
BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA ELECTRÓNICA



**MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA, OPCIÓN
INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA**

**EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE UNA RED
VEHICULAR AD HOC EN CARRETERAS PARA LA
BANDA DE SÚPER ALTA FRECUENCIA (SHF)**

Presenta: **Fernando Avendaño Macías***

Director de Tesis: Dra. Josefina Castañeda Camacho.

Co-director de Tesis: Dr. Mauricio Rodríguez Guzmán.

Co-director de Tesis: M.C. Nicolás Quiroz Hernandez.

*Becario Conahcyt

Puebla, México.

Esta tesis está dedicada a mi mamá, mis hermanos y a mi abuelo Toño, por creer siempre en mí y motivarme a seguir adelante. Su confianza y apoyo han sido fundamentales en cada paso de este camino.

Agradecimientos

En este trabajo, agradezco a mi mamá, Inés, la persona que más admiro y a quien debo toda mi formación. Gracias a su apoyo y amor incondicional, he salido adelante.

A mis hermanos, Raúl e Ilse, quienes han sido un ejemplo para mí, su hermano menor. Gracias por demostrarme que con trabajo, disciplina y constancia se puede salir adelante, y por estar siempre para mí cuando los he necesitado.

A mi abuelo Toño, que está en el cielo, gracias por haberme apoyado en vida durante tantos años, por estar siempre a mi lado y nunca dejarme. Tu respaldo en mis estudios fue invaluable.

A Esmeralda, una mujer muy especial en mi vida, por todo su amor y apoyo.

A mis amigos que han formado parte de mi vida, desde la infancia hasta la universidad y esta maestría. En especial, a Josué, Martín, Diego, Mauro, Edwin y Guillermo, personas cercanas a mí y a quienes admiro profundamente.

A la Dra. Josefina, por enseñarme, motivarme y despertar en mí la pasión por el área de las comunicaciones. Gracias por inspirarme a continuar con un posgrado y querer especializarme en este campo, siguiendo su ejemplo.

Al CONAHCYT, por su invaluable apoyo a lo largo de mis estudios de posgrado.

A la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, por acogerme como parte de su comunidad, por proporcionar un excelente cuerpo académico, espacios de trabajo y el equipo necesario para desarrollar proyectos de calidad.

Contenido

Agradecimientos.	II
Índice de figuras	v
Índice de tablas	vii
Resumen.	ix
Abstract.	x
1. Introducción	1
1.1. Introducción	1
1.2. Objetivos de Tesis	2
1.2.1. Objetivo General	2
1.2.2. Objetivos Específicos	3
1.3. Estado del Arte	3
1.4. Justificación de la Tesis	9
1.5. Organización de Tesis	10
2. Marco Teórico	11
2.1. VANET	11
2.1.1. Comunicaciones en VANET	12
2.1.2. Sistema de Transporte Inteligente (ITS)	12
2.1.3. Redes móviles <i>ad hoc</i>	13
2.1.4. Estándares VANET	13
2.1.5. Arquitectura de VANET	14
2.2. Banda de Súper Alta Frecuencia	14
2.2.1. Fenómenos de Propagación	15

2.2.2.	Canal Inalámbrico	18
2.3.	Modelos de Propagación	18
2.3.1.	Enlaces LOS y NLOS	19
2.3.2.	Modelo de propagación en espacio libre (FSPM)	20
2.3.3.	Modelo de 2 rayos	20
2.3.4.	Modelo Log-Distance	22
2.4.	Modelado de eficiencia en redes inalámbricas	22
2.4.1.	Esquema de Acceso Múltiple por División de Frecuencia Orto- gonal (OFDMA)	23
2.4.2.	Tipos de modulaciones en OFDMA	24
2.4.3.	Modulación QPSK	25
2.4.4.	Modulación 16-QAM y 64-QAM	25
2.4.5.	Relación señal/interferencia SIR	25
2.4.6.	Métrica de calidad	26
2.4.7.	Tasa de transmisión	27
2.4.8.	Interferencia externa	27
3.	Marco Metodológico	29
3.1.	SIR del sistema vehicular V2I para el Modelo Log-Distance	33
3.2.	SIR del sistema vehicular V2I para el Modelo de 2 Rayos	34
3.3.	SIR del sistema vehicular V2V para el Modelo Log-Distance	35
3.4.	SIR del sistema vehicular V2V para el Modelo de 2 Rayos	36
3.5.	Desarrollo de simulación	38
3.6.	Caso 1: V2I	41
3.6.1.	Transmisor	41
3.6.2.	Receptor	42
3.7.	Caso 2: V2V	42
3.7.1.	Transmisor	42
3.7.2.	Receptor	42
3.7.3.	Evaluación del desempeño de la red vehicular	42
4.	Resultados	44
4.1.	Validación de resultados	56
5.	Conclusiones	59
	Bibliografía.	60

Anexo 1	66
5.1. Publicación Uno	66
5.2. Publicación Dos	66

Índice de figuras

2.1.	Longitud de onda de una frecuencia de 28 GHz.	15
2.2.	Rayo incidente sobre una superficie.	16
2.3.	Dispersión ocasionada por superficie irregular.	17
2.4.	Enlaces de línea de vista (LOS) y de no línea de vista (NLOS) [4]. . .	19
2.5.	Modelo de 2 rayos [34].	21
2.6.	Exponentes típicos de pérdida de trayectoria [34].	22
2.7.	Diferencia entre las subportadoras en OFDM y OFDMA.	23
3.1.	Distribución de la red vehicular.	30
3.2.	Distribución de los vehículos aleatoriamente.	31
3.3.	Interferencia proveniente de la estaciones base vecinas y vehículos ve- cinos.	32
3.4.	Código implementado en Matlab para calcular la SIR para los dos tipos de comunicaciones: V2V y V2I.	37
3.5.	Parámetros que pide el programa para ejecutarse.	39
3.6.	Representación del Modelo de 2 Rayos en VANET.	40
3.7.	Representación del Modelo de 10-Rayos en VANET	41
3.8.	Diagrama de bloques del procedimiento metodológico.	43
4.1.	Diagrama de flujo para la simulación.	44
4.2.	Parámetros que pide el programa para ejecutarse.	45
4.3.	Distribución de la red vehicular.	45
4.4.	Potencia Recibida para comunicación V2V a 5.9 GHz.	46
4.5.	Potencia Recibida para comunicación V2I a 5.9 GHz.	47
4.6.	Potencia Recibida para comunicación V2V a 28GHz.	47
4.7.	Potencia Recibida para comunicación V2I a 28 GHz.	48
4.8.	Código implementado en Matlab para calcular la SIR para los dos tipos de comunicaciones: V2V y V2I.	48

4.9. Tasa de transmisión para modulación 16QAM a 5.9 GHz para comunicación V2I con ancho de banda = 10 MHz	49
4.10. Tasa de transmisión para modulación para 16QAM a 5.9 GHz para comunicación V2V con ancho de banda = 10 MHz	50
4.11. Tasa de transmisión para modulación 16QAM a 28 GHz para comunicación V2V con ancho de banda = 10 MHz	51
4.12. Tasa de transmisión para modulación 16QAM a 28 GHz para comunicación V2I con ancho de banda = 10 MHz	52
4.13. Tasa de transmisión para modulación 64QAM a 5.9 GHz para comunicación V2V con ancho de banda = 10 MHz	53
4.14. Tasa de transmisión para modulación 64QAM a 28 GHz para comunicación V2V con ancho de banda = 10 MHz	54
4.15. Tasa de transmisión para modulación 64QAM a 28 GHz para comunicación V2V con ancho de banda = 100 MHz	55
4.16. Comparación de la tasa de transmisión promedio para V2V y V2I con el mismo ancho de banda = 10 MHz y diferente frecuencia.	56
4.17. Validación del modelo de 2 Rayos con el artículo titulado: "Wireless Access Channels with Near-Ground Level Antennas" [47].	57
4.18. Validación de los modelos de N-Rayos con el modelo de Friis.	57
4.19. Validación del throughput.	58
5.1. Artículo Publicado.	67
5.2. Artículo en revisión.	68

Índice de tablas

1.1. Análisis de Referencias Consultadas	4
3.1. Parámetros para la implementación de la red vehicular.	38

Resumen

Esta investigación tuvo como objetivo evaluar el desempeño de una red vehicular ad hoc (VANET) en entornos de carreteras, específicamente dentro de la banda de súper alta frecuencia (SHF). Se realizó un análisis del desempeño para dos tipos de comunicaciones vehiculares: comunicación vehículo a infraestructura (V2I) y comunicación vehículo a vehículo (V2V), dentro de un área de cobertura delimitada en un escenario de carretera. El estudio se enfocó en evaluar el impacto de las redes vehiculares con y sin infraestructura, así como en analizar el efecto de la frecuencia operativa. En particular, se comparó el desempeño en la frecuencia estándar actual para VANET, que es 5.9 GHz, con una frecuencia de interés de 28 GHz, ambas ubicadas dentro de la banda SHF. La evaluación se llevó a cabo mediante simulaciones Monte Carlo desarrolladas en MATLAB, utilizando como métrica de desempeño la tasa de transmisión del sistema vehicular, calculada a partir de la relación señal a interferencia (SIR) y el tipo de modulación empleada. Los resultados obtenidos confirman el cumplimiento de los estándares establecidos y son consistentes con los datos reportados en la literatura.

Abstract

This research aimed to evaluate the performance of a vehicular ad hoc network (VANET) in road environments, specifically within the super high frequency (SHF) band. A performance analysis was performed for two types of vehicular communications: vehicle-to-infrastructure (V2I) communication and vehicle-to-vehicle (V2V) communication, within a delimited coverage area in a road scenario. The study focused on evaluating the impact of vehicular networks with and without infrastructure, as well as analyzing the effect of the operating frequency. In particular, the performance was compared at the current standard frequency for VANET, which is 5.9 GHz, with a frequency of interest of 28 GHz, both located within the SHF band. The evaluation was carried out using Monte Carlo simulations developed in MATLAB, using as a performance metric the transmission rate of the vehicular system, calculated from the signal to interference ratio (SIR) and the type of modulation used. The results obtained confirm compliance with the established standards and are consistent with the data reported in the literature.

Capítulo 1

Introducción

1.1. Introducción

En el contexto de los sistemas de transporte inteligente (ITS), las redes vehiculares *ad hoc* (VANET) juegan un papel crucial al proporcionar conectividad tanto entre vehículos (V2V) como entre vehículos e infraestructuras de carreteras (V2I). Estas redes, al operar en escenarios sin infraestructura centralizada o apoyadas por nodos de infraestructura, buscan garantizar la seguridad vial y mejorar la experiencia de conducción mediante el intercambio de información [1]. La relevancia de estas redes radica en su capacidad para soportar aplicaciones críticas como el control de colisiones, la navegación cooperativa y la transmisión de contenido multimedia, aspectos que dependen directamente del rendimiento del sistema, medido a través del throughput. El throughput, se ve afectado por diversos factores, siendo la relación señal a interferencia (SIR) y el esquema de modulación, dos de los más relevantes [2]. En el contexto de esta investigación, se consideran modulaciones adaptativas como QPSK, 16QAM y 64QAM, las cuales influyen directamente en la capacidad de la red para transmitir datos de manera eficiente [3]. A mayor SIR, es posible implementar esquemas de modulación de mayor orden, lo que incrementa la tasa de transmisión, pero también requiere condiciones más estrictas de calidad del canal. En entornos vehiculares, donde las condiciones de propagación son altamente variables, esta adaptación dinámica resulta esencial para maximizar el throughput. El cálculo de la SIR está fuertemente influenciado por los modelos de propagación empleados. Estos modelos permiten estimar la potencia de la señal recibida y la interferencia, considerando factores como la atenuación por distancia, las reflexiones y las obstrucciones propias del entorno vehicular. En escenarios de carreteras, las variaciones en el entorno físico,

como la presencia de vehículos o edificios, pueden alterar significativamente la calidad del canal de comunicación, afectando directamente el rendimiento del sistema. Por tanto, una evaluación precisa del throughput requiere un análisis detallado de las condiciones de propagación y su impacto en la SIR [4]. Además, el impacto de los esquemas de modulación en el throughput es crucial. Las modulaciones de mayor orden, como 64QAM, ofrecen tasas de transmisión superiores, pero también son más susceptibles a los errores en condiciones de baja SIR. Esto implica que la selección de la modulación debe ser adaptativa, dependiendo de las condiciones del canal y del nivel de interferencia presente. Este enfoque permite optimizar el uso de los recursos espectrales y garantizar una experiencia de comunicación eficiente y confiable [5]. Para llevar a cabo un análisis estadístico representativo del rendimiento del sistema, esta investigación utiliza la metodología de simulación Monte Carlo. Este método se basa en la generación de muestras aleatorias que representan configuraciones del sistema, permitiendo evaluar el impacto de diversos parámetros de entrada sobre las métricas de salida, como el throughput y la SIR [6]. En este caso, se simulan escenarios de carreteras con vehículos distribuidos aleatoriamente y estaciones base ubicadas estratégicamente, evaluando el rendimiento tanto en la banda de 5.9 GHz, actualmente utilizada en VANET, como en la de 28 GHz, que pertenece a la región de frecuencias SHF. La simulación en MATLAB permite modelar de manera precisa las interacciones complejas entre los vehículos, el entorno y los parámetros de la red, proporcionando un análisis exhaustivo y estadísticamente significativo. En síntesis, esta tesis se centra en la evaluación del rendimiento de una red vehicular *ad hoc* en escenarios de carreteras para la banda de SHF, utilizando una simulación Monte Carlo. Se analiza el impacto de los modelos de propagación, la SIR y los esquemas de modulación sobre el throughput, con el objetivo de proporcionar una comprensión profunda del comportamiento de las redes vehiculares en estas condiciones y contribuir al desarrollo de sistemas de comunicación más eficientes y robustos.

1.2. Objetivos de Tesis

1.2.1. Objetivo General

Evaluar el desempeño de una red vehicular *ad hoc* en carreteras para la banda de Súper Alta Frecuencia (SHF) en un escenario con y sin infraestructura celular.

1.2.2. Objetivos Específicos

1. Determinar las características y requerimientos de una red *ad hoc* vehicular en carreteras a partir de las normas que las regulan.
2. Determinar un modelo matemático de capa física característico de una red *ad hoc* vehicular para la evaluación del desempeño.
3. Diseñar la simulación a través de la técnica Monte Carlo que permita la evaluación del desempeño.
4. Validar los resultados de la simulación comparándolos con lo reportado en la literatura.
5. Analizar los resultados de desempeño de la red *ad hoc*.

1.3. Estado del Arte

En los últimos años se han realizado diversas campañas de mediciones y simulaciones para comunicaciones vehiculares para frecuencia de 5.9 GHz, la actual utilizada para el desarrollo de las VANET. Tras una revisión en la literatura, se encontraron diversos estudios e implementaciones sobre redes vehiculares; se encontraron diversos proyectos relacionados al proyecto propuesto. A continuación, se da un repaso a lo más sobresalientes.

Tabla 1.1: Análisis de Referencias Consultadas

Referencia consultada y año	Parámetros medidos	Contribución	Pros y contras
[8] - 2015	Miden la calidad de la comunicación V2V.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Análisis de interferencias desde los carriles laterales en comunicaciones mmWave/THz en comunicación V2V. ▪ Análisis de capacidad de comunicaciones mmWave/THz. 	<p>Pros:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Caracterizan la interferencia de carriles laterales en entornos de carreteras y urbanas para mmWave. <p>Contras:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Solo se centra en comunicación V2V. ▪ Cobertura limitada a pocos metros. ▪ No menciona esquemas de acceso.

Continúa en la siguiente página...

Referencia consultada y año	Parámetros medidos	Contribución	Pros y contras
[9] - 2015	Rendimiento del sistema	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Análisis de interferencias para comunicación V2V y V2I. ▪ Evaluación del rendimiento del sistema. 	<p>Pros:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Crean áreas de cobertura propias. ▪ Analizan V2V y V2I. ▪ Contemplan interferencia de estaciones base vecinas. <p>Contras:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ No utiliza reuso de frecuencias. ▪ No evalúa modulaciones. ▪ Ignora interferencia de vehículos vecinos.
[10] - 2018	Evalúa el throughput mediante simulaciones V2I.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Análisis del estándar IEEE 802.11p y IEEE 802.16e usando MATLAB. 	<p>Pros:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Considera modulaciones variadas. ▪ Cobertura amplia. <p>Contras:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Sólo analiza 5.9 GHz. ▪ Ignora modelos de propagación e interferencias.

Continúa en la siguiente página...

Referencia consultada y año	Parámetros medidos	Contribución	Pros y contras
[11] - 2015	Evaluación del rendimiento del sistema.	<ul style="list-style-type: none"> Propuesta de sistema de alertas viales mediante comunicación V2V. 	<p>Pros:</p> <ul style="list-style-type: none"> Monitoreo de condiciones viales mediante sensores. Integración con una app web. <p>Contras:</p> <ul style="list-style-type: none"> Alcance limitado a pocos metros. Ignora interferencias y modulaciones.
[12] - 2020	Especificaciones para comunicación vehicular en frecuencias altas.	<ul style="list-style-type: none"> Discusión sobre integración de frecuencias altas en sistemas 3GPP NR V2X. 	<p>Pros:</p> <ul style="list-style-type: none"> Comparación entre 5.9 y 28 GHz. <p>Contras:</p> <ul style="list-style-type: none"> No incluye simulaciones.
[13] - 2012	Evaluación del rendimiento con modulación adaptativa.	<ul style="list-style-type: none"> Implementación de modulación adaptativa en NS-2. 	<p>Pros:</p> <ul style="list-style-type: none"> Evalúa diversas modulaciones. <p>Contras:</p> <ul style="list-style-type: none"> Ignora modelos de propagación y efectos de interferencias.

La tabla 1 presenta estudios cuyo objetivo principal es evaluar el rendimiento de un sistema vehicular. Estos estudios comparten ciertas similitudes; por ejemplo, la evaluación se realiza en una configuración V2V [8], [9],[10],[11],[13]. En [9],[10],[11],[12], [13] utilizan frecuencias de 5.9 GHz para su simulación, pero en [8],[12] trabajan con diferentes frecuencias, en [12] trabajan en la frecuencia de la cual se espera traba-

jar en VANET, 28 GHz. También en [13],[10] evalúan el rendimiento del sistema utilizando diferentes modulaciones, las cuales son: QPSK, 16QAM y 64QAM, uno de los factores para evaluar el Throughput. En cuanto al software que utilizan para modelar fue en ns-2 [13], que es un programa de código abierto para simular redes inalámbricas. Hay una gran cantidad de trabajos relacionados con la comunicación vehicular con y sin infraestructura y sus efectos en el rendimiento de la red.

