

UCLV
Universidad Central
"Marta Abreu" de Las Villas



FIE
Facultad de
Ingeniería Eléctrica

Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones

TRABAJO DE DIPLOMA

“Impacto de las características de diferentes modelos de antenas en el
rendimiento de las Redes *Ad-hoc* Vehiculares”

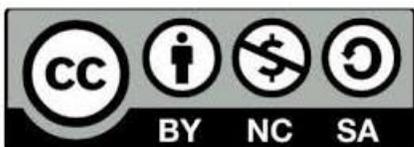
Autor del trabajo: Mario Annier González Pérez

Tutor del trabajo: Dr. C. Erik Ortiz Guerra

Este documento es Propiedad Patrimonial de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, y se encuentra depositado en los fondos de la Biblioteca Universitaria “Chiqui Gómez Lubian” subordinada a la Dirección de Información Científico Técnica de la mencionada casa de altos estudios.

Se autoriza su utilización bajo la licencia siguiente:

Atribución- No Comercial- Compartir Igual



Para cualquier información contacte con:

Dirección de Información Científico Técnica. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. Carretera a Camajuaní. Km 5½. Santa Clara. Villa Clara. Cuba. CP. 54 830

Teléfonos.: +53 01 42281503-1419

DEDICATORIA

*A mis padres por darme la vida y además entregarme la suya
cada día.*

AGRADECIMIENTOS

A Dios por darme el espíritu y las ganas de ser cada día mejor.

A mi familia por todo su amor y apoyo incondicional.

*A mi novia Giselle Avila Pérez por ser mi calma, mi fuerza y mi
corazón.*

*A mis suegros y su familia por acogerme como un hijo y ayudarme con
sabios consejos.*

*A mi tutor Dr. Erik Ortiz Guerra por su guía certera y por ser un
ejemplo de persona para mí.*

*A mis amigos del grupo por dedicarme su tiempo y compartir sus
conocimientos.*

TAREA TÉCNICA

1. Revisión bibliográfica sobre el tema redes *Ad-hoc* vehiculares haciendo énfasis en el protocolo IEEE 802.11p definido para la capa MAC y PHY de las.
2. Descripción de las principales características de los modelos de antenas utilizados en los dispositivos VANETs.
3. Definición de las métricas de desempeño y cooperativas que permitan medir el rendimiento de una red *Ad-hoc* vehicular.
4. Evaluación a través de experimentos del impacto provocado por la variación de las características de las antenas en las métricas de una red *Ad-hoc* vehicular.
5. Confección del informe.

Firma del Autor

Firma del Tutor

LISTA DE ACRÓNIMOS

ACC, Adaptive Cruise Control
ACs, Access Categories
AIFS, Arbitration Interframe Space
AU, Application Unit
BPSK, Binary Phase Shift Keying
BSS, Basic Service Set
C2C-CC, Car-to-Car Communication Consortium
CAMs, Cooperative Awareness Messages
CCH, Control Channel
CSMA/CA, Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
CW, Contention Window
DCF, Distributed Coordination Function
DIFS, Distributed Interframe Spaces
DSRC, Dedicated Short Range Communications
EDCA, Enhanced Distributed Channel Access
ETSI, European Telecommunications Standards Institute
FCC, Federal Communications Commission
GB, Guard Band
GPRS, General Packet Radio Service
GSM, Global System for Mobile Communications
GUI, Graphical User Interface
HSDPA, High Speed Downlink Packet Access
HCF, Hybrid Coordination Function
I2V, Infrastructure-to-Vehicle
IBSS, Independent Basic Service Set
IDE, Integrated Development Environment
IEEE, Institute of Electrical and Electronics Engineers
IFS, Interframe Spaces
IP, Internet Protocol
ITS, Intelligent Transportation Systems
LDM, Local Dynamic Map
MAC, Medium Access Control
MANETs, Mobile Ad-hoc Networks
MLME, MAC Layer Management Entity

MOVE, MObility model generator for VEhicular networks
OBU, On-Board Unit
OCB, Outside the Context of a Basic Service Set
OMNeT++, Objective Modular Network Testbed in C++
OFDM, Orthogonal Frequency–Division Multiplexing
PCB, Printed Circuit Board
PDA, Personal Digital Assistant
PDU MAC, Protocol Data Unit MAC
PHY, Physical Layer
PLCP, Physical Layer Convergence Procedure
PMD, Physical Medium Dependent
QAM, Quadrature Amplitude Modulation
QoS, Quality of Service
RL, Return Loss
RSU, Road-Side Unit
SCH, Service Channel
SIFS, Short Interframe Spaces
SNIR, Signal to Noise + Interference Ratio
SUMO, Simulation of Urban MObility
UMTS, Universal Mobile Telecommunications System
VANETs, Vehicular Ad-hoc Networks
Veins, Vehicles in Network Simulation
V2I, Vehicle-to-Infrastructure
V2V, Vehicle-to-Vehicle
WAVE, Wireless Access in Vehicular Environments
WiMAX, Worldwide Interoperability for Microwave Access
Wi-Fi, Wireless Fidelity

RESUMEN

Las redes VANETs forman parte del conjunto de tecnologías que utilizan la comunicación inalámbrica para el intercambio de información. Las antenas son parte esencial de todo sistema inalámbrico. En esta tesis se propone realizar un análisis de la influencia de la variación de las principales características de dos modelos de antenas utilizadas en las comunicaciones vehiculares. Se analiza el rendimiento del sistema en tres escenarios diferentes basados en tres métricas de desempeño y dos métricas cooperativas. En el escenario urbano el aumento de la temperatura de ruido de la antena degrada la razón de recepción exitosa de paquetes y el *throughput*. Una antena como la monopolo con poca ganancia, pero con distribución homogénea se desempeña de manera eficaz en este ambiente. En el escenario de autopista se necesita disminuir la temperatura de ruido de la antena y aumentar la ganancia en la parte delantera y trasera del vehículo para mejorar la eficiencia de las comunicaciones. El entorno rural está caracterizado por la baja densidad de nodos por lo que el aumento de la altura de los vehículos o la disminución de las pérdidas de retorno pueden ayudar a una comunicación más confiable y con un flujo de información más alto.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1. Redes <i>Ad-hoc</i> Vehiculares (VANETs)	5
1.1 Definición	5
1.2 Características.....	7
1.3 Aplicaciones.....	9
1.3.1 Orientadas a la Seguridad.....	9
1.3.2 No orientadas a la Seguridad.....	11
1.4 Estándar 802.11p	12
1.4.1 Capa MAC.....	12
1.4.2 Capa PHY.....	15
1.5 Conclusiones parciales.....	18
CAPÍTULO 2. Modelos de antenas y métricas utilizadas	19
2.1 Características de las antenas.....	19
2.1.1 Antena Monopolo.....	19
2.1.2 Antena Parche.....	22
2.2 Métricas de desempeño.....	25
2.3 Métricas cooperativas	25
2.3.1 Error de posición promedio real	26
2.3.2 Número de terminales ocultos interferentes	28
2.4 Conclusiones Parciales	32
CAPÍTULO 3. Evaluación del desempeño de los modelos de antenas	33

3.1 Herramientas de Simulación.....	33
3.2 Escenarios y parámetros de simulación	35
3.2.1 Escenario urbano	37
3.2.2 Escenario de autopista	38
3.2.3 Escenario rural.....	39
3.3 Resultados y discusión.....	40
3.3.1 Entorno urbano	40
3.3.2 Entorno de autopista.....	43
3.3.3 Entorno rural.....	46
3.4 Conclusiones parciales.....	49
CONCLUSIONES	51
RECOMENDACIONES.....	53
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54
ANEXOS	59
Anexo I. Función que calcula el número de terminales ocultos	59
Anexo II. Modificaciones a la capa PHY	60
Anexo III. Función que calcula el EPPReal	60
Anexo IV. Función que calcula el ángulo entre los vehículos.....	61
Anexo V. Función que calcula la velocidad relativa entre dos nodos	62

INTRODUCCIÓN

El avance de la industria automotriz ha dado lugar al aumento del número de vehículos y conductores por todo el mundo. Este auge también trae consigo un incremento considerable en el número de muertes debido a accidentes automovilísticos y por consiguiente la elevación de costos en términos de víctimas y de seguridad. Sistemas de protección como bolsas de aire (*airbag*), cinturones de seguridad (*security belt*) y sistemas de frenos anti-bloqueo (*anti-lock braking systems*) ayudan tanto a conductores como a pasajeros en condiciones críticas a mitigar el accidente [1]. Sin embargo, no pueden erradicar los incidentes completamente. El principal inconveniente de las soluciones propuestas es que constituyen métodos que se orientan hacia el efecto en lugar de concentrarse en la causa: el accidente en sí [2]. La principal solución para la prevención de accidentes a través de una perspectiva previsiva consiste en ampliar el conocimiento del conductor sobre el entorno vehicular [3].

La comunicación vehicular se presenta como una tecnología clave para mejorar la seguridad vial y la eficiencia de tráfico a través de los Sistemas de Transporte Inteligente (*ITS, Intelligent Transportation Systems*) [4]. Los ITS conforman un conjunto de soluciones tecnológicas basadas en la información y las telecomunicaciones diseñadas para mejorar la operatividad y la seguridad del transporte terrestre. Esto acarrea un gran impacto social dada su gran aplicabilidad en la prevención de accidentes, congestiones en zonas urbanas, mejora ambiental, etc. [5], [6]. Para su despliegue los vehículos se equipan con tecnologías de comunicación inalámbrica, actuando como nodos intermedios en una comunicación multisalto, esto se conoce como Red *Ad-hoc* Vehicular (VANET).

Una red VANET se encuentra compuesta por un conjunto de nodos que se comunican entre sí mediante interfaces inalámbricas y con ayuda de un sistema de posicionamiento [7]. En este entorno pueden estar involucradas dos entidades diferentes, los vehículos y las infraestructuras de comunicaciones. Los vehículos van equipados con una Unidad de Comunicaciones a Bordo (*OBU, On-Board Unit*) y una Unidad de Aplicación (*AU*,

Application Unit); por su parte, la infraestructura de comunicaciones puede formarse por Unidad al Borde de la Vía (*RSU, Road-Side Unit*), la cual es un dispositivo ubicado en posiciones fijas a lo largo de puntos importantes en las vías [8], [9]. Estos equipos trabajan en la banda del espectro de 5.9 GHz [10], designada para las Comunicaciones Dedicadas de Corto Alcance (*DSRC, Dedicated Short Range Communications*) [11] y regidas bajo el conjunto de protocolos para el Acceso Inalámbrico en Entornos Vehiculares (*WAVE, Wireless Access in Vehicular Environments*) [12].

El estándar 802.11p [13] es el estándar definido para el control de acceso al medio (*MAC, Medium Access Control*) y la capa física (*PHY, Physical Layer*) en el conjunto de protocolos WAVE, dirigido a proveer comunicaciones robustas y de baja latencia en entornos vehiculares de alta movilidad y gran dinamismo en la topología de red.

Una gran relevancia en el desempeño de la capa física del estándar 802.11p recae sobre la antena ya que está ligada a aspectos como rango de transmisión, potencia de señal transmitida y recibida, interferencia, relación señal a ruido, etc. Esto estimula a su estudio por parte de la comunidad científica [7], [14].

En 1985, *Jesch* [15] presentó varias mediciones y encontró que no sólo la antena en sí, sino también su posición en el auto y la existencia de sirenas y luces en el techo pueden tener efectos significativos en el patrón de radiación de la antena. Esto provoca afectaciones en la potencia recibida por parte del nodo receptor. Del mismo modo, en *Reichardt et al.* [16] se investigaron los efectos de las diferentes ubicaciones de la antena dentro del auto en la comunicación VANETs. Los autores concluyen que una colocación de la antena en algunos lugares es más ventajosa que en otros. *Karedal et al.* [17] mostró en mediciones de situaciones reales que no sólo el patrón de la antena, sino también la disposición de las intersecciones en el entorno tiene un impacto significativo en el nivel de potencia de recepción. También realizó hincapié en la necesidad de modelos de simulación más realistas para poder llevar a cabo mejores diseños.

Hasta la fecha no se han realizado estudios profundos del impacto del modelo de antena y de sus características en las métricas de desempeño y cooperativas de las redes *Ad-hoc* vehiculares para diferentes escenarios.

Por esa razón se plantea el problema científico:

¿Cuáles características de las antenas influyen en el rendimiento de las redes *Ad-hoc* vehiculares para un escenario en específico?

El objetivo general del presente trabajo es:

Analizar el impacto de las principales características de diferentes modelos de antenas en el rendimiento de las redes *Ad-hoc* vehiculares.

Para dar cumplimiento al objetivo general fueron trazados los siguientes objetivos específicos:

- Caracterizar el protocolo IEEE 802.11p definido para la capa MAC y PHY de las redes *Ad-hoc* vehiculares.
- Describir las principales características de los modelos de antenas utilizados en los dispositivos VANETs.
- Definir métricas de desempeño y cooperativas que permitan medir el rendimiento de una red *Ad-hoc* vehicular.
- Evaluar a través de experimentos el impacto provocado por la variación de las características de las antenas en las métricas de una red *Ad-hoc* vehicular.

Interrogantes Científicas

- ¿Qué características presenta la capa PHY en las redes *Ad-hoc* vehiculares?
- ¿Cuáles son las características principales de los modelos de antenas utilizados en las redes VANETs?
- ¿Qué métricas cooperativas y de desempeño son más importantes en la evaluación de las redes *Ad-hoc* vehiculares?
- ¿Cuáles características de las antenas son más influyentes en el desempeño de las comunicaciones VANETs?
- ¿Qué tipo de antena ofrece más ventajas en una red VANET para un escenario en específico?

El informe de la investigación se estructura en: introducción, capitulario, conclusiones, referencias bibliográficas, bibliografía y anexos.

En el capítulo 1, se abordan aspectos como la definición y las características de las redes *Ad-hoc* vehiculares, incluyendo las principales aplicaciones vehiculares desplegadas y las particularidades del estándar IEEE 802.11p, haciendo énfasis en la capa PHY. En el capítulo 2, se definen las principales características de las antenas que son utilizadas en redes VANETs, al mismo tiempo se realiza un análisis de las métricas empleadas para valorar el desempeño de un sistema de comunicaciones vehiculares. En el capítulo 3, se evalúa mediante la simulación el comportamiento de las métricas seleccionadas, se interpretan los resultados obtenidos y se estudia cómo se comporta cada antena en cada uno de los escenarios planteados. Finalmente, en las conclusiones, son enunciados aquellos elementos de mayor interés y generalización obtenidos a partir de los objetivos, se abordan aspectos que puedan enriquecer y perfeccionar estudios realizados. Mientras que las recomendaciones refieren los tópicos que aún quedan abiertos a líneas futuras de investigación.

CAPÍTULO 1. Redes *Ad-hoc* Vehiculares (VANETs)

1.1 Definición

Las VANETs son redes de comunicaciones que utilizan a los vehículos como nodos, constituyendo así, un caso particular de las redes *Ad-hoc* Móviles (*MANETs*, *Mobile Ad-hoc Networks*) orientadas a entornos vehiculares. Las estaciones en este tipo de red se notifican entre sí mediante dispositivos de comunicación inalámbrica que se ayudan de un sistema de navegación y no necesitan una infraestructura de red fija [7]. En las VANETs, los vehículos pueden actuar como nodos con capacidad de enrutar o como una colección de *hubs* portátiles. Poseen la capacidad de intercambiar datos con el fin de contribuir a aumentar el conocimiento del escenario común, se les puede enmarcar como un sistema vehicular cooperativo. Constituyen un sistema de topología variable que trabaja sin una estación base y sin una organización previamente incorporada. Son definidas como redes confiables en el uso de las comunicaciones en autopistas o condiciones urbanas [18].

Los vehículos pueden conformar la red detenidos o mientras se desplazan, intercambiando información tanto en comunicaciones vehículo a vehículo (*V2V*, *Vehicle-to-Vehicle*) como en vehículo a infraestructura (*V2I*, *Vehicle-to-Infrastructure*) o infraestructura a vehículo (*I2V*, *Infrastructure-to-Vehicle*). También dispositivos fijos próximos a las vías pueden constituir parte de la red y proveer una conexión hacia o desde redes basadas en infraestructura [19]. El objetivo principal de una VANET es proveer seguridad vial y gestión del tráfico, aunque también puede usarse para otros fines de prestación de servicios auxiliares. Tienen un enorme potencial en la mejora de la seguridad en las carreteras, la eficiencia del tráfico y la comodidad tanto para conductores como para pasajeros [20].

Los elementos básicos de la arquitectura de comunicación de los sistemas vehiculares cooperativos fueron definidos por el Consorcio para la Comunicación Vehículo-Vehículo (*C2C-CC*, *Car 2 Car Communication Consortium*) en 2007 [8] y por el Instituto Europeo de Normas de Telecomunicaciones (*ETSI*, *European Telecommunications Standards Institute*) [9] para la Unión Europea en 2008, se pueden observar en la Figura 1.1. El

reporte técnico incluyó: entidades de red, tecnologías de acceso y protocolos de comunicación a nivel de red y transporte. Las principales entidades definidas de esta arquitectura son:

Unidad a bordo (OBU, On-Board Unit): es un dispositivo que permite intercambiar información entre vehículos o con puntos de acceso estacionarios ubicados alrededor de las carreteras. La misma proporciona servicios de comunicación a las AUs y es capaz de reencaminar datos provenientes de otras OBUs que estén en el dominio *Ad-hoc*. Una OBU está equipada con un dispositivo WAVE basado en la tecnología de radio IEEE 802.11p para aplicaciones de seguridad vial. También se puede equipar con otras interfaces de red basadas en otras tecnologías de radio como: IEEE 802.11a/b/g/n y redes celulares (GSM, GPRS, UMTS, HSDPA, WiMAX, 4G), en particular para aplicaciones no relacionadas a la seguridad vial. El funcionamiento de una OBU debe proveer comunicación inalámbrica, control de la congestión de red, seguridad de datos, transferencia confiable de mensajes, encaminamiento *Ad-hoc* geográfico mediante soporte de Protocolos de Internet (*IP, Internet Protocol*) [19], [21].

