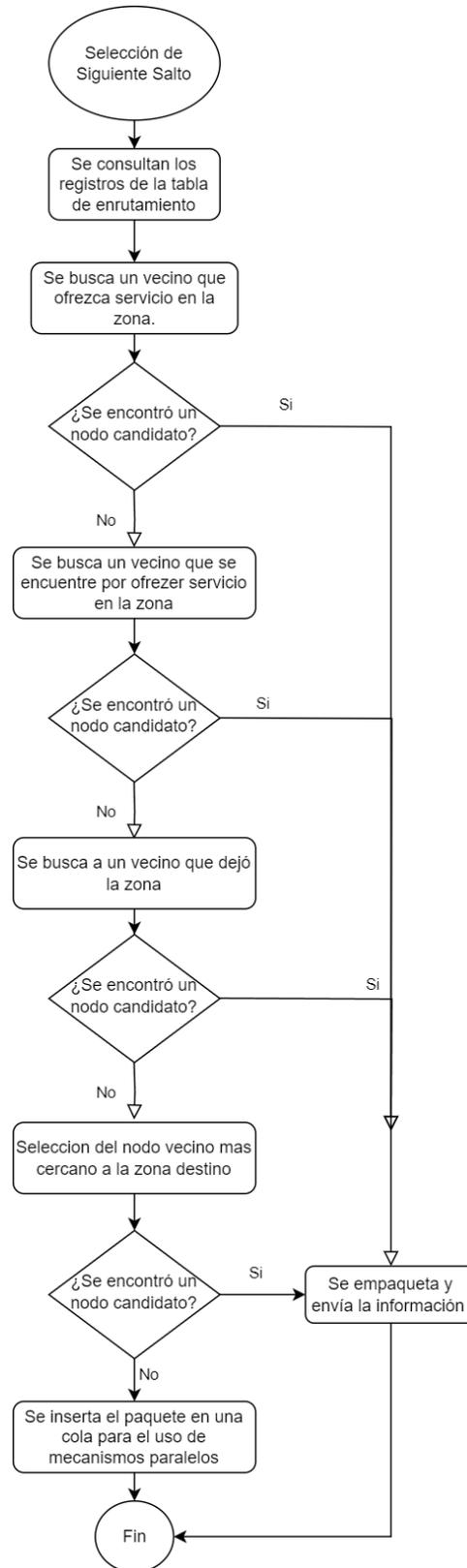


Figura 35 Diagrama de flujo para la selección del mejor siguiente salto.

La descripción de las decisiones anteriormente mencionadas se presenta a continuación:

1. **Prioridad a vecinos en la zona destino de la información:** Al momento de iniciar el enrutamiento de información, se consulta si existe un nodo que esté ofreciendo servicio la zona de destino de la información. Si existe dicho nodo, entonces este nodo es asignado como el mejor siguiente salto y se procede con él envío en unicast de la información hacia ese nodo. En caso contrario se procede a la siguiente decisión.
2. **Vecinos en transición hacia la zona de servicio:** Si no existe un nodo que ofrezca cobertura en la zona de destino, entonces se buscan nodos que se estén por dar servicio a la zona de destino. En caso en que no existan, entonces se procede a la siguiente decisión.
3. **Nodos que recién abandonaron la zona de destino:** Cuando no se han encontrado nodos que se encuentren sobre la zona de destino o estén por ofrecer servicio a esta, entonces se seleccionan nodos que tengan en su registro de última zona de servicio a la zona de destino. Si hasta este punto no es posible asignar un nodo como mejor siguiente salto, se procede a la siguiente decisión.
4. **Proximidad geográfica:** Se busca el nodo que se encuentre más cercano a la zona destino de la información según sus registros en la tabla de enrutamiento.
5. **Desempate por conectividad:** Cuando existen dos o más opciones de nodos para ser el mejor siguiente salto, entonces, se privilegia al que posee mayor número de vecinos registrados.

5.5.2 Transmisión unicast y mecanismos de integridad.

Tras seleccionar el siguiente salto, se inicia una transmisión unicast hacia el nodo seleccionado como siguiente salto, el cual contiene la información necesaria para el procesamiento de la ruta y la incorporación de dos mecanismos clave para evitar la duplicidad e inundaciones de paquetes. Los mecanismos junto con sus campos y la información de ruta se describen a continuación:

- **Un identificador de secuencia incremental para la detección de paquetes duplicados:** Un evento recurrente en redes ad-hoc es el envío de paquetes duplicados debido a la imposibilidad de

escuchar un ACK del nodo que recibe un unicast. Por esta razón, en TLE-Routing se propone incluir un identificador secuencial en los paquetes unicast enviados, el cual será utilizado para no procesar el paquete recibido si, tras cotejar contra los paquetes enviados y almacenados, este paquete ya fue procesado por el nodo. Lo anterior cumple con evitar la propagación de paquetes duplicados por la red.

- **Un identificador para la detección de inundación de paquetes (“Time To Live” o “TTL”):** En redes existe la posibilidad de que un paquete de información circule infinitamente por la red debido problemas en sus nodos que afecten el protocolo de enrutamiento. Debido a lo anterior, es necesario incluir el mecanismo “Time to Live”, el cual limita el número de saltos que un paquete puede dar antes de ser descartado.
- **Identificadores para la selección del siguiente mejor salto junto con prevenciones de bucles:** Es necesario que al realizar el envío en unicast de la información, el nodo transmisor envíe toda la información necesaria para que el nodo seleccionado como el mejor siguiente salto pueda tomar la decisión del salto subsecuente de la información. Por lo anterior se incluyen los campos donde se identifican el último salto de la información que incluye la dirección, última y penúltima zona donde se proviene la información, así como la zona de destino final.

El formato de paquete de la transmisión unicast donde se incluyen los campos de los mecanismos junto con la información de ruta se observa en la **Figura 36**. El campo “TTL” perteneciente al mecanismo “Time-to-Live” con una longitud de 1B permitiendo un TTL máximo de 255. El campo “Numero de secuencia” perteneciente al mecanismo de detección de paquetes duplicados y los campos “con una longitud de 2B permitiendo un número máximo de secuencia de 65535. Los campos “Identificador del nodo transmisor” (2B ligado al “Satellite catalog number” de un TLE), “identificación del nodo destino” (2B ligado al “Satellite catalog number” de un TLE), “zona de origen del paquete” (1B), “penúltima zona de servicio” (1B) y “zona destino” (1B) pertenecientes al mecanismo de selección del siguiente mejor salto (explicado en la sección anterior) junto con prevenciones de bucles. Finalmente, el campo de información por paquete dependerá de las capacidades de la capa física.

Identificador del nodo destino (2B)	TTL(1B)	Número de secuencia (2B)	Identificador del nodo transmisor (2B)	Zona de origen paquete (1B)	Penúltima zona de proveniencia del paquete (1B)	Zona de destino (1B)	Información
-------------------------------------	---------	--------------------------	----------------------------------------	-----------------------------	-------------------------------------------------	----------------------	-------------

Figura 36 Diagrama del contenido de un paquete unicast de TLE-Routing.

Como se mencionó en capítulos anteriores las redes ad-hoc satelitales enfrentan desafíos que no se encuentran necesariamente en redes terrestres. Por ejemplo, la posibilidad de perder al vecino seleccionado como mejor siguiente salto debido a la alta movilidad de los nodos, o la formación de grupos de nodos espaciales denominados "swarms". La exploración de estos desafíos, así como las propuestas que trabajan en paralelo a la selección del mejor siguiente salto para resolverlos se presentan en la siguiente sección.

5.6 Situaciones presentes en el enrutamiento redes ad-hoc satelitales y mecanismos para afrontarlas.

En los escenarios de aplicación planteados para redes ad-hoc en capítulos anteriores, el algoritmo de enrutamiento puede enfrentar dos desafíos críticos:

- **Formación de "swarms"**: Agrupaciones aisladas de nodos que pierden conexión con la red principal, lo que puede generar ciclos o "loops" de retransmisiones.
- **Imposibilidad de encontrar un nodo vecino para el "mejor siguiente salto"**: Existe la posibilidad de que el nodo designado como el mejor siguiente salto de la información se encuentre en la periferia de la red y no cuente con un nodo vecino para acercar la información al destino.

Para atender estos desafíos, TLE-Routing incorpora dos mecanismos complementarios que se detallan en las siguientes subsecciones:

- **Detección de agrupaciones emergentes de satélites**: Este mecanismo busca identificar agrupaciones desconectadas de la red principal mediante análisis de retransmisiones cíclicas y prioriza el almacenamiento temporal en colas especiales.
- **"Store & forward" con delimitación de tiempo**: Este mecanismo propone el almacenamiento de paquetes en situaciones donde no sea encontrado un caso válido para el "mejor siguiente salto". Para esto se define una ventana de tiempo durante la cual se almacena el paquete, aminorando casos de redes desconectadas debido a pocos participantes o cuando un nodo se encuentre en la periferia de la red y aun así no logra retransmitir la información hasta su zona de destino.

A través de estos mecanismos, TLE-Routing realiza esfuerzos para entregar la información hacia su destino incluso en escenarios con baja densidad de nodos participantes y a la vez busca compensar la desconexión transitoria de la red debido a las características de los nodos satelitales.

5.6.1 Detección de agrupaciones emergentes de satélites.

Durante la realización del presente trabajo de investigación, se identificó un comportamiento que puede surgir debido a los patrones de movilidad presentes en las redes ad-hoc satelitales, particularmente cuando la densidad de nodos experimenta fluctuaciones debido al dinamismo inherente de la red. En particular, en estas redes puede surgir un fenómeno caracterizado por la formación de agrupaciones de nodos desconectadas de la red principal, a las cuales se les ha referido como "swarms" (**Figura 37**). En un "swarm" los nodos satelitales viajan en una misma dirección relativa y pueden ser de distintas dimensiones.



Figura 37 Captura de un escenario de simulación con swarms.

Estas agrupaciones, cuando están compuestas por más de tres nodos, pueden desencadenar una secuencia de transmisiones cíclicas, disparadas por los mecanismos de enrutamiento. Esto a su vez puede

resultar en un uso ineficiente de recursos de procesamiento y energéticos, así como resultar en un agotamiento prematuro de mecanismos de enrutamiento (por ejemplo, del mecanismo "Time to Live" - TTL). Por lo anterior se desarrolló un "Mecanismo de detección de agrupamientos" y un mecanismo de "store & forward modificado", los cuales forman parte de TLE-Routing y son explicados a continuación.

5.6.2 Mecanismo de detección de agrupamientos aislados de la red y prevención de enlaces redundantes.

Un enfoque intuitivo para detectar swarms implicaría filtrar paquetes basándose en identificadores de nodos de los últimos saltos (por ejemplo, evitar retransmitir a nodos que ya procesaron el paquete). Sin embargo, esta estrategia resulta inviable cuando se tienen swarms dinámicas que van desde dos hasta un número desconocido de nodos. Esto se debe a que se requeriría almacenar una lista creciente de direcciones en la cabecera del paquete, superando rápidamente los límites de tamaño predefinidos y fragmentando la información crítica. En TLE-Routing se propone resolver la problemática anterior manteniendo un registro local en los nodos, el cual almacena identificadores únicos de paquetes (combinando dirección de origen y número de secuencia) asociados a un temporizador de validez finita (por ejemplo 5 minutos). El diagrama de flujo del mecanismo correspondiente se presenta en la **Figura 38**.