La presente tesis introduce un enfoque novedoso para evaluar el rendimiento de redes vehiculares en entornos de carretera, abordando diversas limitaciones identificadas en la literatura existente. Aunque hay una cantidad considerable de estudios sobre la comunicación vehicular con y sin infraestructura, muchos presentan diferencias en la configuración de parámetros, los modelos de propagación y las frecuencias analizadas, lo que dificulta la comparación directa de sus hallazgos. En este trabajo se propone un marco de evaluación único, caracterizado por las siguientes particularidades:

- **Uso del modelo de propagación de N-rayos adaptado al entorno de carretera:**
 - A diferencia de los estudios previos, que suelen emplear modelos de propagación simplificados o genéricos, esta tesis implementa el modelo de N-rayos, adaptado específicamente al entorno de carreteras. [14],[15],[16],[23],[26].
 - Este enfoque permite un análisis más detallado del comportamiento del canal inalámbrico, capturando los efectos específicos del entorno vehicular en dichas condiciones.
- **Comparación de frecuencias vehiculares actuales y futuras:**
 - Mientras que gran parte de la literatura utiliza frecuencias tradicionales, como 5.9 GHz, para evaluar el throughput, este trabajo amplía el análisis al considerar también la frecuencia de 28 GHz, proyectada como una de las principales bandas de operación para redes vehiculares de próxima generación. [17],[18],[19],[20],[21],[22],[23],[24],[26],[27].
- **Evaluación del impacto de diferentes esquemas de modulación:**
 - Se evalúan las modulaciones QPSK, 16QAM y 64QAM para analizar su desempeño en términos de throughput en ambos escenarios de frecuencia (5.9 GHz y 28 GHz).

- Si bien algunos estudios previos han explorado el uso de estas modulaciones, son pocos los que las comparan en el contexto de frecuencias de alta frecuencia (28 GHz) y en un entorno de carretera específicamente [28],[29].
- **Implementación del esquema OFDMA en el análisis de rendimiento:**
 - El uso de este esquema permite una evaluación detallada del Throughput, considerando interferencias generadas tanto por estaciones base vecinas como por vehículos cercanos.
- **Análisis exhaustivo de comunicación con y sin infraestructura:**
 - La tesis no solo se limita a evaluar la comunicación V2V (vehículo a vehículo) o V2I (vehículo a infraestructura) de manera aislada, sino que examina ambos escenarios.
 - Este enfoque integral proporciona una visión más sólida del rendimiento de la red en distintos contextos.
- **Aportación principal de la tesis:**
 - Esta tesis aporta una contribución significativa al área de comunicaciones vehiculares al proponer un análisis integral y detallado que combina modelos de propagación específicos, frecuencias actuales y emergentes, esquemas de modulación avanzados y escenarios de comunicación mixtos.
- **Evaluación del rendimiento en carretera mediante simulación:**
 - La evaluación del rendimiento en carretera se destaca por considerar los dos tipos de comunicación existentes: con y sin infraestructura.
 - Se analiza el comportamiento del canal inalámbrico mediante el uso de modelos de propagación.
 - Se realiza una comparativa entre la frecuencia actual (5.9 GHz) y la frecuencia esperada para redes vehiculares (28 GHz).
 - Para medir la SIR [25], se genera una red vehicular donde se analiza la interferencia de estaciones base vecinas y de vehículos cercanos.
 - Se utiliza el esquema de modulación OFDMA, que ofrece diversos tipos de modulaciones y se evalúa el throughput, que es el objetivo principal del trabajo de tesis.

1.4. Justificación de la Tesis

El transporte por carretera constituye la columna vertebral de las economías modernas y, en la actualidad, los avances en las tecnologías de la información y la comunicación (TIC) están revolucionando la forma en que se gestiona y opera la infraestructura vial. La integración de hardware, software y sistemas de comunicación ha abierto la puerta al desarrollo de Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS), fundamentados en principios esenciales como la sostenibilidad, la integración, la seguridad y la capacidad de respuesta. En este contexto, el concepto de vehículo en red adquiere una relevancia sin precedentes, permitiendo no solo mejorar la seguridad y eficiencia en las carreteras, sino también transformar la experiencia de viaje mediante el intercambio de información.

La creación de entornos de carretera inteligente es clave para avanzar hacia ciudades más seguras y sostenibles. Dichos entornos, que integran sistemas de monitoreo satelital, sensores urbanos, cámaras, radares y plataformas de detección en vehículos, permiten recopilar una gran cantidad de datos esenciales para gestionar el tráfico, prevenir accidentes y optimizar rutas. En el marco de estas innovaciones, la comunicación entre vehículos (V2V) y entre vehículos e infraestructura (V2I) se posiciona como un componente fundamental de los ITS. Estas tecnologías permiten el intercambio bidireccional de datos críticos, tales como la posición, la velocidad y las condiciones del entorno, lo que puede prevenir accidentes y mejorar la toma de decisiones en tiempo real. Sin embargo, la mayoría de las implementaciones actuales se han centrado en bandas de frecuencia específicas, como la de 5.9 GHz, dejando en gran medida por explorar otras bandas que podrían ofrecer ventajas significativas.

La banda de Súper Alta Frecuencia (SHF) representa una alternativa prometedora, dado que proporciona un mayor ancho de banda y velocidades de transmisión superiores, características indispensables para soportar la creciente demanda de datos en entornos ITS. En las carreteras, donde las condiciones de movilidad son dinámicas y la transmisión de información debe ser inmediata, evaluar el rendimiento de una red vehicular *ad hoc* (VANET) utilizando la banda SHF se vuelve crucial. Esta evaluación permitirá determinar la viabilidad y el potencial de esta tecnología para mejorar la comunicación entre vehículos y sistemas de infraestructura, con el fin de optimizar la seguridad vial y la eficiencia en la gestión del tráfico.

No obstante, realizar estas pruebas en un vehículo real implica un conjunto de desafíos adicionales. La ejecución de pruebas en carreteras requiere permisos legales específicos y representa una amenaza para la seguridad de las personas, ya que estas pruebas demandan entornos controlados y seguros. Por ello, la realización de una

simulación ofrece una vía segura y eficiente para llevar a cabo un análisis en estos entornos sin comprometer la integridad humana.

Dado el panorama actual, en el que la integración de sensores avanzados (como LiDAR, cámaras y radares) y la fusión de datos son esenciales para la operación de vehículos autónomos y la implementación de ITS, es necesario contar con redes de comunicación robustas y confiables. La presente investigación de tesis proporcionará un análisis detallado del desempeño de las VANET en la banda SHF en escenarios de carretera. Los resultados obtenidos contribuirán al avance teórico en el campo de las comunicaciones vehiculares y ofrecerán también herramientas prácticas para el diseño y la implementación de infraestructuras de transporte [7].

1.5. Organización de Tesis

El contenido de la tesis se presenta a continuación: el capítulo 2 desarrolla el marco teórico de lo que son las VANET, modelos de propagación y evaluación del rendimiento de un sistema de comunicaciones que tienen relación con este trabajo. El capítulo 3 presenta la metodología empleada para la simulación. El capítulo 4 expone los resultados obtenidos a partir de la simulación. El capítulo 5 se muestran las conclusiones de la tesis.

Capítulo 2

Marco Teórico

En el contexto de los sistemas de transporte inteligente (ITS), las redes vehiculares *ad hoc* (VANET) juegan un papel crucial al proporcionar conectividad tanto entre vehículos (V2V) como entre vehículos e infraestructuras de carreteras (V2I). Estas redes, al operar en escenarios sin infraestructura centralizada o apoyadas por nodos de infraestructura, buscan garantizar la seguridad vial y mejorar la experiencia de conducción mediante el intercambio de información [1].

2.1. VANET

Las redes *ad hoc* para vehículos (VANET) se han convertido recientemente en un área de investigación activa debido a sus importantes aplicaciones en el campo de transporte, en el que los vehículos ocupan una posición importante durante las actividades de la vida diaria de las personas. Las redes *ad hoc* para vehículos (VANET) son un tema importante en los sistemas de transporte inteligente (ITS). Las VANET pueden proporcionar aplicaciones para el conductor y el pasajero para mejorar el entorno de conducción y evitar accidentes en la carretera. Las VANET son una subclase de las redes *ad hoc* móviles (MANET), a la que el vehículo se refiere como la movilidad de nodo. Hay tres componentes principales de VANET: Autoridad de confianza (TA), Unidades de carretera (RSU) y Unidades de a bordo (OBU). La TA es responsable de gestionar todo el sistema. La RSU es una estación base como infraestructura vial en la carretera. Cada vehículo tiene una OBU, que permite el proceso y la transmisión del mensaje.

2.1.1. Comunicaciones en VANET

Existen dos tipos de comunicación en VANET: de vehículo a vehículo (V2V) y de vehículo a infraestructura (V2I). Los dos esquemas de comunicación en VANET se describen a continuación.

- V2I: Se refiere a la comunicación que existe entre el automóvil con las infraestructuras viales.
- V2V: En esta comunicación, los vehículos pueden intercambiar información entre sí directamente.

Con estas dos opciones, el vehículo puede intercambiar información sobre el entorno de conducción, como la velocidad y los accidentes de tráfico. Al transmitirse estos mensajes, el otro vehículo VANET toma la decisión sobre la siguiente ruta, lo que conduce a evitar el accidente y el atasco de tráfico [7].

2.1.2. Sistema de Transporte Inteligente (ITS)

Los sistemas de transporte inteligente (ITS) son aplicaciones que proporcionan servicios innovadores de gestión del transporte y del tráfico, proporcionan mejor información a los distintos usuarios y hacen que el uso de la red de transporte sea más seguro, más coordinado y mucho más inteligente. El sistema VANET ya está bien establecido para el control y la monitorización del tráfico de vehículos mediante los conceptos de comunicación V2V y V2I [8]. Los objetivos más importantes de los ITS son :

- Proteger y salvaguardar el medio ambiente.
- Mejorar la seguridad del tráfico.
- Aumentar la efectividad en el área de transporte.
- Reducir el tiempo de viaje.
- Reducir los costos de viaje.

2.1.3. Redes móviles *ad hoc*

La tecnología MANET se utiliza ampliamente en comunicaciones móviles con muchos nodos autónomos. Para un propósito específico, MANET puede organizarse de diferentes maneras a través de un conjunto de enlaces inalámbricos. La idea basada en el concepto de MANET también es útil para garantizar la seguridad y la comodidad en el entorno vial. Por lo tanto, se han desarrollado sistemas ITS para introducir la idea de VANET. La comunicación a bordo del vehículo y el concepto de MANET se implementaron en una nueva forma denominada VANET.

2.1.4. Estándares VANET

Para la designación del protocolo completo del estándar para acceso inalámbrico en entornos vehiculares, se utilizan IEEE 802.11p, DSRC y WAVE.

- Comunicación dedicada de corto alcance (DSRC): DSRC especifica los canales de comunicación inalámbrica de corto a medio alcance diseñados específicamente para que los vehículos se comuniquen entre sí a través de un conjunto de protocolos y estándares u otra infraestructura como 5.850 a 5.925 GHz. Los 75 MHz de espectro en la banda DSRC se dividen en siete canales.
- WAVE: La familia WAVE IEEE 1609 define una arquitectura y un conjunto complementario de protocolos, servicios e interfaces estandarizados que permiten a todas las estaciones WAVE operar en un entorno VANET y establecer comunicaciones de vehículo a vehículo (V2V) y de vehículo a infraestructura (V2I). La arquitectura WAVE define también la seguridad de los mensajes intercambiados. Los estándares WAVE forman en conjunto la base para la implementación de un amplio conjunto de aplicaciones en el ambiente del transporte, que incluye seguridad de vehículos, peajes automáticos, navegación mejorada, gestión del tráfico y muchas otras aplicaciones.
- IEEE 802.11p: Las definiciones de las capas física y de acceso al medio para VANETs están especificadas por el estándar IEEE 802.11p-2010 que adoptó las capas PHY y MAC del IEEE 802.11-2007 para que sean adecuadas para redes vehiculares. IEEE 802.11p se basa especialmente en el IEEE 802.11a para la definición de la capa PHY y en IEEE 802.11e para la definición de la QoS.[2]

2.1.5. Arquitectura de VANET

Existen dos tipos de capas de VANET, que se componen de la capa superior y la capa inferior. La capa superior se compone de la autoridad de confianza (TA), mientras que las Unidades de carretera (RSU) y los vehículos equipados con Unidades a bordo (OBU) han consistido en la capa inferior del modelo del sistema. TA es una autoridad de total confianza para todas las partes en VANET con potentes capacidades de computación y almacenamiento. Es responsable de generar el parámetro público del sistema y registrar las OBU y RSU en el sistema. Además, es el único componente que puede revelar la identidad original del remitente para rastrear y revocar nodos maliciosos en el sistema. RSU es una estación base que se implementa en la carretera como infraestructura de red de VANET. Puede comunicarse con OBU y TA, a través del protocolo DSRC y canal seguro cableado, respectivamente. Las RSU ayudarían a la TA a revelar la identidad original del remitente. En OBU cada vehículo está equipado con una OBU, que le permite comunicarse e intercambiar mensajes con otros vehículos o RSU cercanos, a través del protocolo DSRC. Además, los parámetros públicos del sistema se almacenan en la OBU [9].

2.2. Banda de Súper Alta Frecuencia

Antes de abordar las características específicas de la banda de Súper Alta Frecuencia (SHF), resulta esencial comprender el concepto de señal. Una señal se define como una variación en una magnitud física que permite la transmisión de información. Estas señales pueden propagarse en forma de ondas electromagnéticas a través de distintos medios, como el aire, cables o el vacío. Las ondas electromagnéticas se organizan en función de su frecuencia dentro de un marco denominado espectro electromagnético, el cual abarca desde frecuencias subsónicas, de apenas unos pocos hertz, hasta las frecuencias extremadamente altas de los rayos cósmicos. Este espectro se encuentra subdividido en bandas específicas, cada una con límites y nombres determinados. La asignación de frecuencias para aplicaciones de radio propagación en el espacio libre es regulada principalmente por organismos internacionales, como la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC) [10]. El espectro útil de radiofrecuencias (RF) se clasifica en bandas de frecuencia, que a su vez pueden subdividirse para cubrir distintos tipos de servicios. Según las designaciones del Comité Consultivo Internacional de Radio (CCIR), la banda de SHF corresponde al intervalo de frecuencias comprendido entre 3 GHz y 30 GHz. Este rango incluye muchas de las frecuencias empleadas en sistemas avanzados de radiocomunicación, como los sis-

temas por microondas y satelitales. Dentro de esta banda, las ondas milimétricas caracterizadas por longitudes de onda de entre 1 mm y 10 mm ocupan un lugar de particular interés. La longitud de onda, representada por el símbolo λ , se define como la distancia entre dos crestas consecutivas de una onda electromagnética y se mide en metros o milímetros. Su relación con la frecuencia (f) se expresa mediante la ecuación $\lambda = c/f$, donde c es la velocidad de la luz en el vacío. Esta relación inversa implica que una mayor frecuencia conlleva una menor longitud de onda [11].

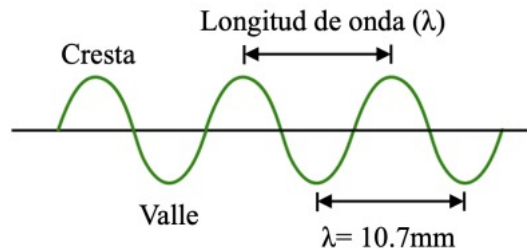


Figura 2.1: Longitud de onda de una frecuencia de 28 GHz.

El interés en el uso de la banda SHF surge debido a sus propiedades únicas que las hacen especialmente adecuadas para su implementación en redes vehiculares. Estas propiedades incluyen: ancho de banda mucho mayor que las frecuencias más bajas, permitiendo velocidades de transmisión de datos muy altas. También, permiten la implementación de sistemas de comunicación con antenas más pequeñas y arreglos de antenas más compactos, lo que facilita su integración en vehículos y estaciones base.

2.2.1. Fenómenos de Propagación

Los fenómenos de propagación que afectan el canal de comunicación inalámbrico representan un factor fundamental que se debe tener en cuenta para el modelamiento del canal. Estos fenómenos, que abarcan desde la reflexión y la difracción hasta el desvanecimiento, influyen en la calidad y la confiabilidad de la comunicación inalámbrica, impactando directamente en la cobertura y la eficiencia de los sistemas inalámbricos. En este apartado se explica los fenómenos de propagación que impactan directamente el rendimiento de una señal transmitida.

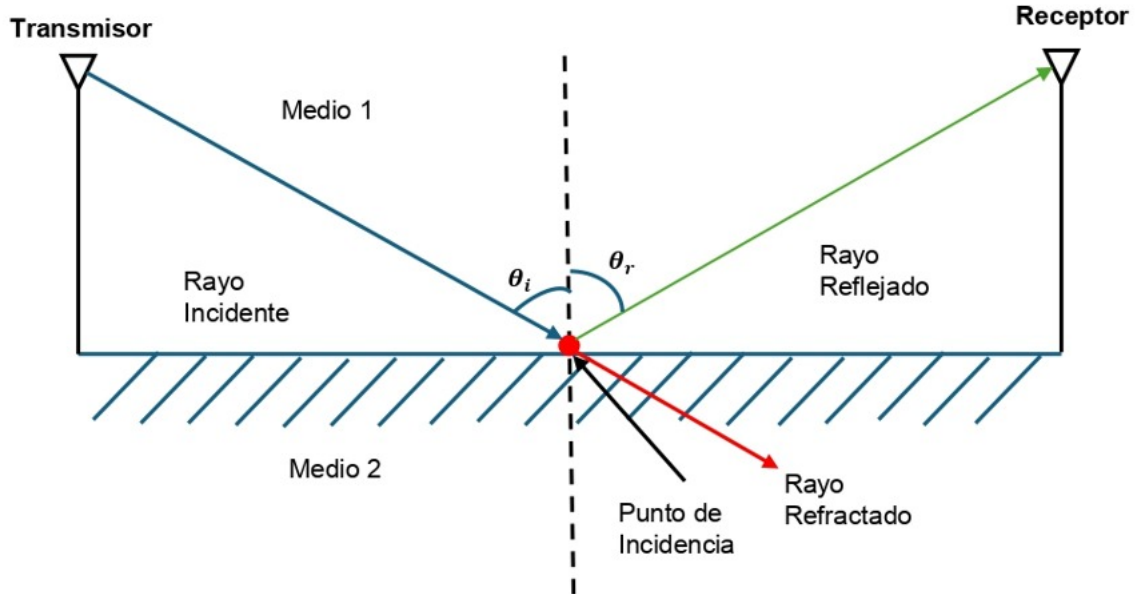


Figura 2.2: Rayo incidente sobre una superficie.