Unidad de aplicación (AU, Application Unit): es un equipo situado dentro del vehículo que permite ejecutar múltiples aplicaciones proporcionadas por el proveedor, las cuales pueden usar la capacidad de comunicación de la OBU. La AU puede ser utilizado en las aplicaciones de seguridad o como asistentes digitales personales (*PDA, Personal Digital Assistant*) para ejecutar el Internet. Ejemplos de AUs son: a) un dispositivo dedicado para aplicaciones de seguridad vial como avisos de peligro, b) un sistema de navegación con capacidad de comunicación, c) un dispositivo móvil como puede ser PDA. Una AU se puede encontrar empotrada en el vehículo o conectada de forma permanente a una OBU. Otros tipos de unidades de aplicación, como por ejemplo el *Smartphone, Tablet* o PDA de un pasajero, pueden conectarse de forma dinámica a la red interna del vehículo. Múltiples AUs pueden estar conectadas simultáneamente a una OBU, compartiendo el procesamiento y los recursos inalámbricos de la misma [19], [21].

Unidad al borde de la vía (RSU, Road-Side Unit): es un dispositivo ubicado en posiciones fijas a lo largo de carreteras y autopistas, y/o en puntos importantes como estacionamientos, hoteles, gasolineras y restaurantes. La RSU está equipada con un

dispositivo de red para la comunicación inalámbrica de corto alcance basada en la tecnología de radio IEEE 802.11p. Además, puede estar equipada con otros dispositivos de red inalámbricos para permitir la comunicación con una red basada en infraestructura. Las funciones principales de una RSU son: a) proveer aplicaciones de seguridad vial que usan la comunicación I2V, b) proveer a las OBU conectividad a Internet así como enlace con las redes basadas en infraestructura, c) extender el rango de comunicación de la red *Ad-hoc* mediante la redistribución de información hacia las OBU, y d) cooperar con otras RSUs en la distribución de información asociada a la seguridad vial [19], [21].

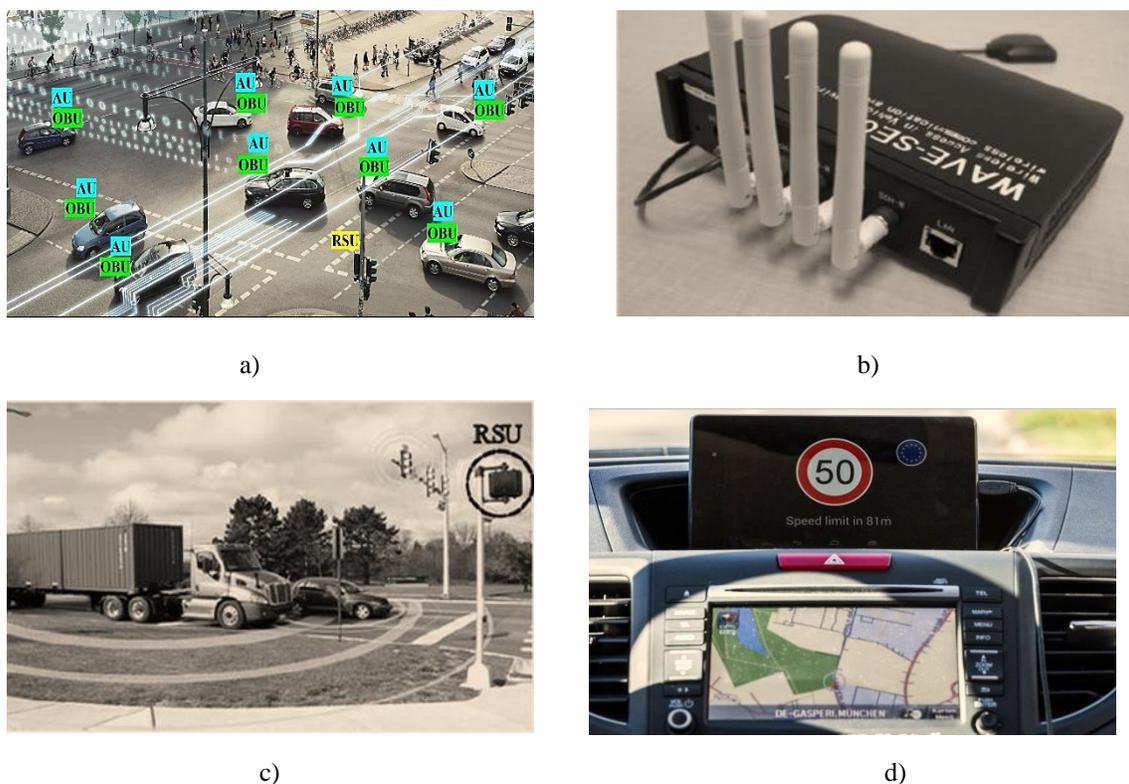


Figura 1.1: Entidades ITS [19] a) Representación de VANET con entidades C2C-CC, b) Prototipo de OBU IEEE 1609/802.11p, c) Prototipo de RSU, d) Prototipos de AUs.

1.2 Características

Las redes *Ad-hoc* vehiculares presentan una caracterización de comparte similitudes con las MANETs, ya que se identifican como un caso particular de estas últimas. A pesar de sus semejanzas se describen a continuación las características distintivas más relevantes de las redes VANETs [7].

Variaciones en la topología de red y gran movilidad de los nodos: Las redes vehiculares poseen un alto dinamismo debido a la velocidad de los nodos y a las características de radiopropagación de la señal de comunicación. Los vehículos pueden desplazarse con una alta velocidad en el orden de los 50 km/h en ambientes urbanos y por encima de los 100 km/h en escenarios de autopista. Los automóviles se desplazan en diferentes direcciones, además de que pueden unirse o dejar de formar parte de la red VANET en un corto período de tiempo, conduciendo a rápidos y frecuentes cambios de topología.

Patrones de movimiento de los nodos y escenario frecuentes: El desplazamiento de los vehículos está limitado por la topología de la carretera. Ellos no se mueven de forma arbitraria, sino que utilizan vías predefinidas. Existen tres tipos principales de escenarios que influyen directamente en el grado de previsibilidad de los movimientos. Las autopistas, las cuales están formadas por una carretera de varios carriles, que cuenta con segmentos muy grandes y salidas bien definidas. Los movimientos de los vehículos son prácticamente en línea recta. Las carreteras rurales, donde la intensidad de tráfico en ocasiones no permite formar una red ya que los vehículos pueden ser muy pocos en un trayecto de la vía. Suelen tener segmentos más grandes, siendo las intersecciones menos frecuentes que en las ciudades. Y las carreteras urbanas, donde existen numerosas carreteras de disímiles tamaños y la densidad en las vías es relativamente alta. La mayoría son frecuentemente interrumpidas por intersecciones conformando segmentos de menor longitud. Además, las edificaciones que se encuentran al lado de las calles impactan de forma negativa en la comunicación inalámbrica.

Densidad variable de nodos: El número de vehículos presentes en una zona en cierto intervalo de tiempo puede variar considerablemente. Esta variación está en dependencia del escenario geográfico y del flujo de tráfico de cada lugar, si es una urbe o una zona rural. También depende de situaciones específicas, como en una situación de atasco, donde la densidad aumenta considerablemente. Por otro lado, en horario de la madrugada puede disminuir el número de vehículos circulantes en un territorio.

Variabilidad en los enlaces de comunicación: La topología altamente dinámica de las VANETs provoca desconexiones frecuentes de los enlaces de comunicación. Esto ocurre con mayor frecuencia en escenarios con una alta velocidad y baja densidad de nodos. La

capacidad variable de estos enlaces impacta de manera significativa en la calidad de la comunicación ya que si el enlace entre dos vehículos desaparece mientras se están comunicando ocurre una pérdida de información.

Privacidad: La confidencialidad en la información acerca del usuario es primordial en la comunicación entre los vehículos. En los mensajes intercambiados se envían datos como identificador, posición y los patrones de movimiento, los cuales pueden ser intersectados debido principalmente a la forma de radiodifusión. Por eso la necesidad de autenticación de mensajes y la implementación de los mensajes de seguridad para que se pueda mantener el anonimato.

Potencia y procesamiento: Los dispositivos de comunicación empotrados en los vehículos como las OBU y AU deben ser más poderosos en cuanto a la capacidad de procesamiento que las AUs externas, o sea, aquellas que se conectan de forma dinámica a la red interna del vehículo. Como estos dispositivos están conectados de manera permanente a la fuente de potencia del vehículo, el consumo de energía no es un aspecto crítico. No se desarrolla así en los dispositivos nómadas, cuyas fuentes de energía dependen de baterías.

1.3 Aplicaciones

Las aplicaciones desempeñan un rol fundamental en el desarrollo de los sistemas vehiculares cooperativos. El mayor objetivo es proporcionar un viaje seguro mediante la generación de alertas para una respuesta a tiempo ante situaciones de peligro. Diferentes arquitecturas de redes VANETs soportan la operación multicanal para aplicaciones de seguridad y de otros tipos. Basados en este propósito primario las aplicaciones VANETs son típicamente clasificadas en dos categorías: aplicaciones orientadas a la seguridad de las personas en el auto y las no enfocadas a la seguridad [22]–[24].

1.3.1 Orientadas a la Seguridad

El propósito de las aplicaciones orientadas a la seguridad es proporcionar viajes seguros, esto se logra con alarmas tempranas que permiten una respuesta previa en situaciones de riesgo. Las aplicaciones de seguridad desempeñan un importante papel en la disminución

de muertes en las carreteras. Según [25], el 60 % de los accidentes se podrían evitar si los conductores contaran con un aviso segundos antes del momento de la colisión.

Algunas de estas aplicaciones están orientadas a informar a los vehículos circundantes sobre obstrucciones viales como pueden ser las obras constructivas, desvíos o afectaciones en las condiciones de las vías. En ellas se coloca una RSU en la zona de interés para notificar a los autos circulantes sobre la posibilidad de peligro, indicándoles que deben disminuir la velocidad y/o cambiar el carril de conducción. Además, si se detecta una zona dañada como puede ser una sección en mal estado o un derrame de líquido en el pavimento permite la comunicación entre los autos contiguos sobre la localización del riesgo. También pueden proporcionar una guía sobre datos de interés como son intersecciones, pasos peatonales, límites de peso en carga, altura de los túneles, etc.

Otras variantes están orientadas a realizar alertas en diferentes situaciones en las vías, proporcionando avisos a los conductores acerca de cambios de carril o ruta de otros autos para evitar accidentes. Los adelantamientos o giros son el objetivo de las aplicaciones orientadas a advertencia de riesgo de colisión. Estos avisos de riesgo de colisión informan a los autos vecinos para evitar incidentes, disminuyendo la probabilidad de colisión y preservando las vidas humanas. También puede ser de mucha ayuda después de un accidente enviar notificaciones a los servicios de emergencia y de esta manera aumentar la velocidad de repuesta por parte de las autoridades.

Los vehículos de emergencia se encuentran en una categoría particular dentro de este tipo de aplicaciones ya que su presencia en las vías obliga a los demás automóviles que están en su camino a disminuir la velocidad, estacionarse o ceder el paso. Ambulancias, autos de bomberos o de policías, se incluyen dentro de esta categoría.

Las aplicaciones de seguridad requieren retardos de tiempo estrictamente pequeños en el intercambio de información, incluso una fracción de segundo puede ser importante en la toma de decisión. Por lo tanto, la gestión de los intervalos de tiempo debe demandar un manejo especial por parte de las capas inferiores del modelo de comunicación empleado. En la capa de red no puede estar involucrado un complejo proceso de enrutamiento ya que esto conllevaría mayores demoras.

1.3.2 No orientadas a la Seguridad

El propósito principal de las redes *Ad-hoc* vehiculares es acarrear seguridad, no obstante, algunas aplicaciones con otro enfoque están empezando a ser desarrolladas. Esto es debido a la gran incursión en el mercado de aspectos como el info-entretenimiento y automatización de procesos viales.

El uso de un tráfico dirigido de manera eficiente tiene como objetivo principal regular el flujo vehicular en ciertos puntos de interés. Reducir los atascos que se producen en zonas urbanas o secciones de una carretera mediante la monitorización y redistribución hacia rutas menos pobladas es otra tarea de este tipo de aplicaciones. La congestión en las intersecciones de una carretera se puede manejar de manera eficiente utilizando señales de tráfico inteligentes. Estas señales pueden ajustar su respuesta a las condiciones de tráfico y puede incluso, comunicar su estado a las intersecciones vecinas. Las aplicaciones de gestión de tráfico utilizan ampliamente la infraestructura en carretera, algunas pueden estar disponibles para ser utilizadas por cualquier usuario, mientras que otras serán de uso privado. Mejorar el flujo de tráfico reduce la congestión y el tiempo de viaje, contribuyendo a la protección del medio ambiente ya que se reduce el consumo de combustible y la emisión de gases tóxicos a la atmósfera [6]. El emplazamiento de tecnologías vehiculares en controles de peajes contribuye a la automatización de este servicio, incrementando la eficiencia operacional, eliminando problemas de retenciones y ahorrando tiempo a los conductores.

Varias aplicaciones vehiculares se agrupan bajo el término de valor añadido. Estas tienen como objetivo proporcionar comodidad y entretenimiento a los viajeros. Los pasajeros en un vehículo pueden disfrutar de la facilidad de la conectividad a Internet donde otras opciones tradicionales de conectividad inalámbrica a Internet (Wi-Fi, WiMAX, etc.) no están disponibles. Su centro está en proveer a los ocupantes del vehículo servicios relacionados con la notificación de puntos de interés, comercio electrónico, descarga de multimedia, servicios financieros y de aseguramiento, descarga y actualización de mapas, suministro y actualización de software, entre otros. Estos casos de uso son menos importantes que los asociados a la seguridad vial o la gestión del tráfico, pero también aportan ventajas al sector del automóvil.

1.4 Estándar 802.11p

La estandarización juega un papel importante a la hora de facilitar la interoperabilidad entre tecnologías de acceso inalámbrico de diferentes fabricantes. La definición, por parte de instituciones reguladoras, de diferentes características permite elaborar equipamiento compatible que funcione para comunicación VANET por parte de diferentes fabricantes. En la Figura 1.2 se observan los estándares relacionados con el acceso inalámbrico en ambientes vehiculares. Ellos son los encargados de describir el proceso de enrutamiento, las especificaciones de seguridad correspondiente a cada nodo implicado, los protocolos de interconectividad, los servicios de direccionamiento y los diferentes servicios a desplegar [5]. IEEE 802.11p es el estándar definido para el control de acceso al medio y de la capa física en el conjunto de protocolos WAVE. Es una alternativa a los estándares 802.11 [26] actuales, estando su desarrollo dirigido a proveer comunicaciones robustas y de baja latencia en escenarios vehiculares de alta movilidad y elevado dinamismo en la topología de escenarios de red.

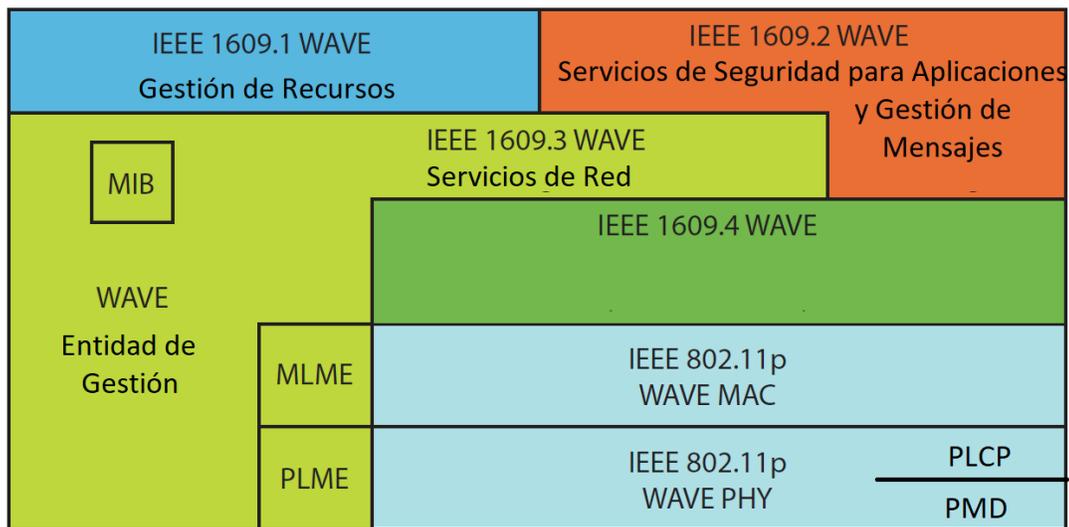


Figura 1.2: Arquitectura de red WAVE - Relación entre los protocolos IEEE 1609 y 802.11p (Adaptada a partir de [11])

1.4.1 Capa MAC

La capa MAC debe proporcionar un acceso de canal fiable, equitativo y eficiente. Esta tecnología de acceso desempeña un papel crucial en la regulación del acceso al canal de comunicaciones inalámbrico permitiendo que múltiples elementos compartan de forma eficiente un recurso común. Esta capa se encarga de gestionar y mantener la comunicación

entre las estaciones, determinando cuál estación de la red puede hacer uso del medio de transmisión y cómo debe hacerlo. También recoge aspectos de la transmisión como la probabilidad de recepción de paquetes, el tiempo de acceso al canal, el control de congestión y la prioridad de los mensajes [27].