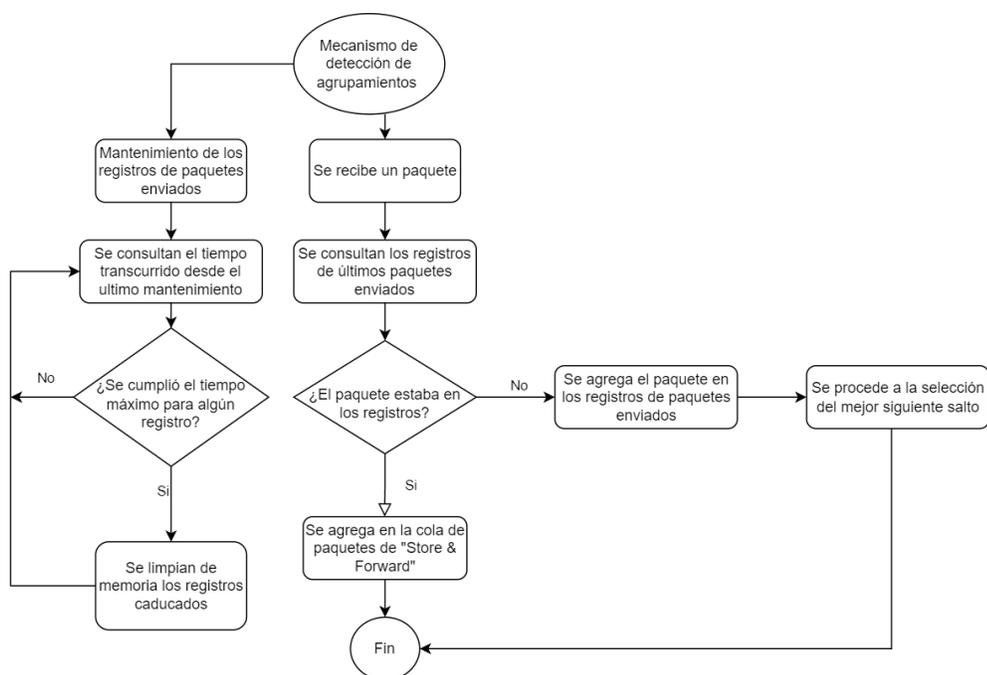


Figura 38 Diagrama de flujo del mecanismo de detección de swarms.

En el anterior diagrama, cuando un nodo recibe un paquete que coincide con una entrada existente en este registro (i.e. que ya había sido retransmitido previamente), entonces se infiere que el paquete pertenece a un swarm desconectado de la red principal y está circulando cíclicamente dentro del grupo. Ante esta situación, el nodo cancela la retransmisión inmediata y almacena el paquete en una cola de paquetes a retransmitir manejada por el mecanismo de “Store & Forward” (sección 5.6.3).

5.6.3 Mecanismo de “store & forward” con delimitación de tiempo.

Una vez que se detecta que un nodo se encuentra en un swarm, es necesario que este sea capaz de reconocer cuándo el swarm vuelve a conectarse a la red. Adicionalmente, también es necesario que un nodo aislado identifique cuando es factible reconectarse a la red. Por esta razón, en TLE-Routing se propone hacer uso de una técnica de “store & forward” modificada para solventar dichos desafíos.

El “store & forward” es una técnica que consiste en recibir, almacenar temporalmente y luego retransmitir los datos hacia su destino final. En situaciones donde la transmisión directa a través de la red no es posible debido a limitaciones de ancho de banda o a la pérdida de la ruta hacia el destino, esta técnica permite iniciar mecanismos de reparación de ruta.

La técnica de almacenar y enviar es ampliamente empleada en redes satelitales convencionales, especialmente en las redes que toleran retardos (Delay Tolerant Networks), donde sus nodos guardan la información a transmitir hasta que empaten en una ventana de tiempo con un nodo de transferencia de información. “Store & forward” busca incrementar la probabilidad de que la información sea transmitida a través de la red, al aumentar la ventana de tiempo que tiene el nodo actual para hacer contacto con otro nodo que la información de un siguiente salto. Sin embargo, esto tiene los inconvenientes de agregar retardos al flujo de la información e incrementar el tiempo que los nodos deben de mantener la información en memoria.

La idea de implementar un mecanismo como “store & forward” podría a ser atractiva para el caso específico de densidades de nodos bajas. Sin embargo, es necesario realizar modificaciones al mecanismo debido a las características distintivas de los nodos que se asumen podrían participar en una red ad-hoc satelital. En particular recordemos que para el diseño de TLE-Routing se asume que la misión principal de los nodos satelitales es diferente a la de establecer una red de comunicaciones, por lo que se considera

que cada nodo tendrá capacidades limitadas en almacenamiento y procesamiento para la transmisión de información a través de la red. Por esta razón, TLE-Routing propone la implementación y diseño de un mecanismo de "Store & Forward" limitado por ventanas de tiempo y consciente de las zonas de servicio de los nodos, cuyo diagrama de flujo es presentado en la **Figura 39**.

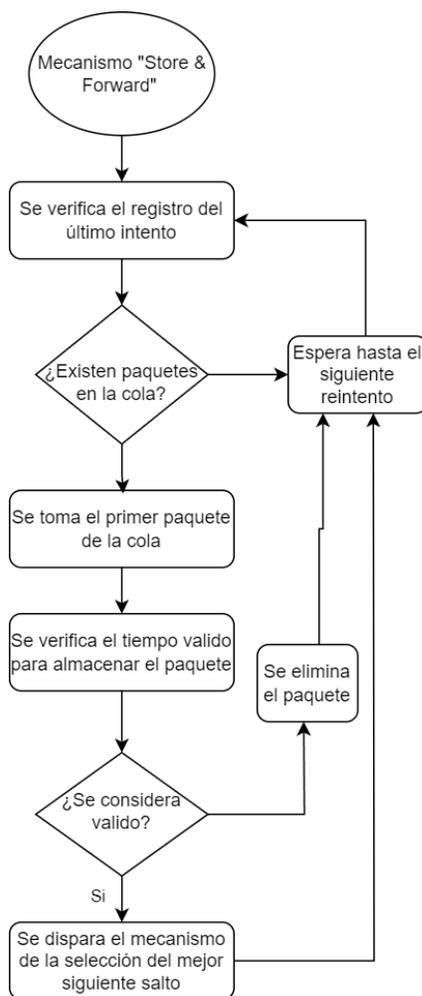


Figura 39 Diagrama de flujo del mecanismo "Store and Forward"

La modificación propuesta de este mecanismo permite que el nodo mantenga el paquete a retransmitir en un buffer interno solo durante el tiempo en que el nodo o el swarm salgan de una situación de desconexión. Las redes ad-hoc satelitales tienen una alta movilidad en sus nodos, por lo cual ofrecer la oportunidad al nodo de encontrarse con un vecino cuando las redes se encuentren con una baja densidad de nodos participantes podría propiciar un incremento de paquetes que lleguen de manera correcta a su destino.

5.7 Desempeño de TLE-Routing en escenarios estáticos y despliegues dinámicos.

Con la finalidad de comprobar el desempeño de las decisiones de diseño tomadas para el desarrollo del protocolo de enrutamiento TLE-Routing, en este trabajo de investigación se propone el diseño de un escenario estático tipo malla para realizar pruebas de la pila de comunicaciones y posteriormente un escenario de emergencia con atención a eventos de tsunami.

A su vez, se propone realizar una comparativa del desempeño obtenido de TLE-Routing con los protocolos considerados estándares de-facto para redes MANET: OLSR y AODV. Esto permite ofrecer una comparativa del desempeño de TLE-Routing desde la perspectiva de soluciones de enrutamiento proactivo o reactivo para redes ad-hoc.

5.7.1 Escenarios estáticos tipo malla.

En este escenario se asume que se cuenta con dos nodos terrestres, uno sumidero y otra fuente de información. El sumidero se asume que está localizado en la costa de México, específicamente en el CICESE (31.8675° N, 116.6652° W). La fuente se asume que está ubicada en Hawái (19.8987° N, 155.6659° W) y. Los nodos satelitales se colocaron en el rango de transmisión máximo (teórico) posible reportado para radios LoRa (2500km) y geográficamente se colocaron sobre los puntos centrales de cada división terrestre de un polígono de Goldberg (4,0).

El objetivo es analizar el desempeño de los protocolos propuestos y TLE-Routing en escenarios donde no existe movilidad, pero todas las consideraciones de comunicación existen. El escenario se presenta en la **Figura 40** y las características del escenario simulado en OMENT++ con ST-INETMANET (ver sección 3.3) se presentan en la **Tabla 10**.

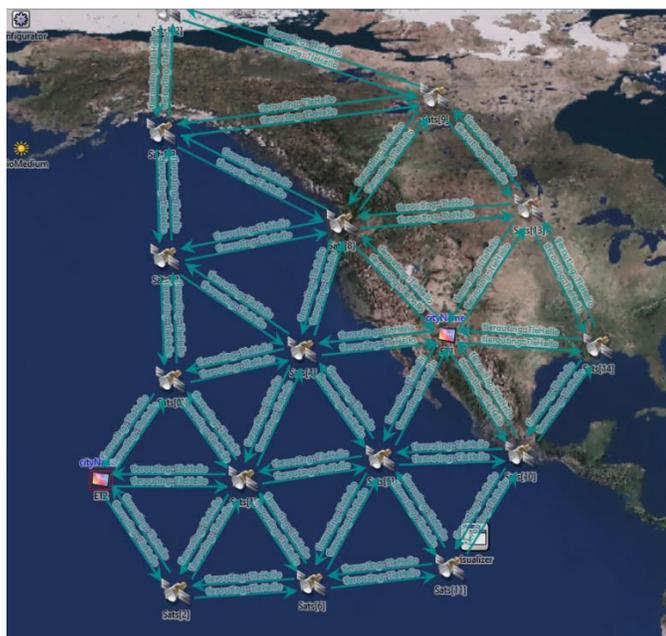


Figura 40 Visualización del escenario estático con vistas a sus enlaces.

Tabla 10 Configuración de simulaciones del escenario estático.