- Reflexión

En la propagación de señales inalámbricas en un entorno vehicular, se presenta el fenómeno de reflexión. Sucede cuando una señal propagada se encuentra con una superficie y se refleja sobre ella en un punto de incidencia, generando un rayo reflejado en una dirección diferente. Este fenómeno ocurre en entornos con obstáculos como por ejemplo un medio diferente al cual se transmite, afectando la trayectoria de la señal. El rayo incidente posee un ángulo θ_i , que al reflejarse genera un rayo reflejado con ángulo θ_r , como se aprecia en la figura 2.2. Según la ley de reflexión de Snell [36], se puede afirmar que $\theta_i = \theta_r$. En frecuencias como la de 28 GHz, la reflexión es significativa debido a la naturaleza de las ondas milimétricas. Las propiedades de la superficie reflectante como su composición influyen en la eficiencia de la reflexión. En la propagación sobre escenarios vehiculares en carretera, la reflexión depende de la posición donde se encuentre el vehículo y de las irregularidades de la superficie de la carretera.

- Refracción

La refracción ocurre cuando un rayo incidente cambia de dirección al atravesar la frontera entre dos medios con diferentes densidades o propiedades dieléctricas

como se observa en la figura 2.2. Este cambio de dirección se debe a la variación en la velocidad de la onda entre los dos medios, ocasionando que el rayo siga una trayectoria no lineal [36].

- **Dispersión**

La dispersión ocurre cuando una onda propagada se desvía en múltiples direcciones al encontrarse con irregularidades en la superficie de reflexión [37]. Esto puede suceder en escenarios donde hay edificios con irregularidades. En la figura 2.3 se presenta la comparación entre un rayo incidente al reflejarse sobre una superficie plana seguido de un rayo reflejado sobre una superficie irregular, ocasionando rayos dispersos.

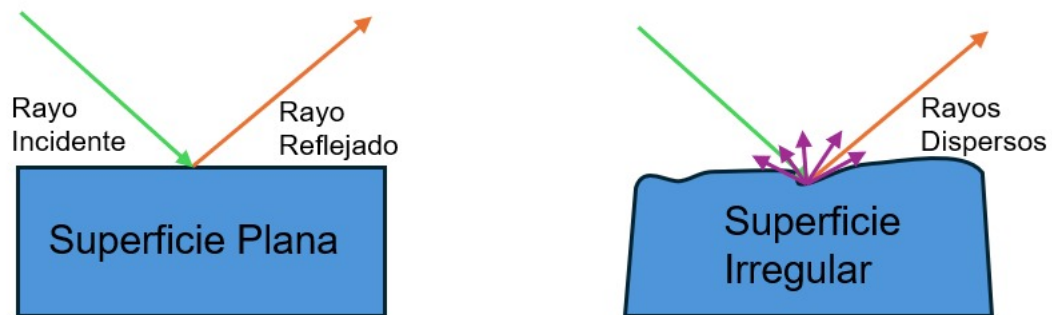


Figura 2.3: Dispersión ocasionada por superficie irregular.

A frecuencias altas como la de 28 GHz, la dispersión puede causar pérdidas de potencia de la señal y degradar la calidad de la comunicación.

- **Difracción**

La difracción es la capacidad de las ondas de radio para desviarse alrededor de obstáculos y propagarse en áreas donde no hay visión directa entre el transmisor y el receptor. Este fenómeno es analizado en entornos con múltiples obstáculos, como edificios o árboles. A frecuencias altas como 28 GHz, la difracción es menos efectiva debido a la longitud de onda más corta, resultando en zonas de sombra más pronunciadas.

2.2.2. Canal Inalámbrico

En esta sección se describen los fundamentos teóricos del canal inalámbrico para el análisis del modelo de 2 rayos y N-rayos. Este análisis se basa en componentes que afectan la transmisión en un escenario específico como el vehicular. En concreto, se examinan los fenómenos involucrados en este entorno como la conductividad y la permitividad.

- Conductividad

La conductividad es la medida de la capacidad de un material o sustancia para permitir el flujo de corriente eléctrica a través de él. Se mide en siemens por metro (S/m) y esta unidad se representa con el símbolo sigma (σ). Esta influye en cómo las ondas electromagnéticas interactúan con los materiales a lo largo de su trayecto. En el caso de la propagación en carreteras, la conductividad para este estudio se considera con un valor de $5 S/m$ lo cual es típico en entornos vehiculares [39].

- Permitividad

Adicionalmente a la conductividad en un escenario vehicular se presenta la permitividad eléctrica, también conocida como constante dieléctrica, es un parámetro que describe como un material es afectado por un campo eléctrico. Está determinada por la tendencia de un material a polarizarse en respuesta a un campo eléctrico aplicado. La constante dieléctrica es una medida adimensional representado por epsilon (ϵ), que indica la capacidad de un material para almacenar energía eléctrica en presencia de un campo eléctrico. Y se describe mediante la ecuación [38]:

$$\epsilon_0 = \epsilon - j60\sigma\lambda \quad (2.1)$$

donde ϵ_0 representa la permitividad compleja, ϵ es la constante dieléctrica, σ es la conductividad y λ es la longitud de onda de la frecuencia.

2.3. Modelos de Propagación

La dinámica cambiante de los vehículos plantea un desafío importante para la tecnología de redes inalámbricas, especialmente cuando se trata de transmitir datos vitales a los vehículos. Por lo tanto, es importante la selección de un modelo de propagación que cumpla con las características necesarias para evaluar el rendimiento

de una red vehicular. Los modelos de propagación son un factor importante para determinar las características del canal inalámbrico en la comunicación V2V y V2I. Los factores de propagación afectan la intensidad de la señal que viaja desde el vehículo transmisor al vehículo receptor en un medio inalámbrico, incluyendo la pérdida de trayectoria y el desvanecimiento de la señal [34]. Para este trabajo de tesis se consideran 3 modelos de propagación: Friis, N-rayos y Log-Distance. Se compararán y se determinará cuál es el mejor para un escenario específico en carretera.

2.3.1. Enlaces LOS y NLOS

En las comunicaciones inalámbricas existen dos tipos de enlaces que se presentan en los estudios realizados en esta área, los enlaces LOS y NLOS. El enlace de línea de vista LOS (del inglés line of sight) se caracteriza principalmente por la inexistencia de obstáculos entre el transmisor y receptor, sus pérdidas se encuentran asociadas a la distancia entre el transmisor y receptor. Cuando un obstáculo se encuentra entre el transmisor y receptor, deja de ser un enlace LOS y se dice que es un enlace NLOS, es decir, enlace de no línea de vista. La siguiente figura muestra los enlaces LOS y NLOS.

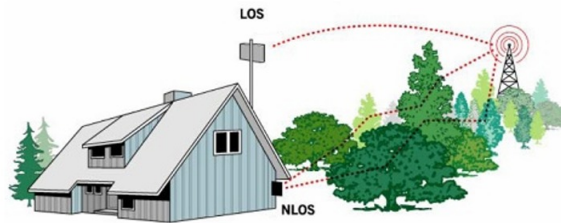


Figura 2.4: Enlaces de línea de vista (LOS) y de no línea de vista (NLOS) [4].

Como se mencionó anteriormente, en el enlace NLOS se generan pérdidas por la presencia de obstáculos entre el transmisor y el receptor, las cuales varían dependiendo del tipo de material que posea el obstáculo, ya que algunos materiales pueden causar desvanecimiento y atenuación en la señal, mientras que otros pueden absorber parte de la señal y reflejar el resto. Por eso, se debe tener en consideración el tipo de material por el que se va a propagar la señal.

2.3.2. Modelo de propagación en espacio libre (FSPM)

El modelo de propagación de espacio libre, conocido también como ecuación de Friis, se utilizó por primera vez en redes *ad hoc* móviles (MANET). Es un modelo matemático que obtiene el valor de la potencia recibida en función de la separación que existe entre el transmisor y el receptor [35]. El resultado que entrega este modelo solo es válido cuando no hay obstáculos entre el transmisor y receptor, es decir, en condiciones de espacio libre. Este modelo es de mucha utilidad para verificar si el nivel de potencia recibida en un enlace LOS se aproxima al nivel de potencia “ideal” que entrega dicho modelo, y así, facilitar la correcta ubicación y orientación del transmisor y receptor en enlaces fijos. El modelo se presenta en la ecuación 2.2, donde P_r es la potencia recibida y la variable desconocida que esta en función de la distancia d del enlace en cuestión, P_t se define como la potencia del transmisor, G_t y G_r son las ganancias de las antenas transmisora y receptora, y finalmente, λ es el valor de la longitud de onda de la señal propagada en el medio.

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2} \quad (2.2)$$

Es muy común trabajar los modelos de propagación en el dominio logarítmico, es decir, en decibeles (dB o dBm según corresponda), la expresión 2.1 muestra la conversión de las variables, tomando en consideración que PL corresponde a las pérdidas de trayecto (del inglés Pathloss) que están asociadas a la distancia existente en el enlace de propagación, como señala la expresión 2.3.

$$P_r[dBm] = P_t + G_t + G_r - PL \quad (2.3)$$

$$PL[dB] = 20 \log\left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right) \quad (2.4)$$

La idea principal del modelo es que la potencia disminuye con el cuadrado de la distancia cuando una onda de radio se envía a través de una antena omnidireccional.

2.3.3. Modelo de 2 rayos

Este modelo es ideal para ser utilizado en la mayoría de los estudios de MANET [35], tiene en cuenta la trayectoria LOS y una única trayectoria reflejada desde la superficie del suelo. En el modelo de 2 rayos, la potencia recibida se puede escribir como [34]:

$$P_r = P_t \left[\frac{\lambda}{4\pi} \right]^2 \left| \frac{\sqrt{G_m}}{l} + R \frac{\sqrt{G_r} e^{-j\phi}}{x + x'} \right|^2 \quad (2.5)$$

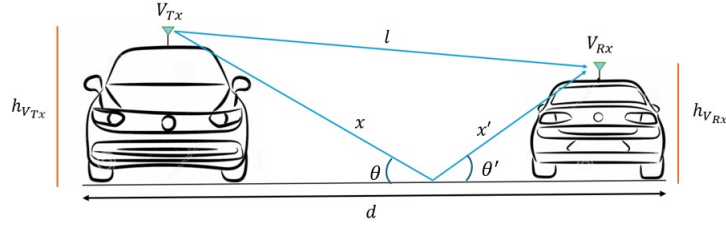


Figura 2.5: Modelo de 2 rayos [34].

donde λ es la longitud de onda de la señal, P_t es la potencia transmitida, $\sqrt{G_m} = \sqrt{G_p G_q}$ denota el producto de los patrones de campo de la antena a lo largo de la dirección LOS, $\sqrt{G_r} = \sqrt{G_i G_j}$ denota el producto de los patrones de campo de la antena a lo largo de la trayectoria reflejada, l denota la distancia de propagación para la trayectoria LOS, $x + x'$ denota la distancia de propagación de la trayectoria reflejada desde el capó del vehículo transmisor, l y $x + x'$ están dados por:

$$l = \sqrt{d^2 + (h_{V_{Tx}} - h_{V_{Rx}})^2} \quad (2.6)$$

$$x + x' = \sqrt{d^2 + (h_{V_{Tx}} + h_{V_{Rx}})^2} \quad (2.7)$$

donde d es la distancia entre el transmisor y el receptor. En la figura 2.5, ϕ es la diferencia de fase entre la trayectoria LOS y la trayectoria reflejada, se escribe como:

$$\phi = \frac{2\pi((x + x') - l)}{\lambda} \quad (2.8)$$

R es el coeficiente de reflexión de la trayectoria reflejada, que viene dado por:

$$R = \frac{\cos\theta - \sqrt{\epsilon - \sin^2\theta}/\epsilon}{\cos\theta + \sqrt{\epsilon - \sin^2\theta}/\epsilon} \quad (2.9)$$

donde ϵ es la permitividad compleja relativa del vehículo. θ es el ángulo de incidencia.

2.3.4. Modelo Log-Distance

Este modelo estima la pérdida de potencia para una distancia y rango de comunicación amplios, es decir, calcula la pérdida de potencia exponencial incurrida desde una distancia entre el transmisor y receptor.

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r}{d^\mu} 10^{\frac{\zeta}{10}} \quad (2.10)$$

Donde P_t es la potencia del vehículo transmisor, G_t y G_r son las ganancias de las antenas transmisora y receptora, d^μ es la distancia con exponente de pérdidas que tomará valor dependiendo del tipo de entorno, figura 2.6. $10^{\zeta/10}$ es la componente log-normal la cual representa las pérdidas por Shadowing modelados en función de la variable aleatoria Gaussiana con media (\bar{x}) igual a cero y desviación estándar (Δ) en dB.

Ambiente	μ
Distancias largas	3.7-6.5
Distancias cortas	2.7-3.5
Edificio de oficinas (mismo piso)	1.6-3.5
Edificio de oficinas (varios pisos)	2-6
Tienda	1.8-2.2
Fábricas	1.6-3.3
Vivienda	3

Figura 2.6: Exponentes típicos de pérdida de trayectoria [34].

2.4. Modelado de eficiencia en redes inalámbricas

El modelado de sistemas inalámbricos consiste en construir funciones matemáticas que describan el funcionamiento de los esquemas de acceso y sus modulaciones pertenecientes a estas redes. Tanto LTE como IEEE 802.11p pueden utilizar el esquema de acceso OFDMA para su control de acceso al medio, mientras que de la transmisión en la capa física se pueden encargar las modulaciones QAM para ambos casos o QPSK para redes celulares. Si bien existen distintos esquemas o modulaciones que pueden ser implementadas, el compartir características similares entre las redes propuestas hace que su implementación y modelos compartan los mismas métricas y parámetros de funcionamiento [40]-[41].

2.4.1. Esquema de Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal (OFDMA)

Existen diversas técnicas de acceso múltiple conocidas, la técnica de Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal (OFDMA) es la más utilizada en los sistemas de transmisión de banda ancha. Ha sido diseñado para ser capaz de superar la interferencia que se genera entre el transmisor y el receptor para aprovechar eficientemente el espectro de frecuencias útiles. En la siguiente figura se muestra la similitud de OFDMA con OFDM, pero OFDMA es mucho más eficiente a la hora de aprovechar el espectro de frecuencias, debido a que el espacio que existe entre las subportadoras es traslapado ortogonalmente sin presentar pérdida de información gracias a esta característica [42].

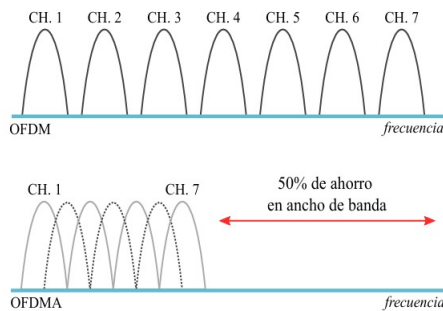


Figura 2.7: Diferencia entre las subportadoras en OFDM y OFDMA.

Esta técnica utiliza la Transformada Rápida de Fourier (FFT) de un tamaño mayor a OFDM, y divide a las subportadoras disponibles en grupos llamados subcanales (SC). A diferencia de OFDM, el cual transmite la misma cantidad de energía en cada subportadora, OFDMA puede transmitir diferentes cantidades de energía en cada subcanal. Mediante el uso de los subcanales, dentro del mismo intervalo de tiempo, la estación base puede asignar más potencia de transmisión a los nodos con una SIR más baja y menos potencia a la que tienen una SIR más alta. También permite que la EB asigne una mayor potencia a los subcanales asignados a los nodos en interiores, lo que da como resultado una mejor cobertura dentro de un edificio. Para implementar OFDMA se asignan subconjuntos de portadoras a cada usuario, la asignación de subportadoras por usuario puede variar de acuerdo con las condiciones del canal utilizado o en base a la calidad del servicio (QoS) requerida para cada uno. En un sistema de portadora única, el desvanecimiento o la interferencia causan fallas

en cualquier aplicación, pero en un sistema de varias portadoras (subcanal), solo un pequeño porcentaje de esas portadoras desaparecerá. Para corregir las subportadoras con envío de información errónea se utilizan códigos de corrección de error. Es necesario que el transmisor y receptor cuenten con la misma frecuencia de modulación y escala de tiempo para llevar al cabo la transmisión y la recuperación de la información de los usuarios correctamente [42].

Esta técnica emplea la Transformada Rápida de Fourier (FFT) de mayor tamaño en comparación con OFDM, y divide las subportadoras disponibles en grupos denominados subcanales (SC). A diferencia de OFDM, que transmite la misma cantidad de energía en cada subportadora, OFDMA permite transmitir diferentes cantidades de energía en cada subcanal. Utilizando estos subcanales, la estación base puede asignar más potencia de transmisión a los nodos con menor relación señal a interferencia (SIR) y menos potencia a aquellos con mayor SIR dentro del mismo intervalo de tiempo. Además, la estación base puede asignar más potencia a los subcanales destinados a nodos ubicados en interiores, mejorando así la cobertura dentro de los edificios.

Para implementar OFDMA, se asignan subconjuntos de portadoras a cada usuario, y esta asignación puede variar según las condiciones del canal utilizado o basarse en la calidad del servicio (QoS) requerida para cada uno. En un sistema de portadora única, el desvanecimiento o la interferencia pueden causar fallas en cualquier aplicación; sin embargo, en un sistema de múltiples portadoras (subcanales), solo un pequeño porcentaje de esas portadoras se verá afectado. Para corregir las subportadoras con errores de transmisión se utilizan códigos de corrección de errores. Es esencial que tanto el transmisor como el receptor utilicen la misma frecuencia de modulación y escala de tiempo para llevar a cabo la transmisión y recuperación de la información de los usuarios de manera correcta [43].