La subcapa MAC IEEE 802.11p [13] hereda los procedimientos y técnicas principales de la subcapa MAC IEEE 802.11 [26] con su acceso prioritario al canal, pero simplifica las operaciones de asociación y autenticación. Esto lo logra gracias a una nueva definición llamada modo fuera de contexto del conjunto de servicios básicos (*OCB, Outside the Context of a Basic Service Set*). OCB es un modo de operación donde una estación no es miembro de un conjunto de servicios básicos (*BSS, Basic Service Set*). Los nodos en una VANET pueden configurarse en los modos OCB, BSS o independiente del conjunto de servicios básicos (*IBSS, Independent Basic Service Set*), sin embargo, OCB fue especialmente definido para evitar todos los tiempos de configuración que llegan a perjudicar el acceso al medio debido al movimiento rápido de los vehículos.

Utiliza tres tipos de tramas: datos, control y administración. Las tramas de datos transmiten la información de los usuarios desde capas superiores, las de gestión, permiten a las estaciones establecer y mantener comunicaciones, no enviando datos a las capas superiores. Mientras que las de administración permiten regular el flujo de los otros dos tipos por los diferentes canales.

En la capa MAC, IEEE 802.11p utiliza acceso múltiple por detección de portadora y prevención de colisiones (*CSMA/CA, Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*), en su variante de función de coordinación distribuida (*DCF, Distributed Coordination Function*) para controlar el acceso al canal de comunicaciones reduciendo el riesgo de colisiones de paquetes. El mecanismo DCF opera de manera distribuida, haciendo que las estaciones accedan al medio aleatoriamente. Para esto define dos tipos de tiempo de espera: espacio entre tramas (*IFS, Interframe Spaces*) y ventana de contención (*CW, Contention Window*), la cual se divide en ranuras de tiempo equidistantes (*backoff slots*). Una vez que el medio está desocupado, la estación espera un tiempo que es la suma del espacio distribuido entre tramas (*DIFS, Distributed Interframe Spaces*) y un número aleatorio de ranuras de *backoff*. Durante la espera, la estación censa la

1.4.2 Capa PHY

La capa física IEEE 802.11p representa una interfaz entre la subcapa MAC y el medio de comunicación inalámbrico que permiten el envío y recepción de datos. Es responsable de la codificación de la señal, de las especificaciones de *hardware* y de la conversión de bits. Esta capa constituye una variante de la capa física del protocolo IEEE 802.11, a la cual se realizaron modificaciones debido al entorno operativo rápidamente cambiante de las redes vehiculares. Estas transformaciones ofrecen intercambio de datos V2V y V2I en un rango de aproximadamente un kilómetro con una velocidad del vehículo de hasta 260 km/h [12].

La amplia gama de posibles aplicaciones en la rama de las tecnologías vehiculares, tanto para fines de seguridad como no destinadas a la seguridad, originó muchas inquietudes. Por eso organizaciones de normalización y autoridades gubernamentales asignaron una banda de frecuencia específica para estas comunicaciones.

Los espectros de frecuencia usados para los canales en los sistemas de la capa PHY pueden variar dependiendo de la región. Por ejemplo en la estandarización de los Estados Unidos, en 1999 la Comisión Federal de Comunicaciones (*FCC, Federal Communications Commission*) estableció las reglamentaciones para las operaciones de comunicaciones de corto alcance en ese país, reservando una banda de 75 MHz de 5.850 a 5.925 GHz para la tecnología vehicular [28]. En Europa para las aplicaciones del campo de las ITS se reserva una banda de 70 MHz desde la frecuencia de 5.855 GHz hasta 5.925 GHz. Esta se divide en tres partes: SU-G5A, es una banda de 30 MHz de ancho de banda, de 5.875 a 5.905 GHz, destinada a apoyar aplicaciones de seguridad. Otra banda nombrada SU-G5B que incluye las frecuencias de 5.855 a 5.875 GHz y se dedica a las aplicaciones no destinadas a la seguridad. La restante es la SU-G5D, esta contiene las frecuencias desde 5.905 hasta 5.925 GHz y está destinada para aplicaciones futuras [29].

Según [28] en Estados Unidos el estándar IEEE 802.11p opera con 7 canales con un ancho de banda de 10 MHz cada uno, esto está representado en la Figura 1.3. Los CH172 y CH184 son canales centrados en las frecuencias 5.860 y 5.920 GHz respectivamente. El primero sirve para brindar soluciones de seguridad, mientras que el segundo, es primordial contra la congestión que se presenta en otros canales. El CH178 es un canal de control y está situado en la frecuencia de 5.890 GHz. Tiene como objetivo el establecimiento del

enlace y control de la transmisión. Los cuatro restantes son canales de servicio, designados para la comunicación bidireccional entre diferentes tipos de unidades. De hecho, se pueden asumir como dos, porque el par CH174, CH176 y el par CH180, CH182 se combinan para formar dos simples canales de 20MHz respectivamente. Al inicio de la banda se utiliza un intervalo de guarda (*GB, Guard Band*) de 5MHz que comienza en la frecuencia de 5.85 GHz. Los dispositivos WAVE tienen la posibilidad de poder acceder a uno o más canales de forma alternada. Como ejemplo, un dispositivo podría estar intercambiando información por el SCH, mientras también lo hace por el CCH. Para ello, durante 50ms se podría estar intercambiando información por CCH, se esperaría un intervalo guarda de 4ms para cambiar el canal de transmisión y ya podría enviar datos a través de SCH, y así las veces que sean necesarias [30].

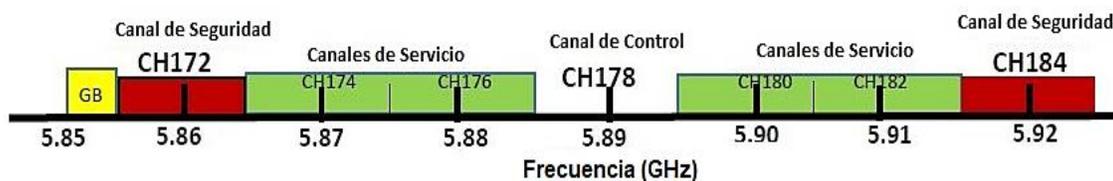


Figura 1.4: Distribución de los canales en la banda de frecuencias del estándar IEEE 802.11p [12]

En el estándar 802.11p el ancho de banda del canal se reduce a la mitad para mantenerse al día con los requisitos de las VANETs, lo que da como resultado un ancho de banda de 10 MHz en lugar de los 20MHz utilizados en 802.11a. Además, la distancia entre portadoras se reduce a la mitad, normalmente 0.15625 MHz, en comparación con 802.11a que es 0.325 MHz. Mientras que la longitud del símbolo para 802.11p es dos veces ($8\mu\text{s}$) la de 802.11a ($4\mu\text{s}$). En general, en 802.11p se duplican todos los parámetros de temporización utilizados en los transmisiones regulares 802.11a en la etapa de multiplexación [12].

Varios esquemas de modulaciones se utilizan para la transmisión de paquetes de maneras eficiente. La especificación IEEE 802.11p, define la disposición de los 64 sub-portadoras, 52 son utilizadas como sub-portadoras de datos y pilotos, a las cuales se le asignan números desde el -26 al 26. Las señales pilotos están incrustados en las sub-portadoras de -21, -7, 7 y 21. El resto son vector nulo asignado en el principio (0) y medio (27 a 37) [13].

Las variantes de transmisión que se utilizan son basadas en la Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales (*OFDM, Orthogonal Frequency–Division Multiplexing*), especificadas por IEEE 802.11 para canales de 10 MHz. Una razón de datos de 3 Mbit/s, con el esquema de modulación BPSK y una razón de codificación igual a 1/2, demanda una potencia de señal recibida como mínimo de -85 dBm. Un incremento en la razón de datos requiere una mayor fuerza en la señal recibida. Para una razón de 27 Mbit/s, con el esquema de modulación 64-QAM y una razón de codificación igual a 3/4, la potencia de señal recibida debe ser como mínimo de -64 dBm [26].

Tabla 1.2 Variante de transmisión definidas por IEEE 802.11 para canales de 10Mhz [26]

Razón de Datos(Mbit/s)	Modulación	Razón de codificación	Sensibilidad (dBm)
3	BPSK	1/2	-85
4,5	BPSK	3/4	-84
6	QPSK	1/2	-82
9	QPSK	3/4	-80
12	16-QAM	1/2	-77
18	16-QAM	3/4	-73
24	64-QAM	2/3	-69
27	64-QAM	3/4	-68

La división en subcapas es primordial para tener una mínima dependencia de la subcapa MAC con el medio de comunicaciones, así se tiene flexibilidad y adaptabilidad con nuevas tecnologías. La capa PHY 802.11p está dividida en dos [31]: la subcapa de procedimiento de convergencia de la capa física (*PLCP, Physical Layer Convergence Procedure*) que convierte la unidad de protocolo de datos de MAC (*PDU MAC, Protocol Data Unit MAC*) a un formato adecuado para su transmisión y recepción en el canal. Además, simplifica la interfaz física a los servicios de la capa superior MAC. Y la subcapa dependiente del medio físico (*PMD, Physical Medium Dependent*) que define las características, métodos de transmisión y recepción de datos entre dos o más estaciones en medios inalámbricos. También especifica técnicas de transmisión, codificación, modulación, etc. Provee mecanismos para enviar y recibir datos entre los vehículos, y realiza la gestión de las funciones físicas locales junto con la entidad de gestión de la capa MAC (*MLME, MAC Layer Management Entity*).

Los diseños de los protocolos para la capa física en este tipo de redes tienen que considerar el desvanecimiento multitrayecto y los cambios de frecuencia debido al efecto Doppler,

causados por movimientos rápidos de los nodos en la red VANETs para los tres ambientes: carretera, rural y ciudad. En una carretera, el modelo de propagación se asume generalmente el espacio libre, pero la señal puede sufrir interferencia por la reflexión con los disimiles obstáculos alrededor de las carreteras. En una ciudad y sus alrededores se hace compleja la comunicación debido a la densidad variable de vehículos y la presencia de edificios, árboles y otros objetos, actuando como interferencia a la propagación de la señal.

1.5 Conclusiones parciales

Las Redes *Ad-hoc* Vehiculares forman una de las tecnologías más importantes dentro del grupo llamado ITS. Las características específicas de los entornos vehiculares imponen retos en la comunicación, debido a la importancia de la seguridad vial para preservar vidas es de sumo interés el correcto funcionamiento de este tipo de redes.

IEEE 802.11p es la alternativa al IEEE 802.11 para ser usado en redes VANETs, diseñado para proveer comunicaciones robustas y de baja latencia en entornos móviles. Este protocolo define el funcionamiento de la capa MAC y PHY en la arquitectura de red acceso inalámbrico en entornos vehiculares. Ambas capas presentan adaptaciones para su empleo eficiente dentro de un medio con múltiples nodos irradiando información de manera inalámbrica. Debido a la gran cantidad de obstáculos presentes en estos entornos vehiculares el rendimiento de estos sistemas de comunicaciones se ve afectado principalmente por las pérdidas de trayectoria, por lo tanto, resulta importante conocer las características de las antenas utilizadas.

CAPÍTULO 2. Modelos de antenas y métricas utilizadas

2.1 Características de las antenas

La antena es un componente clave a tener en cuenta para lograr un alto desempeño en un sistema de comunicaciones. Constituye un elemento importante, responsable de transmitir y recibir las ondas electromagnéticas a través del canal de comunicaciones. En las comunicaciones inalámbricas las antenas constituyen el límite entre el *hardware* y el medio de transmisión, encargándose de transformar la energía eléctrica en ondas electromagnéticas y viceversa.

En las redes *Ad-hoc* vehiculares se utilizan diferentes modelos de antenas dependiendo de la tecnología empleada por el fabricante. La mayoría de las antenas utilizadas en este tipo de redes son direccionales, con patrones de radiación no homogéneos, ofreciendo así mayores beneficios en términos de ganancia y calidad de la señal [32]. Las antenas empleadas en las redes VANET poseen pequeños tamaños debido a que operan a frecuencias en la banda de 5.9 GHz. Además, este tipo de antenas se caracteriza por su alta dependencia angular y por recibir señales provenientes de diferentes ángulos de azimuts, pero con un limitado ángulo de elevación en la recepción y transmisión [14].

Las características de las antenas dependen de la relación entre sus dimensiones y la longitud de onda de la señal de radiofrecuencia transmitida o recibida [15]. Para que una antena sea considerada un buen radiador electromagnético sus parámetros deben tener ciertas características que garanticen su óptimo funcionamiento. Por lo tanto, es importante una correcta caracterización de parámetros como el patrón de radiación, la ganancia, la temperatura de ruido, la posición en el vehículo, las pérdidas de retorno y la eficiencia [33] de cada antena empleada.

2.1.1 Antena Monopolo

El monopolo es una antena derivada del dipolo que irradia sólo en la mitad del espacio y con la mitad de la potencia de un dipolo. Está conformada por un brazo que dispersa las

ondas electromagnéticas con una orientación del campo eléctrico en la misma dirección de su eje axial [34].

Las dimensiones de un monopolo vertical sintonizado a la frecuencia central de las comunicaciones vehiculares (en la banda de 5.9 GHz), oscilan los 5 cm. Este tamaño reducido y el plano de tierra limitado en dimensiones potencian el empleo de técnicas de fabricación diferentes a las utilizadas para los monopolos a bajas frecuencias. En las VANETs los monopolos planos e impresos son buenos candidatos por su gran ancho de banda y su versatilidad en el patrón de radiación.

La antena monopolo plano es también conocida como antena de disco plano. Este tipo de monopolo se imprime sobre un sustrato dieléctrico empleando tecnología de *microstrip*. El plano de tierra es parte del diseño de la antena, es perpendicular al plano del monopolo y forma parte de la misma antena. Este limita el patrón de radiación a sólo la mitad del hemisferio y con ello, la ganancia máxima a ángulos de elevación entre 20 y 60 grados. Puede existir un parche impreso sobre un dieléctrico, lo cual convierte la entidad en una estructura tridimensional. También se pueden encontrar el empleo de monopolos con forma elíptica y con forma semicircular cuya optimización se logra variando los ejes, mayor y menor, de la elipse o variando el espacio de la línea de alimentación entre la parte conductora y el plano de tierra. Con este tipo de monopolo las características de la antena se ven favorecidas, debido a la transición suave entre la línea de alimentación y el parche radiador. Se consigue, además, que la antena pueda presentar características de banda ancha.

Diferentes variantes de antenas del tipo monopolo son empleadas en las comunicaciones V2V y V2I. En [35] se plantea el empleo de tres configuraciones, como se muestra en la Figura 2.1. En ella se observa una antena colineal de 43 mm de alto, un monopolo plano con 68 mm de área total y un monopolo con forma de disco. Las antenas son montadas en la misma posición en el techo del automóvil de prueba para la obtención de resultados en experimentos.

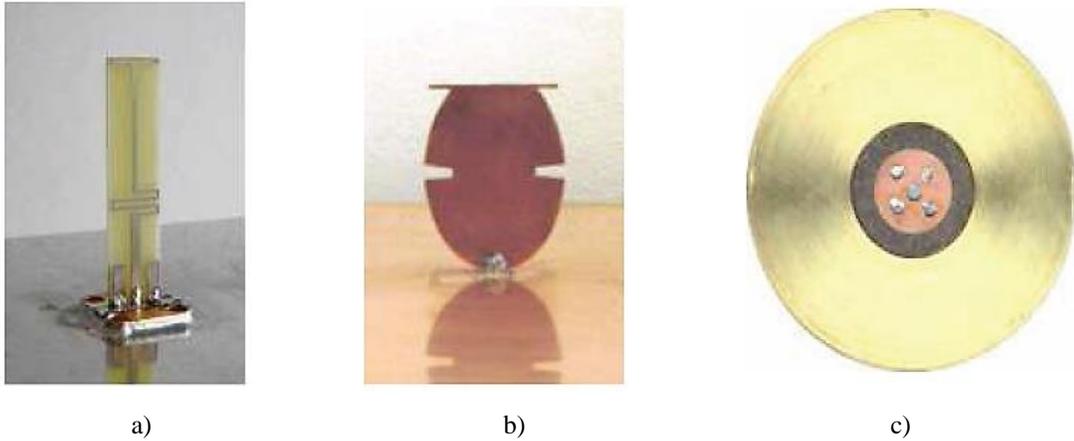


Figura 2.1: Antenas del tipo monopolo empleadas en [35]: a) Colineal b) Plano c) Disco *Flush*

El patrón de radiación representa gráficamente las propiedades de radiación de una antena como una función de sus coordenadas espaciales. Según sus propiedades de radiación una antena se puede clasificar como isotrópica cuando irradia con igual magnitud en todas direcciones. Omnidireccional, es el caso que concentra la máxima radiación hacia todas las direcciones en un plano. Y directiva, cuando presenta la mayor cantidad de radiación emitida en una sola dirección. La distribución espacial utilizada en esta investigación se basa en [35], donde se utilizan los tres modelos de antenas presentados en la Figura 2.1. Estos monopolos analizados presentan patrones de radiación omnidireccionales en el plano horizontal. En la Figura 2.2 a) se muestra el patrón determinado para el campo lejano, suponiendo que se tomaron muestras equidistantes de modo que cada ángulo se asocia con una ganancia positiva o negativa. Los valores entre las muestras son interpolados para su representación gráfica.

La posición donde se encuentra ubicada la antena según [36], [37] y el material que funciona como plano de tierra es una característica secundaria a tener en cuenta. Su influencia en la ganancia de la antena monopolo se puede observar en la Figura 2.2 b), en la cual se muestra la variación de la ganancia cuando se emplea un techo de vidrio panorámico. La deformación causada sobre el patrón de radiación se debe tener en cuenta al realizar el análisis de las características de las antenas. Valores de pérdidas de aproximadamente de -15 dB son introducidos, con respecto a los medidos para techos de metal. Esto provoca una drástica reducción del rango de transmisión en la dirección del frente del conductor.