Configuración pila de protocolos de los nodos	
Capa	Configuración
Capa de Aplicación	UDPBasic y UDP-TLE-App UpdSink [Implementación de INET]
Capa de Aplicación (paquetes generados)	1, 2, 4, 8 y 16 Pkts/min.
Protocolos de enrutamiento	AODV, OLSR y TLE-Routing
Capa enlace (MAC)	ALOHA-Ranurado
Capa física (PHY)	LoRa con rangos de transmisión de 2205 km.
Capa física (PHY)	Ancho de Banda (BW) 125 Khz con un SF12 (una velocidad de bps máxima de 293bps)
Configuración de los grupos de escenarios	
División terrestre utilizada	Goldberg (4,0)
Cantidad de simulaciones	100 simulaciones con 10 semillas diferentes.
Angulo mínimo en las estaciones terrenas	10 grados
Altura de los nodos	550 km (LEO)

La configuración del escenario incluye una consideración crítica: la selección del rango de transmisión máximo la cual es de 2715 km para LoRa en entornos satelitales (Mehdi et al., 2023). Este parámetro impacta directamente en dos variables clave:

- *Probabilidad de éxito de una comunicación.* Un mayor rango de transmisión incrementa la conectividad potencial entre nodos en redes ad-hoc dinámicas, facilitando interacciones incluso con baja densidad de nodos (Gujral et al., 2012). Si bien en la propuesta de este escenario tipo malla no se considera el ofrecer un servicio definido, el utilizar la máxima distancia de transmisión nos permite observar el comportamiento de la red cuando se estresa y el alcanzarlo en relativas bajas tasas de datos dado las limitaciones técnicas inherentes de utilizar el máximo rango de transmisión.
- *Limitaciones en la tasa de transmisión de los radios LoRA.* El utilizar el máximo rango de transmisión en LoRA fija su factor de esparcimiento (SF – “*spread factor*”) a 12, lo que limita a tasa de transmisión a 293 bps (bits por segundo).

Bajo estas condiciones, la máxima carga útil por paquete se calcula en 213 bits tras descontar los 80 bits reservados para cabeceras de TLE-Routing (información de zona, TTL, secuencia incremental, etc). Considerando ventanas de servicio típicas de 5 minutos por cada pase satelital, se obtiene un límite teórico de 1.59 kb de datos útiles transmitidos por pase, asumiendo la utilización continua del canal sin colisiones. Dado este contexto, se propone un análisis del comportamiento de la red utilizando la métrica de tasa de entrega de paquetes (PDR), variando las tasas de generación de tráfico y considerando las restricciones impuestas por el máximo rango de transmisión. Esta evaluación busca evidenciar el impacto de dichas condiciones en el desempeño de la red, comparando los resultados de TLE-Routing junto a los protocolos de enrutamiento OLSR y AODV. Para los protocolos anteriores, se asumieron las implementaciones según sus respectivas definiciones en los RFC correspondientes.

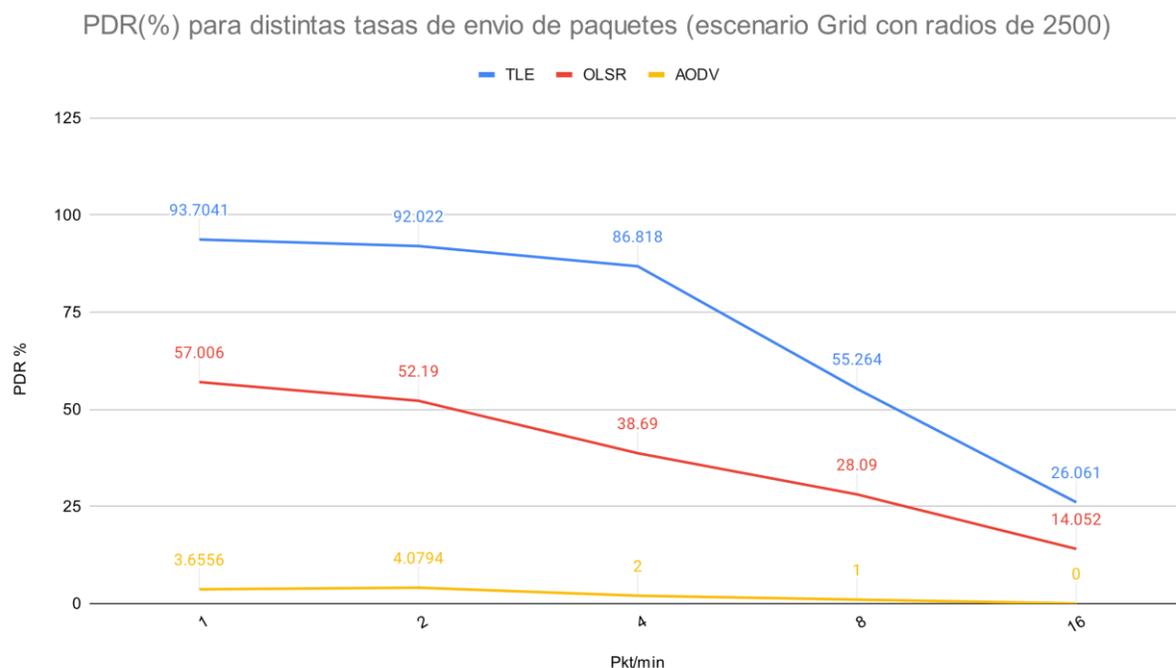


Figura 41 Comparativa de PDR para escenario tipo malla.

Los resultados de simulación para la métrica PDR (ver Sección 2.4.2) revelan el desempeño de los protocolos evaluados. TLE-Routing emerge como el protocolo con el mejor rendimiento, alcanzando un PDR del 93.7% en la tasa más baja (1 pkt/min), superando significativamente a OLSR (57%) y AODV (3.6%). Este patrón se mantiene consistentemente en todas las tasas, demostrando resiliencia ante incrementos de carga. Un análisis detallado del comportamiento bajo estrés de red muestra que el PDR de TLE-Routing experimenta una caída más pronunciada al superar 4 pkt/min (equivalente a 1 pkt/15s), alcanzando un mínimo del 68% a 5 pkt/min. Esta reducción, es atribuible a la saturación del canal LoRa (velocidad fija en 293 bps), y evidencia el caudal eficaz máximo impuesto por las configuraciones de capa física. Si bien la tasa de 293 bps podría considerarse restrictiva, este escenario valida la viabilidad de TLE-Routing en aplicaciones de monitoreo remoto (por ejemplo, telemetría o sensores ambientales), donde la prioridad es la entrega de paquetes sobre la cantidad de paquetes transmitidos. No obstante, se propone extender el análisis a un escenario de desastres con un rango de transmisión de 1500km que refleje el modelo propuesto en ONION (Ruiz-De-Azua et al., 2018), con un SF menor permitiendo tasas de hasta 5.5 kbps (Xuan et al., 2018). Esto permitiría habilitar servicios como Mensajes de ubicación (<50 B), alertas de oleaje (<64B) para tsunamis, y reportes de estado (<30 B), pensados para situaciones de emergencia en específico

desastres naturales.

5.7.2 TLE-Routing en escenarios de desastres naturales.

Como se mencionó anteriormente, a continuación, se presentan los resultados comparativos cuando se emplean los protocolos de enrutamiento AODV, OLSR y TLE-Routing en situaciones de desastres naturales. En particular, se asume la recreación de un escenario presentado en el año 2023, el cual fue la proliferación descontrolada de incendios en Hawái (Roy et al., 2024). Se emplea un nodo que genera datos sobre el archipiélago de las islas de Hawái (19.8987° N, 155.6659° W), así como un nodo que recibe información sobre las costas mexicanas en CICESE (31.8675° N, 116.6652° W). El escenario pretende ilustrar la construcción y posible desempeño de una red ad-hoc satelital emergente, la cual de soporte para desastres naturales. Se analiza el desempeño de la red emergente considerando diversas densidades de nodos disponibles para participar en la red. Para comprender los resultados presentados en esta sección es importante describir la creación de los escenarios.

Como se explicó en el Capítulo 4, en la generación de escenarios de simulación no se considera utilizar constelaciones predefinidas de satélites, ya que TLR-Routing se diseñó para formar redes emergentes considerando la participación de nodos satelitales cuya misión principal podría ser diferente a la de participar en la red. Por esta razón, para cada escenario de simulación los nodos que participaron en la misma se seleccionaron aleatoriamente, buscando capturar de esta manera como se formaría una red con satélites colaborativos que no estén activamente participando en la red si no hasta surgir una emergencia que active su participación. Esto es importante, dado que el efecto que se busca recrear es el surgimiento de una red de apoyo totalmente descentralizada que puede o no estar funcionando antes de que se presente la emergencia que incite al inicio del envío de paquetes a través de esta.

La elección de los parámetros de la generación de paquetes y su tamaño es necesario llevarla en función del tipo de evento que se busca recrear en el escenario, por lo cual una propuesta es analizar este tipo de sistemas. Por ejemplo, en sistemas especializados como el DARTS(Gonzalez et al., 1998) para la identificación y reportes de fenómenos como tsunamis, se utilizan mensajes periódicos cada hora si el sistema se encuentra en un estado sin una emergencia detectada y mensajes periódicos enviados cada minuto tras la detección de una emergencia. Estos mensajes contienen 64 bytes de carga útil, donde van contenidos reportes de diversos sensores y estados generales del sistema. En sistemas de detección de

incendios forestales se sugieren mensajes periódicos cada 2 minutos en caso de emergencia o detección de un incendio y 15 minutos como periodo de monitoreo en un estado normal. En este caso se sugiere una carga útil menor a 64 bytes (Mohapatra & Trinh, 2022). La selección de una carga útil mínima de 64 bytes también permite incluir datos esenciales como coordenadas GPS (11 bytes) y transmisión de estados simples (53 caracteres). Por lo anteriormente mencionado, se propone para el escenario de simulación la transmisión de un mensaje periódico cada minuto con una carga útil de 64 bytes, lo cual es suficiente para transmitir el estado de sensores que permitan la interpretación de un estado actual de la zona en la cual ocurrió el siniestro o posiciones de GPS y mensajes de estados simples.

En el conjunto de simulaciones realizadas se incluyen tres versiones de TLE-Routing. La primera considera una ventana de store-and-forward de 5 minutos para los paquetes en cada nodo. Esta versión es denominada TLE-Routing-300. La segunda versión utiliza una ventana de 60 segundos de store-and-forward y es denominada TLE-Routing-60. La tercera versión no implementa store-and-forward y es llamada TLE-Routing-0. Se incluyen resultados comparativos de OLSR y AODV en dos versiones, la primera con su implementación según sus RFC publicados. La segunda considera una modificación donde en la estación terrena que genera el tráfico se implementa el mismo comportamiento de comunicación tierra-espacio presentado en la sección 5.4.2 para TLE-Routing. Estas modificaciones se etiquetan como OLSR-CT (“OLSR con Comportamiento Terrestre”) y AODV-CT (“AODV con Comportamiento Terrestre”).

Los escenarios se elaboran conforme a la metodología expuesta en el **Capítulo 4.** , donde se generan grupos con posibles nodos que son incorporados en el escenario de simulación utilizando nodos LEO con órbitas reales tomadas de la base de datos Celestrak. Las características de los escenarios se presentan en la **Tabla 11.**

Tabla 11 Configuración de pilas de protocolos utilizados en las simulaciones.