2.4.2. Tipos de modulaciones en OFDMA

En los sistemas inalámbricos que utilizan el esquema de acceso OFDMA, es posible alcanzar una tasa de datos relativamente alta mediante el uso de modulaciones como la modulación por desplazamiento de fases en cuadratura (QPSK) y las modulaciones de amplitud en cuadratura (QAM), específicamente 16-QAM y 64-QAM, las cuales mejoran la eficiencia espectral del sistema. Estas modulaciones transmiten una de M posibles señales durante cada intervalo de tiempo T [44].

2.4.3. Modulación QPSK

En esta modulación la fase de 2 radianes es distribuida de manera uniforme entre las 4 señales de transmisión ($M = 4$), la expresión para la señal se escribe:

$$s_i(t) = \sqrt{(2E/T)} [\cos(2\pi f_c t + (2\pi/M)_i)] \quad (2.11)$$

Donde E es la energía de la señal, T es la duración de cada simbolo, f_c es la de la portadora, $i = 0, 1, \dots, M - 1$ y $0 < t < T$. Por definición $m = 2$.

2.4.4. Modulación 16-QAM y 64-QAM

Estas modulaciones combinan la modulación por desplazamiento de amplitud (ASK) y la modulación por desplazamiento de fase (PSK). La señal se define por:

$$s_i(t) = \sqrt{(2E/T)} [a_i \cos(2_c t) - b_i \sin(2_c t)] \quad (2.12)$$

En estas modulaciones, para 16-QAM, $M = 16$, por lo tanto el valor de $m = 4$, mientras que para 64-QAM $M = 64$ y $m=6$.

2.4.5. Relación señal/interferencia SIR

Uno de los factores importantes que se debe considerar para el diseño de un sistema OFDMA es la cobertura del servicio. Para los sistemas inalámbricos móviles de banda ancha, satisfacer el requerimiento de cobertura significa que el enlace de radio debe cumplir con un cierto valor de relación señal/interferencia (SIR) mínima requerida, eso significa que el conjunto de estaciones base deben entregar la suficiente potencia de la señal en el área de cobertura, las estaciones base pueden recibir una adecuada potencia en la misma área y cada receptor en el sistema no debe experimentar una interferencia excesiva [44]. La SIR es una función sumamente esencial en la evaluación de redes mediante su simulación, la manipulación de sus parámetros en conjunto con la métrica de calidad y tasa de transmisión deriva en la obtención de desempeño de la misma y se expresa a través de la siguiente ecuación:

$$SIR_i = \frac{P_T^0 L_P^0 u_L^0 G(\phi_0)}{\sum_{k=1}^{N_{AP}} P_T^{k,i} L_P^{k,i} u_L^{k,i} G(\phi_{k,i})} \quad (2.13)$$

Donde $P_T^{0,i}$ es la potencia isotrópica radiada equivalente, irradiada hacia el i -ésimo usuario respecto al punto de acceso que provee el servicio.

$L_P^{0,i}$ son las pérdidas por propagación para el i -ésimo usuario respecto al punto de acceso que provee el servicio.

$u_L^{0,i}$ son las pérdidas relacionadas con la propagación, como las pérdidas por oscurecimiento (shadowing), pérdidas por caída y pérdidas por oscurecimientos rápidos (fast fading) para el i -ésimo usuario respecto al punto de acceso que provee el servicio.

$G_{\phi_{0,i}}$ es la ganancia de la antena del i -ésimo usuario respecto al punto de acceso que provee el servicio.

AP es el número de puntos de acceso que proveen servicio.

$P_T^{k,i}$ es la potencia EIRP del i -ésimo usuario respecto al k -ésimo punto de acceso.

$L_P^{k,i}$ son las pérdidas por propagación para el i -ésimo usuario respecto a la k -ésimo punto de acceso.

$u_L^{k,i}$ son las pérdidas relacionadas con la propagación, como las pérdidas por oscurecimiento (shadowing) y pérdidas por caída y pérdidas por oscurecimientos rápidos (fast fading) para el i -ésimo usuario respecto al k -ésimo punto de acceso.

$G_{\phi_{k,i}}$ es la ganancia de la antena de i -ésimo usuario respecto al k -ésimo punto de acceso.

2.4.6. Métrica de calidad

En un sistema OFDMA, la métrica de calidad se encuentra asociada con la relación señal a interferencia dada en función de la razón de la energía de bit a densidad espectral de interferencia definida por:

$$\gamma = \left(\frac{E_b}{I_0}\right)_i = \frac{\omega_0}{R_i} SIR_i \quad (2.14)$$

E_b es la energía de bit.

I_0 es la densidad espectral de interferencia.

ω_0 es el ancho de banda del sistema celular.

R_i es la tasa de transmisión de i -ésimo usuario.

SIR_i es la relación señal a interferencia del i -ésimo usuario.

2.4.7. Tasa de transmisión

La tasa de transmisión R_i no es más que la cantidad de bits por segundo que se pueden transferir por un punto de acceso para cualquiera de los dos tipos de enlaces (ascendente y descendente) y depende del tipo de modulación empleada. Cuando la tasa de transmisión alcanza el valor máximo, se habla del parámetro llamado desempeño (throughput), es este el parámetro de interés para conocer la capacidad de un sistema OFDMA [45]. La definición correspondiente al desempeño del sistema queda expresada en términos de la tasa de transmisión:

$$R_i = \begin{cases} (\frac{\omega_0}{\gamma})SIR_i & \text{si } SIR_i < m\gamma \\ m\omega_0 & \text{si } SIR_i \geq m\gamma \end{cases} \quad (2.15)$$

Donde m toma un valor de acuerdo con el tipo de modulación empleado. Para Q-PSK $m=2$, $m=4$ para 16-QAM y $m=6$ para 64-QAM.

2.4.8. Interferencia externa

En un sistema móvil OFDMA con múltiples estaciones base, un usuario puede experimentar interferencia de otras estaciones base. Para calcular la interferencia para un usuario específico se tiene [44]:

$$I_i = \sum_{k=1}^M P_T^k L_P^k u_L^k G_\phi^k \quad (2.16)$$

I_i es la interferencia del i -ésimo usuario

M es el número de estaciones base interferentes.

P_T^k es la potencia EIRP del k -ésimo usuario.

L_P^k son las pérdidas por propagación para el k-ésimo usuario.

u_g^k son las pérdidas relacionadas con la propagación, los oscurecimientos lentos (shadowing), pérdidas por caída y pérdidas por oscurecimientos rápidos (fast fading) para el k-ésimo usuario.

G_R^k es la ganancia de la antena para el k-ésimo usuario.

Capítulo 3

Marco Metodológico

En este trabajo la evaluación del desempeño de la red a partir de la medición de la SIR para los 2 escenarios de interés se realiza a través de una simulación Monte Carlo implementada en MATLAB. La metodología de simulación Monte Carlo es un tipo de simulación que se basa en un muestreo aleatorio repetido y un análisis estadístico para calcular los resultados. Este método de simulación está muy relacionado con los experimentos aleatorios, experimentos para los cuales el resultado específico no se conoce de antemano. En este contexto, Monte Carlo puede considerarse como una forma metódica de realizar el llamado análisis de hipótesis, en el que se utilizan modelos matemáticos para describir las interacciones en un sistema utilizando expresiones matemáticas. Estos modelos normalmente dependen de una serie de parámetros de entrada que, cuando se procesan a través de las fórmulas matemáticas del modelo, dan como resultado uno o más resultados de salida [6].

se comenzó creando el ambiente vehicular, como primer paso es crear el área de cobertura, que consiste en celdas hexagonales de las cuales se generan 37 celdas. Estas celdas hexagonales cuentan con 3 sectores compartiendo la misma frecuencia de transmisión, lo que quiere decir que cada sector de cada celda es interferente entre sí, figura 3.1.

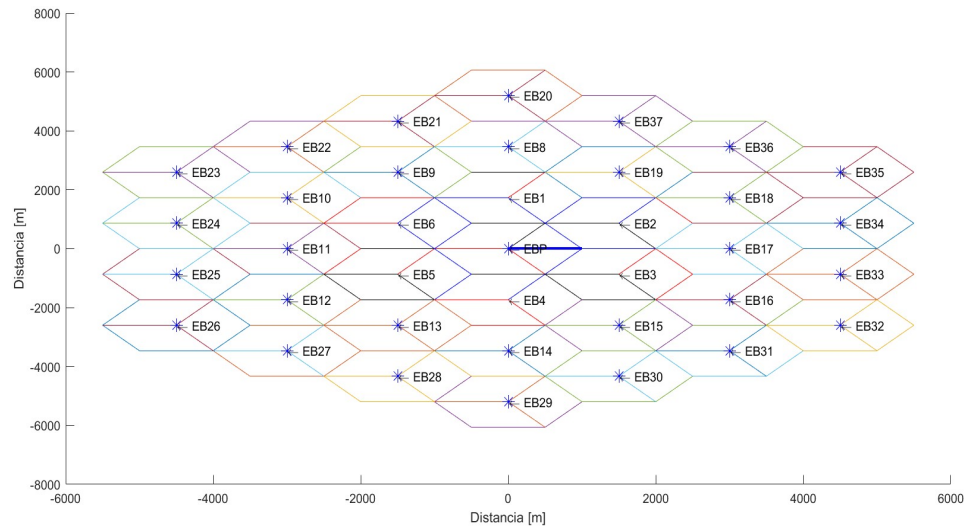


Figura 3.1: Distribución de la red vehicular.

El escenario en carretera es generado en un sector de la celda central donde cada vehículo tiene una posición equiprobable en el área acotada, como se muestra en la figura 3.2.

Adicionalmente se evalúa la interferencia proveniente de las estaciones base o unidades móviles para cada posición, como se ilustra en la figura 3.3.

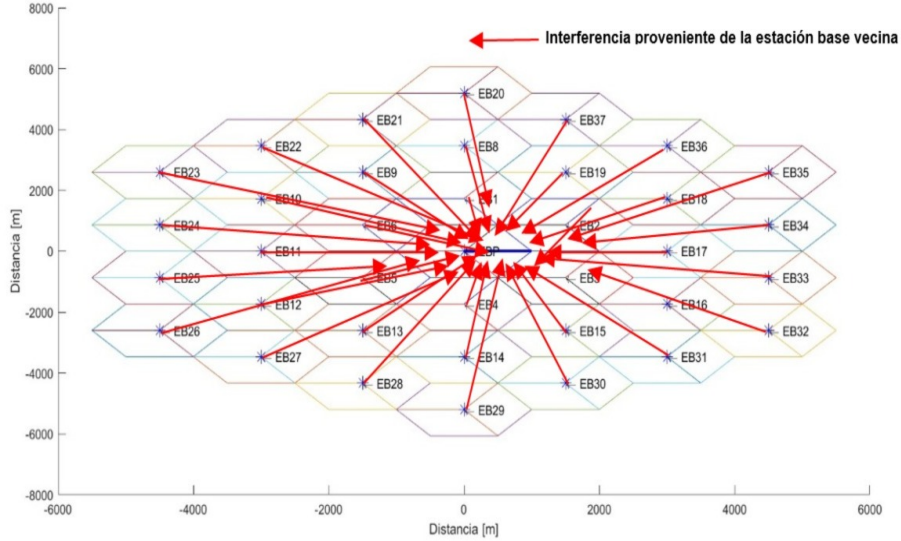


Figura 3.3: Interferencia proveniente de la estaciones base vecinas y vehículos vecinos.

El código para calcular las potencias recibidas interferentes para el modelo de 2 rayos se muestra a continuación:

$$PR_{2R_{Interferentes}} = Pt * (lambda./(4 * pi)).^2 * (abs((sqrt(Gt).)/dlv_{interferentes}) + (((R_{interferentes} * sqrt(Gr). * exp^{(1j*delta_{phi_{interferentes}})}).)/dr_{interferentes})))^2;$$

$$Sumatoria_{PR_{2R_{Interferentes}}} = sum(PR_{2R_{Interferentes}}(2 : end, :), 1);$$

De igual manera, se calculan las potencias interferentes para los demás modelos.

Como el objetivo principal de la tesis es evaluar el throughput de un sistema vehicular para los dos tipos de comunicación vehicular existentes: V2V y V2I, se requiere medir la relación señal a interferencia (SIR) a partir de las potencias deseadas y las interferentes. Partiendo de la ecuación (2.13), se evalúa la SIR del sistema con las ecuaciones para la comunicación V2V y V2I para los diferentes modelos de propagación como se detalla a continuación.

3.1. SIR del sistema vehicular V2I para el Modelo Log-Distance

Por definición, la SIR se puede expresar como el cociente de la potencia recibida P_{R_x} y la interferencia recibida I_{R_x} para el i -ésimo usuario. Partiendo de la ecuación (2.13) se obtiene que, para redes vehiculares V2I, la SIR se define como [3]-[6]:

$$SIR_{V2I} = \frac{P_{R_{vehiculo-interes,i}}}{I_{EB_k}} = \frac{P_{t_i} G(\phi_i) u_{Rayleigh}^i / d_i^\mu 10^{\zeta_i/10}}{\sum_{k=1}^{N_{EB}} P_{t_{k,i}} G(\phi_{k,i}) u_{Rayleigh}^{k,i} / d_{k,i}^\mu 10^{\zeta_{k,i}/10}} \quad (3.1)$$

P_{t_i} es la potencia de transmisión para la i -ésima posición del vehículo.

$G(\phi_i)$ es la ganancia de la antena de la i -ésima posición del vehículo respecto a la estación base en el origen.

$u_{Rayleigh}^i$ son las pérdidas causadas por fast fading para la i -ésima posición del vehículo respecto a la estación base en el origen modeladas con variables aleatorias Rayleigh.

d_i^μ es la distancia con exponente de pérdida de la i -ésima posición del vehículo.

$10^{\zeta_i/10}$ componente log-normal la cual representa las pérdidas por Shadowing modelados en función de la variable aleatoria Gaussiana con media ζ con media (\bar{x}) igual a cero y desviación estándar (Δ) en dB, para la i -ésima posición del vehículo.

EB es el numero de estaciones bases que conforman la red vehicular.

$P_{t_{k,i}}$ es la potencia de transmisión del k -ésima estación base al i -ésima posición del vehículo.

$G(\phi_{k,i})$ es la ganancia de la k -ésimo antena de la estación base respecto a la i -ésima posición del vehículo.

$u_{Rayleigh}^{k,i}$ son pérdidas causada por fast fading del k -ésima estación base respecto a la i -ésima posición del vehículo modeladas por variables aleatorias del tipo Rayleigh.

$d_{k,i}^\mu$ es la distancia con exponente de pérdida del k -ésima estación base con respecto

a la i -ésima posición del vehículo.

$10^{\zeta_{k,i}/10}$ componente log-normal la cual representa las pérdidas por shadowing modeladas en función de la variable aleatoria Gaussiana ζ con media (\bar{x}) igual a cero y desviación estándar (Δ) en dB, para la k -ésima estación base con respecto a la i -ésima posición del vehículo.

3.2. SIR del sistema vehicular V2I para el Modelo de 2 Rayos

$$SIR_{V2I} = \frac{P_{R_{vehiculo-interes,i}}}{I_{EB_k}} = \frac{P_{t_i} \left[\frac{\lambda_i}{4\pi} \right]^2 \left| \frac{\sqrt{G_{m_i}}}{d_{l_i}} + R_i \frac{\sqrt{G_{r_i}} e^{-j\Delta\phi_i}}{d_{r_i}} \right|^2}{\sum_{k=1}^{N_{EB}} P_{t_{i,k}} \left[\frac{\lambda_{i,k}}{4\pi} \right]^2 \left| \frac{\sqrt{G_{m_{i,k}}}}{d_{l_{i,k}}} + R_{i,k} \frac{\sqrt{G_{r_{i,k}}} e^{-j\Delta\phi_{i,k}}}{d_{r_{i,k}}} \right|^2} \quad (3.2)$$

Donde:

P_{t_i} es la potencia de transmisión para el i -ésima posición del vehículo de interés.

λ_i es la longitud de onda de la señal para la i -ésima posición del vehículo de interés.

$\sqrt{G_{m_i}} = \sqrt{G_{p_i} G_{q_i}}$ denota el producto de los patrones de campo de la antena a lo largo de la dirección LOS, $\sqrt{G_{r_i}} = \sqrt{G_{i_i} G_{j_i}}$ denota el producto de los patrones de campo de la antena a lo largo de la trayectoria reflejada del i -ésima posición del vehículo de interés con respecto a la estación de origen.

d_{l_i} denota la distancia de propagación para la trayectoria LOS para la i -ésima posición del vehículo de interés con respecto a su estación base de origen.

d_{r_i} denota la distancia de propagación de la trayectoria reflejada de la estación base de origen al i -ésima posición del vehículo de interés.

EB es el número de estaciones base interferentes.

$P_{t_{i,k}}$ es la potencia de transmisión para el i -ésima posición del vehículo de interés con respecto a las estaciones base interferentes.

$\lambda_{i,k}$ es la longitud de onda de la señal para la i -ésima posición del vehículo de interés con respecto a las estaciones base interferentes.

$\sqrt{G_{m_{i,k}}} = \sqrt{G_{p_{i,k}} G_{q_{i,k}}}$ denota el producto de los patrones de campo de la antena a lo largo de la dirección LOS, $\sqrt{G_{r_{i,k}}} = \sqrt{G_{i_{i,k}} G_{j_{i,k}}}$ denota el producto de los patrones de campo de la antena a lo largo de la trayectoria reflejada del i -ésima posición del vehículo de interés con respecto a las estaciones base interferentes.

$d_{l_{i,k}}$ denota la distancia de propagación para la trayectoria LOS para la i -ésima posición del vehículo de interés con respecto a las estaciones base interferentes.

$d_{r_{i,k}}$ denota la distancia de propagación de la trayectoria reflejada de las estaciones base interferentes al i -ésima posición del vehículo de interés.

3.3. SIR del sistema vehicular V2V para el Modelo Log-Distance

Para redes vehiculares V2V la SIR debe ser abordada de otra manera, es decir, se debe contemplar la interferencia que es causada por otros vehículos que están usando el mismo canal.

$$SIR_{V2V} = \frac{P_{R_{vehiculo-interes,i}}}{I_{EB_k} + I_{VI_j}} = \frac{P_{t_i} G(\phi_i) u_{Rayleigh}^i / d_i^\mu 10^{\zeta_i/10}}{I_{EB_k} + \sum_{j=1}^{N_{VI}} P_{t_{j,k}} G(\phi_{j,k}) u_{Rayleigh}^{j,k} / d_{j,k}^\mu 10^{\zeta_{j,k}/10}} \quad (3.3)$$

VI es el número de vehículos de interferencia.