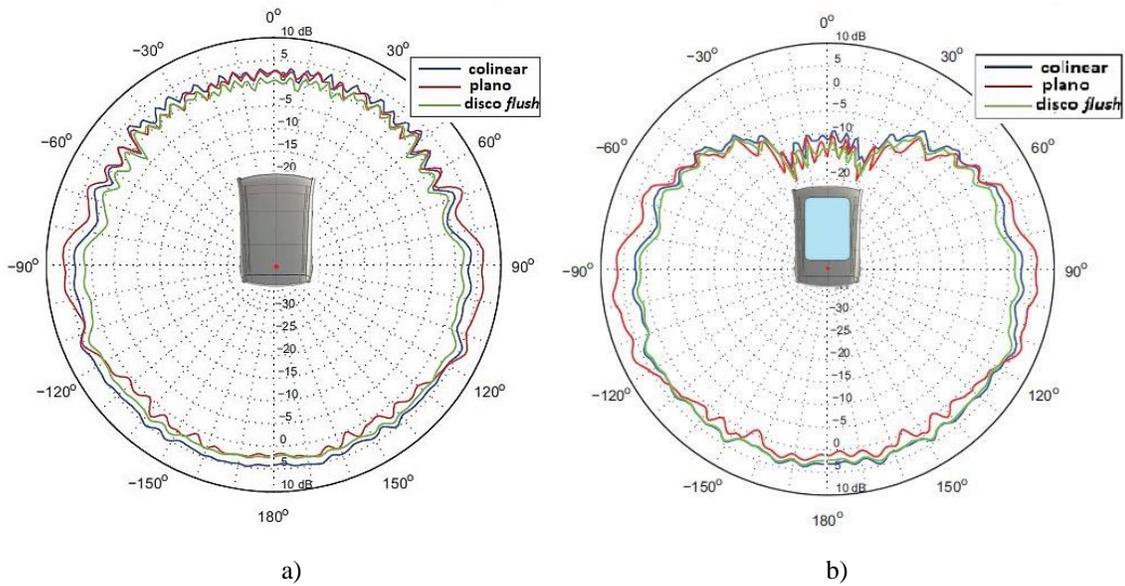


Figura 2.2: Patrón de radiación de antenas de tipo monopolo a 5.9 GHz [35]: a) Techo metálico
b) Techo con vidrio panorámico

2.1.2 Antena Parche

Las antenas Parche o *Microstrip* se usan ampliamente en la región de frecuencia de microonda debido a su simplicidad y compatibilidad con la tecnología de circuito impreso. En su forma más simple consiste en un parche de metal, generalmente rectangular o redondo, encima de un sustrato conectado a tierra [38], como muestra la Figura 2.3.

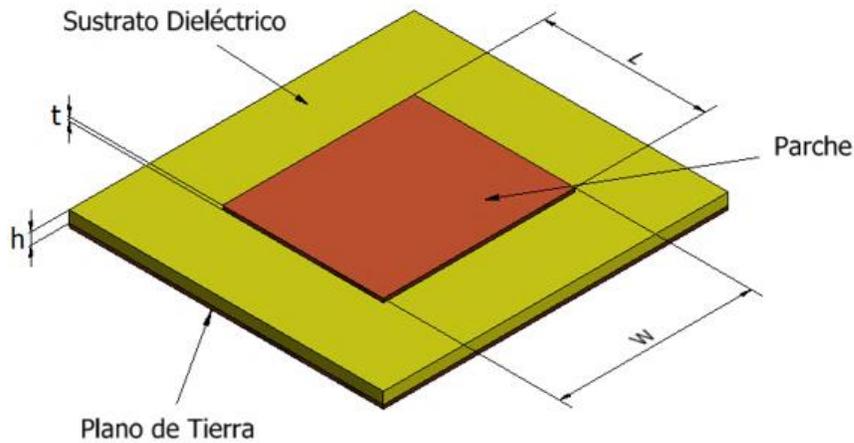


Figura 2.3: Componentes de una antena Parche [38]

Estas antenas se forman de una tira metálica de un espesor fino (t), regularmente $t \ll \lambda_0$ (λ_0 es la longitud de la onda en el espacio libre), colocada sobre el Plano de Tierra a una altura (h), donde $(0.003 \lambda_0 < h < 0.05 \lambda_0)$. El parche de microcinta se diseña de modo que

el máximo del patrón sea normal al parche (radiación *broadside*). Esto se logra seleccionando adecuadamente el modo (configuración del campo) de excitación debajo del parche. El parche y el Plano de Tierra se separan por una lámina dieléctrica (sustrato) cuya constante dieléctrica (ϵ_r) está regularmente en el rango $2.2 < \epsilon_r < 12$. Los elementos radiantes y las líneas de alimentación son usualmente fotograbados en el sustrato dieléctrico [34].

La distribución espacial de energía de una antena parche considera que el plano de tierra es infinito, evitando así radiaciones de lóbulos traseros no deseados en aplicaciones de antenas directivas. En realidad, no existen planos de tierra infinitos, de hecho, en muchos diseños se debe trabajar con planos de tierra prácticamente del mismo tamaño que la antena. Para aplicaciones vehiculares el plano de tierra es considerado, en algunos casos, en dependencia del vehículo y del material con que esté fabricado la cubierta del mismo. En [37] se determina el patrón de radiación para una antena Parche localizada en la parte frontal del espejo lateral de un vehículo y es el que utiliza esta investigación como modelo. En entornos vehiculares se considera que el desplazamiento es principalmente en el plano horizontal y que las antenas están montadas a bajas alturas. Por lo tanto, las ondas que inciden en la antena receptora llegarán desde direcciones horizontales arbitrarias, pero dentro de un rango límite de ángulos en elevación [39].

En las antenas Parche también se debe analizar el importante papel que desempeña la selección del sustrato por su valor de permitividad dieléctrica, el grosor entre las capas metálicas y el ancho (W) de las mismas. A su vez la eficiencia de radiación [34] también depende de las características de los materiales, ya que esta tiende a aumentar en la medida que la permitividad dieléctrica es menor. Por otra parte, la eficiencia de radiación tiende a disminuir, conforme el grosor del sustrato (h) es mayor.

La habilidad de una antena de aceptar potencia desde una fuente está determinada por la impedancia de entrada (Z_{in}). Para que ocurra máxima transferencia de potencia la Z_{in} debe coincidir con la impedancia característica de la línea de transmisión (Z_0), un proceso que no se logra en los sistemas de comunicaciones. Debido a este desacople parte de la potencia que se le entrega a la antena por parte del sistema se refleja hacia la fuente. La porción de potencia que se refleja está cuantificada por un valor que se llama coeficiente

de reflexión (Γ) [34]. Dos características de imprescindible análisis de las antenas que se derivan de Γ son la eficiencia de radiación y las pérdidas de retorno [40], las cuales tienen una estrecha relación con la potencia que logra transmitir la antena al ambiente. La eficiencia de radiación es un parámetro difícil de medir y se encuentra incluido en el patrón de radiación de una antena cuando se realizan pruebas de campo. Las pérdidas de retorno inciden directamente en el rango de transmisión, por lo que es una característica importante en un sistema de comunicaciones inalámbrico. Otra propiedad que influye en el desempeño de todo sistema de comunicaciones que posea una antena es la Temperatura de Ruido de la antena (T_a) [34]. Esta característica indica cuánto ruido produce una antena debido al ambiente y está relacionada con la ganancia y el ancho de banda. Debido al cambiante escenario al cual pueden enfrentarse los nodos en una red VANET es necesario analizar el comportamiento de este parámetro. La potencia de ruido (P_r) se incrementa a medida que la temperatura de ruido de la antena (T_a) crece, como se observa en la Ecuación (2.1), donde k es la constante de *Boltzmann* (1.38×10^{-23} J/K) y B es el ancho de banda.

$$P_r = k \cdot T_a \cdot B \quad (2.1)$$

Según [41] este modelo de antena es utilizada con gran regularidad en la implementación de los sistemas VANETs para las comunicaciones vehiculares. Esto se debe a que sus parámetros pueden ser modificados en función de la forma del parche, el sustrato y el modo de excitación seleccionado. También poseen un reducido tamaño importante para mantener un bajo perfil, y un bajo peso, que las hace muy apropiadas para los sistemas de comunicaciones modernos. Otro rasgo importante que explica el auge de esta tecnología es el reducido costo de fabricación, basada en tecnologías de circuito impreso (*PCB, Printed Circuit Board*). Por el contrario, es válido mencionar que estas antenas también presentan algunos inconvenientes importantes. Para algunos modelos encontramos baja ganancia en algunas direcciones del espacio. En dependencia de la elección de los valores de permeabilidad del sustrato se pueden presentar casos con baja eficiencia de radiación y una banda de frecuencias estrecha.

2.2 Métricas de desempeño

Es importante poseer conocimiento del comportamiento de los parámetros fundamentales de las redes vehiculares para lograr discernir entre un desempeño óptimo o no. Para ello existen diferentes métricas con el objetivo primordial de evaluar el rendimiento de las redes *Ad-hoc* vehiculares. Atendiendo a los parámetros de desempeño se encuentran el número de colisiones promedio, la razón de recepción exitosa de paquetes y el *throughput* de un nodo, determinado en función de las características de los distintos tipos de antenas para cada escenario analizado. Según la descripción encontrada en [42]–[47] las métricas de desempeño en las redes VANETs se pueden definir como:

Número de colisiones (NC): cantidad de colisiones que ocurren debido a la expiración simultánea de los contadores de *backoff*. Además, debido a la limitada zona de detección ocurre que dos o más transceptores inalámbricos quizás no se detectan. En este punto si transmiten paquetes simultáneamente causan colisión en el área de alcance común a los distintos remitentes.

Razón de recepción exitosa (RRE): se define como la razón que existe entre el número total de paquetes que se reciben y además se decodifican de manera exitosa por un terminal y el número total de paquetes que se debían recibir por ese mismo nodo. Se determina tanto para nodos individuales como para su conjunto cuando se trata de un escenario.

Tasa de transferencia efectiva (*throughput*): volumen de trabajo o de información neto que fluye a través de la red para un intervalo de tiempo. Este volumen neto no es más que la cantidad de datos libres de errores exitosamente transferidos entre nodos por unidad de tiempo, generalmente en bits por segundo (bps).

2.3 Métricas cooperativas

El conocimiento cooperativo es la base del uso de las diferentes categorías de aplicaciones de seguridad vial y gestión del tráfico [48]. Específicamente, casos de uso como gestión de intersección [49] y control de velocidad adaptativo (*ACC, Adaptive Cruise Control*) [50], se sustentan en el conocimiento del entorno vehicular. La premisa fundamental es el conocimiento del estado de los autos vecinos por parte de cada vehículo que compone la red. Los sistemas implementados en los vehículos podrán detectar situaciones

potencialmente peligrosas y gestionar o coordinar el tráfico en determinados puntos de una carretera basados en este conocimiento. Para habilitar el conocimiento cooperativo cada vehículo de la red debe difundir periódicamente mensajes de conocimiento cooperativo (*CAMs*, *Cooperative Awareness Messages*) o “*beacons*” [51], que incluyen datos como la posición, velocidad, aceleración, dirección, etc. Con los datos existentes en estos mensajes, los vehículos receptores crean una base de datos del entorno circundante conocida como mapa dinámico local (*LDM*, *Local Dynamic Map*), la cual constituye la base del funcionamiento de diferentes casos de uso.

2.3.1 Error de posición promedio real

Existe una relación intrínseca entre el nivel de conocimiento cooperativo y la calidad de la información de posición. En [47], se define una métrica que cuantifica la exactitud de posición obtenida con cierta frecuencia de transmisión de *beacons*. La misma refleja tres criterios: el error mínimo, error máximo y error promedio referente a la última información de posición recibida en relación con la posición física actual del vehículo. Los parámetros de entrada de la métrica son: velocidad del vehículo (v), intervalo de *beacons* (I_b) y demora de transmisión-recepción de *beacon* (D_{TxRx}).

Error de posición mínimo (E_{Min}): representa el error de posición que se produce debido al desplazamiento del vehículo durante el tiempo que dura la transmisión-recepción del *beacon*.

Error de posición máximo (E_{Max}): constituye el error de posición que se produce cuando la posición de un vehículo se busca en la tabla de vecinos un instante de tiempo antes de recibir el próximo *beacon* de ese vehículo.

Error de posición promedio (E_{Prom}): es el error medio asumiendo que el evento de búsqueda de posición está uniformemente distribuido en el intervalo de tiempo relativo a la recepción de los *beacons*. En la Figura 2.4 se muestran los parámetros de tiempo que influyen en el error de posición promedio. La ecuación correspondiente se puede escribir como:

$$E_{Prom} = \frac{E_{Min} + E_{Max}}{2} = \frac{v (D_{TxRx} + I_b)}{2} \quad (2.2)$$

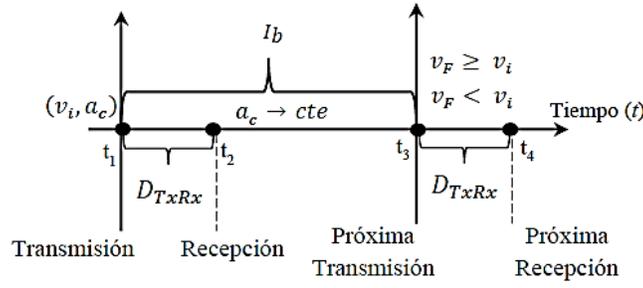


Figura 2.4: Parámetros que influyen en el error de posición promedio asumiendo que durante el intervalo de *beacon* el vehículo se desplaza con aceleración constante [19].

En las comunicaciones entre vehículos se considera significativo el Error de Posición Promedio Real (E_{PPReal}). Este es el error de posición máximo que un vehículo computa respecto a sus vecinos, incluyendo el efecto de las pérdidas y las variaciones de la velocidad. El cálculo toma como base la ecuación (2.3) donde se considera un vehículo que se desplaza con cierta velocidad inicial (v_i) mayor que cero ($v_i > 0$), al comienzo del intervalo de *beacon* (I_b), mientras que al final del intervalo de *beacon* la velocidad del nodo es (v_f). Durante este intervalo el vehículo se mueve con aceleración (a_c) constante. Todos los parámetros referidos anteriormente son mostrados en la Figura 2.4.

$$E_{Prom} = \frac{v_i \times D_{TxRx} + \left(\frac{v_i + v_f}{2} \right) \times I_b + v_f \times D_{TxRx}}{2} \quad (2.3)$$

La aceleración del vehículo está definida en la Ecuación (2.4) como la variación de su velocidad durante el intervalo de *beacon*:

$$a_c = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v_f - v_i}{I_b} \quad (2.4)$$

Despejando v_f de (2.4) y sustituyendo en (2.3) se obtiene el error promedio (E_{Prom}) en función de a_c, v_i, I_b [19]. Incluyendo el coeficiente de pérdidas (C_p), que indica el número de paquetes perdidos de manera consecutiva, en la definición formulada en [19], se obtiene la definición E_{PPReal} , como se muestra en la Ecuación (2.5). Por cada paquete que no se reciba el error se incrementa con respecto a su valor anterior ya que el nodo continúa su desplazamiento y la pérdida simula una reducción de la frecuencia del *beaconing*.

$$E_{PPReal} = \frac{v_i \cdot D_{TxRx} + I_b \times (C_p + 1) \left(v_i + \frac{a_c \cdot I_b \times (C_p + 1)}{2} \right) + D_{TxRx} (a_c \cdot I_b \times (C_p + 1) + v_i)}{2} \quad (2.5)$$

En la Figura 2.5 se muestra la relación entre el Error de Posición Promedio Real y la cantidad de paquetes perdidos consecutivamente, calculada a través de la Ecuación (2.5), asumiendo una $D_{TxRx} = 0.001s$ e $I_b = 0.2s$ [19]. Para una velocidad de 5.55 m/s (20 Km/h) y una aceleración de 1.5 m/s² (entorno urbano), una velocidad próxima a los 15.27 m/s (55 Km/h) y aceleración de 3.0 m/s² (entorno rural) y un entorno de autopista donde la velocidad se eleva hasta los 25.0 m/s (90 Km/h) y la aceleración alcanza los 4.5 m/s² [52]. Las curvas muestran la influencia de la velocidad y de la aceleración de los vehículos en el E_{PPReal} , y con esto la diferencia marcada para los diferentes escenarios. Se destacó en la Figura 2.6 un E_{PPReal} igual a cinco metros, observándose que, para ambientes de alta movilidad, como el de autopista, con solo un errores consecutivos ya se excede este límite. Mientas en otros como el urbano tienen que ser aproximadamente siete errores consecutivos.

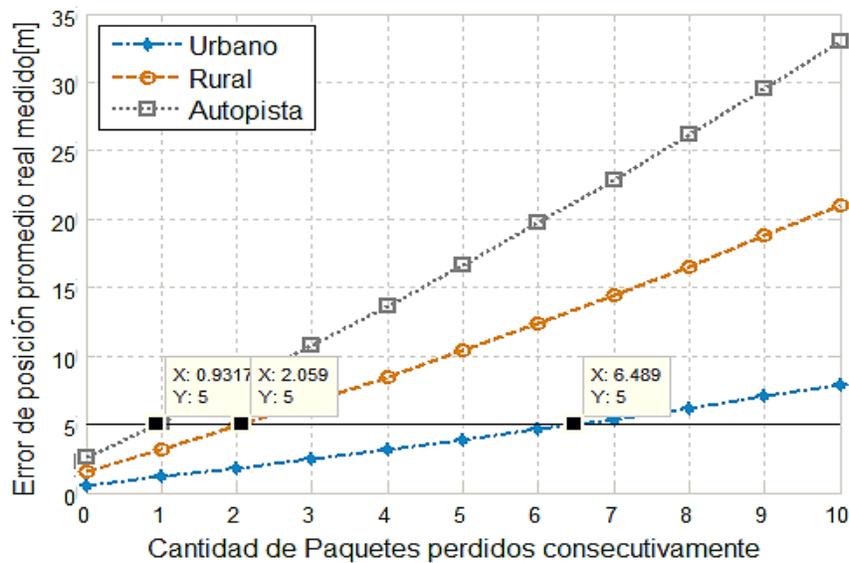


Figura 2.5: EPPReal en función de la cantidad de paquetes perdidos en ráfaga.