Configuración de pilas de protocolos utilizados en las simulaciones	
Capa	Configuración
Capa de Aplicación	UDPBasic y UDP-TLE-App UpdSink [Implementación de INET]
Capa de Aplicación (paquetes generados)	1 Pkt/min.
Protocolos de enrutamiento	AODV, OLSR, TLE-Routing incluyendo variaciones con Store and Forward y comportamientos terrestres
Capa enlace (MAC)	ALOHA-Ranurado
Capa física (PHY)	LoRa con rangos de 1500km de radio
Capa física (PHY)	BW 125 KHz con un SF10 y una velocidad de 980bps
Configuración de los grupos de escenarios	
Base de datos de orbitas	Celestrak
Cantidad de nodos en cada escenario	Desde 20 nodos hasta 200 en saltos de 20.
Angulo mínimo en las estaciones terrenas	10 grados
Altura de los nodos	550 km (LEO)

5.7.2.1 Resultados y análisis de la métrica de PDR.

Los resultados de PDR (ver sección 2.4.2) obtenidos para cada protocolo de enrutamiento considerando las configuraciones presentadas en la **Tabla 11** se proporcionan en la **Figura 42**. Al observar esta figura se puede ver que el mejor desempeño para todas las densidades de nodos estudiadas es obtenido con TLE-Routing-300, seguido de TLE-Routing-60, TLE-Routing-0, OLSR y por último AODV. La configuración de TLE-Routing-300 mejora significativamente el PDR, esto debido a que los nodos tienen más tiempo para encontrar su siguiente mejor salto. Esto impacta sobre todo en las redes donde se tiene el menor número de nodos participantes, donde tanto AODV como OLSR no superan el 5% de PDR.

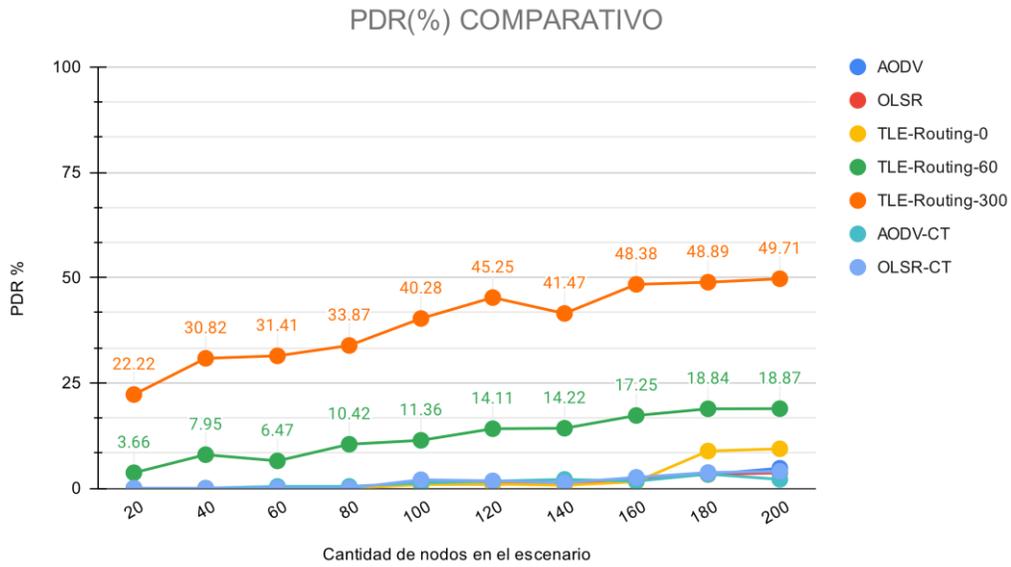


Figura 42 PDR comparativo.

El orden de desempeño refleja que entre más grande sea la ventana de tiempo, mayor la flexibilidad para manejar redes desconectadas. AODV y OLSR, al no considerar mecanismos como el de detección de swarms o store and forward limitado, dependen en su totalidad de sus rutas descubiertas de origen a destino, lo que reduce su eficacia en redes tan dinámicas como las redes satelitales ad-hoc. En la **Figura 43** podemos encontrar la comparación de resultados excluyendo a TLE-Routing-300, buscando ofrecer una perspectiva más clara del comportamiento sobre todo en densidades de nodos de 20-100.

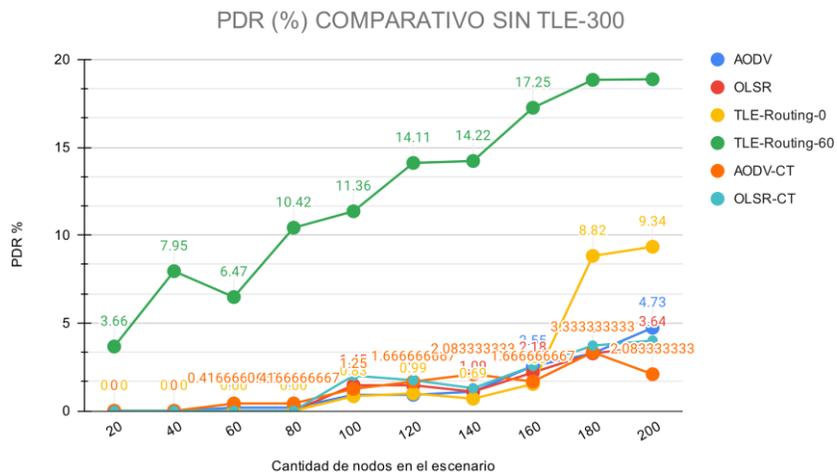


Figura 43 PDR Comparativo sin TLE con mecanismos de store & forward.

Los resultados mostrados en las **Figura 42** y **Figura 43** demuestran que TLE-Routing con una ventana de 60 segundos supera consistentemente a AODV y OLSR en términos de PDR, incluso en sus variantes mejoradas (AODV-CT y OLSR-CT). La Figura 43 en particular, resalta la importancia de ajustar la ventana de tiempo del mecanismo store and forward según la densidad de nodos. En particular, en escenarios con menos de 20 nodos una ventana de tiempo mayor incrementa significativamente la entrega de paquetes al proporcionar mayor flexibilidad para encontrar el mejor siguiente salto. Por otro lado, cuando no se implementa el mecanismo de store-and-forward como en TLE-Routing-0, este supera a AODV y OLSR cuando se tiene una cantidad de nodos en la red mayor a 160. Esto sugiere que el optar por decidir el siguiente mejor salto en lugar de realizar la búsqueda de una ruta de origen a destino o de un punto a destino, proporciona mejores resultados.

5.7.2.2 Resultados y análisis de la métrica de E2E.

La segunda métrica para analizar es el retardo extremo-a-extremo (E2E), definido como el tiempo transcurrido entre el envío de un paquete y su recepción en el destino. En aplicaciones de respuesta a emergencias como el caso de Hawái en 2023 (donde la comunicación interislas colapsó por días) este retardo puede determinar la eficacia de las operaciones de respuesta a las emergencias presentadas.

En la **Figura 44** podemos encontrar el promedio en segundos de la cantidad de tiempo que la información necesitó para poder llegar hacia su destino. Se observa que TLE-Routing, a pesar de ser el protocolo que reporta el mejor resultado analizado para PDR también presenta el mayor tiempo en E2E reportado. Esto se debe a la relación entre la ventana de tiempo configurada en TLE-Routing, el retardo E2E y la cantidad de nodos participantes en la red. Aunque TLE-Routing-300 presenta un E2E mayor que TLE-Routing-60, su ventana de store-and-forward es cinco veces mayor, lo cual ayuda a TLE-Routing-300 a proveer a un mejor desempeño de PDR (tal cual se ve en la **Figura 42**). Adicionalmente, note que para TLE-Routing, OLSR y sus variantes la tendencia es que el retardo disminuye progresivamente al aumentar la densidad de nodos, ya que una mayor conectividad facilita rutas alternativas y reduce la congestión.

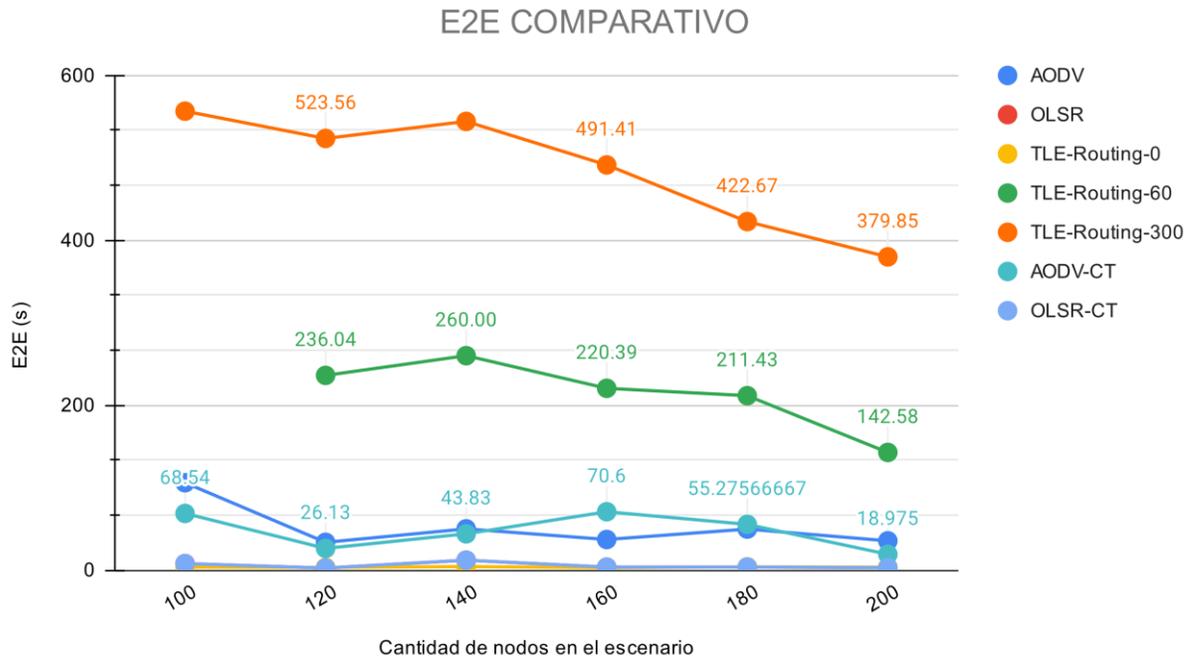


Figura 44 E2E Comparativo.

5.7.2.3 Resultados y análisis de comparativas en capa MAC.

Analizar las métricas de capa MAC nos ayuda a entender el tráfico total generado por nodo inyectado en la red. Al ser la última capa lógica que se encarga de la inyección de paquetes al medio o la primera capa lógica para decidir si son aceptados en el nodo, es posible conocer cuántos paquetes fueron descartados debido a que contienen errores (colisiones).