$P_{t_{j,k}}$ es la potencia de transmisión para el j -ésimo vehículo vecino con respecto a su estación base de origen.

$G(\phi_{j,k})$ es la ganancia de la antena del j-ésimo vehículo de interferencia con respecto a su estación base de origen.

$u_{Rayleigh}^{j,k}$ son pérdidas causada por fast fading del j-ésimo vehículo de interferencia con respecto a su estación base de origen modeladas por variables aleatorias del tipo Rayleigh.

$d_{j,k}^\mu$ es la distancia con exponente de pérdida del j-ésimo vehículo de interferencia con respecto a su estación base de origen.

$10^{\zeta_{j,k}/10}$ componente log-normal la cual representa las pérdidas por shadowing modeladas en función de la variable aleatoria Gaussiana ζ con media (\bar{x}) igual a cero y desviación estándar (Δ) en dB, para el j-ésimo vehículo de interferencia con respecto a su estación base de origen.

3.4. SIR del sistema vehicular V2V para el Modelo de 2 Rayos

$$SIR_{V2V} = \frac{P_{R_{vehiculo-interes,i}}}{I_{EB_k} + I_{VI_l}} = \frac{P_{t_i} \left[\frac{\lambda_i}{4\pi} \right]^2 \left| \frac{\sqrt{G_{m_i}}}{d_{l_i}} + R_i \frac{\sqrt{G_{r_i}} e^{-j\Delta\phi_i}}{d_{r_i}} \right|^2}{\sum_{l=1}^{N_{VI_l}} P_{t_{l,k}} \left[\frac{\lambda_{l,k}}{4\pi} \right]^2 \left| \frac{\sqrt{G_{m_{l,k}}}}{d_{l_{l,k}}} + R_{l,k} \frac{\sqrt{G_{r_{l,k}}} e^{-j\Delta\phi_{l,k}}}{d_{r_{l,k}}} \right|^2} \quad (3.4)$$

Donde:

VI_l Es el número de vehículos interferentes.

$P_{t_{l,k}}$ es la potencia de transmisión de las estaciones base interferentes para la l-ésima posición de los vehiculos interferentes.

$\lambda_{l,k}$ es la longitud de onda de la señal para la l-ésima posición de los vehiculos interferentes.

$\sqrt{G_{m_{l,k}}} = \sqrt{G_{p_{l,k}} G_{q_{l,k}}}$ denota el producto de los patrones de campo de la antena

a lo largo de la dirección LOS, $\sqrt{G_{r_{l,k}}} = \sqrt{G_{i_{l,k}} G_{j_{l,k}}}$ denota el producto de los patrones de campo de la antena a lo largo de la trayectoria reflejada del l -ésima posición de los vehículos interferentes con respecto a las estaciones base interferentes.

$d_{l,k}$ denota la distancia de propagación para la trayectoria LOS desde las estaciones base interferentes al l -ésima posición de los vehículos interferentes.

$d_{r_{l,k}}$ denota la distancia de propagación de la trayectoria reflejada desde las estaciones base interferentes al l -ésima posición de los vehículos interferentes,

Sus códigos se muestran en la figura 3.4 para cada tipo de SIR:

```
SIR_2R_V2I = PR_2R./Sumatoria_PR_2R_Interferentes;
SIR_Log_Distance_V2I = Log_Distance./Sumatoria_Log_Distance_Interferentes;

SIR_2R_V2V = PR_2R./((Sumatoria_PR_2R_Interferentes+Sumatoria_Vehiculos_interferentes));
SIR_Log_Distance_V2V = Log_Distance./((Sumatoria_Log_Distance_Interferentes+Sumatoria_Vehiculos_interferentes));
```

Figura 3.4: Código implementado en Matlab para calcular la SIR para los dos tipos de comunicaciones: V2V y V2I.

Quedando así expresada la función SIR para cada modelo de propagación. El cálculo de la tasa de transmisión se evalúa con la misma ecuación, donde lo único que va a diferir será el tipo de modulación utilizado. Este factor es relevante para la evaluación del throughput.

La metodología utilizada para llevar al cabo la simulación de los modelos de propagación a 5.9 GHz, que es la frecuencia con la que actualmente se trabaja en las redes vehiculares *ad hoc* (VANET), y a 28 GHz, que es la frecuencia con la cual se espera trabajar en futuras aplicaciones de VANET que se discute en la siguiente sección [46]. El objetivo principal es evaluar el rendimiento de un sistema vehicular cuando la comunicación es V2V y V2I mediante el uso de tres tipos de modulaciones: QPSK, 16QAM y 64QAM. Para lograr este objetivo, se implementa la técnica de simulación Monte Carlo, la cual permite realizar un análisis estadístico detallado al generar múltiples iteraciones bajo condiciones variables. Esta metodología es particularmente útil para modelar la aleatoriedad en los canales de propagación y evaluar el impacto en el rendimiento del sistema vehicular.

3.5. Desarrollo de simulación

La configuración de la simulación y las especificaciones técnicas se resumen en la tabla 3.1, y de forma gráfica se muestran los parámetros requeridos para ejecutar el programa.

Parámetros	Símbolo	Valores
Generación de eventos	N	20,000
Cobertura	d	[1, 1,000] m
Frecuencia	f	[5.9, 28] GHz
Altura de Estación Base	h_{EB}	10 m
Altura de vehículo receptor	$h_{V_{Rx}}$	1.5 m
Altura de vehículo transmisor	$h_{V_{Tx}}$	2.5 m
Potencia de transmisión	P_{Tx}	0 dBm
Ganancia de transmisor	G_{Tx}	0 dB
Ganancia de receptor	G_{Rx}	0 dB
Constante Dieléctrica	ϵ	5
Conductividad	σ	0.02 S/m
Ancho de Banda	ω_o	[10, 100] MHz
Exponente de Pérdida por Propagación	μ	4.7
Métrica de Calidad	γ	[1,2,3,4,5,6]

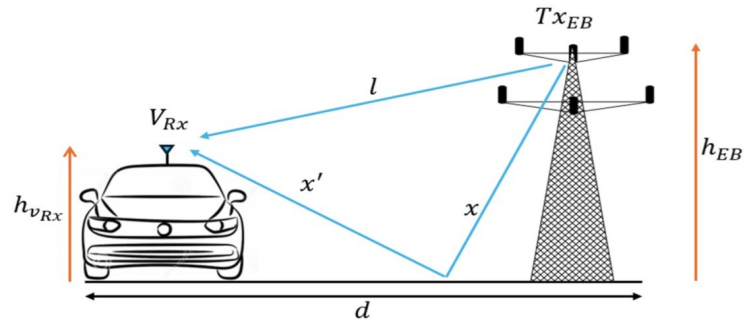
Tabla 3.1: Parámetros para la implementación de la red vehicular.

```

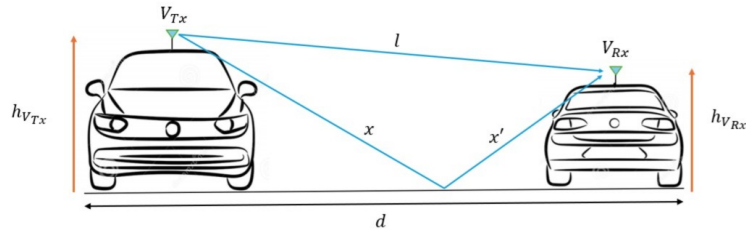
Command Window
Introduce el reuso que deseas: reuso 1 (1) reuso 3 (2) reuso 7 (3) = 1
Introduce la longitud de la carretera [m] = 1000
Introduce el número de eventos = 20000
Introduce el ancho de la carretera [m] = 20
Introduce la altura del vehiculo transmisor [m] = 2
Introduce la altura de la estación base [m] = 10
Introduce la altura del vehiculo receptor [m] = 1.5
Introduce la Frecuencia = 28e9
Introduce el valor del exponente de pérdida = 4.7
fx Introduce el valor del ancho de banda = 10e6
    
```

Figura 3.5: Parámetros que pide el programa para ejecutarse.

El escenario de la carretera vista de cerca en la simulación se ilustra en la figura 3.6, para comunicación V2I y V2V, donde en *a*) se considera una estación base en una posición fija que es el transmisor (T_x) y un vehículo en carretera que opera como el receptor (V_{R_x}) que va a lo largo de la carretera, ambas con antenas omnidireccionales polarizadas verticalmente con una ganancia de 0 dBi en *b*) se consideran dos vehículos en la carretera asumiendo que ambos vehículos pueden estar en el mismo o en diferente carril. El vehículo V_{R_x} se posiciona a una distancia d del V_{T_x} . El cálculo de la potencia recibida se realiza en cada evento generado aleatoriamente en el intervalo de d . Cabe mencionar que entre el vehículo y la estación base existe línea de vista *LOS* identificado como el rayo l , así mismo entre el vehículo transmisor y el receptor. Además, se ilustra un rayo reflejado sobre la superficie de la carretera, expresado como $x + x'$. Estos dos componentes son parámetros fundamentales que conforman el modelo de dos rayos. En la simulación del escenario planteado se considera que el vehículo V_{R_x} puede estar en ambos carriles de la carretera.



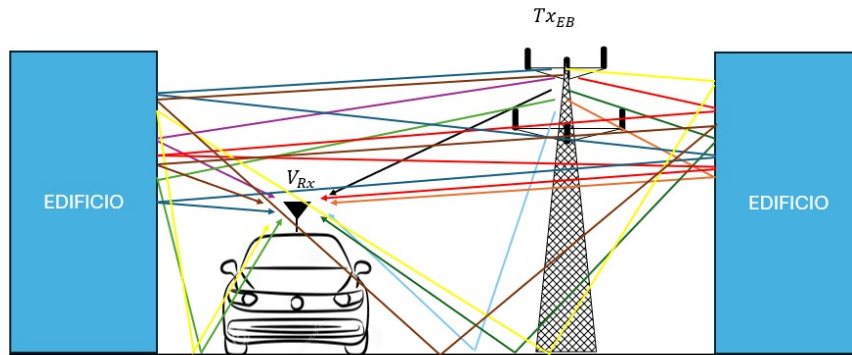
(a) Comunicación V2I



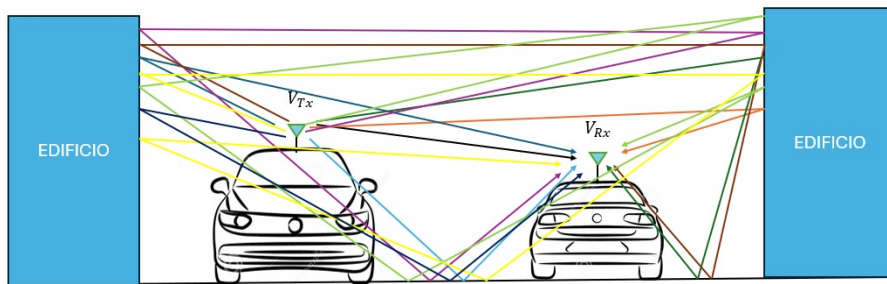
(b) Comunicación V2V

Figura 3.6: Representación del Modelo de 2 Rayos en VANET.

Por otro lado, para el modelo Log-Distance se consideran parámetros como el exponente de pérdidas por propagación, las afectaciones debidas a los desvanecimientos rápidos o fastfading modeladas con variables aleatorias Rayleigh y las pérdidas por shadowing modeladas en función de la variable aleatoria Gaussiana con media cero y desviación estándar = 8 dB. No se contemplan todos los parámetros como el modelo de 2 Rayos, como lo son las alturas de los vehículos, la altura de la estación base ni de la frecuencia utilizada. Por último, y no menos importante, en el trabajo se programó el modelo de N-rayos, ya que se asume que los vehículos pueden pasar por zonas donde se encuentren edificios, muros, etc. Para fines gráficos se hizo el modelo de 10-Rayos como se muestra en la figura 3.7.



(a) Comunicación V2I para modelo de 10 Rayos



(b) Comunicación V2V para modelo de 10 Rayos

Figura 3.7: Representación del Modelo de 10-Rayos en VANET

3.6. Caso 1: V2I

3.6.1. Transmisor

En el caso de la comunicación V2I, se asume que la estación base está en una posición fija transmitiendo a dos frecuencias: 5.9 GHz y 28 GHz. La altura de la estación base (h_{EB}) se simuló considerando que a mayor frecuencia, la longitud de onda es más pequeña. Para facilitar la comparación entre ambas frecuencias, se asignó la misma altura a las antenas transmisoras, ambos casos la antena es omnidireccional.

3.6.2. Receptor

En cuanto a la altura del receptor (h_{Rx}), se consideró un valor promedio estándar para un vehículo, equivalente a 1.5m. El vehículo receptor se encuentra en una carretera de 1,000 m de longitud, la cual cuenta con dos carriles, y se considera que puede estar ubicado en cualquiera de ellos. Los cambios en la posición del vehículo receptor a lo largo de la carretera permiten observar las variaciones en la señal recibida, ya que la antena receptora adopta diferentes posiciones. Esto afecta el punto de incidencia de los rayos reflejados en la superficie de la carretera en los modelos de 2 Rayos y 10 Rayos. Por otro lado, en los modelos de Friis y Log-Distance, este parámetro no se considera, ya que dichos modelos no lo incorporan en sus cálculos.

3.7. Caso 2: V2V

3.7.1. Transmisor

En el caso de la comunicación V2V, se asume que el vehículo transmisor (V_{Tx}) está ubicado en la carretera y al igual que el vehículo receptor, puede ocupar cualquiera de los carriles disponibles. Sin embargo, se establece la condición de que la distancia mínima entre el vehículo transmisor y el receptor debe ser de al menos 1 m. La altura del vehículo transmisor (h_{Tx}) se fijó en 2.5 m. No obstante, cabe destacar que esta altura puede variar dentro del rango permitido para diferentes tipos de vehículos. Al igual que en el caso V2I, la transmisión se realiza a dos frecuencias: 5.9 GHz y 28 GHz, utilizando antenas omnidireccionales en ambos vehículos.

3.7.2. Receptor

Para el caso V2V, el receptor sigue la misma metodología utilizada en la comunicación V2I. La principal diferencia radica en que la comunicación se establece con otro vehículo, manteniendo una distancia mínima de 1 m entre ambos.

3.7.3. Evaluación del desempeño de la red vehicular

Para la evaluación de la red vehicular para V2V y V2I, se calculará la Relación Señal a Interferencia (SIR) utilizando las ecuaciones (3.1), (3.2), (3.3) y (3.4). Estas ecuaciones permiten implementar el esquema de acceso OFDMA, aplicando las tres modulaciones más utilizadas en este esquema: QPSK, 16QAM y 64QAM. Los

resultados obtenidos permitirán comparar la tasa de transmisión alcanzada con cada tipo de modulación y evaluar el rendimiento del sistema vehicular en un escenario de comunicación entre vehículos.

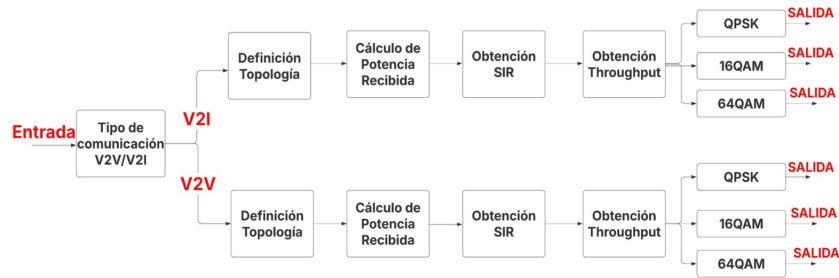


Figura 3.8: Diagrama de bloques del procedimiento metodológico.

El procedimiento completo llevado a cabo en la simulación se presenta en la figura 3.8, donde se describen detalladamente los pasos realizados. Este análisis se centra en la evaluación del rendimiento de la red vehicular, considerando escenarios de comunicación V2I y V2V. El objetivo principal es evaluar la cobertura y la calidad del enlace en el escenario simulado, empleando esquemas de acceso OFDMA con modulaciones QPSK, 16QAM y 64QAM, además de calcular métricas como la Relación Señal a Interferencia (*SIR*) en diferentes configuraciones. Los resultados obtenidos permitirán determinar la efectividad del sistema vehicular bajo las condiciones de simulación planteadas.

Capítulo 4

Resultados

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos del ambiente vehicular en carreteras. A continuación, en la figura 4.1, se presenta el diagrama de flujo para el diseño de la simulación.

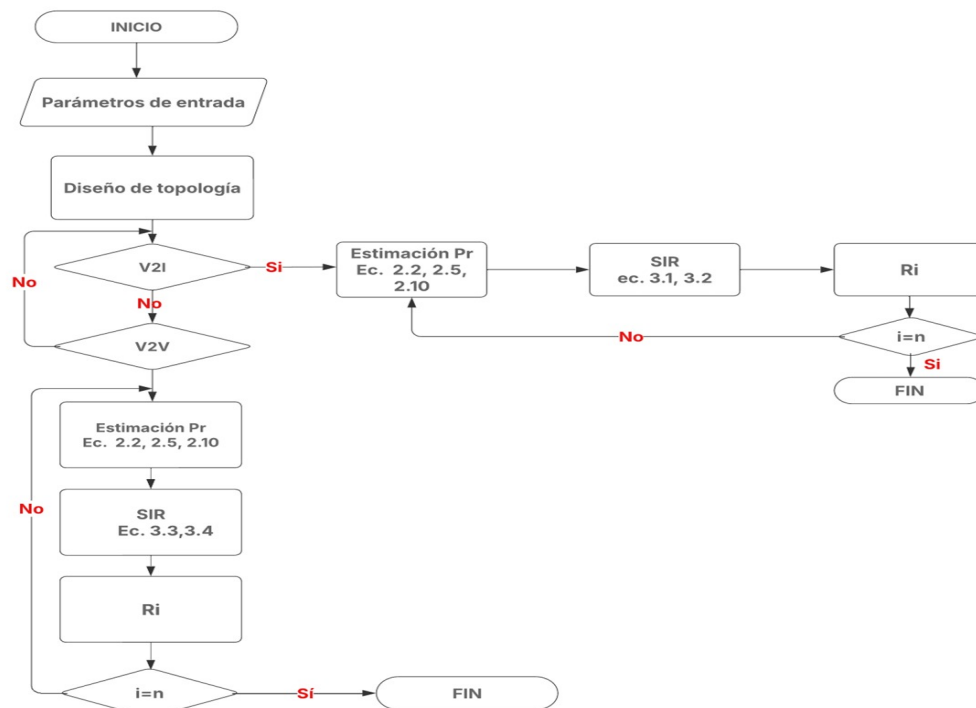


Figura 4.1: Diagrama de flujo para la simulación.