2.3.2 Número de terminales ocultos interferentes

Los distintos valores de potencia de señal recibida permiten dividir el rango de transmisión de un vehículo en tres regiones que varían según la distancia, como se observa en la Figura 2.6. El rango de comunicación (RC) es el área donde los valores computados de relación señal a ruido más interferencia (SNIR, *Signal to Noise + Interference Ratio*) y potencia de señal recibida, permiten la correcta decodificación del paquete. El rango de detección (RD) de portadora representa el área donde los vehículos pueden detectar una transmisión

en curso, pero no necesariamente decodificar exitosamente el paquete. El rango de interferencia (RI) es el área donde los valores de potencia de señal recibidos y SNIR, no permiten la correcta decodificación del paquete. En esta zona, la transmisión del vehículo actúa como ruido para las transmisiones en curso.

En las VANETs son frecuentes situaciones en las cuales dos o más transmisiones acceden al medio al mismo tiempo dando como resultado el problema del terminal oculto. En la Figura 2.6 se presenta el escenario más simple, formado por tres estaciones: transmisor (T), receptor (R) y terminal oculto (H—*hidden terminal*). La estación T inicia una comunicación con R, que no es detectada por H debido a que T no está dentro del rango de detección (RD) de H. La estación H que está oculta para T porque no está dentro de su RD, inicia una comunicación con R en el mismo instante de tiempo en que lo hizo T. El resultado es una colisión que le impide a la estación R la correcta recepción del paquete.

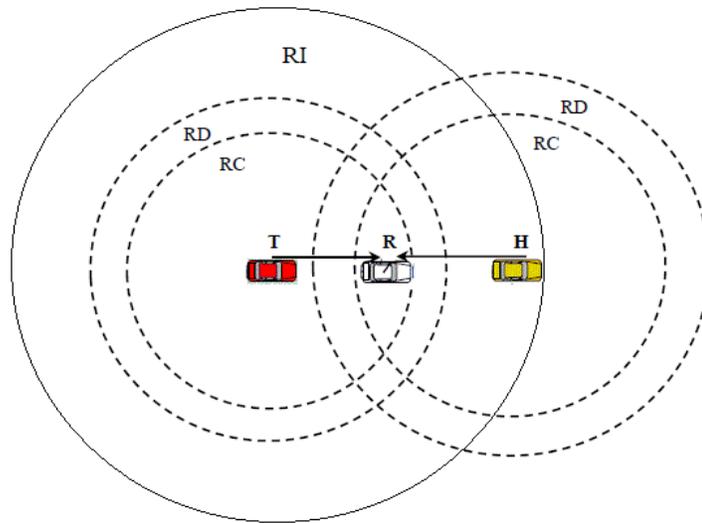


Figura 2.6: Representación del problema del terminal oculto para escenario CSMA/CA—Tres estaciones: transmisor (T), receptor (R) y terminal oculto (H) (Adaptada a partir de [19]).

El efecto del terminal oculto se manifiesta después del rango del terminal oculto (D_{to}), esta región es parte del rango de transmisión total (d_{tx}^{ran}). Se calcula según la Ecuación (2.6) según [53], teniendo en cuenta un valor umbral (Γ_{dto}) que permita una decodificación exitosa y considerando un coeficiente de pérdida por trayectoria (μ).

$$D_{to} = \frac{d_{tx}^{ran}}{1 + (\Gamma_{dto})^{\frac{1}{\mu}}} \quad (2.6)$$

En las modelaciones de escenarios vehiculares se considera la utilización de antenas omnidireccionales sin ganancia debido a la simplicidad que esto acarrea. Sin embargo, las antenas vehiculares reales manifiestan patrones de radiación asimétricos y características direccionales. Esto contribuye a una fuerte dependencia del ángulo entre la señal emitida y las antenas receptoras, atenuando significativamente la señal en algunas direcciones. Un ligero cambio en el ángulo puede tener un impacto considerable en la intensidad de la señal recibida y, por lo tanto, también en el rango de transmisión. De ahí la importancia de la variación del rango de comunicaciones en función de los parámetros de la antena [35].

El trayecto de una onda radioeléctrica se caracteriza principalmente por las ganancias de las antenas y las diferentes atenuaciones a la señal como parte del camino. Este trayecto está descrito en [54], donde se define la Ecuación (2.7), teniendo como la potencia detectada en los terminales del receptor o sensibilidad (P_r), la potencia con que se trasmite la señal (P_t), las ganancias de las antenas trasmisoras (G_t) y receptoras (G_r), y la totalidad de las pérdidas expresadas como ($\sum_x L_x$).

$$P_r[dBm] = P_t[dBm] + G_t[dB] + G_r[dB] - \sum_x L_x[dB] \quad (2.7)$$

En esta investigación se usa el modelo de pérdidas *Two-Ray Ground* [5] para estas estimaciones. Este modelo de pérdidas tiene en cuenta las interferencias constructivas y destructivas debido a reflexiones con la tierra durante la radiotransmisión. A grandes distancias el efecto de la interferencia destructiva causa pérdidas notablemente, haciendo que los efectos sean imposibles de ignorar [55]. El cálculo de la interferencia entre la línea de visión y los rayos reflejados se puede simplificar para grandes distancias y suponiendo una perfecta polarización y reflexión [56]. Asumiendo las condiciones anteriores en [57] se plantea el cálculo de las pérdidas (L_{trg}) debido al modelo *Two-Ray Ground* en función de la distancia entre los nodos (d) y las alturas de las antenas receptoras (h_r) y trasmisoras (h_t) como:

$$L_{trg} = 20 \lg \left(\frac{d^2}{h_r h_t} \right) \quad (2.8)$$

Despejando en la Ecuación (2.8) el valor de la distancia y sustituyéndolo en la Ecuación (2.7) se puede determinar la distancia de transmisión para un determinado valor de potencia y de ganancia en función de los ángulos de elevación (θ) y de azimut (φ) de las antenas transmisora $G_t(\theta_t, \varphi_t)$ y receptoras $G_r(\theta_r, \varphi_r)$. Obteniendo que ese rango para un nodo está definitivo por:

$$d_{tx}^{ran} = d = \sqrt{h_t \cdot h_r \sqrt{\frac{P_t \cdot G_t(\theta_t, \varphi_t) \cdot G_r(\theta_r, \varphi_r)}{P_r}}} \quad (2.9)$$

Las ganancias del trasmisor y del receptor, para cada paquete enviado, se pueden calcular utilizando los ángulos φ_t y φ_r como se ilustra en la Figura 2.7, en el caso de las comunicaciones vehiculares solo se tienen en cuenta variaciones de ángulo en el plano azimutal por lo que se eliminan las componentes de elevación θ_t y θ_r [39]. Por lo tanto, considerando las ganancias y la atenuación en el plano horizontal y el rango de estaciones ocultas D_{to} queda definido por la Ecuación (2.10).

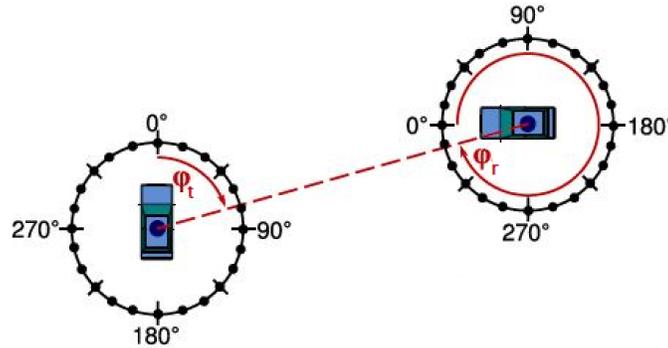


Figura 2.7: Representación de los ángulos usados para el cálculo de las Ganancias y de la Atenuación entre dos vehículos [14]

$$D_{to} = \frac{\sqrt{h_t h_r \sqrt{\frac{P_t G_t(\varphi_t) G_r(\varphi_r)}{P_r}}}}{1 + (\Gamma_{d_{to}})^{\frac{1}{\mu}}} \quad (2.10)$$

La Figura 2.8 representa el área donde pueden aparecer los terminales ocultos referentes a un vehículo ubicado en el inicio de coordenadas. Esta área que se considera como uniforme en la mayoría de las investigaciones, pero no presenta realmente este

comportamiento. Se puede observar como la región donde se encuentran los vehículos interferentes varía en dependencia de las características de la antena empleada.

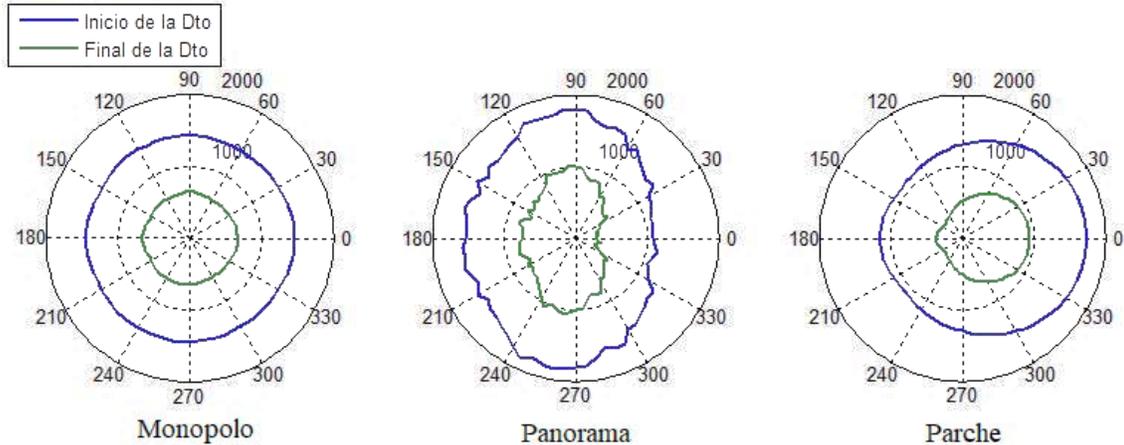


Figura 2.8: Representación del área dónde están ubicados los terminales ocultos.

2.4 Conclusiones Parciales

Las antenas utilizadas en las redes *Ad-hoc* vehiculares presentan particularidades propias de una tecnología desarrollada para ambientes de alta movilidad. Los modelos más utilizados son las antenas de Monopolo, de tipo Parche, o agrupaciones de ellas. Las características de estas antenas varían en dependencia de sus materiales de fabricación y de las dimensiones de sus componentes. Algunas características como la directividad y la ganancia de este tipo de antenas cambia en dependencia del modelo y de los requerimientos del fabricante. Los parámetros de radiación de estos modelos se ven influenciados por los materiales de fabricación del automóvil.

La medición de la calidad del enlace es un aspecto fundamental en este tipo de tecnología debido a sus aplicaciones en la seguridad vial y en la gestión de tráfico. La medición de la misma se basa en parámetros como la razón de recepción exitosa de paquetes o el *throughput*. También es importante cuantificar la información que posee un vehículo de su entorno y para ello se propone el análisis de dos métricas cooperativas. Estas permiten calcular el error de posición promedio real percibido y el número de terminales ocultos interferentes que puede poseer un nodo.

CAPÍTULO 3. Evaluación del desempeño de los modelos de antenas

3.1 Herramientas de Simulación

La simulación se ha convertido en una parte esencial en la evaluación de los protocolos, propiedades y aplicaciones de las redes vehiculares. El despliegue de una red VANET es una tarea costosa, debido al alto número de dispositivos en juego y a las tecnologías empleadas. Por lo tanto, los simuladores son usados con gran regularidad en las investigaciones ya que son herramientas útiles y poderosas para el desarrollo de pruebas en escenarios complejos [58]. En esta investigación, las simulaciones se realizan utilizando el *framework* de Simulaciones de Redes Vehiculares (*Veins, Vehicles in Network Simulation*) en su versión 4.7.1. Este *framework* es ejecutado por el simulador de red basado en eventos discretos llamado Banco de Prueba de Red Modular Objetivo desarrollado sobre C ++ (*OMNeT++*, *Objective Modular Network Testbed in C++*), versión 5.4.1, el cual interactúa de manera bidireccional con el Simulador de Movilidad Urbana 0.30.0 (*SUMO, Simulation of Urban MObility*). Además, se usa el Generador de modelos de Movilidad para redes *Ad-hoc* Vehiculares (*MOVE, MObility model generator for VEhicular networks*), versión 2.92, para generar el modelo de movilidad vehicular.

Veins [59]: es un software de código abierto para la simulación de redes *Ad-hoc* vehiculares que integra el simulador de red OMNeT++ y el simulador de tráfico SUMO. Ambos dominios se encuentran bidireccionalmente acoplados y trabajan en tiempo real, permitiendo el re-encaminamiento y la re-configuración *on-line* de vehículos en reacción al intercambio de paquetes de red. Otras características que incluye son: uso de modelos de movilidad vehicular generados por la herramienta MOVE, implementación de los protocolos IEEE 1609.4/802.11p, efectos de interferencia y ruido, así como el uso de mapas de simulación reales provenientes del sitio OpenStreetMap [60]. De esta manera este *framework* permiten a los usuarios realizar simulaciones VANETs con un alto grado de realismo en sistemas operativos Windows y Linux.

OMNeT++ [61]: es un entorno de desarrollo integrado (*IDE, Integrated Development Environment*) de código abierto basado en la plataforma Eclipse y programado en C++. Permite la simulación de red mediante eventos discretos, es altamente modular, escalable y bien estructurado. Provee la infraestructura necesaria para la modelación de diferentes proyectos de simulación usando redes cableadas e inalámbricas, protocolos de red y arquitecturas de *hardware*. Se ejecuta tanto en plataformas Linux como Windows, y ofrece una ventana de líneas de comando, así como una potente interfaz gráfica de usuario (*GUI, Graphical User Interface*). Cuenta con opciones de simulación en tiempo real, lenguajes alternativos de programación (Java, C#), la integración de bases de datos, integración de SystemC, y otras funciones. OMNeT++ es libre para uso académico y es una plataforma ampliamente utilizada por la comunidad científica mundial.

SUMO [62]: es un programa diseñado para la simulación de tráfico vehicular en diferentes escenarios. Altamente portable y de código abierto, está disponible para la mayoría de los sistemas operativos. Se puede configurar para la generación de trazas de salida directamente utilizables por los simuladores de red. Incluye diferentes tipos de vehículos, modelos de movilidad, calles con límites de velocidad, carreteras multicarril y señales de tráfico. Está centrado en la simulación de tráfico bajo el modelo Krauss de *car-following*. Permitiendo desplegar casi todos los elementos que componen un escenario VANET realista. Además, puede gestionar escenarios con un elevado número de nodos e importar diferentes formatos de archivos de red, entre los que se encuentran: Visum, Vissim, ArcView o descripciones XML. A través de la combinación de SUMO y mapas descargados del sitio OpenStreetMap, es posible simular tráfico vehicular en diferentes zonas del planeta.

MOVE [63]: es un simulador que permite generar rápidamente trazas de movilidad para simuladores de tráfico. Está construido sobre SUMO facilitando su utilización por medio de una amigable y completa interfaz gráfica, además brinda la posibilidad de usar mapas generados por el usuario y también propone algunas topologías predefinidas como: las basadas en cuadrículas (*grid*), aleatorias (*random*) y con forma de telaraña (*spider*). Es compatible con los mapas TIGER y permite generar el patrón de movilidad vehicular de forma automática, o manualmente a través de un editor de movimiento del vehículo [19].

3.2 Escenarios y parámetros de simulación

El impacto de las características de las antenas en las comunicaciones VANETs es analizado en tres escenarios simulados, cada uno de ellos presenta parámetros de simulación comunes. Todos los vehículos implicados tienen equipada tecnología para la comunicación de tipo VANET, con lo cual se tiene un 100% de índice de penetración. Los dispositivos de comunicación inalámbrica utilizados en los vehículos operan en el canal de control (CCH) todo el tiempo, cuya frecuencia central es 5.89 GHz con un ancho de banda 10 MHz. La arquitectura de red implementada en cada vehículo considera que no están presentes las capas de red y transporte. Los mensajes generados presentan un tamaño de 217 bytes para cumplir con los requerimientos planteados en [30] en cuanto a aplicaciones de seguridad vial y la presencia de información asociada a la seguridad de red. Este paquete contiene bits de información del mensaje CAM, preámbulos, cola y bits de la capa aplicación [26].

El tamaño de los *beacons* empleados en los experimentos es de 200 bytes [64] y se transmiten con una prioridad correspondiente a la clase EDCA 0 (categoría de acceso AC_BK). La categoría de acceso del tráfico *background* (BK) tiene el mayor valor de ventana de contención mínima ($CW_{\min} = 15$). Esto provee a los *beacons* generados la menor probabilidad de colisión debido a expiraciones simultáneas de los contadores de *backoff*. Los nodos transmiten los datos a una razón de 6 Mbit/s y presentan una sensibilidad de -82 dBm. Esta es la razón de datos definida por defecto en Europa para la comunicación en el canal de control (CCH) y la sensibilidad es especificada por el estándar IEEE 802.11 para la variante de transmisión de 6 Mbit/s, modulación QPSK, razón de codificación 1/2, en canales de 10 MHz, según [26].