El promedio de la cantidad de paquetes enviados por nodo se presenta en la **Figura 45**. Note que OLSR genera la mayor cantidad de paquetes para todos los escenarios analizados, seguido de todas las versiones de TLE-Routing y por último AODV. La cantidad de paquetes enviados es importante, dado que da un indicativo de la cantidad de información generada por todos los protocolos superiores. En este sentido podemos observar en la figura una división clara clasificable por el tipo de enrutamiento (proactivo, reactivo e híbrido). Por ejemplo, puede ser intuitivo el concluir que AODV genere el menor número de paquetes por nodo al ser un protocolo totalmente reactivo. Lo anterior dado que el protocolo ADOV solo involucra la actividad de vecinos alcanzables por el nodo que busca enviar información, así como los nodos que interactúan en el descubrimiento de la ruta definida de regreso. Con OLSR se visualiza

el mayor número de paquetes enviados en todos los escenarios. Esto se presenta dado que, al ser un protocolo proactivo, todos los nodos envían información constantemente buscando conocer toda la red a múltiples saltos en busca de definir sus MPR. Por su parte, TLE-Routing se ubica en la mitad de ambos, donde si bien TLE-Routing envía mensajes periódicos, todos son a un salto a diferencia de OLSR. Es posible observar en un ligero decremento en el número de paquetes generados por nodo en TLE-Routing conforme se incrementa el número de nodos. Lo anterior se debe al mecanismo de detección de swarms de TLE-Routing, el cual tras detectar un swarm hace un recorrido por el swarm intentando salir y si no lo logra, inicia la retransmisión hasta que sea detectado que el siguiente salto sea hacia un nodo fuera de la zona donde se encuentra ubicado el swarm. Al tener un incremento en la cantidad de satélites por escenario, la probabilidad de que los grupos de satélites aislados tengan un enlace aumenta, por lo cual disminuye la ejecución del mecanismo de detección de swarms y por ende el número de paquetes enviado por nodo.

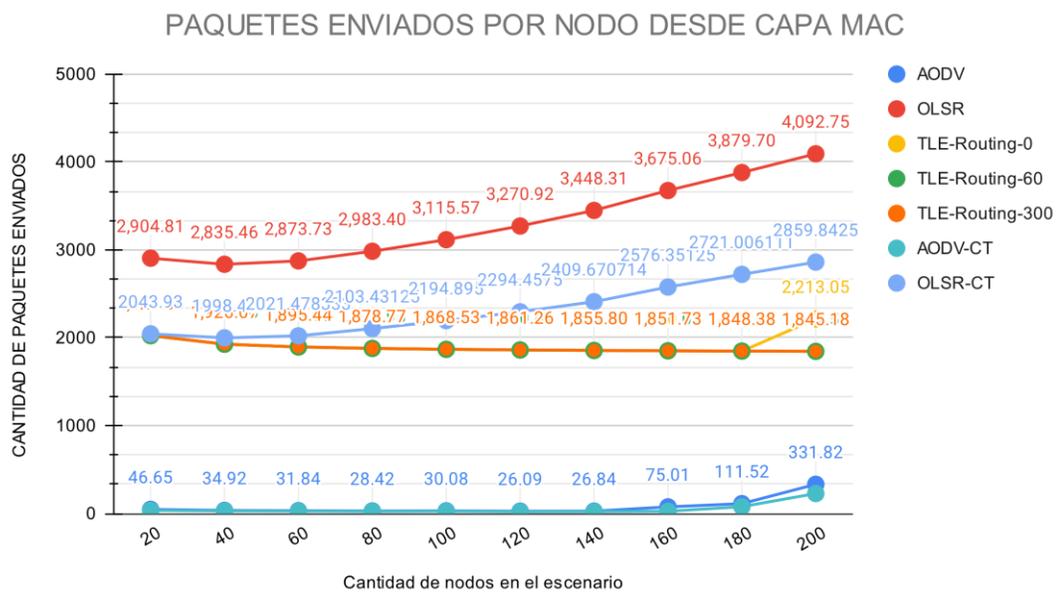


Figura 45 Comparativa paquetes enviados por nodo desde capa MAC.

La cantidad de paquetes descartados desde la capa MAC presentada en la Figura 46 otorga un vistazo a la contención que existe en el medio, donde se contemplan en mayor medida colisiones. Es posible observar que OLSR presenta no solo la mayor cantidad de paquetes generados, sino también la mayor cantidad de

paquetes descartados con un comportamiento exponencial. En la **Figura 47** podemos encontrar un acercamiento a la gráfica cuando no se incluye OLSR.

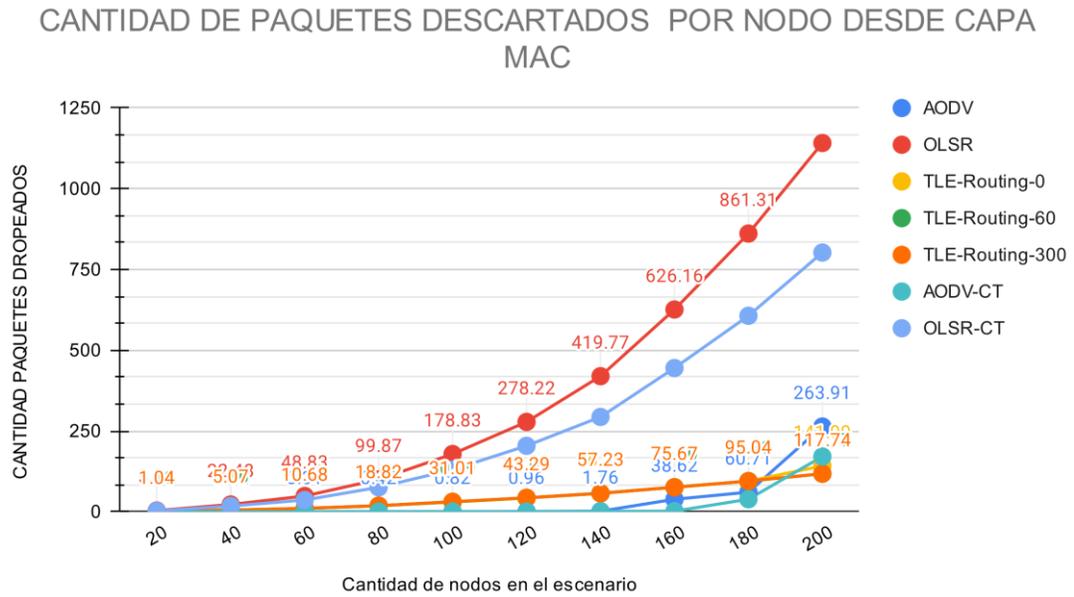


Figura 46 Comparativa cantidad de paquetes descartados por nodo desde capa MAC.

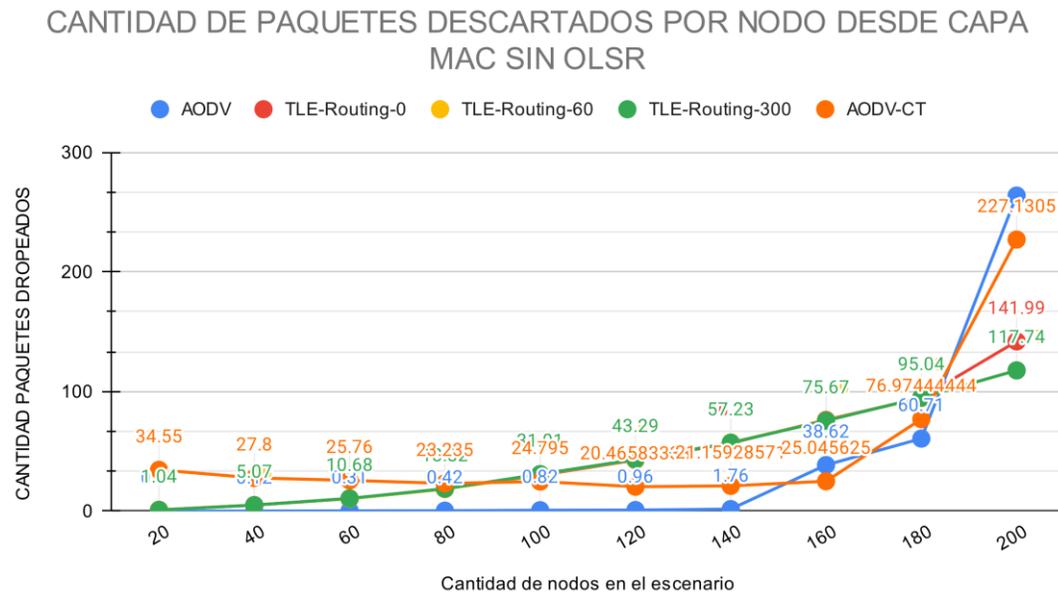


Figura 47 Comparativa de la cantidad de paquetes descartados por nodo desde la capa MAC (SIN OLSR).

Es importante remarcar el fenómeno que se presenta cuando se analizan los escenarios con un mayor número de nodos, en donde es posible observar un incremento exponencial derivado de los propios mecanismos de AODV, lo cual no sucede con TLE-Routing. Al existir una mayor cantidad de nodos se comienza a incrementar la probabilidad de la existencia de nodos vecinos. Por esta razón los mecanismos de descubrimiento como los de AODV comienzan a generar una mayor cantidad de actividad, la cual se refleja en el incremento de paquetes descartados. En TLE-Routing es posible observar para todas sus versiones se mantiene un incremento relativamente lineal a lo largo de los experimentos. Por lo tanto, es posible concluir que el comportamiento de los mecanismos que componen a TLE-Routing causa en promedio la misma cantidad de contención por nodo aun y cuando se incremente el número de nodos participantes en la red.

5.8 Conclusión del capítulo

En este capítulo se introdujo un nuevo protocolo de enrutamiento específicamente pensado para redes ad-hoc satelitales, el cual fue llamado TLE-Routing. Este protocolo aprovecha el dinamismo inherente de las redes ad-hoc satelitales, superando limitaciones de enfoques tradicionales como AODV y OLSR. TLE-Routing opera bajo el criterio de decisión del mejor siguiente salto, asumiendo que un vecino más cercano al destino eventualmente retransmitirá el paquete, incluso en entornos con conectividad intermitente. TLE-Routing opera con un conjunto de mecanismos ideados y desarrollados para los desafíos que se presentan en redes satelitales ad-hoc, como alta movilidad, predictibilidad, limitaciones de los nodos participantes, detección de swarms y consideraciones para la interacción de nodos terrestres para transmisiones tierra-espacio.

En escenarios con pocos nodos donde surgen swarms, TLE-Routing evita descartar paquetes prematuramente gracias a su mecanismo de store and forward limitado, permitiendo que el movimiento natural de los satélites genere nuevas oportunidades de enrutamiento. Mientras AODV y OLSR luchan con sobrecarga de mensajes para la detección de una ruta bidireccional (AODV) o actualizaciones proactivas a vecinos de más de un salto (OLSR), TLE-Routing minimiza el tráfico de control mediante mensajes periódicos a un solo salto y selecciona el mejor siguiente salto como el paso a seguir en la ruta de la información.

En síntesis, TLE-Routing no solo afronta los desafíos de las redes ad-hoc satelitales con un mejor desempeño que AODV y OLSR, sino también establece un paradigma de enrutamiento donde la incertidumbre se convierte en una herramienta y no en un obstáculo. Esto posiciona a TLE-Routing como una opción viable para la conformación de redes ad-hoc satelitales que funcionen como una red de redundancia o red alternativa en escenario de atención a emergencias (p.ej. terremotos, tsunamis) o monitorización de variables ambientales en localidades remotas con poca cobertura de telecomunicaciones.

Capítulo 6. Conclusiones y trabajo futuro

En este capítulo se presentan las contribuciones de este trabajo de investigación, las lecciones aprendidas de estos y las propuestas de áreas de oportunidad a considerarse como futuro trabajo en la línea de investigación.