Capítulo 4

La simulación comienza con la selección del escenario de operación, con y sin infraestructura. A continuación se asignan los parámetros de entrada, se seleccionan, de acuerdo con la tabla 3.1 del capítulo anterior.

```
Command Window
Introduce el reuso que deseas: reuso 1 (1) reuso 3 (2) reuso 7 (3) = 1
Introduce la longitud de la carretera [m] = 1000
Introduce el número de eventos = 20000
Introduce el ancho de la carretera [m] = 20
Introduce la altura del vehiculo transmisor [m] = 2
Introduce la altura de la estación base [m] = 10
Introduce la altura del vehiculo receptor [m] = 1.5
Introduce la Frecuencia = 28e9
Introduce el valor del exponente de pérdida = 4.7
fx Introduce el valor del ancho de banda = 10e6
```

Figura 4.2: Parámetros que pide el programa para ejecutarse.

Ingresados los parámetros, se genera la red vehicular, con las estaciones base y vehículos tanto de interés como interferentes, y la carretera.

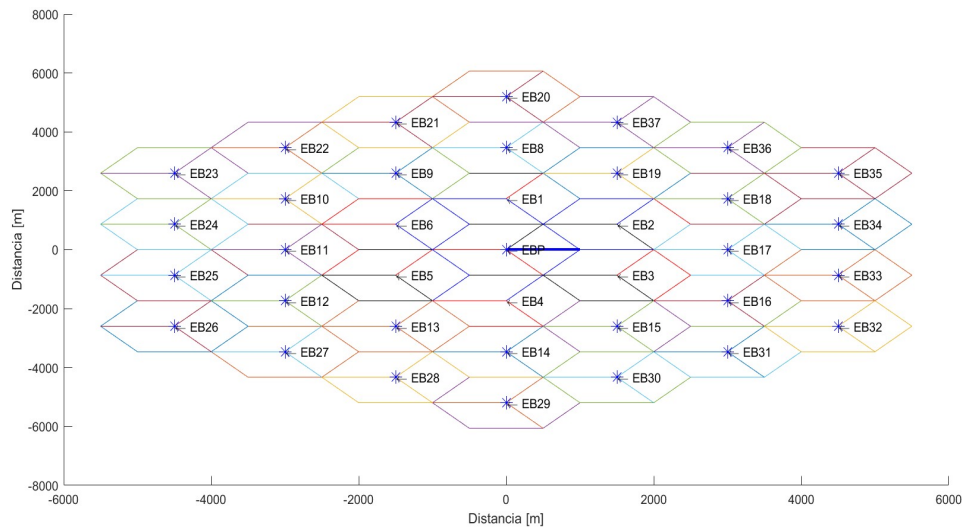


Figura 4.3: Distribución de la red vehicular.

A continuación se da paso a la generación de los n eventos, que en este caso fueron 20,000 eventos, para dar paso al cálculo de las interferentes. En las siguientes figuras se muestran las potencias recibidas de interés, para la comunicación V2V y V2I.

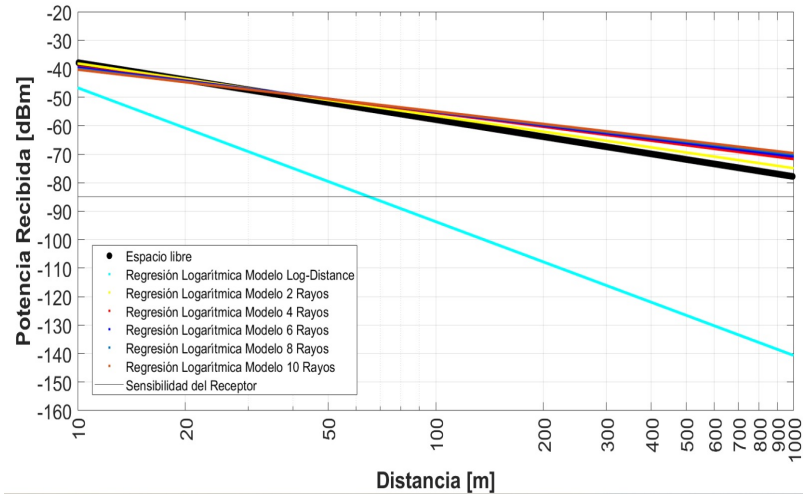


Figura 4.4: Potencia Recibida para comunicación V2V a 5.9 GHz.

La potencia calculada por el modelo Log-Distance se aleja del caso ideal y de las aproximaciones de 2,4,6,8 y 10 Rayos lo que significa que a través de este no es posible modelar de forma precisa el funcionamiento de la red a una frecuencia de 5.9 GHz. Una tendencia similar en la cual las pendientes asociadas al modelado por Friis y N-Rayos están muy cercanas se observa en el escenario V2I, figura 4.5.

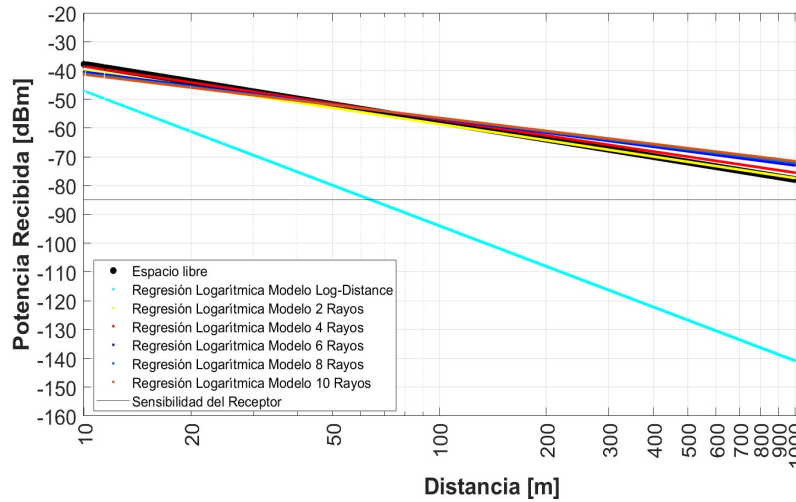


Figura 4.5: Potencia Recibida para comunicación V2I a 5.9 GHz.

Para las frecuencias a 28 GHz, en ambas figuras 4.6 y 4.7 para el escenario V2V y V2I, el modelo Log-Distance se aleja considerablemente de los resultados generados por Friis y N-rayos. A pesar de que el modelo Log-Distance ha sido un referente para la evaluación del desempeño de los sistemas de comunicaciones, la migración frecuencial hace necesaria la consideración de los otros modelos.

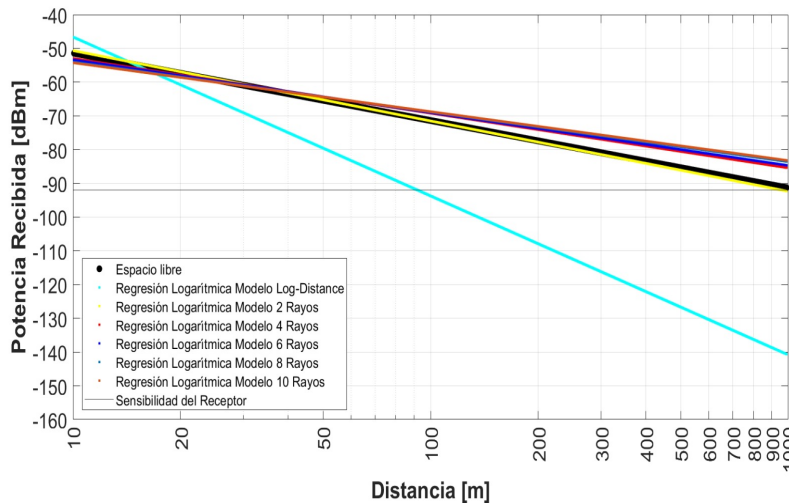


Figura 4.6: Potencia Recibida para comunicación V2V a 28GHz.

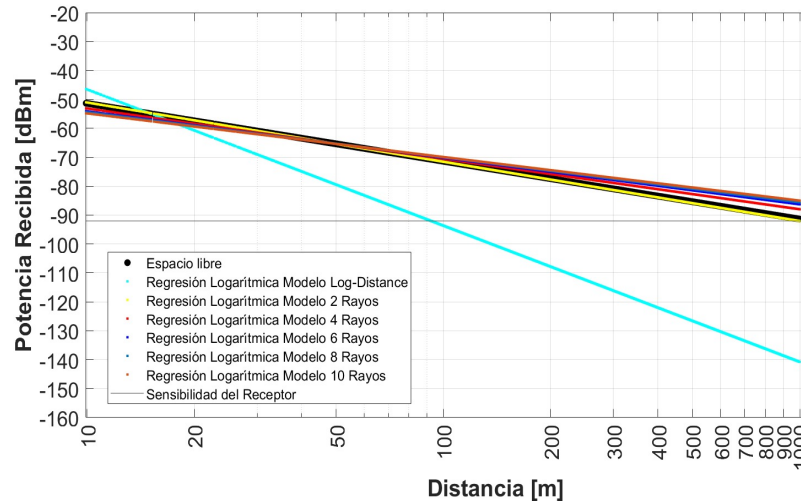


Figura 4.7: Potencia Recibida para comunicación V2I a 28 GHz.

Para evaluar el throughput se mide la relación señal a interferencia de la red vehicular, utilizando las ecuaciones propuestas en esta tesis (3.1, 3.2, 3.3 y 3.4) para las dos tipos de comunicación V2V y V2I. El código con el cual se evalúa en Matlab se muestra en la figura 4.8.

```
SIR_2R_V2I = PR_2R./Sumatoria_PR_2R_Interferentes;
SIR_Log_Distance_V2I = Log_Distance./Sumatoria_Log_Distance_Interferentes;

SIR_2R_V2V = PR_2R./(Sumatoria_PR_2R_Interferentes+Sumatoria_Vehiculos_interferentes);
SIR_Log_Distance_V2V = Log_Distance./(Sumatoria_Log_Distance_Interferentes+Sumatoria_Vehiculos_interferentes);
```

Figura 4.8: Código implementado en Matlab para calcular la SIR para los dos tipos de comunicaciones: V2V y V2I.

El throughput se ve afectado por la relación señal a interferencia y por el esquema de modulación, el tipo de modulación utilizados. En este trabajo para esquema de acceso OFDMA se tienen disponibles las modulaciones QPSK, 16QAM y 64QAM.

A partir de la simulación se obtiene el throughput para las dos configuraciones en distintas frecuencias de operación y considerando además los 3 esquemas de modulación, mediante la ecuación 2.15.

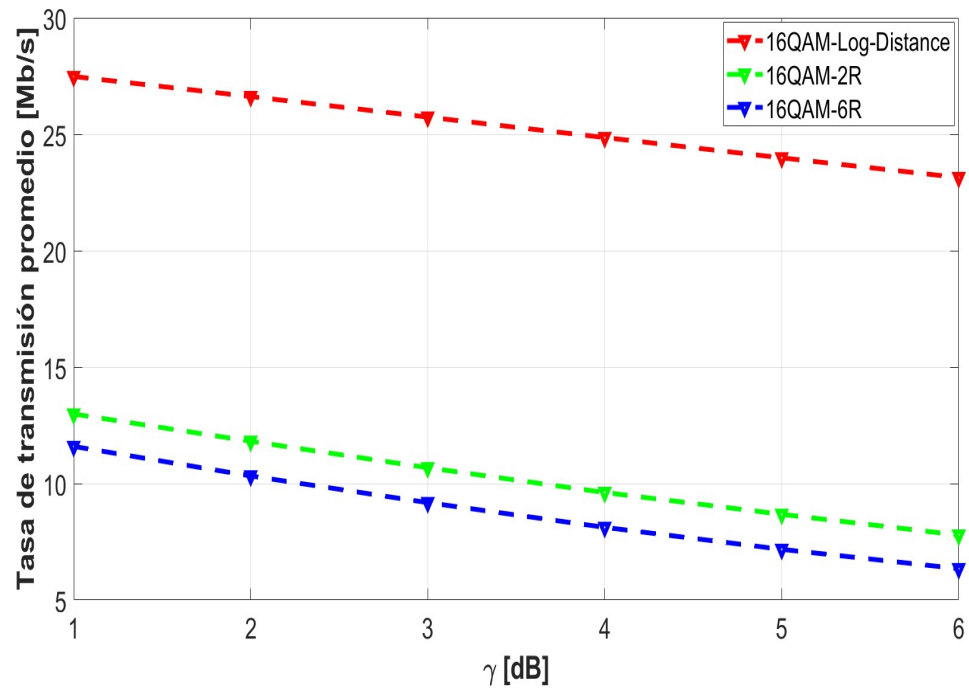


Figura 4.9: Tasa de transmisión para modulación 16QAM a 5.9 GHz para comunicación V2I con ancho de banda = 10 MHz

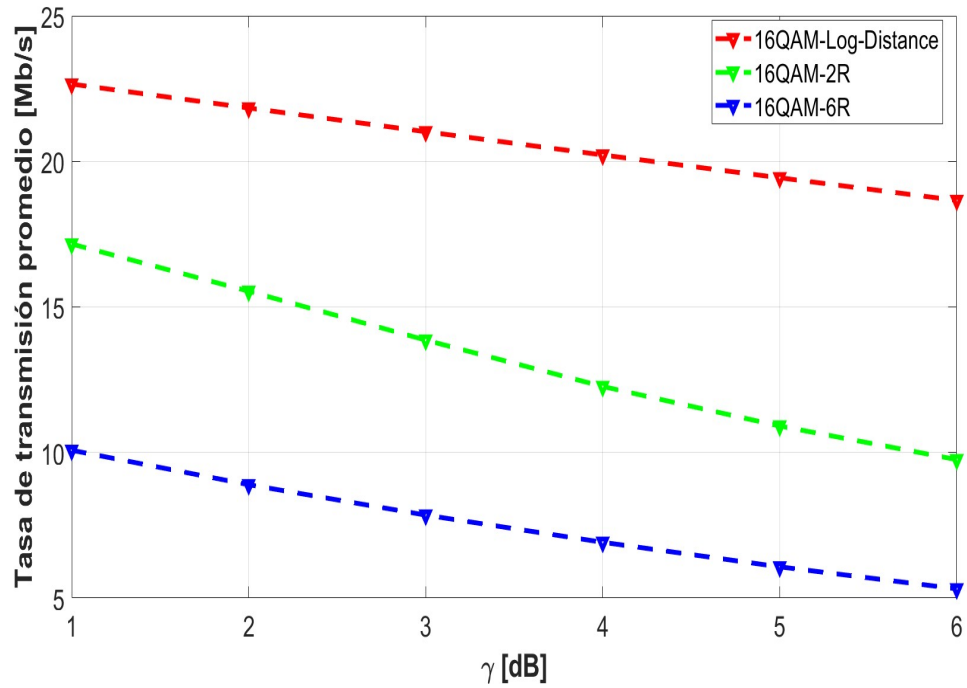


Figura 4.10: Tasa de transmisión para modulación para 16QAM a 5.9 GHz para comunicación V2V con ancho de banda = 10 MHz

En la figura 4.9 y 4.10 se muestran las gráficas de la tasa de transmisión para frecuencias de 5.9 GHz para comunicación V2V y V2I. Para el escenario con infraestructura, como los interferentes son fijos, el modelo Log-Distance enmascara las pérdidas por propagación con las pérdidas por distancia, por lo que presentan el mejor desempeño a nivel throughput, a diferencia del generado por 2 rayos y 6-rayos, en el escenario V2V, los modelos de N-rayos tienden a mostrar mejor desempeño que el modelo Log-Distance. Esta conducta se repetirá a mayor frecuencia como se muestra en las figuras 4.11 y 4.12.

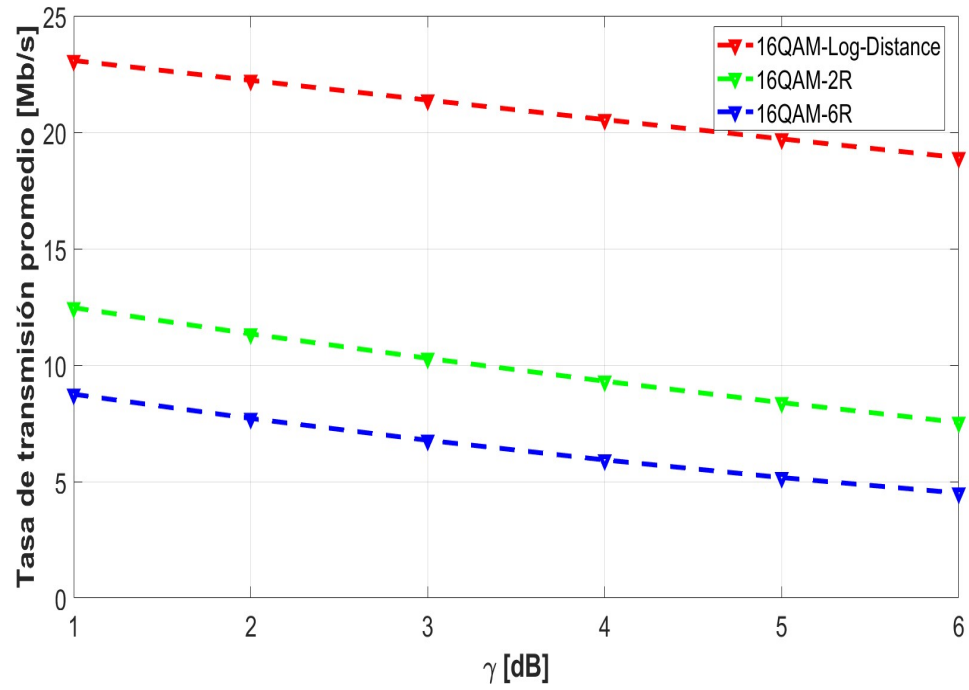


Figura 4.11: Tasa de transmisión para modulación 16QAM a 28 GHz para comunicación V2V con ancho de banda = 10 MHz

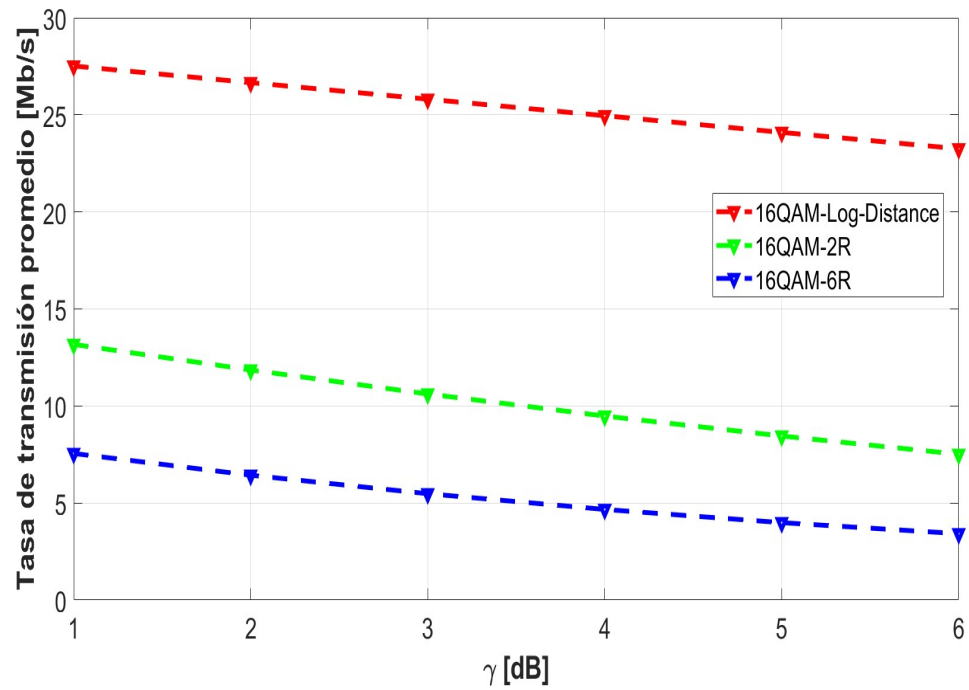


Figura 4.12: Tasa de transmisión para modulación 16QAM a 28 GHz para comunicación V2I con ancho de banda = 10 MHz

A mayor dimensionalidad de la modulación se observa un incremento en el throughput. Sin embargo, comparando el escenario V2V 64QAM a 5.9 GHz con el V2V 64QAM a 28 GHz, se observa un decremento en el Throughput ante el incremento en la frecuencia como se ilustra en la figura 4.13 y 4.14.