La movilidad vehicular se simula bajo el modelo de seguimiento de automóvil de *Krauss* (*CarFollowing-Krauss*)[65]. En la propagación de la señal radioeléctrica se toma como modelo de pérdida de trayectoria *TwoRay-Ground* asumiendo lo propuesto por [57], utilizando un valor de constante dieléctrica $\epsilon_r = 1.02$. Se considera una imperfección del conductor (σ) de 0.5, un espacio vacío después del líder (*minGap*) de 2.5 m. Para cada escenario se realiza una variación de las pérdidas de retorno, el ruido térmico y el porcentaje de vehículos con alturas de sus antenas mayor de 2.5 metros. Además, cada

experimento es ejecutado para tres variantes: antena Monopolo, antena monopolo bajo la influencia del techo de vidrio panorámico (Panorama) y antena Parche. En la Tabla 3.1 se muestran todos los parámetros utilizados en las simulaciones.

Tabla 3.1 Parámetros usados en las simulaciones

Parámetro	Valor
Canal de comunicación	Canal de control CCH (CH178)
Frecuencia central del canal CCH	5.890 GHz
Ancho de banda del canal	10 MHz
MAC – PHY	IEEE 802.11p
Razón de transmisión de datos	6 Mbits/s
Sensibilidad del receptor	- 82 dBm
Potencia de transmisión	30 mW
Mecanismo de elección de trama (Veins)	Decider80211p
aCWmín – aCWmáx	15 - 1023
Tiempo de una ranura	13 μ s
SIFS, DIFS	32, 64 μ s
Demora de propagación	1 μ s
Tamaño de cabecera de capa de aplicación	11 Bytes
Tamaño de Cabecera y cola PLCP	46 bit
Tamaño de <i>beacon</i>	200 Bytes
Prioridad de <i>beacon</i>	AC_BK
Razón de <i>beacon</i>	5 <i>beacon</i> /s
Tamaño del paquete	217 Bytes
Modelo de movilidad vehicular	<i>Car Following-Krauss</i>
Espacio vacío después del líder	2.5 m
Imperfección del conductor (σ)	0.5
Índice de penetración ϕ	1 (100 %)
Modelo de radio propagación	Modelo de pérdida <i>Two-Ray Interference</i> $\epsilon_r = 1.02$
Tiempo de simulación	1000 s
Número de experimentos	135

Un aspecto clave en la simulación de las VANETs es el uso de un modelo de movilidad realista y de mapas topológicos reales. Los atributos de las vías presentes en los mapas son importantes, dentro de ellos tenemos: límites de velocidad, restricciones basadas en la clase del vehículo, presencia de señales de tránsito y el efecto de la presencia de puntos de interés. Estos aspectos intervienen en los patrones de movimiento de los vehículos y

por tanto en las comunicaciones. El uso de escenarios reales en las simulaciones, así como modelos de demanda de tráfico realistas le otorga un alto grado de exactitud y credibilidad a la ejecución de los experimentos [66]. En esta investigación se plantean tres escenarios, un área urbana, un área de autopista y una zona rural.

3.2.1 Escenario urbano

El entorno urbano seleccionado está compuesto por una porción de la ciudad de Chicago con unas dimensiones de aproximadamente 0.75 Km². Como se observa en la Figura 3.1 contiene numerosas carreteras pequeñas y otras de mayor tamaño conocidas como vías principales, las cuales son continuamente interrumpidas por intersecciones. Las cuadras tienen forma rectangular y carreteras poseen un límite de velocidad 60 Km/h.



Figura 3.1: Porción de mapa real de la ciudad de Chicago con la planificación de las rutas de tráfico.

En la Figura 3.1 se aprecia la ilustración de los flujos de tráfico primarios y secundarios. Los vehículos que pertenecen al mismo flujo, se desplazan del origen al destino siguiendo en ocasiones diferentes trayectorias. Cada flujo primario es bidireccional, esto quiere decir que los vehículos se desplazan por los dos carriles de la misma vía en sentidos contrarios, el punto de inicio en una dirección es el punto de llegada de la dirección contraria. En los flujos secundarios los vehículos se desplazan en una sola dirección por la vía (unidireccional). La simulación cuenta con 2 flujos primarios, cada uno con 40 vehículos; y con 2 flujos secundarios con 20 vehículos. La cantidad de vehículos existentes en el área de análisis provee una densidad de nodos de 41.2 veh/Km². En la Tabla 3.2 se muestran los parámetros del escenario.

Tabla 3.2 Parámetros del entorno urbano Chicago

Parámetro	Valor
Escenario	Mapa real de la ciudad de Chicago
Dimensiones del área	≈0.91 Km x 0.82 Km
Número de intersecciones	≈ 51
Número de RSUs	1
Velocidad máxima del vehículo	8.33 m/s (30 Km/h) y 16.6 m/s (60 Km/h)
Aceleración máxima del vehículo	4.5 m/s ²
Desaceleración máxima del vehículo	6.5 m/s ²
Número de flujos primarios (bidireccionales)	2
Número de vehículos por flujo	40
Número de flujos secundarios (unidireccionales)	2
Número de vehículos por flujo	20
Densidad de vehículos	≈ 41.2 veh/Km ²

3.2.2 Escenario de autopista

El entorno de autopista seleccionado para realizar las simulaciones es una sección de la carretera *Katy Freeway*. Esta sección está compuesta por tres vías, con intersecciones entre ellas, de 8.0 Km de largo, proporcionando un trayecto de alta velocidad. Las vías cuentan con dos sentidos opuestos permitiendo en cada uno de ellos velocidades de 110 Km/h como máximo.

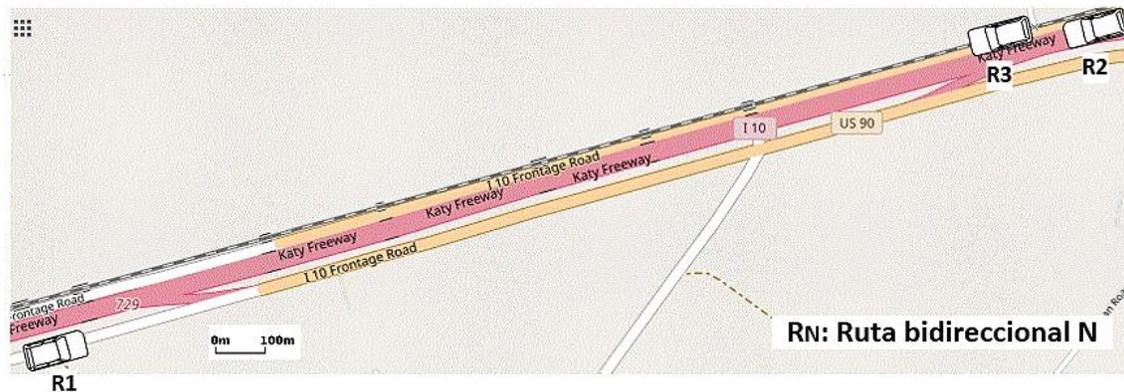


Figura 3.2: Porción de mapa real de *Katy Freeway* con la planificación de las rutas de flujo.

En la Figura 3.2 se muestran los puntos de inicio de los tres flujos de tráficos bidireccionales establecidos. Cada flujo está compuesto por 40 vehículos que se desplazan con una velocidad inicial de 100 Km/h al entrar en la zona analizada en la simulación. Por lo tanto, se obtiene una densidad de nodos de 15 veh/Km de vía. Los demás valores de simulación son incluidos en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3 Parámetros del entorno autopista *Katy Freeway*

Parámetro	Valor
Escenario	Mapa real de la autopista <i>Katy Freeway</i>
Largo de las vías	≈ 8 Km
Velocidad máxima del vehículo	30.55 m/s (110 Km/h)
Aceleración máxima del vehículo	4.5 m/s ²
Desaceleración máxima del vehículo	6.5 m/s ²
Número de flujos (bidireccionales)	3
Número de vehículos por flujo	40
Densidad de vehículos	≈15 veh/Km de vía

3.2.3 Escenario rural

La ciudad de Saragüeta en España fue el entorno rural seleccionado, este posee características para el análisis en situaciones de baja densidad de infraestructura y poca afluencia de tráfico. Esta región cuenta con unas dimensiones de aproximadamente 1.2 Km de ancho por 2.0 Km de largo. Las vías son mayormente curvas y con velocidades permitidas de hasta 80 Km/h, la ausencia de grandes infraestructuras en los lados de las carreteras disminuye la atenuación por obstáculos.

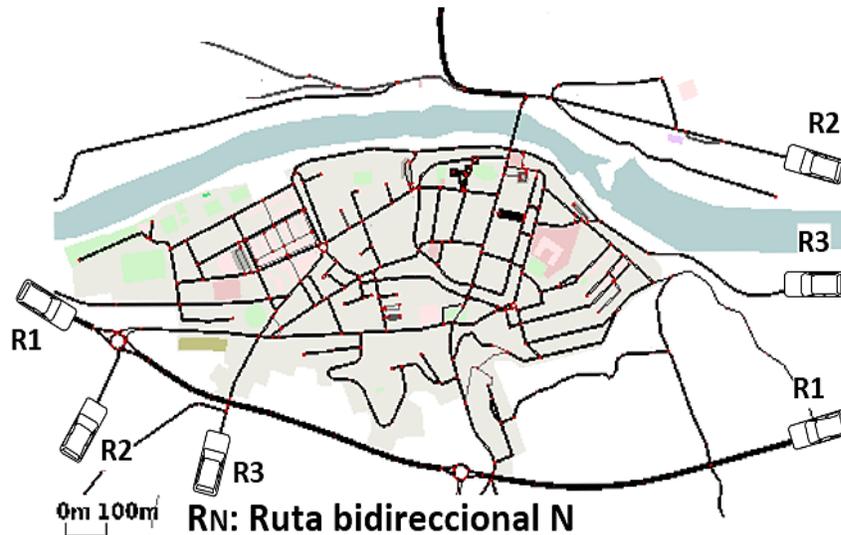


Figura 3.3: Porción de mapa real de Saragüeta con la planificación de las rutas de flujo.

Según ilustra la Figura 3.3 este experimento cuenta con tres flujos con desplazamientos en direcciones opuestas en la misma vía. Cada flujo cuenta con una cantidad de vehículos igual a 10 para una densidad de nodos de 8.33 veh/Km², además se colocó una RSU en una zona de interés del escenario. La Tabla 3.4 muestra los demás parámetros de simulación.

Tabla 3.4 Parámetros del entorno rural Saragüeta

Parámetro	Valor
Escenario	Mapa real de la ciudad de Saragüeta, España
Dimensiones del área	≈ 2.0 Km × 1.2 Km
Velocidad máxima del vehículo	22.2 m/s (80 Km/h)
Número de flujos (bidireccionales)	3
Número de vehículos por flujo	20
Densidad de vehículos	≈8.33 veh/Km ²
Número de RSUs	1

3.3 Resultados y discusión

El análisis de los experimentos se realiza de manera independiente para cada escenario ya que cada entorno presenta características diferentes. Las comparaciones de los valores de las métricas empleadas tendrán en cuenta la variación de los parámetros de las antenas.

3.3.1 Entorno urbano

El incremento de las Pérdidas de Retorno (RL, *Return Loss*) influye negativamente sobre la potencia de transmisión en las redes VANET. La Figura 3.4 muestra el desempeño de la red en función de distintos valores de RL. En la Figura 3.4 a) se observa como disminuye el total de colisiones a medida que aumenta RL y con esto un aumento de la razón de recepción exitosa (RRE) (ver Figura 3.4 b). Esto denota que, con la pérdida de potencia en el terminal transmisor, debido al aumento de RL, ocurre una disminución del rango de comunicaciones de los vehículos y, por tanto, menos vehículos se ven involucrados en la comunicación *broadcast*. La disminución del intercambio de información efectiva (Ver Figura 3.4 c) no una característica determinante en el desempeño de este ambiente ya que muchos nodos se comunican entre sí debido a la alta densidad vehicular.

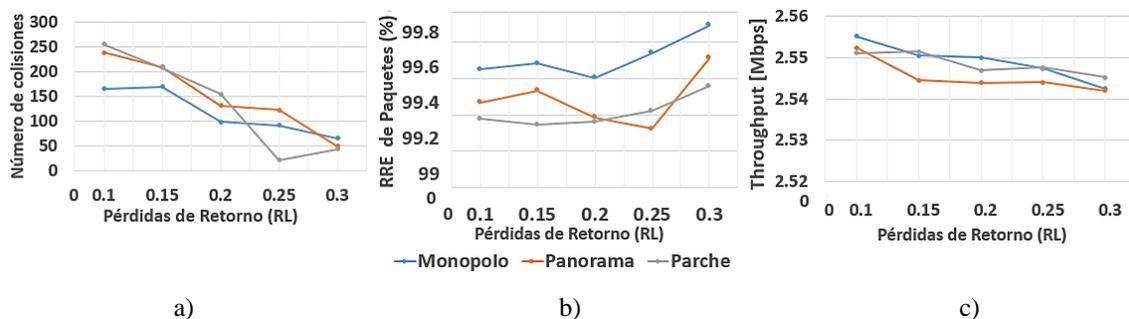


Figura 3.4: Variación de: a) Número de colisiones b) Razón de recepción exitosa c) *Throughput*, en función de las pérdidas de retorno (escenario Urbano).

En la Figura 3.5 se representa la variación de la temperatura de ruido de la antena mediante un aumento de la Potencia de Ruido Térmico en los terminales del receptor. El análisis se centra en cómo el aumento de la potencia de ruido afecta las comunicaciones. Los nodos presentan una disminución en el *throughput* (Ver Figura 3.5 a) debido al aumento de los valores de ruido térmico, con un aumento del ruido la decodificación se hace más compleja. En la Figura 3.5 b) se observa como la efectividad de las comunicaciones pueden disminuir un 1.05 % aproximadamente para una variación de 8 dBm de potencia de ruido. Como se observa en la Figura 3.5 c) el número de colisiones no es un parámetro dependiente de esta característica del receptor.

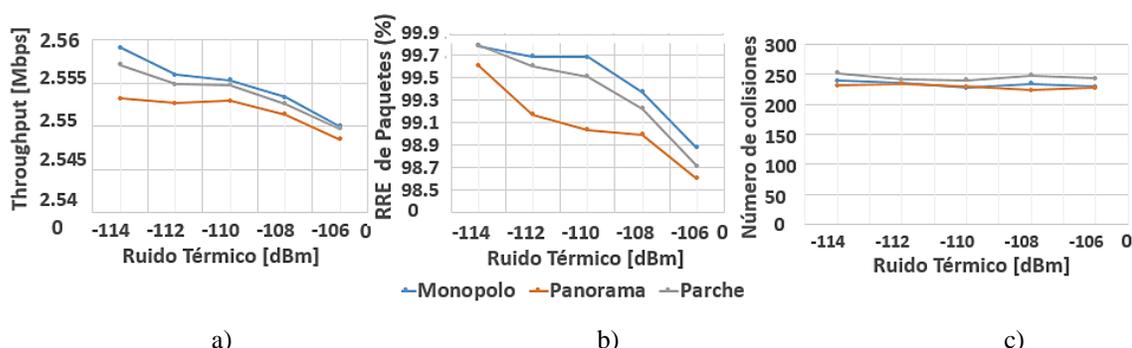


Figura 3.5: Variación de: a) *Throughput* b) Razón de recepción exitosa c) Número de colisiones, en función del ruido térmico en la antena receptora (escenario Urbano).

Como se aprecia en las Figura 3.6 la altura de la antena es importante en el intercambio de información en una red VANET. El aumento del porcentaje de automóviles que poseen la antena a una altura mayor a 2.5 metros incrementa el número de colisiones (Ver Figura 3.6 c), esto se debe al aumento del rango de comunicaciones. En la Figura 3.6 b) se observa cómo la RRE de paquetes también aumenta con la altura, partiendo de esto y del análisis de la Figura 3.6 c) se deduce que la disminución de las pérdidas debido al aumento de la altura de la antena influye más que las pérdidas por colisiones en el *throughput*.

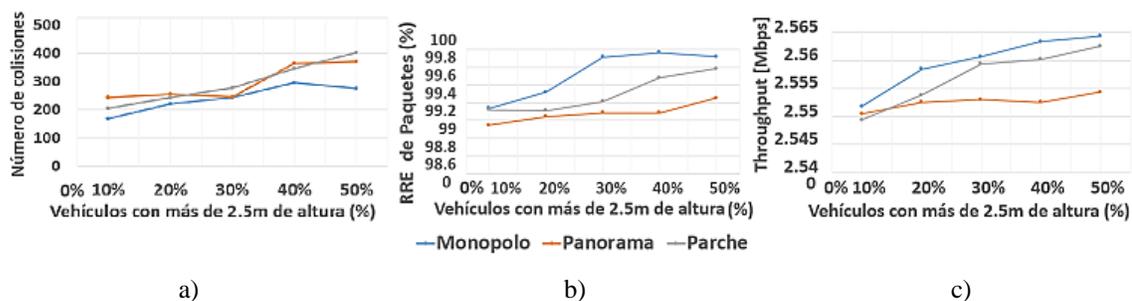


Figura 3.6: Variación de: a) Número de colisiones b) Razón de recepción exitosa c) *Throughput* en función del porcentaje de vehículos con altura mayor que 2.5m (escenario Urbano)

En la Figura 3.7 se observa el error de posición promedio real (EPPReal) que percibe el Nodo 35 con respecto a los autos vecinos. Se analizó el comportamiento de este nodo en específico debido a que es el que más pérdidas de paquetes presenta durante la simulación de este escenario urbano. Destacar que los valores de pérdidas de retorno, ruido térmico en el receptor y porcentaje de los vehículos con altura de las antenas mayor que 2.5 metros son: 0.1, -110dBm y 50% respectivamente, de manera que se obtengan una mayor cantidad de paquetes perdidos.