6.1 Contribuciones del presente trabajo de investigación

El desarrollo de redes ad-hoc satelitales demanda herramientas especializadas para simular su comportamiento único, caracterizado por su alta movilidad, predictibilidad, restricciones energéticas y topologías dinámicas. En este contexto se desarrolló TINETMANET, un framework de simulación basado en INETMANET sobre OMNET++ que incorpora módulos para habilitar comunicaciones inter-satelitales, movilidad orbital y cálculos geoespaciales. Complementando esta plataforma, se desarrolló un análisis factorial 2^k donde se identificaron factores críticos en el desempeño de enrutamiento sobre redes ad-hoc satelitales. Todo lo anterior culminó en el desarrollo de TLE-Routing, un protocolo de enrutamiento híbrido que combina descubrimiento proactivo de vecinos con decisiones descentralizadas basadas en datos orbitales (TLE).

6.1.1 Simulador de redes

Uno de los ejes de este trabajo de investigación se presentó como el desarrollo de ST-INETMANET, una herramienta de simulación especializada en redes ad-hoc satelitales, diseñada para solventar la carencia de entornos que modelen escenarios con movilidad y restricciones inherentes a estas redes. El cual este compuesto por módulos:

- **SatelliteMobility/GSMobility:** Movilidad para nodos espaciales y estaciones terrenas.
- **SGP4Updater:** Actualización en el escenario simulado y encargado de los cálculos de distancia entre los nodos participantes.

- **TLEUpdater**: Cálculos de trayectorias basados en archivos TLE.
- **STVallado, STOrbitTools y NoradSGP4**: Implementaciones del modelo SGP4 utilizadas para cálculo de posiciones.

Además, se estableció una metodología para:

- Calcular distancias entre nodos espaciales y terrestres, considerando la curvatura terrestre y coordenadas geodésicas.
- Determinar ángulos de elevación el cual es un cálculo esencial para validar la visibilidad satelital en estaciones terrenas.

Finalmente, se desarrollaron protocolos de acceso al medio adaptados a comunicaciones LoRa en satélites, en particular ALOHA (Ranurado/No Ranurado). Estas implementaciones, incorporadas en el módulo alohaWirelessInterface, son pensadas para abordar el análisis de soluciones pensadas para desafíos únicos que enfrentan protocolos sobre estas redes como la alta movilidad de la red ad-hoc satelital y la asimetría de recursos.

En el área de redes satelitales es de suma relevancia contar con herramientas de simulación que permitan generar resultados confiables de manera ágil y a un costo manejable. Esto se vuelve más relevante aun cuando las redes consideran un gran número de nodos, como las redes ad-hoc satelitales abordadas en este trabajo. En la simulación de este tipo de redes, particularmente en el área de enrutamiento, es muy importante considerar aspectos de: movilidad, distancia entre nodos y trayectorias. Así como radios de comunicación con que consideren aspectos de la capa física y de acceso al medio.

6.1.2 Análisis de enrutamiento redes ad-hoc

En este trabajo de investigación se planteó una metodología fundamentada en el análisis factorial 2^k con el objetivo de identificar los factores cualitativos y cuantitativos más significativos que inciden en el desempeño del protocolo de enrutamiento en las redes ad-hoc satelitales. Los resultados de esta sección se publicaron en el trabajo “**Analysis of the Most Relevant Factors for Routing in Internet of Space Things**

Networks” (Garcia-Loya et al., 2022). La característica de asegurar la actualidad de la información de enrutamiento se identificó como el elemento fundamental en el establecimiento de redes ad-hoc satelitales. Un breve período de mantenimiento preventivo resulta en una mejora en el rendimiento en el escenario evaluado, tanto para los enfoques de enrutamiento proactivo como reactivo. No obstante, la frecuencia con la que se ajusta el parámetro NRT debe ser determinada en función del enfoque de enrutamiento seleccionado. Una herramienta de revisión de enlaces no funcionales (NRT) de corta duración facilita la detección rápida de enlaces rotos, aunque existe la posibilidad de que incremente los errores al confundir una pérdida temporal de paquetes con un enlace roto permanente. La utilización de un enfoque de enrutamiento proactivo en una red ad-hoc satelital podría desencadenar de manera innecesaria el mecanismo de reparación. Por consiguiente, se debe seleccionar con cuidado el valor de NRT para este enfoque a fin de detectar los enlaces rotos sin incrementar de manera innecesaria la carga en el servidor. El enfoque proactivo se beneficia principalmente de la alta frescura de la información de enrutamiento, con un aumento del 14% en los beneficios.

Es fundamental destacar que, en el caso de densidades de nodo altas (Densidad +), el enfoque de enrutamiento reactivo supera al enfoque de enrutamiento proactivo para la mayoría de las combinaciones de frescura analizadas. La alta incidencia de colisiones entre paquetes en la red ad-hoc satelital al emplear el enfoque de enrutamiento proactivo puede explicar este fenómeno. Esta comparación se realiza con base en la cantidad de colisiones de paquetes registradas al implementar el enfoque de enrutamiento reactivo.

6.1.3 TLE-Routing

El protocolo TLE-Routing es un protocolo de enrutamiento desarrollado para redes ad-hoc satelitales producto de este trabajo de investigación. En este se combinan elementos de un descubrimiento proactivo de los miembros de la red con la responsabilidad del mejor siguiente salto otorgada al nodo que contiene la información salto a salto. El protocolo lleva a cabo labores de mantenimiento de manera distribuida y descentralizada, sin depender de una entidad central y permite la distinción entre los distintos tipos de nodos que participan en una red satelital como son estaciones terrenas del lado terrestre y satelitales del lado espacial. Para el conocimiento y descubrimiento de la red se propuso un mecanismo proactivo de descubrimiento de vecinos mediante el envío de mensajes broadcast a un salto (“Hello Packet”) para su

posterior registro en una tabla de enrutamiento, la cual contiene sus propias rutinas de mantenimiento como, por ejemplo, purgas según las últimas interacciones con nodos vecinos.

En lo que respecta al envío de mensajes unicast y descubrimiento de rutas, TLE-Routing utiliza como una herramienta principal las características de movimiento obtenidas por los Elementos de Dos Líneas (TLE) de cada nodo participante en la red. De manera individual cada nodo realiza cálculos de su órbita utilizando su TLE propio para determinar el momento en que pasará por segmentos terrestres específicos durante periodos de 24 horas. Estos segmentos terrestres son definidos por la división de la superficie de la Tierra en zonas de servicio, para las cuales se seleccionaron las divisiones de Goldberg (4,0). Con esta información, un nodo espacial registrará los resultados de los pases sobre las diferentes zonas de servicio en una tabla siguiendo un orden tal que la primera entrada se corresponderá con la zona de servicio que será transitada por el nodo y la segunda o posteriores las zonas futuras. La información anterior se utiliza para la selección de siguiente mejor salto, como por, mecanismos paralelos para los desafíos que se presentan en redes ad-hoc satelitales como agrupamientos emergentes que se desconectan de la red y el mecanismo de store and forward limitado por tiempo.

6.2 Conclusiones respecto a las contribuciones

6.2.1 Simulador de redes

Cuando se habla de un modelo de capa física en redes satelitales, es necesario tomar en consideración ángulos de elevación para los nodos que se encuentren sobre la superficie terrestre, así como distancias de entre nodos satelitales que representen el esparcimiento de los nodos en el espacio. Para resolver la problemática anterior se realizó el desarrollo de un módulo compuesto de tres módulos simples. El primero, es un módulo de comunicación basado en distancia del tipo Unit-disk (Clark et al., 1990), en donde se calculan las distancias usando proyecciones en tres dimensiones sobre un plano. Esta estrategia se sigue debido a que ha demostrado ser una abstracción válida cuando el objetivo principal de la simulación es el análisis de comportamientos y desempeño de protocolos de comunicación y no el desempeño específico ofrecido por una solución de capa física particular (Kuhn et al., 2003). El segundo, es un módulo de cálculos de distancia en base a Geodesy (Lu et al., 2014), la ciencia que estudia el trasfondo de mediciones conforme las características de orientación, fuerza gravitacional y morfología del

planeta tierra. El tercero, es un módulo de cálculo de ángulos de elevación entre los nodos terrestres y espaciales, buscando conocer la viabilidad de los enlaces de comunicación entre nodos.

6.2.2 Enrutamiento en redes ad-hoc

A partir del análisis y la discusión realizados en este estudio, se pueden establecer las siguientes pautas para abordar las tareas de enrutamiento en las ad-hoc satelitales:

- En el caso de que la cantidad prevista de nodos que forman parte de la red ad-hoc satelital sea reducida, es posible que un enfoque de enrutamiento proactivo ofrezca un desempeño superior al enrutamiento reactivo.
- No obstante, al emplear el enrutamiento proactivo, es necesario ser precavido al modificar los parámetros de actualización de la información con el fin de alcanzar una eficiente ejecución del enrutamiento.
- En una red ad-hoc satelital con una alta densidad de nodos, se observó que el enfoque reactivo ofreció el mejor rendimiento de entrega de paquetes (PDR) y la menor cantidad de colisiones de paquetes en comparación con otras estrategias.
- En consecuencia, si se prevé que la densidad de los nodos en una red ad-hoc satelital sea elevada, sería más apropiado emplear un enfoque de enrutamiento reactivo en lugar de uno proactivo para la tarea de enrutamiento.

Es importante considerar que estas pautas sirven como un punto de partida para desarrollar estrategias de enrutamiento particulares en las redes ad-hoc satelitales. El análisis y la discusión presentados en este documento pueden servir como fundamento para el diseño de estrategias de enrutamiento híbrido en redes ad-hoc satelitales. A partir de los resultados expuestos y su respectiva discusión, se estima que la metodología propuesta en este estudio para evaluar y analizar estrategias de enrutamiento en redes ad-hoc satelitales, el análisis comparativo entre enrutamientos proactivos y reactivos llevado a cabo, y la identificación de los factores críticos para la tarea de enrutamiento, establezcan un punto de partida que

la comunidad académica pueda utilizar para investigar el diseño e implementación de nuevas estrategias de enrutamiento en redes ad-hoc satelitales.

6.2.3 TLE-Routing

Los resultados obtenidos demuestran que TLE-Routing supera significativamente a protocolos ad-hoc establecidos como AODV y OLSR en redes ad-hoc satelitales, particularmente en escenarios con alta movilidad y densidades variables de nodos. La métrica de Packet Delivery Ratio (PDR) revela que las versiones de TLE-Routing con ventanas de tiempo (60 y 300 segundos) logran tasas de entrega exitosa hasta un 40% mayores que OLSR y AODV en el caso de densidades de 80-120 nodos. Este desempeño se atribuye a su enfoque híbrido y los mecanismos especializados que presenta TLE-Routing. En cuanto la métrica de End-to-End (E2E) se tienen dos vertientes para su análisis: La primera, en el caso con la ventana de mayor duración (300 segundos) se obtuvieron resultados que garantizan una mayor probabilidad de éxito en entornos desconectados donde OLSR y AODV no pudieron realizar entregas de paquetes. Por otro lado, la versión sin ventana temporal (TLE-Routing-0) presenta las latencias más bajas en todos los casos analizados. Este comportamiento resalta la importancia de configurar ventanas temporales según las aplicaciones y número de participantes.