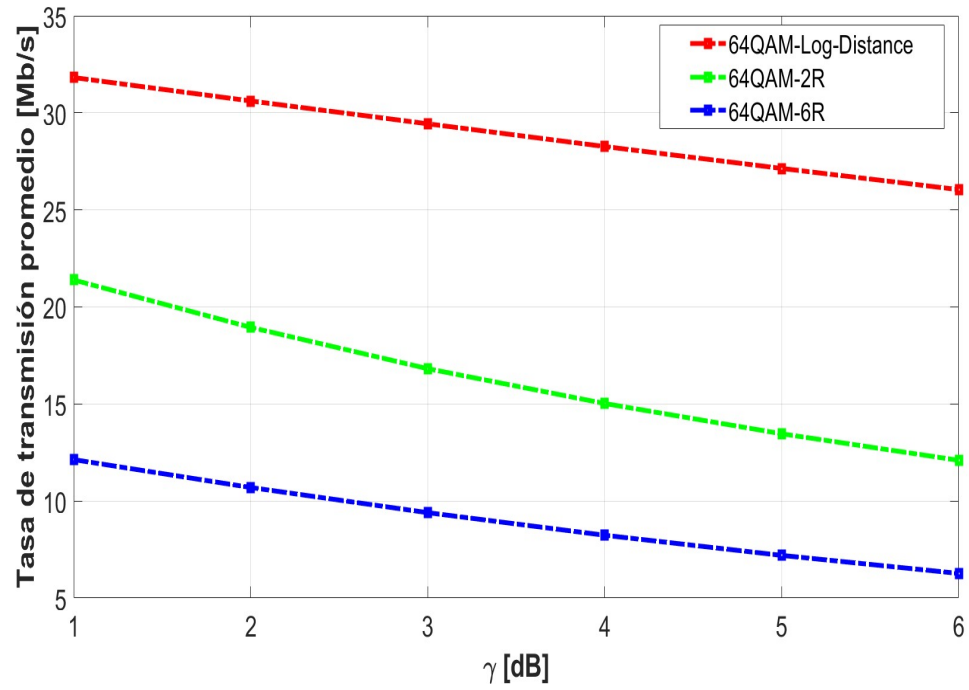


Figura 4.13: Tasa de transmisión para modulación 64QAM a 5.9 GHz para comunicación V2V con ancho de banda = 10 MHz

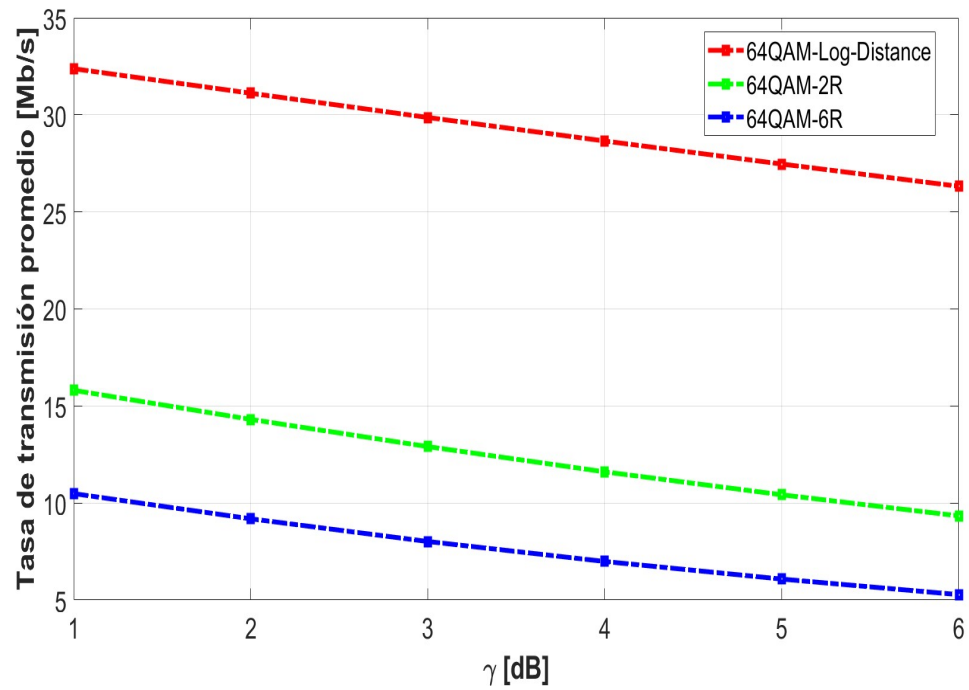


Figura 4.14: Tasa de transmisión para modulación 64QAM a 28 GHz para comunicación V2V con ancho de banda = 10 MHz

Ante esta problemática debido a la poca saturación de usuarios, se recomienda el incremento de ancho de banda para estas regiones frecuenciales de operación. En la figura 4.15 se muestra la frecuencia de 28 GHz para V2V con ancho de banda de 100 MHz.

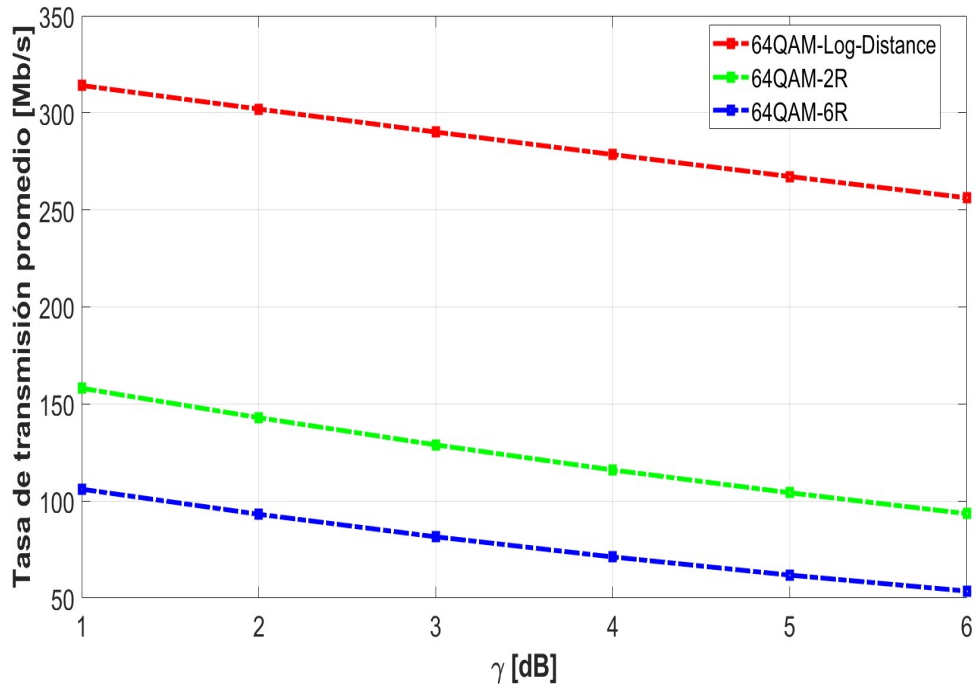


Figura 4.15: Tasa de transmisión para modulación 64QAM a 28 GHz para comunicación V2V con ancho de banda = 100 MHz

En la figura 4.16 se muestran los resultados del throughput cuando $\gamma = 6$ para los dos tipos de comunicación a diferentes frecuencias con el mismo ancho de banda. Como se observa, la comunicación V2V y V2I son muy parecidas para 5.9 y 28 GHz, lo que ocurre porque el cambio de frecuencia no impacta en el modelo. Lo contrario sucede con los modelos de 2 Rayos y 6 Rayos.

Por otra parte, en el esquema V2V el throughput es mayor que en V2I, ya que el transmisor en V2I estará más lejos que en V2V y, por lo tanto, tendrá una SIR más baja. También se aprecia un decremento en el throughput al incrementar la frecuencia, como era de esperarse.

Comunicación	Frecuencia	Modulación	$\gamma = 6$		
			Log-Distance	2 Rayos	6 Rayos
V2V	5.9 GHz	QPSK	10 Mb/s	7 Mb/s	4 Mb/s
		16QAM	19 Mb/s	10 Mb/s	5 Mb/s
		64QAM	26 Mb/s	12 Mb/s	6 Mb/s
	28 GHz	QPSK	11 Mb/s	5 Mb/s	3 Mb/s
		16QAM	19 Mb/s	8 Mb/s	4 Mb/s
		64QAM	26 Mb/s	9 Mb/s	5 Mb/s
V2I	5.9 GHz	QPSK	11 Mb/s	5 Mb/s	4 Mb/s
		16QAM	23 Mb/s	7 Mb/s	5 Mb/s
		64QAM	33 Mb/s	10 Mb/s	9 Mb/s
	28 GHz	QPSK	11 Mb/s	5 Mb/s	2 Mb/s
		16QAM	23 Mb/s	6 Mb/s	4 Mb/s
		64QAM	33 Mb/s	9 Mb/s	4 Mb/s

Figura 4.16: Comparación de la tasa de transmisión promedio para V2V y V2I con el mismo ancho de banda = 10 MHz y diferente frecuencia.

4.1. Validación de resultados

Como uno de los objetivos específicos consiste en la validación de los resultados obtenidos en las simulaciones comparándolos con lo reportado en la literaturase colocó como artículo de referencia para los modelos de N-Rayos el trabajo del Dr. Mauricio Rodríguez (Senior Member, IEEE) [47].

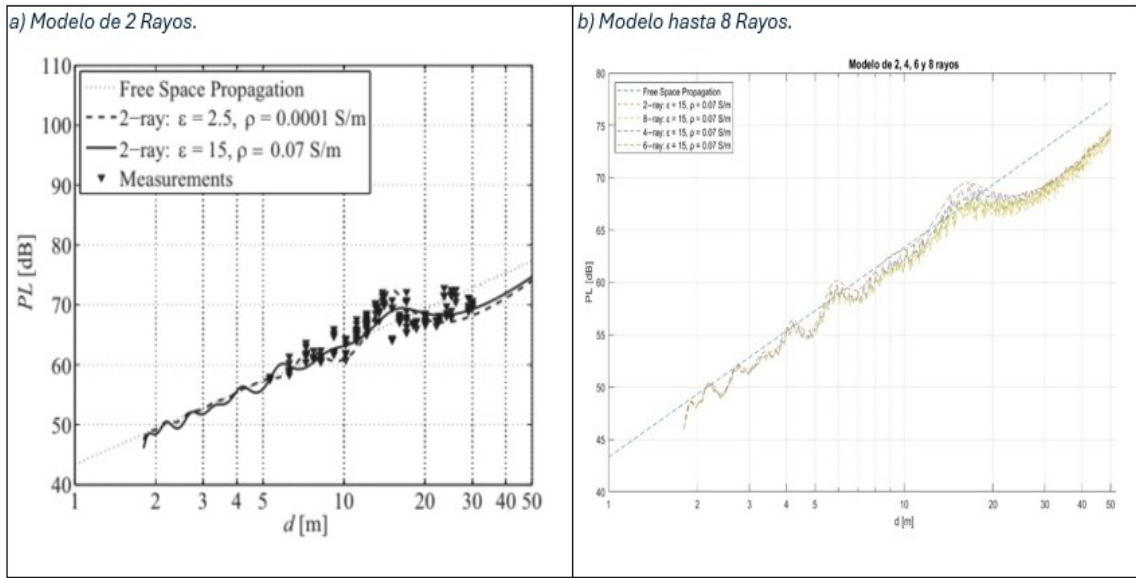


Figura 4.17: Validación del modelo de 2 Rayos con el artículo titulado: "Wireless Access Channels with Near-Ground Level Antennas" [47].

Adicionalmente, los modelos matemáticos fueron evaluados para casos límite: el cual consiste en alejar los muros en donde las señales son reflejadas y aumentar las alturas de las antenas transmisoras y receptoras hasta converger a Friis.

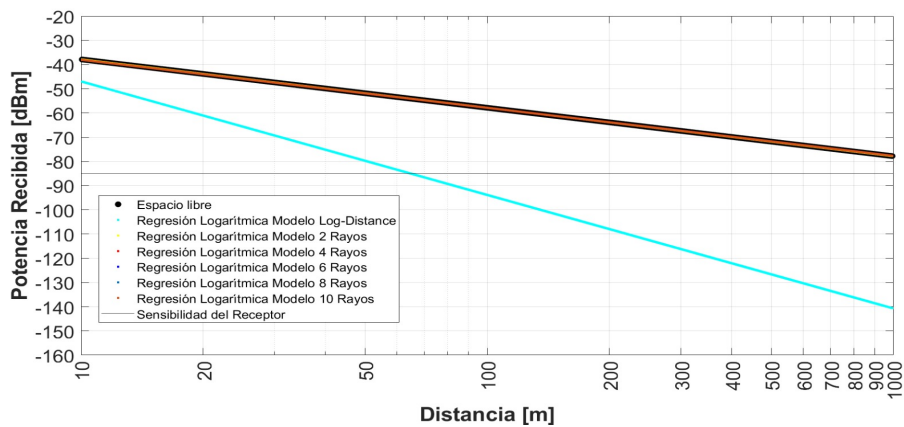


Figura 4.18: Validación de los modelos de N-Rayos con el modelo de Friis.

En la figura comparativa se observa que la tendencia y las tasas de datos se apro-

ximan para los distintos valores de gamma, no son iguales debido a las condiciones de aleatoriedad. Sin embargo, en ambos casos se cumple con el estándar IEEE 802.11p [48].

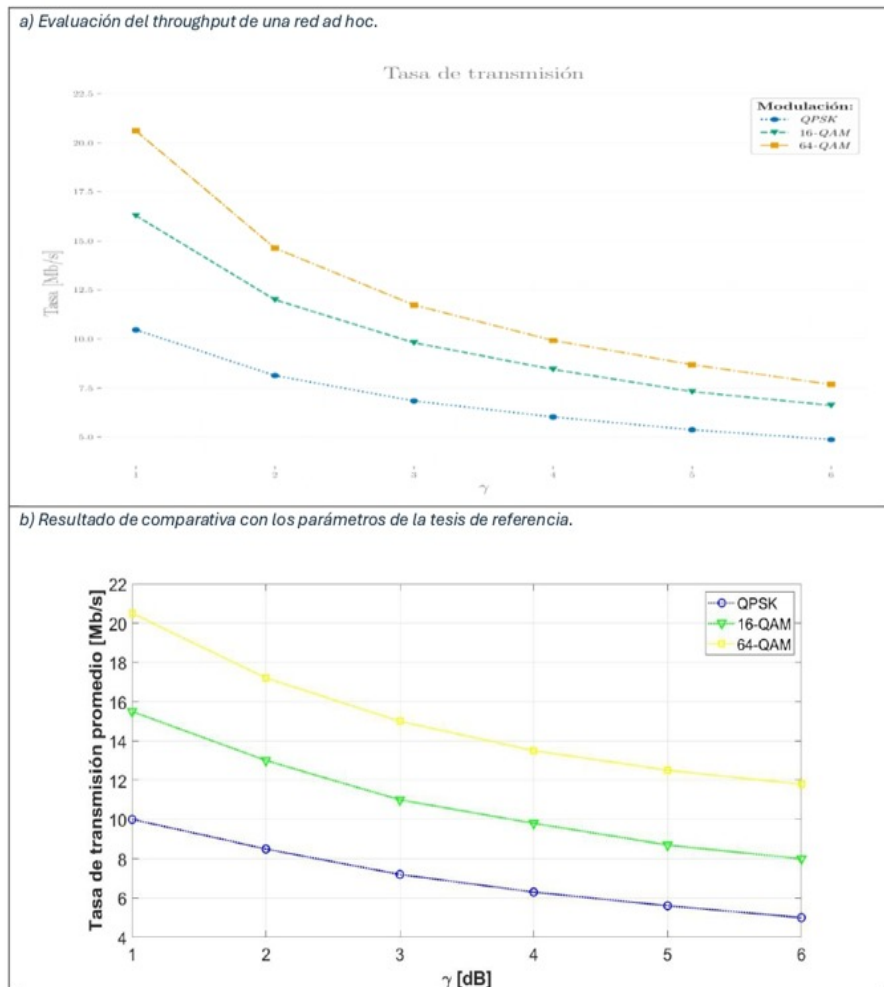


Figura 4.19: Validación del throughput.