Los valores de EPPReal evidencian que la antena monopolo tiene un desempeño similar a la antena parche en cuanto a esta métrica, la gran cantidad de paquetes intercambiados en este escenario propicia valores de EPPReal similares. La antena monopolo posee aproximadamente doce errores más que la parche debido a que su patrón de radiación favorece una alta recepción de paquetes desde todas las direcciones, pero con menos ganancia. El valor de EPPReal máximo obtenido le corresponde a la antena bajo la influencia del techo de vidrio panorámico, demostrando el deterioro del desempeño cuando se usa este tipo de materiales. Esta influencia degrada el rendimiento incrementando en más de un 40% los errores de posición mayores de dos metros. Una mayor cantidad de paquetes perdidos consecutivamente y un mayor número de ráfagas de paquetes perdidos caracterizan el desempeño del caso panorama.

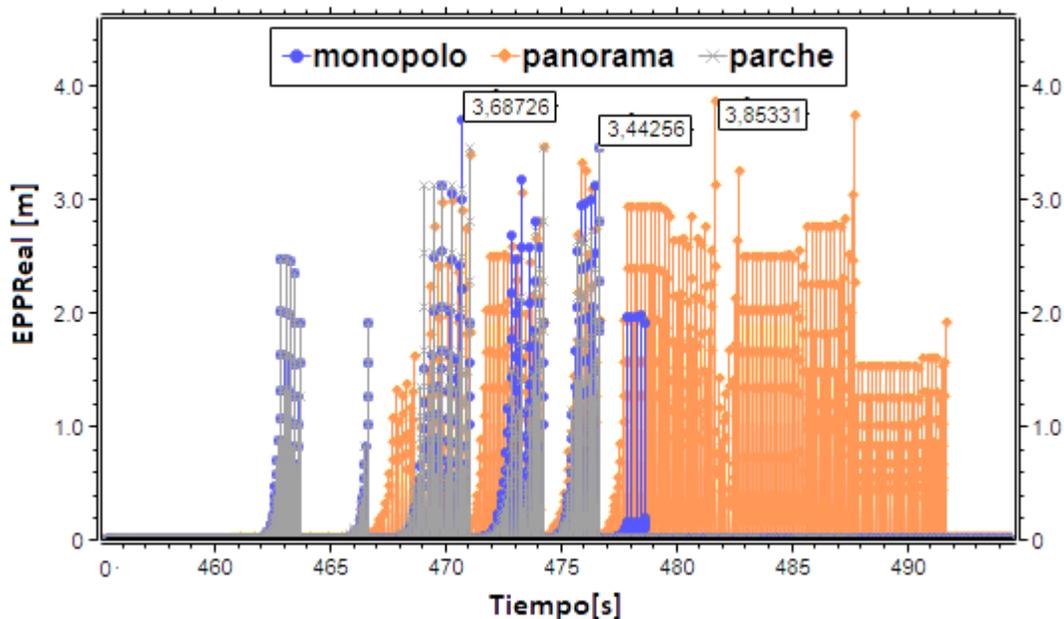


Figura 3.7: Error de posición promedio real percibido por el Nodo 35 para los tres tipos de antenas.

La probabilidad de colisiones aumenta al existir un mayor número de terminales ocultos interferentes. En la Figura 3.8 se compara el promedio de terminales ocultos interferentes por unidad de tiempo (Y) y la desviación estándar (L) apreciados por los nodos del escenario urbano para techo de vidrio y para los dos tipos de antenas analizados. Para cada caso anterior se simularon tres variantes independientes: pérdidas de retorno igual a 0.25, potencia de ruido térmico igual a -106 dBm y porcentaje de los vehículos con altura de las antenas mayor que 2.5 metros del 50%. En la figura se aprecia como los vehículos con antena parche poseen un mayor número de terminales interferentes, superando a la antena monopolo en más de doce terminales ocultos por cada segundo de simulación. Se observa además que la característica más influyente en cuanto a esta métrica cooperativa es el porcentaje de vehículos que presentan gran altura en sus antenas y un patrón de radiación homogéneo ofrece mejores resultados en este entorno.

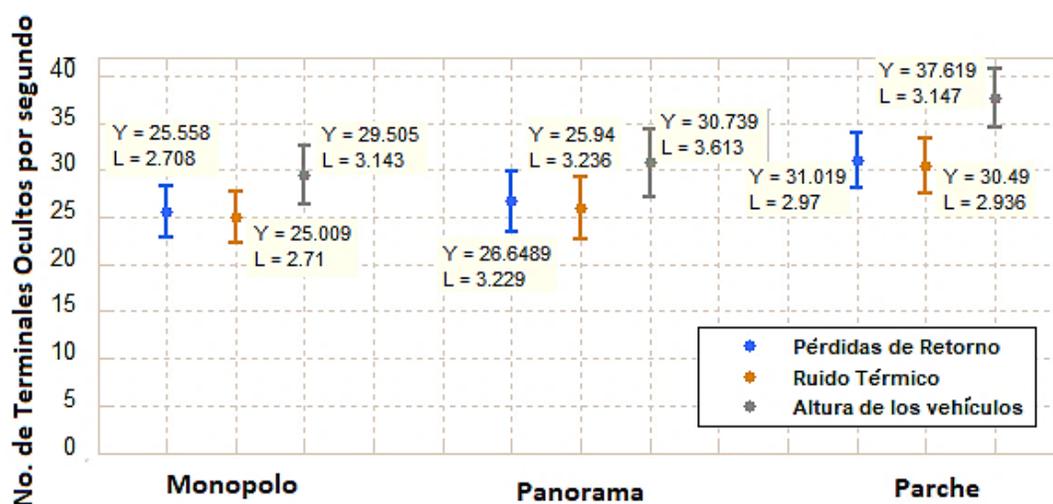


Figura 3.8: Promedio de terminales ocultos interferentes para cada tipo de antena.

3.3.2 Entorno de autopista

En el entorno de autopista los diferentes nodos se trasladan a altas velocidades y con desplazamientos en carriles prácticamente rectos. La Figura 3.9 muestra la influencia de las variaciones de RL para este escenario. Como se observa en la Figura 3.9 a) los valores de colisiones disminuyen a medida que aumenta el coeficiente de RL. La influencia de techo de vidrio panorámico reduce el número de colisiones y mantiene un alto nivel de razón de recepción exitosa (Ver Figura 3.9 b), debido a que presenta un 42 % menos de paquetes intercambiados con respecto a su no utilización, este dato justifica el bajo número de colisiones. Nótese que, en la Figura 3.9 c), se manifiesta una reducción del *throughput*

para este tipo de techo con respecto al caso de antena monopolo y parche con techo de metal, dejando explícito la influencia negativa del vidrio panorámico.

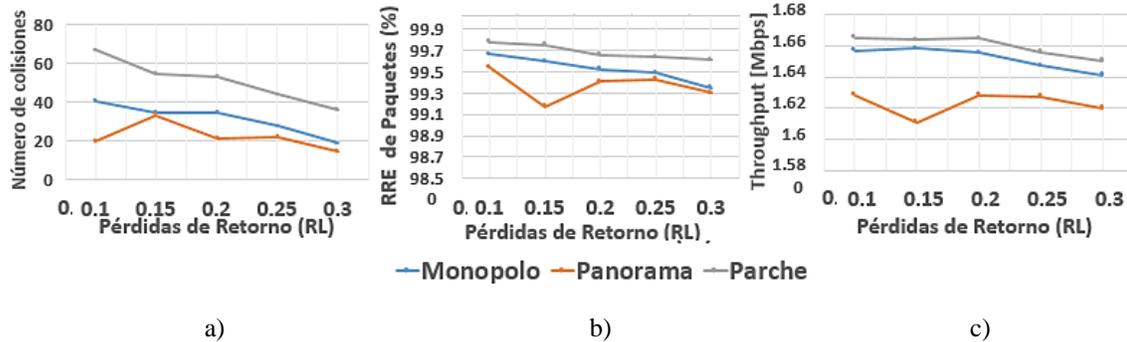


Figura 3.9: Variación de: a) Número de colisiones b) Razón de recepción exitosa c) *Throughput* en función de las pérdidas de retorno (escenario de Autopista).

Un mayor número de colisiones para el caso de la antena parche se observa en la Figura 3.10 a). Esto no significa que su desempeño sea peor, ya que como se muestra en la Figura 3.10 b) y c) posee una mayor razón de entrega exitosa y una mayor transferencia de información efectiva. Esto se debe a que la antena parche proporciona un mayor rango de transmisión hacia la parte frontal y posterior del vehículo que los demás casos.

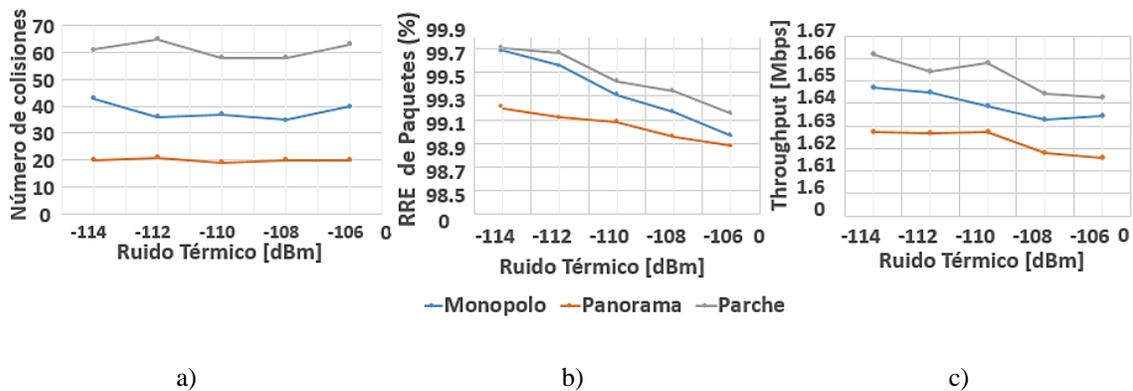
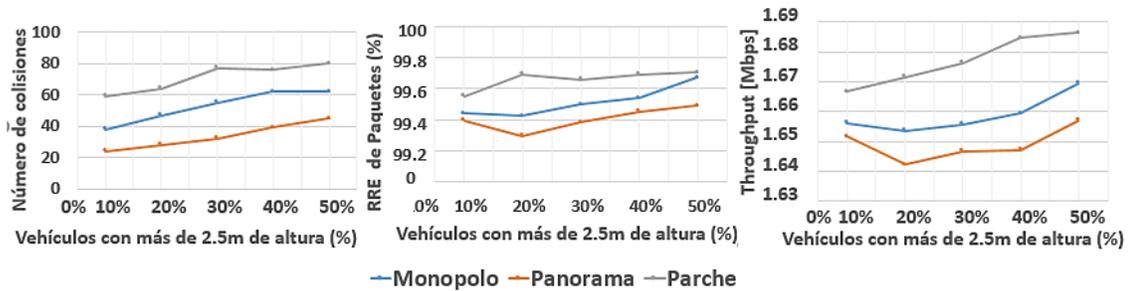


Figura 3.10: Variación de: a) Número de colisiones b) Razón de recepción exitosa c) *Throughput* en función del ruido térmico en la antena receptora (escenario de Autopista).

En la Figura 3.11 se visualizan los valores de las métricas para al aumento del porcentaje de vehículos con antenas a más de 2.5 metros de altura. Del análisis de la figura se deduce que en la autopista un mayor rango de comunicaciones mejora el intercambio de información efectiva, aunque es a expensas de un aumento del número de colisiones. El valor de pérdidas por colisiones es poco significativo ya que no existe una alta densidad vehicular en este ambiente.



a) Número de colisiones b) Razón de recepción exitosa c) *Throughput* en función del porcentaje de vehículos con altura mayor que 2.5m (escenario de Autopista).

En la Figura 3.12 se presenta el error de posición promedio para el nodo con mayor cantidad de paquetes perdidos (Nodo 32) en este escenario. La figura muestra los valores de EPPReal en función del tiempo, exponiendo las principales pérdidas en ráfagas que presenta el vehículo analizado. Nótese que el desempeño de la antena parche para este ambiente es mucho mejor que el de la antena monopolo ya que como muestra la Figura 3.12 el valor de EPPReal máximo para la antena parche es inferior en 8.64 metros al de su similar monopolo. La influencia del techo de vidrio panorámico en los vehículos se ve reflejada en un aumento del número de paquetes perdidos y en la cantidad de ráfaga de paquetes perdidos, el EPPReal alcanza valores de 13.09 metros para este caso. En este escenario la velocidad promedio de los nodos es de 100 Km/h aproximadamente lo que implica mayores valores de EPPReal que en otros escenarios.

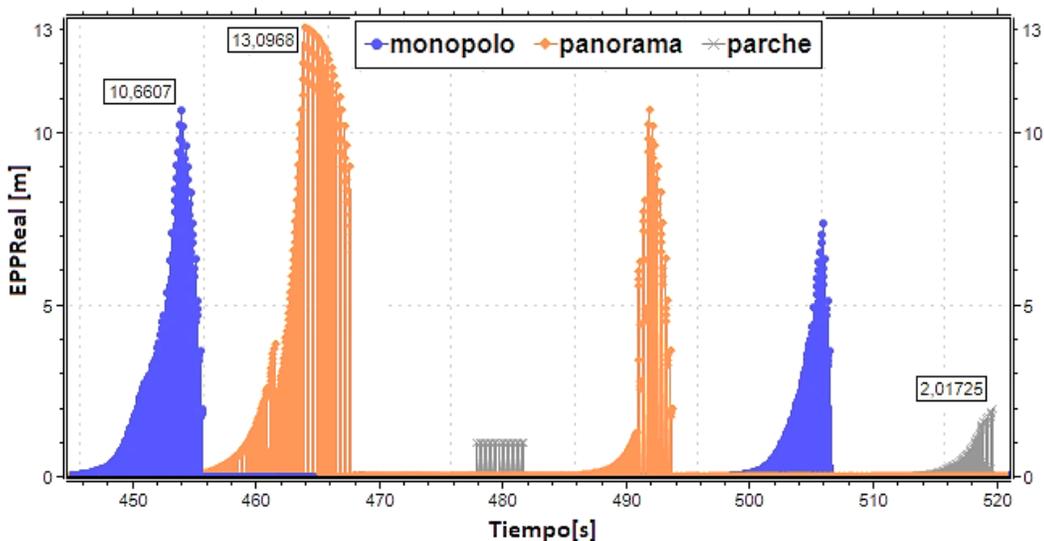


Figura 3.12: Error de posición promedio real percibido por el Nodo número 32 para los tres tipos de antenas.

El promedio de terminales ocultos (Y) y la desviación estándar (L) para el escenario de autopista se muestra en la Figura 3.13, analizando los tres casos (antena monopolo, techo de vidrio panorámico y antena parche) y en cada uno se analizan las variantes equivalentes a: pérdidas de retorno igual a 0.25, potencia de ruido térmico igual a -108 dBm y porcentaje de los vehículos con altura de las antenas mayor que 2.5 metros del 50%. Como se observa el desempeño del sistema cuando se utiliza techo de vidrio panorámico desciende ligeramente debido a un incremento del número de terminales ocultos. Las características de ambiente favorecen la utilización de antenas con mayores ganancias en las direcciones frontales y posteriores del vehículo.

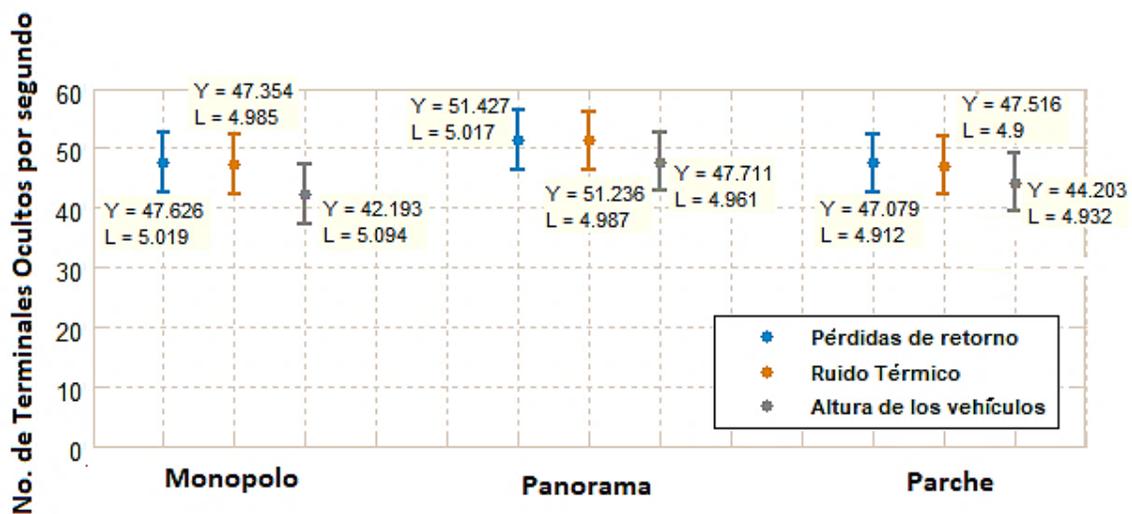


Figura 3.13: Promedio de terminales ocultos interferentes para cada tipo de antena.

3.3.3 Entorno rural

La baja densidad de nodos en el escenario rural dificulta la comunicación y el establecimiento de una red. En la Figura 3.14 a) se muestra el bajo número de colisiones, teniendo como valor máximo 26 colisiones para la antena con la influencia del techo de vidrio panorámico. El escaso intercambio de paquetes incrementa la influencia de las pérdidas por baja potencia de recepción (Figura 3.14 b), donde se aprecia la disminución del RRE de paquetes aun cuando el número de colisiones disminuye. El *throughput* se encuentra por debajo de 1.5 Mbps para todos los tipos de antenas empleadas como resultado de la insuficiente presencia de vehículos al mismo tiempo en la zona analizada (Figura 3.14 c).