A nivel de capa MAC, TLE-Routing muestra superioridad en gestión del medio. Genera un 30% menos paquetes que OLSR y un 15% menos que AODV en densidades altas, gracias a mecanismos como:

- **Detección de swarms:** Reduce retransmisiones redundantes al identificar agrupaciones aisladas y almacenar paquetes en colas prioritarias hasta identificar una reconexión.
- **ACK implícito:** Utiliza una inferencia en las transmisiones exitosas para evitar insertar paquetes al medio duplicados.

Estos resultados validan que el protocolo de enrutamiento TLE-Routing es una fuerte propuesta para el habilitar redes satelitales ad-hoc. Su capacidad para operar en densidades desde 20 a 200 o más nodos sin colapsar el medio lo posicionan como una propuesta esencial para el despliegue de aplicaciones en redes ad-hoc satelitales, especialmente en redes emergentes, con variaciones de participantes y como apoyo en redes de emergencia.

6.3 Áreas de trabajo futuro

Una vez presentadas las conclusiones es necesario presentar las áreas de oportunidad que habilita el desarrollo del presente trabajo de investigación, presentadas en las siguientes subsecciones.

6.3.1 Simulador de redes espaciales

Las áreas de trabajo futuro identificadas en el desarrollo del simulador de redes espaciales se pueden centrar en abordar desafíos tanto de protocolos de red como de modelos de movilidad.

- Implementaciones de modelos de canal sofisticados permitiendo cambiar de la estimación por distancia a estimación por potencia e incorporar técnicas de modulación en los escenarios.
- Implementación de protocolos de enrutamiento satelitales.
- La implementación de modelos de movilidad para espacio profundo, buscando habilitar simulaciones de redes satelitales ad-hoc interplanetarias.
- Implementación de algoritmos de eficiencia en el despliegue de nodos. El uso eficiente de recursos es necesario para habilitar la simulación de escenarios en el orden de miles de nodos.

6.3.2 Enrutamiento satelital ad-hoc

Concluido el trabajo de investigación se presentan oportunidades identificadas como posibles caminos para extender la literatura sobre redes ad-hoc satelitales:

- El diseño de un mecanismo de guardado de información dinámico para protocolos de enrutamiento el cual identifique el estado de la red y ajuste su duración en los nodos.
- Nuevas propuestas de divisiones terrestres explorando la creación de polinomios que puedan ser proyectados sobre una esfera.

- Desarrollo de nuevas tecnologías de comunicación y protocolos de acceso al medio.
- Diseño de nuevas herramientas de simulación, buscando la eficiencia sobre modelos de movilidad satelital.
- TLE-Routing se ha diseñado para su aplicación principal en una única capa orbital baja (LEO), aunque deja las bases para ser ampliado para redes multi-orbitales que incluyan LEO, MEO y GEO.

Literatura citada

- Akyildiz, I. F., & Kak, A. (2019). The Internet of Space Things/CubeSats. *IEEE Network*, 33(5), 212–218. <https://doi.org/10.1109/MNET.2019.1800445>
- Alvarez, G., Fraire, J. A., Hassan, K. A., Cespedes, S., & Pesch, D. (2022). Uplink Transmission Policies for LoRa-Based Direct-to-Satellite IoT. *IEEE Access*, 10, 72687–72701. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3189647>
- Ariza, A., & Inzillo, V. (2019). INETMANET Framework. In *Recent Advances in Network Simulation* (A. Virdis & M. Kirsche, Eds.), (pp. 107-138). Springer International Publishing.
- Arnold, S. S., Nuzzaci, R., & Gordon-Ross, A. (2012). Energy budgeting for CubeSats with an integrated FPGA. *2012 IEEE Aerospace Conference*, 1–14. <https://doi.org/10.1109/AERO.2012.6187240>
- Cabral-Pacheco, E. G., Villarreal-Reyes, S., Galaviz-Mosqueda, A., Villarreal-Reyes, S., Rivera-Rodriguez, R., & Perez-Ramos, A. E. (2019). Performance Analysis of Multi-Hop Broadcast Protocols for Distributed UAV Formation Control Applications. *IEEE Access*, 7, 113548–113577. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2935307>
- CalPoly. (2009). Cubesat design specification. In *The CubeSat Program, California Polytechnic State ...* (Vol. 8651, Issue June 2004). http://www.cubesat.org/images/developers/cds_rev12.pdf%5Chttp://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:CubeSat+Design+Specification#0
- Chakeres, I. D., & Belding-Royer, E. M. (2004). AODV routing protocol implementation design. *24th International Conference on Distributed Computing Systems Workshops, 2004. Proceedings.*, 698–703. <https://doi.org/10.1109/ICDCSW.2004.1284108>
- Clark, B. N., Colbourn, C. J., & Johnson, D. S. (1990). Unit disk graphs. *Discrete Mathematics*, 86(1–3), 165–177. [https://doi.org/10.1016/0012-365X\(90\)90358-O](https://doi.org/10.1016/0012-365X(90)90358-O)
- Coffee, B. G., Cahoy, K., & Bishop, R. L. (2013). Propagation of CubeSats in LEO using NORAD two line element sets: Accuracy and update frequency. *AIAA Guidance, Navigation, and Control (GNC) Conference*. <https://doi.org/10.2514/6.2013-4944>
- De Azua, J. A. R., Calveras, A., & Camps, A. (2018). Internet of Satellites (IoSat): Analysis of Network Models and Routing Protocol Requirements. *IEEE Access*, 6, 20390–20411. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2823983>
- Duan, T., & Dinavahi, V. (2021). Starlink Space Network-Enhanced Cyber-Physical Power System. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 12(4), 3673–3675. <https://doi.org/10.1109/TSG.2021.3068046>
- Ehsanfar, A., & Grogan, P. T. (2020). Auction-Based Algorithms for Routing and Task Scheduling in Federated Networks. *Journal of Network and Systems Management*, 28(2), 271–297. <https://doi.org/10.1007/s10922-019-09506-y>
- Erick Kulu. (2025). *Nanosats Database*. <https://www.nanosats.eu>

- Gadre, A., Machester, Z., & Kumar, S. (2024). Adapting LoRa Ground Stations for Low-latency Imaging and Inference from LoRa-enabled CubeSats. *ACM Transactions on Sensor Networks*, 20(5), 1–30. <https://doi.org/10.1145/3675170>
- Galaviz-Mosqueda, A., Villarreal-Reyes, S., Galeana-Zapién, H., Rubio-Loyola, J., & Covarrubias-Rosales, D. H. (2014). Reliable Multihop Broadcast Protocol with a Low-Overhead Link Quality Assessment for ITS Based on VANETs in Highway Scenarios. *The Scientific World Journal*, 2014, 1–12. <https://doi.org/10.1155/2014/359636>
- Garcia-Loya, E., Galaviz-Mosqueda, A., Villarreal-Reyes, S., Rivera-Rodríguez, R., Lozano-Rizk, J. E., & Conte-Galván, R. (2022). Analysis of the Most Relevant Factors for Routing in Internet of Space Things Networks. *Applied Sciences*, 12(15), 7726. <https://doi.org/10.3390/app12157726>
- Gehreke, L., Kientopf, K., & Gunes, M. (2022). B.A.T.M.A.N. in the IoT. *NOMS 2022-2022 IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/NOMS54207.2022.9789816>
- Goldberg, M. (1935). The Isoperimetric Problem for Polyhedra. *Tohoku Mathematical Journal*.
- Gongora-Torres, J. M., Vargas-Rosales, C., Aragón-Zavala, A., & Villalpando-Hernandez, R. (2023). Elevation Angle Characterization for LEO Satellites: First and Second Order Statistics. *Applied Sciences*, 13(7), 4405. <https://doi.org/10.3390/app13074405>
- Gonzalez, F. I., Milburn, H. M., Bernard, E. N., & Newman, J. C. (1998). Deep-ocean assessment and reporting of tsunamis (DART): Brief overview and status report. *Proceedings of the International Workshop on Tsunami Disaster Mitigation*, 19, 2.
- Gujral, R. K., Grover, J., Anjali, & Rana, S. (2012). Impact of Transmission Range and Mobility on Routing Protocols over Ad Hoc Networks. *2012 International Conference on Computing Sciences*, 201–206. <https://doi.org/10.1109/ICCS.2012.41>
- Gummalla, A. C. V., & Limb, J. O. (2009). Wireless medium access control protocols. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 3(2), 2–15. <https://doi.org/10.1109/COMST.2000.5340799>
- Guo, J., & Wang, Y. (2025). Efficient AOA Estimation and NLOS Signal Utilization for LEO Constellation-Based Positioning Using Satellite Ephemeris Information. *Applied Sciences*, 15(3), 1080. <https://doi.org/10.3390/app15031080>
- Haxhibeqiri, J., De Poorter, E., Moerman, I., & Hoebeke, J. (2018). A Survey of LoRaWAN for IoT: From Technology to Application. *Sensors* 2018, Vol. 18, 3995. <https://doi.org/10.3390/S18113995>
- Heidt, H., Puig-Suari, J., Moore, A. S., Nakasuka, S., & Twiggs, R. J. (2000). *CubeSat: A new Generation of Picosatellite for Education and Industry Low-Cost Space Experimentation*. In 14th Annual/USU Conference on Small Satellites (p. 1). Utah State University's (USU) Institutional Repository (IR). <https://digitalcommons.usu.edu/smallsat/2000/All2000/32/>
- TinyGS. (n.d.). *TinyGS network architecture*. Retrieved November 30, 2023, from <https://tinygs.com/>