Capítulo 5

Conclusiones

- En este trabajo se evaluó el desempeño de una red *ad hoc* a través de una simulación Monte Carlo de eventos discretos en distintas bandas frecuenciales, encontrando que, a mayor frecuencia, el throughput disminuye.
- En el esquema V2I, las pérdidas por distancia enmascaran otros fenómenos de propagación, por lo que el throughput supera al generado por los modelos de N-rayos.
- En la evaluación del desempeño, conforme se incrementa el número de rayos, los resultados se aproximan a los generados a través del modelo de Friis, especialmente a mayores frecuencias.
- En OFDMA, se observa que el incremento en la dimensionalidad de la modulación repercute directamente en un aumento en la tasa de bit, con el correspondiente incremento en la susceptibilidad al error.
- El marco de referencia son las pérdidas generadas por el modelo de Friis, el cual siempre arroja resultados que están por encima de la sensibilidad del sistema. los modelos de 2 Rayos y N-rayos se aproximan sustancialmente al Friis, a diferencia de los resultados arrojados por el modelo Log-Distance, que además no varía cuando la banda de frecuencia cambia.
- Aunque el modelo Log-Distance ha sido ampliamente utilizado en las últimas dos décadas, los requerimientos de los nuevos sistemas en relación con la banda de frecuencia operacional lo dejan en desventaja frente al modelo de Friis y al modelo de N-rayos.

Bibliografía

- [1] M. A. Al-shareeda, M. A. Alazzawi, M. Anbar, S. Manickam and A. K. Al-Ani, “A Comprehensive Survey on Vehicular Ad Hoc Networks (VANETs),” 2021 International Conference on Advanced Computer Applications (ACA), Maysan, Iraq, 2021, pp. 156-160.
- [2] V. Petrov, J. Kokkonen, D. Moltchanov, J. Lehtomäki, M. Juntti and Y. Koucheryavy, “The Impact of Interference From the Side Lanes on mmWave/THz Band V2V Communication Systems With Directional Antennas,” in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 67, no. 6, pp. 5028-5041, June 2018.
- [3] Juan Carlos Villegas Hernández, “Implementación de una plataforma de simulación para redes oportunistas 5G,” M.S. tesis, Depto. Ciencias de la Electrónica, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México, 2021.
- [4] Y. Yoon, J. Kim and D. S. Han, “Analysis of V2V Communication Performance on Roads and Tunnels Surrounded by Mountains,” 2022 Thirteenth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN), Barcelona, Spain, 2022, pp. 1-4.
- [5] Noory, “Wireless channel optimization in VANET by using adaptive modulation,” 2012 12th International Conference on ITS Telecommunications, Taipei, Taiwan, 2012, pp. 295-299.
- [6] C.-C. Josefina, M.-A. Gerardo, C. Liliana, G.-A. J. E. Moisés, G.-C. J. Fermi, and M. H. G. Ardul, “Montecarlo simulation applied to measurement of the impact of the smart antenna technology in digital cellular systems,” *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, vol. 16, no. 2, pp. 207–212, 2015. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1405774315000062>.

- [7] W. A. Altabey, M. Noori, A. Silik, M. Domaneschi, and W. Hong, Modeling and Simulation of Intelligent Transportation Systems. CRC Press, Taylor Francis Group.
- [8] K. Ito, G. Hirakawa, Y. Arai and Y. Shibata, ".^A Road Alert Information Sharing System with Multiple Vehicles Using Vehicle-to-Vehicle Communication Considering Various Communication Network Environment," 2015 18th International Conference on Network-Based Information Systems, Taipei, Taiwan, 2015, pp. 365-370.
- [9] M. Wang et al., ".^A asymptotic Throughput Capacity Analysis of VANETs Exploiting Mobility Diversity," in IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 64, no. 9, pp. 4187-4202, Sept. 2015.
- [10] S. Benkirane and M. Benaziz, "Performance Evaluation of IEEE 802.11p and IEEE 802.16e for Vehicular Ad Hoc Networks Using Simulation Tools," 2018 IEEE 5th International Congress on Information Science and Technology (CiSt), Marrakech, Morocco, 2018, pp. 573-577.
- [11] K. Ito, G. Hirakawa, Y. Arai and Y. Shibata, ".^A Road Alert Information Sharing System with Multiple Vehicles Using Vehicle-to-Vehicle Communication Considering Various Communication Network Environment," 2015 18th International Conference on Network-Based Information Systems, Taipei, Taiwan, 2015, pp. 365-370.
- [12] T. Zugno, M. Drago, M. Giordani, M. Polese and M. Zorzi, "Toward Standardization of Millimeter-Wave Vehicle-to-Vehicle Networks: Open Challenges and Performance Evaluation," in IEEE Communications Magazine, vol. 58, no. 9, pp. 79-85, September 2020.
- [13] C. Christopher and R. M. Noory, "Wireless channel optimization in VANET by using adaptive modulation," 2012 12th International Conference on ITS Telecommunications, Taipei, Taiwan, 2012, pp. 295-299.
- [14] F. Aghaei, M. Uysal, R. C. De Lamare and L. T. N. Landau, "Vehicular MMW Communication: Channel Characterization Based on Ray Tracing Study," 2024 19th International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS), Rio de Janeiro, Brazil, 2024, pp. 1-6.

- [15] C. F. Mecklenbrauker et al., "Vehicular Channel Characterization and Its Implications for Wireless System Design and Performance," in *Proceedings of the IEEE*, vol. 99, no. 7, pp. 1189-1212, July 2011.
- [16] N. Sangsuwan and S. Poochaya, "The Study of Path Loss and Shadowing Effect in V2V Communication Link using 5G Communication Technology," 2021 9th International Electrical Engineering Congress (iEECON), Pattaya, Thailand, 2021, pp. 257-260.
- [17] T. Kitamura, S. Koyama, G. Kobayashi and K. Ohno, "Channel Analysis and Performance Evaluation for Inter-Vehicle Communication in 700 MHz Band at Intersection with Low Visibility," 2018 16th International Conference on Intelligent Transportation Systems Telecommunications (ITST), Lisboa, Portugal, 2018, pp. 1-6.
- [18] N. I. Ramli, S. Shawal, M. F. Ibrahim and M. I. M. Rawi, "Network Performance Analysis of Content Delivery for V2R Communication in VANET Urban Mobility," 2021 IEEE International Conference on Computing (ICOCO), Kuala Lumpur, Malaysia, 2021, pp. 129-133.
- [19] F. Zeng, C. Li and H. Wang, "Performance Evaluation of Different Fading Channels in Vehicular Ad Hoc Networks," 2018 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC), Jeju, Korea (South), 2018, pp. 356-361.
- [20] N. I. Ramli, M. A. A. Dahalan, M. F. Ibrahim and M. I. M. Rawi, "A Small-Scaled Performance Analysis of V2V and V2R Communication in VANET," 2021 IEEE 15th Malaysia International Conference on Communication (MICC), Malaysia, 2021, pp. 114-119.
- [21] V. Kolici, T. Oda, E. Spaho, L. Barolli, M. Ikeda and K. Uchida, "Performance Evaluation of a VANET Simulation System Using NS-3 and SUMO," 2015 IEEE 29th International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops, Gwangju, Korea (South), 2015, pp. 348-353.
- [22] A. Paier, J. Karedal, N. Czink, C. Dumard, T. Zemen, F. Tufvesson, A. F. Molisch, y C. F. Mecklenbräuker, "Characterization of Vehicle-to-Vehicle Radio Channels from Measurements at 5.2 GHz," *Wireless Personal Communications*, vol. 50, pp. 19-32, 2009.

- [23] S. Bastani, D. T. Ozalla and M. Karaca, "On the performance of vehicular communications with a measurement-based radio propagation model," 2016 IEEE 21st International Workshop on Computer Aided Modelling and Design of Communication Links and Networks (CAMAD), Toronto, ON, Canada, 2016, pp. 6-11.
- [24] W. Wiesbeck and S. Knorz, "Characteristics of the Mobile Channel for High Velocities," 2007 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications, Turin, Italy, 2007, pp. 116-120.
- [25] O. Sassi, P. Hervé and B. Willmann, "Calculation approach of signal to interference and packet error rate estimation: Application to Automotive Scenarios," 2019 IEEE 19th Mediterranean Microwave Symposium (MMS), Hammamet, Tunisia, 2019, pp. 1-4.
- [26] O. Pattnaik y B. K. Pattanayak, "Performance Analysis of MANET and VANET based on Throughput Parameter," International Journal of Applied Engineering Research, vol. 12, no. 18, pp. 7435–7441, 2017.
- [27] A. Jafari, S. Al-Khayatt and A. Dogman, "Performance evaluation of IEEE 802.11p for vehicular communication networks," 2012 8th International Symposium on Communication Systems, Networks Digital Signal Processing (CSNDSP), Poznan, Poland, 2012, pp. 1-5.
- [28] S. Sun, T. S. Rappaport, M. Shafi, P. Tang, J. Zhang and P. J. Smith, "Propagation Models and Performance Evaluation for 5G Millimeter-Wave Bands," in IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 67, no. 9, pp. 8422-8439, Sept. 2018.
- [29] M. Rjab, A. Omri, S. Bouallegue, H. Chamkhia, y R. Bouallegue, "Modeling and Performance Analysis of mmWave and WiFi-Based Vehicle Communications," Electronics, vol. 13, no. 7, p. 1344, Apr. 2024.
- [30] Mohamed Nidhal Mejri, Jalel Ben-Othman, Mohamed Hamdi, "Survey on VANET security challenges and possible cryptographic solutions," Vehicular Communications, Volume 1, Issue 2, 2014, Pages 53-66, ISSN 2214-2096.
- [31] M. A. Al-shareeda, M. A. Alazzawi, M. Anbar, S. Manickam and A. K. Al-Ani, "A Comprehensive Survey on Vehicular Ad Hoc Networks (VANETs)," 2021 International Conference on Advanced Computer Applications (ACA), Maysan, Iraq, 2021, pp. 156-160.

- [32] Eiman Alotaibi, Biswanath Mukherjee, A survey on routing algorithms for wireless Ad-Hoc and mesh networks, *Computer Networks*, Volume 56, Issue 2, 2012, Pages 940-965, ISSN 1389-1286.
- [33] W. Tomasi, *Sistemas de Comunicaciones Electrónicas*, 4ta ed., traducción de G. Mata Hernández y V. González Pozo, revisión técnica de G. Duchén Sánchez, Ciudad de México, México: Pearson Educación, 2004.
- [34] A. Goldsmith, *Wireless communications*. Cambridge university press, 2005.
- [35] T. S. Rappaport, R. W. Heath Jr, R. C. Daniels, and J. N. Murdock, *Millimeter wave wireless communications*. Pearson Education, 2015.
- [36] S. R. Saunders and A. A. Aragon-Zavala, *Antennas and propagation for wireless communication systems*. John Wiley Sons, 2007.
- [37] A. F. Molisch, *Wireless communications*. John Wiley Sons, 2012, vol. 34.
- [38] 3GPP, Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz (3GPP TR 38.901 version 16.1.0 Release 16), 3rd Generation Partnership Project, Tech. Rep., Dec. 2019. [Online]. Available: <https://www.3gpp.org>.
- [39] W. C. Jakes and D. C. Cox, *Microwave mobile communications*. Wiley-IEEE press, 1994.
- [40] Ing. Boris Cucor, Outlines of Vehicular Ad-Hoc networks, *Transportation Research Procedia*, Volume 55, 2021, Pages 1312-1319, ISSN 2352-1465.
- [41] C. Christopher and R. M. Noory, "Wireless channel optimization in VANET by using adaptive modulation," 2012 12th International Conference on ITS Telecommunications, Taipei, Taiwan, 2012, pp. 295-299.
- [42] G. Parsaee and A. Yarali, OFDMA for the 4th Generation Cellular Networks, vol. 4, Jun. 2004, pp. 2325–2330.
- [43] R. Prasad and F. Velez, *WiMAX networks*. Techno-economic vision and challenges, 01 2010.
- [44] S. C. Yang, *OFDMA System Analysis and Design*, 1st ed. Norwood, MA, USA: Artech House, Inc., 2010.

- [45] P. B. E. Prabhakar and K. T. Sikamani, "Efficient exclusive opportunistic routing for vastly dynamic mobile ad hoc networks," in 2013 International Conference on Current Trends in Engineering and Technology (ICCTET), July 2013, pp. 157–160.
- [46] 3GPP, "5G; NR; User Equipment (UE) radio transmission and reception; Part 2: Range 2 Standalone (3GPP TS 38.101-2 version 15.12.0 Release 15)," 3rd Generation Partnership Project (3GPP), Technical Specification, Dec. 2020.
- [47] M. Rodriguez, R. Feick, H. Carrasco, R. Valenzuela, M. Derpich and L. Ahumada, "Wireless Access Channels with Near-Ground Level Antennas," in IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 11, no. 6, pp. 2204-2211, June 2012
- [48] Arena, F.; Pau, G.; Severino, A. A Review on IEEE 802.11p for Intelligent Transportation Systems. J. Sens. Actuator Netw. 2020, 9, 22. <https://doi.org/10.3390/jsan9020022>

Anexo 1

5.1. Publicación Uno

En esta sección se presenta el artículo publicado para: International Journal of Combinatorial Optimization Problems and Informatics

5.2. Publicación Dos



www.editada.org

*International Journal of Combinatorial Optimization Problems and Informatics, 15(5), Dec 2024, 64-74. ISSN: 2007-1558.
<https://doi.org/10.61467/2007.1558.2024.v15i5.558>*

VANET Network Simulation for Greenhouse Monitoring Utilizing Two Mobile Differential Robot Nodes

Fernando Avendaño Macías¹, Steven Gersain Pérez Cortes¹, Elias Christopher García Herrera¹, Josefina Castañeda Camacho¹, José Eligio Moisés Gutiérrez Arias¹, Gabriela Pérez Osorio², Mauricio Rodríguez³.

¹ Facultad de Ciencias de la Electrónica de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, 18 Sur y Avenida San Claudio S/N, San Manuel, Puebla, México

² Facultad de Ingeniería Química de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, 18 Sur y Avenida San Claudio S/N, San Manuel, Puebla, México

³ Pontificia Universidad Católica de Valparaíso

elias.garciaher@alumno.buap.mx, josefina.castaneda@correo.buap.mx, jose.gutierrez@correo.buap.mx, gabriela.perez@correo.buap.mx, Mauricio.rodriguez.g@pucv.cl

Abstract. Monitoring the greenhouse environment is crucial for regulating physical variables such as temperature, humidity, CO₂ concentration and luminosity. VANET (Vehicular Ad-hoc Network) represents a particular case of multi-hop wireless network, characterized by rapid topology changes due to the high mobility of nodes. With an increasing number of vehicles equipped with computer technologies and wireless communication devices, vehicular communication emerges as a promising domain for research, standardization, and development. In the forthcoming era, VANET is positioned to become an integral part of smart cities, offering diverse applications. This article presents the outcomes of simulating a VANET network comprising two mobile nodes within a greenhouse, alongside the design and Lyapunov analysis of mobile node control within that network.

Keywords: Vanet Network, Mobile Node, Lyapunov Analysis, Differential Robot and Wireless Sensor Network.

Article Info
Received May 10, 2024.
Accepted Nov 20, 2024.

Figura 5.1: Artículo Publicado.

3D Performance Evaluation of LORA System

Fernando Avendaño¹, Daniel Hernández¹, Josefina Castaneda Camacho¹, Mauricio Rodríguez²,
Ignacio Zaldivar¹.

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Puebla, México

{fernando.avendano@alumno.buap.mx, daniel.hernandezrodriguez@vlep.com.mx,
josefina.castaneda@correo.buap.mx, mauricio.rodriguez.g@pucv.cl, zaldivar@inaoep.mx}

<http://www.buap.mx>

Abstract. *Low Power Wide Area Networks (LPWAN) have experienced exponential growth from 2017 to 2024, with the market size increasing by 109%. This growth is attributed to features such as 40-kilometer coverage and low power consumption, allowing batteries to last up to 10 years. Due to these advantages, several companies are developing standards for this technology, with the most widely used being SigFox, LoRaWAN, and NB-IoT. This paper presents a performance evaluation of LoRaWAN communication in a 3D environment. By considering shadowing effects, propagation losses using the Okumura-Hata, Log-Distance, and N-Rays models, along with Chirp Spread Spectrum modulation, this study evaluates the mean coverage, SIR, and throughput.*

Keywords: *LoRaWAN, CSS, LPWAN, 5G, IoT*

I. Introduction

The range of LPWAN network applications is extensive, encompassing sectors such as agriculture and forestry, building and infrastructure, healthcare, home and consumer products, industry, retail, smart cities, transportation, supply chain and logistics, roads and highways, and utilities [1]. The three most commonly used LPWAN technologies are LoRaWAN, NB-IoT, and SigFox, with the choice of technology depending on the specific application and its requirements.

Most of the published LoRaWAN designs are used for the implementation of monitoring systems

because their data rate ranges from 300 bps to 37.5 kbps, which is low compared to other technologies such as WiFi or cellular networks. This limitation restricts their use to applications that do not require the transmission of images or videos. This is the primary reason why LoRaWAN is utilized for monitoring sensors in specific applications, such as an air quality monitoring system [2] or the design of a river water monitoring robot [3].

One of the problems with LoRaWAN is that its performance tends to be suboptimal when used with mobile devices in Internet of Things (IoT) implementations[4]. If mobile users are needed as in "Experiments of Tracking Platforms" the technology used is SigFox as in paper [5], nevertheless LoRaWAN is an important technology with a great reliability in IoT applications which requires low power consumption and long range deployment [6], and even is used in Fifth Generation (5G) networks [7]. In some implementations, a design solution could involve integrating different network architectures to improve performance, such as SigFox and LoRaWAN to obtain better results [8] as in Real-Time Monitoring in Power Distribution Grids [9]. The importance of LPWAN networks is increasing every year, from 2017 to 2024 its market size has grown by 109%, so it is normal that lots of works are going in LPWAN technologies area [10].

This paper focuses on the analysis of LoRaWAN due to its potential to serve millions of devices within a single cell, transmitting only a few bytes of data per day. Additionally, it provides an effective solution for achieving wide coverage and

Figura 5.2: Artículo en revisión.