- Hong, J. H., Kim, J. H., Kim, S., & Ryoo, C. K. (2016). TLE data based precise estimation of satellite's orbital parameters. *International Conference on Control, Automation and Systems, 0*, 1025–1030. <https://doi.org/10.1109/ICCAS.2016.7832435>
- Hoots, F. R., & Roehrich, R. L. (1980). *Models for Propagation of the NORAD Element Sets*. [Technical record No. 3, Aerospace Defense Command Peterson Afb Co Office Of Astroynamics, U.S.]
- Hoots, F. R., & Roehrich, R. L. (1980b). Spacetrack Report No. 3--Models for Propagation of NORAD Elements Sets. In *Spacetrack Report* (Vol. 3, Issue 3). <https://celestrak.com/NORAD/documentation/spacetrk.pdf>
- Jacquet, P., Muhlethaler, P., Clausen, T., Laouiti, A., Qayyum, A., & Viennot, L. (n.d.). Optimized link state routing protocol for ad hoc networks. *Proceedings. IEEE International Multi Topic Conference, 2001. IEEE INMIC 2001. Technology for the 21st Century.*, 62–68. <https://doi.org/10.1109/INMIC.2001.995315>
- Jacquet, P., Mühlethaler, P., Clausen, T., Laouiti, A., Qayyum, A., & Viennot, L. (2001). Optimized link state routing protocol for ad hoc networks. *Proceedings - IEEE International Multi Topic Conference 2001: Technology for the 21st Century, IEEE INMIC 2001*, 62–68. <https://doi.org/10.1109/INMIC.2001.995315>
- Jia-Richards, O., Lozano, P. C., Sternberg, D. C., Grebow, D., & Mohan, S. (2020). Feasibility of a Deep-Space CubeSat Mission with a Stage-Based Electro Spray Propulsion System. *IEEE Aerospace Conference Proceedings*, 1–10. <https://doi.org/10.1109/AERO47225.2020.9172544>
- Kumar, S. K., & Vadivukkarasi, K. (2023). IoT Enabled Intersatellite Communication Using Lora and Tinygs. *2023 International Conference on Recent Advances in Electrical, Electronics, Ubiquitous Communication, and Computational Intelligence (RAEEUCCI)*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/RAEEUCCI57140.2023.10134174>
- Lee, S., Mehrparvar, A., Pignatelli, D., Carnahan, J., Munakata, R., Lan, W., Toorian, A., & Hutputanasin, A. (2014). *CubeSat Design Specification Rev. 13 The CubeSat Program, Cal Poly SLO*. <http://www.cubesat.org/index.php/documents/developers>
- Lu, Z., Qu, Y., & Qiao, S. (2014). *Geodesy*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-41245-5>
- Marzioli, P., Frezza, L., Curiano, F., Gugliermetti, L., Picci, N., Amadio, D., Gianfermo, A., Vestito, E., Pancalli, M. G., Bedetti, E., Garofalo, R., Di Palo, L., Celesti, P., Santoni, F., & Piergentili, F. (2022). *Lessons learned from the S5Lab hands-on student activities on the ledsat, greencube and WildTrackCube-SIMBA nanosatellites*. International Astronautical Congress: IAC Proceedings, 1–6. <https://iris.uniroma1.it/handle/11573/1544115>
- Marzioli, P., Garofalo, R., Frezza, L., Nyawade, A., Santilli, G., JahJah, M., Santoni, F., & Piergentili, F. (2024). *Performance Analysis of a Wildlife Tracking CubeSat Mission Extension to Drones and Stratospheric Vehicles*. *Drones 2024*, Vol. 8, Page 129. <https://doi.org/10.3390/DRONES8040129>

- Mehdi, S. Z. A., Mohd Ali, A., & Zulkifli, S. (2023). LoRaWAN CubeSat with an Adaptive Data Rate: An Experimental Analysis of Path Loss Link Margin. *Aerospace*, *10*(1), 53. <https://doi.org/10.3390/aerospace10010053>
- Mészáros, L., Varga, A., & Kirsche, M. (2019). *INET Framework*. In *Recent Advances in Network Simulation*, (pp. 55–106). Springer.
- Miao, Y., Sun, Z., Wang, N., & Cruickshank, H. (2015). Comparison studies of MANET-satellite and MANET-cellular networks integrations. *2015 International Conference on Wireless Communications and Signal Processing, WCSP 2015*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/WCSP.2015.7341337>
- Mohapatra, A., & Trinh, T. (2022). Early Wildfire Detection Technologies in Practice—A Review. *Sustainability*, *14*(19), 12270. <https://doi.org/10.3390/su141912270>
- Murakami, H., & Nishimura, Y. (2001). Static and dynamic characterization of regular truncated icosahedral and dodecahedral tensegrity modules. *International Journal of Solids and Structures*, *38*(50–51), 9359–9381. [https://doi.org/10.1016/S0020-7683\(01\)00030-0](https://doi.org/10.1016/S0020-7683(01)00030-0)
- Palmer, C. (2021). SpaceX Starship Lands on Earth, But Manned Missions to Mars Will Require More. *Engineering*, *7*(10), 1345–1347. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2021.08.005>
- Perkins, C. E., & Royer, E. M. (1999). Ad-hoc on-demand distance vector routing. *Proceedings WMCSA'99. Second IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications*, 90–100. <https://doi.org/10.1109/MCSA.1999.749281>
- Phen, A. (2022). *The realization of a study on the current and future trends of the cost of access to space for CubeSat missions*. <https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:ltu:diva-94439>
- Rana, G., Ballav, B., & Pattanayak, B. K. (2016). Performance Analysis of Routing Protocols in Mobile Ad Hoc Network. *Proceedings - 2015 14th International Conference on Information Technology, ICIT 2015*, 65–70. <https://doi.org/10.1109/ICIT.2015.45>
- Roy, D. P., De Lemos, H., Huang, H., Giglio, L., Houborg, R., & Miura, T. (2024). Multi-resolution monitoring of the 2023 maui wildfires, implications and needs for satellite-based wildfire disaster monitoring. *Science of Remote Sensing*, *10*, 100142. <https://doi.org/10.1016/J.SRS.2024.100142>
- Ruiz-de-Azua, J. A., Calveras, A., Golkar, A., Camps, A., Fernandez, L., Munoz, J. F., Badia, M., Castella, R., Diez, C., Aguilera, A., Briatore, S., & Garzaniti, N. (2019). Proof-of-Concept of a Federated Satellite System Between Two 6-Unit CubeSats for Distributed Earth Observation Satellite Systems. *IGARSS 2019 - 2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2019-July*, 8871–8874. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2019.8900099>
- Ruiz-De-Azua, J. A., Camps, A., & Calveras Auge, A. (2018). Benefits of Using Mobile Ad-Hoc Network Protocols in Federated Satellite Systems for Polar Satellite Missions. *IEEE Access*, *6*, 56356–56367. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2871516>

- Saeed, N., Elzanaty, A., Almorad, H., Dahrouj, H., Al-Naffouri, T. Y., & Alouini, M. S. (2020a). CubeSat Communications: Recent Advances and Future Challenges. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 22(3), 1839–1862. <https://doi.org/10.1109/COMST.2020.2990499>
- Saeed, N., Elzanaty, A., Almorad, H., Dahrouj, H., Al-Naffouri, T. Y., & Alouini, M. S. (2020b). CubeSat Communications: Recent Advances and Future Challenges. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 22(3), 1839–1862. <https://doi.org/10.1109/COMST.2020.2990499>
- Salim, W. W. A. W., Park, J., Rickus, J. L., Rademacher, A., Ricco, A. J., Schooley, A., Benton, J., Wickizer, B., Martinez, A., Mai, N., Rasay, M., Porterfield, D. M., Brownston, L., Cote, M., Defouw, G., Henschke, M., Kitts, C., Luzzi, E., Perez, M., ... Sweet, A. (2014). Sporesat: A Nanosatellite Platform Lab-On-A-Chip System For Investigating Gravity Threshold Of Fern Spore Single-Cell Calcium Currents. *2014 Solid-State, Actuators, and Microsystems Workshop Technical Digest*, 111–114. <https://doi.org/10.31438/trf.hh2014.32>
- San-Juan, J. F., Pérez, I., San-Martín, M., & Vergara, E. P. (2017). Hybrid SGP4 orbit propagator. *Acta Astronautica*, 137, 254–260. <https://doi.org/10.1016/J.ACTAASTRO.2017.04.015>
- Sardar, M. S., Yi, Y., Xue-fen, W., Huang, J., Zhang, J., Qin, X., Zhao, Q., Wang, Y., & Iqbal, M. A. (2018). Experimental Analysis of LoRa CSS Wireless Transmission Characteristics for Forestry Monitoring and Sensing. *2018 International Symposium in Sensing and Instrumentation in IoT Era (ISSI)*, 01249–01254. <https://doi.org/10.1109/ISSI.2018.8538171>
- Semtech (2021). *Semtech and Swarm Deliver Satellite Communications With LoRa®*. Retrieved December 6, 2023, from <https://www.semtech.com/company/press/semtech-and-swarm-deliver-satellite-communications-with-lora>
- Sieden, L. Steven. (2000). *Buckminster Fuller's universe*. Perseus Pub.
- Singh, K., & Verma, A. K. (2015). Applying OLSR routing in FANETs. *Proceedings of 2014 IEEE International Conference on Advanced Communication, Control and Computing Technologies, ICACCCT 2014*, 1212–1215. <https://doi.org/10.1109/ICACCCT.2014.7019290>
- Syed, A. A., Ye, W., Heidemann, J., & Krishnamachari, B. (2007). Understanding spatio-temporal uncertainty in medium access with ALOHA protocols. *Proceedings of the 2nd Workshop on Underwater Networks, WUWNet 2007*, 41–48. <https://doi.org/10.1145/1287812.1287822>
- Tanenbaum, A. S., & Wetherall, D. J. (2010). *Computer Networks* (5th ed.). Prentice Hall Press.
- Toorian, A., Diaz, K., & Lee, S. (2008). *The CubeSat approach to space access*. *IEEE Aerospace Conference Proceedings*. <https://doi.org/10.1109/AERO.2008.4526293>
- Toutouh, J., Garcia-Nieto, J., & Alba, E. (2012). *Intelligent OLSR Routing Protocol Optimization for VANETs*. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 61(4), 1884–1894. <https://doi.org/10.1109/TVT.2012.2188552>
- Vallado, D. A. , & McClain, W. D. . (2007). *Fundamentals of astrodynamics and applications*. (3rd ed). Springer.

- Vallado, D. A., & Crawford, P. (2008). SGP4 orbit determination. *AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference and Exhibit*. <https://doi.org/10.2514/6.2008-6770>
- Varga, A., & Hornig, R. (2008). An Overview Of The Omnet++ Simulation Environment. *Proceedings of the First International ICST Conference on Simulation Tools and Techniques for Communications Networks and Systems*. <https://doi.org/10.4108/ICST.SIMUTOOLS2008.3027>
- Villela, T., Costa, C. A., Brandão, A. M., Bueno, F. T., & Leonardi, R. (2019). Towards the thousandth CubeSat: A statistical overview. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/5063145>
- Viridis, A. (n.d.). *Recent Advances in Network Simulation The OMNeT++ Environment and its Ecosystem* EAI/Springer Innovations in Communication and Computing. <http://www.springer.com/series/15427>
- Viridis, A., Stea, G., & Nardini, G. (2014). SimuLTE – A Modular System-level Simulator for LTE/LTE-A Networks based on OMNeT++. *Proceedings of the 4th International Conference on Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications*, 59–70. <https://doi.org/10.5220/0005040000590070>
- What are SmallSats and CubeSats?* - NASA. (n.d.). Retrieved March 17, 2025, from <https://www.nasa.gov/what-are-smallsats-and-cubesats/>
- William M. Kaula. (2000). *Theory of Satellite Geodesy: Applications of Satellites to Geodesy*. Courier Corporation
- Xuan, Z., Xiaojie, Z., Shuo, W., & Ye, Z. (2018). An attempt to utilize lora for intersatellite communications. *10th International Conference on Communications, Circuits and Systems, ICCAS 2018*, 260–264. <https://doi.org/10.1109/ICCAS.2018.8769213>
- Yoon, Z., Frese, W., Bukmaier, A., & Brieß, K. (2014). System design of an S-band network of distributed nanosatellites. *CEAS Space Journal*, 6(1), 61–71. <https://doi.org/10.1007/S12567-013-0058-1/FIGURES/14>
- Yousif, Z., Hussain, I., Parveen, S., Umer, F., & Naeem, N. (2019). Evaluating Reactive Routing Protocols of VANETs using 2K-factorial Analysis. *Indian Journal of Science and Technology*, 12(20), 1–10. <https://doi.org/10.17485/ijst/2019/v12i20/143590>

Anexos

Diagrama de flujo de actualización de variables orbitales