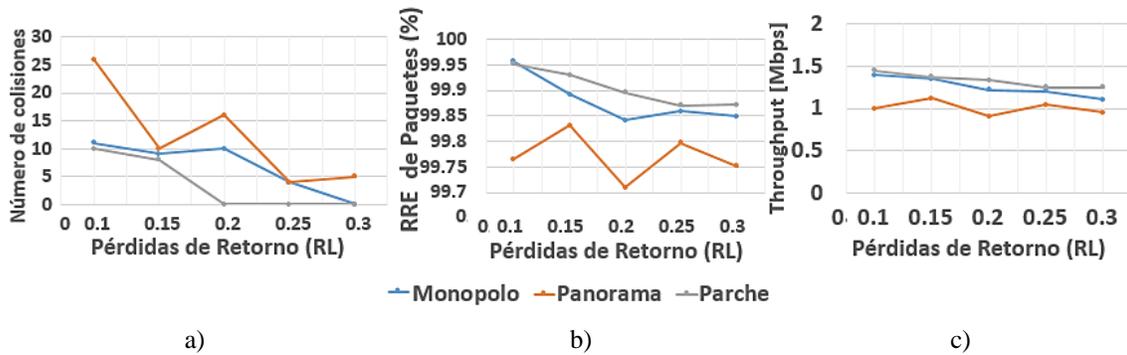


Figura 3.14: Variación de: a) Número de colisiones b) Razón de recepción exitosa c) *Throughput* en función de las pérdidas de retorno (escenario Rural).

Las variaciones de la potencia de ruido térmico, característica del receptor, se muestran en la Figura 3.15. En el caso a) se observa que el número de colisiones no se encuentra influenciado por el aporte de ruido de la antena al sistema de recepción, mientras que en los demás los casos, b) y c), se observa que el aumento de la potencia de ruido térmico contribuye a una disminución del rendimiento de las comunicaciones en el extremo receptor.

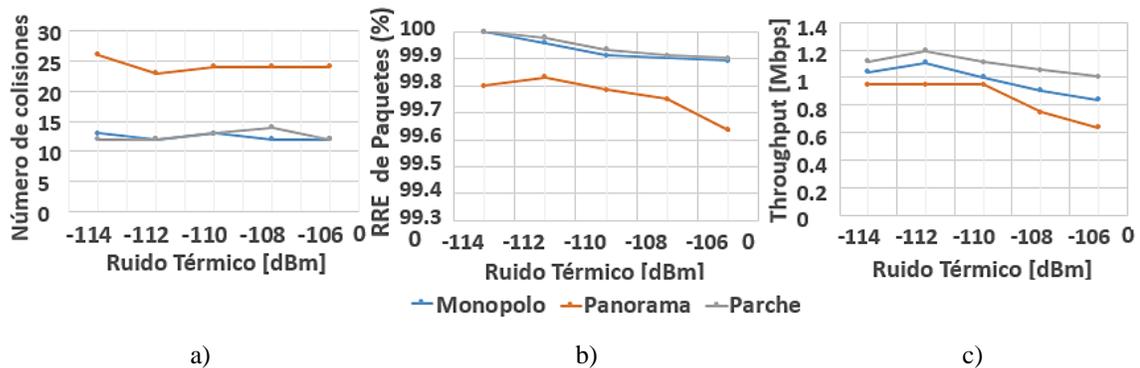


Figura 3.15: Variación de: a) Número de colisiones b) Razón de recepción exitosa c) *Throughput* en función del ruido térmico en la antena receptora (escenario Rural).

En la Figura 3.16 se representa las variaciones de las métricas de desempeño para distintos valores de porcentaje de vehículos con alturas de sus antenas mayor que 2.5 metros. Como evidencia la Figura 3.16 a) el aumento de la altura incrementa el número de colisiones, aunque estas continúan con valores por debajo de 50. En la Figura 3.16 b) se observan valores altos de RRE de paquetes, argumentar que este ambiente se cuenta con un intercambio de información mucho menor que los entornos urbanos y autopistas. Por lo tanto, el número bajo de paquetes intercambiados no permite un *throughput* mayor de 1.5 Mbps (Ver Figura 3.16 c).

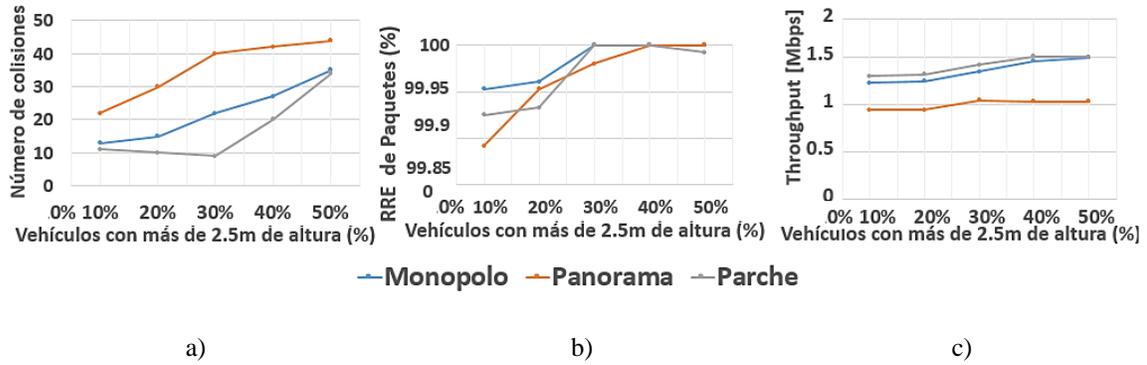


Figura 3.16: a) Número de colisiones b) Razón de entrega exitosa c) *Throughput* en función del porcentaje de vehículos en las vías con altura mayor que 2.5m (escenario Rural).

Las pérdidas consecutivas de paquetes se encuentran más dispersas en el tiempo para este escenario. En la Figura 3.17 se observa el EPPReal para el Nodo 23, este nodo es equipado con tres variantes: antena monopolo, antena con techo de vidrio panorámico y antena parche. En todas las variantes anteriores se usan valores fijos de RL, ruido térmico y porcentaje vehículos con altura de las antenas mayor que 2.5 metros. El análisis de la figura muestra que existe una influencia negativa en el rendimiento del sistema cuando se emplea techo de vidrio panorámico, incrementado en magnitud y en frecuencia el número de EPPReal. La antena monopolo posee un EPPReal menor que la antena parche lo que argumenta su mejor desempeño en este ambiente según el análisis de esta métrica cooperativa.

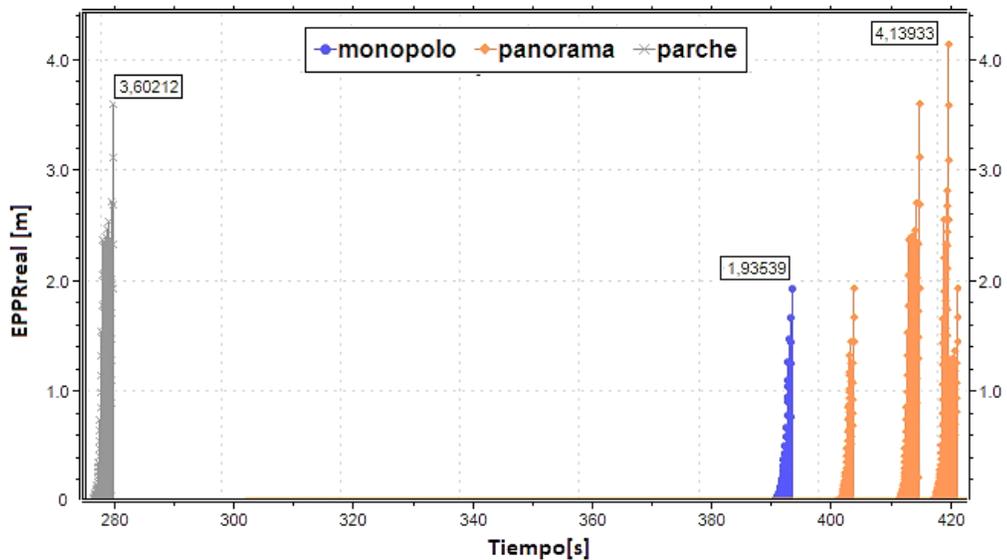


Figura 3.17: Error de posición promedio real percibido por el Nodo número 27 para los tres tipos de antenas.

La Figura 3.18 muestra la media (Y) y la desviación estándar (L) de los terminales ocultos por unidad de tiempo estimada para el escenario rural. Se realizaron tres simulaciones empleando: techo de vidrio panorámico, antena monopolo y antena parche. Para cada caso anterior se definieron: pérdidas de retorno igual a 0.25, ruido térmico igual a -108dBm y porcentaje de los vehículos con altura de las antenas mayor que 2.5 metros del 50%. En la figura se nota como existe una gran desviación estándar para cada uno de los valores medidos, lo que indica la diferencia entre el número de terminales ocultos que presentan los nodos del escenario. La menor cantidad de terminales ocultos le corresponde a la antena parche, manifestando así una menor probabilidad de colisión debido al problema del terminal oculto interferente.

La altura de las antenas continúa siendo la característica más influyente en cuanto a esta métrica cooperativa. En este escenario se necesita favorecer las características que aumenten el rango de comunicaciones del vehículo.

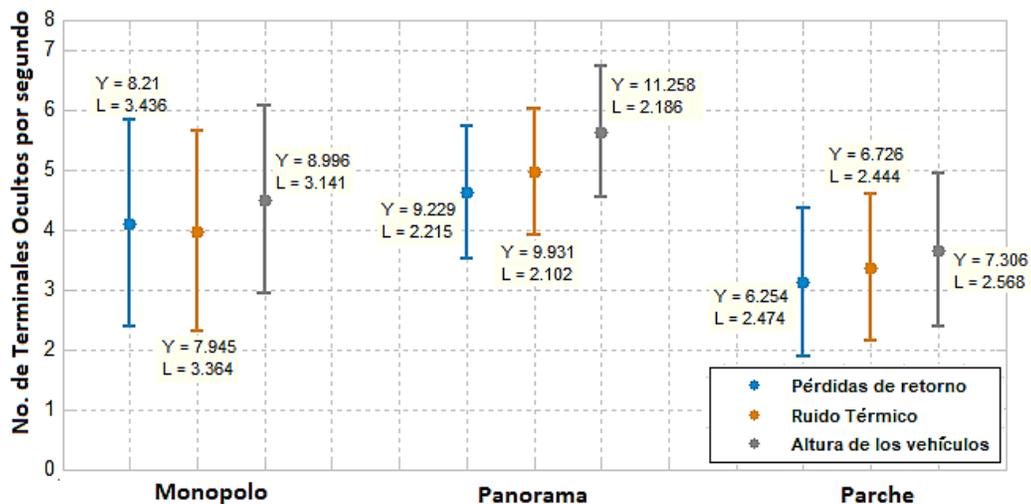


Figura 3.18: Promedio de terminales ocultos interferentes para cada tipo de antena.

3.4 Conclusiones parciales

Las características propias de una red *Ad-hoc* vehicular convierten a la simulación de este tipo de redes en una herramienta muy importantes para el estudio y desarrollo de nuevos conceptos. La unión de SUMO y OMNeT++ a través del *framework* Veins permite el análisis equilibrado del escenario desde dos puntos de vista: el de red y el de movilidad vehicular realista.

Los resultados obtenidos de las simulaciones permitieron demostrar que las variaciones de las características de las antenas no poseen el mismo impacto en las métricas utilizadas para evaluar el rendimiento de una red VANET. También contribuyeron a argumentar que los diferentes escenarios deben ser analizados de manera independiente ya que en cada uno de ellos se obtienen valores diferentes de las mismas métricas con iguales variaciones de las mismas características de la antena. Quedó demostrado que la utilización de techo de vidrio panorámico deteriora el rendimiento de la red vehicular en parámetros como: la cantidad de paquetes intercambiados y el número de paquetes perdidos. La mejora de alguna característica de la antena puede hacer que disminuyan los valores de *throughput* y RRE de paquetes a la vez que aumentan otros como número de colisiones, de ahí que se debe lograr un balance en cuanto a parámetros de la antena para cada ambiente. En general las simulaciones plasman como resultado que el incremento del conocimiento cooperativo se basa fundamentalmente en el tipo de antena empleada y sus características dependientes del diseño.

CONCLUSIONES

En la investigación realizada se analizaron las principales características de las antenas y cómo la variación de cada una de ellas afecta el desempeño de un sistema de comunicaciones VANET. Para medir el rendimiento de la red *Ad-hoc* vehicular se estudiaron tres métricas de desempeño y dos métricas cooperativas. El análisis se llevó a cabo mediante la simulación de tres escenarios: urbano, autopista y rural, definiendo cada uno de ellos con parámetros reales. Como resultado de la investigación se puede arribar a las siguientes conclusiones generales:

- El protocolo IEEE 802.11p es una variante del protocolo IEEE 802.11, presenta modificaciones que permiten un desempeño eficiente en entornos vehiculares. Define las capas MAC y PHY de manera que se garantice una entrega segura de paquetes con baja latencia en una red donde se emplea la comunicación *broadcast*.
- Los modelos de antenas empleados en las comunicaciones VANET son Monopolo y Parche, sus principales características que modifican el rendimiento de una red VANET son: el patrón de radiación, las pérdidas de retorno, la temperatura de ruido, la posición de la antena y el material del techo del vehículo.
- Las principales métricas de desempeño que definen la calidad del enlace en las redes *Ad-hoc* vehiculares son: número de colisiones, razón de recepción exitosa de paquetes y *throughput*. El nivel de conocimiento cooperativo se debe medir mediante el error de posición promedio real percibido y el número de terminales ocultos interferentes para cuantificar la información de un nodo sobre el ambiente.
- Los resultados obtenidos mediante simulación para el escenario urbano mostraron que el aumento de la temperatura de ruido de la antena es el factor más determinante en este escenario en cuanto al desempeño de la red VANET, debido a provoca una disminución de la RRE de paquetes de un 1.06% y un descenso del *throughput* en un 0.357%.

- Demostrando mejores resultados en cuanto a RRE de paquetes, *throughput* y número de terminales ocultos la antena monopolo presenta mejor desempeño en el escenario urbano.
- La simulación del escenario de autopista demostró que al aumentar la altura de la antena se mejora el *throughput* y la RRE de paquetes, mientras que el deterioro de las demás características de la antena empeora el desempeño de la red influyendo más el aumento de la temperatura de ruido de la antena.
- La antena parche, al poseer alta ganancia en la dirección del conductor, proporciona mejor rendimiento en el escenario de autopista, valorando las métricas cooperativas y de desempeño. Además, el deterioro de su rendimiento ocurre en menor escala que en los demás casos.
- Los resultados de simulación del entorno rural demostraron que la antena parche posee un mejor desempeño en este escenario y que las características que favorecen el aumento del rango de comunicaciones como la disminución de RL o el aumento de la altura de las antenas son las más influyentes en la mejora del RRE de paquetes y el *throughput*.

RECOMENDACIONES

Se presentan las siguientes recomendaciones para profundizar en el tema tratado y realizar un estudio más detallado del contenido:

- Analizar el desempeño de los conjuntos de antenas formados por antenas parche y monopolos en las redes *Ad-hoc* vehiculares.
- Realizar un análisis estadístico más profundo sobre el efecto de variación de la característica más importante de cada antena en una situación crítica.
- Comparar los resultados obtenidos con mediciones reales en ambientes urbanos, rurales y de autopistas.
- Diseñar una antena tomando como base los criterios planteados en esta investigación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] T. Zhang y L. Delgrossi, *Vehicle Safety Communications: Protocols, Security, and Privacy*. John Wiley & Sons, 2012.
- [2] R. Stanica, E. Chaput, y A.-L. Beylot, «Simulation of vehicular ad-hoc networks: Challenges, review of tools and recommendations», *Comput. Netw.*, vol. 55, n.º 14, pp. 3179-3188, oct. 2011.
- [3] A. Rasheed, S. Gillani, S. Ajmal, y A. Qayyum, «Vehicular Ad Hoc Network (VANET): A Survey, Challenges, and Applications», en *Vehicular Ad-Hoc Networks for Smart Cities*, 2017, pp. 39-51.
- [4] A.-L. Beylot y H. Labiod, *Vehicular Networks: Models and Algorithms*. John Wiley & Sons, 2013.
- [5] C. Campolo, A. Molinaro, y R. Scopigno, *Vehicular ad hoc Networks: Standards, Solutions and Research*. Springer International, 2015.
- [6] J. A. Sánchez Sánchez, «Redes Vehiculares Aplicadas a la Movilidad Inteligente y Sostenibilidad Ambiental en Entornos de Ciudades Inteligentes», Tesis Doctoral, Universidad de Oviedo, Asturias, España, 2017.
- [7] F. D. da Cunha, A. Boukerche, L. Villas, A. C. Viana, y A. A. F. Loureiro, «Data Communication in VANETs: A Survey, Challenges and Applications», INRIA Saclay ; INRIA, report, mar. 2014.
- [8] R. Baldessari, M. Deegener, A. Festag, y T. Kosch, «Overview of the C2C-CC System», CAR 2 CAR Communication Consortium, 1.1, ago. 2007.
- [9] R. Bossom *et al.*, «European ITS Communication Architecture Overall Framework Proof of Concept Implementation», mar. 2009.
- [10] «FCC ALLOCATES SPECTRUM IN 5.9 GHZ RANGE FOR INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS USES», *Federal Communications Commission*, 30-dic-2015. [En línea]. Disponible en: <https://www.fcc.gov/document/fcc-allocates-spectrum-59-ghz-range-intelligent-transportation>. [Accedido: 05-mar-2019].
- [11] S. Grafing, P. Mahonen, y J. Riihijarvi, «Performance evaluation of IEEE 1609 WAVE and IEEE 802.11p for vehicular communications», 2010, pp. 344-348.
- [12] A. M. Abdelgader y W. Lenan, «The physical layer of the IEEE 802.11 p WAVE communication standard: the specifications and challenges», en *Proceedings of the world congress on engineering and computer science*, 2014, vol. 2, pp. 22–24.
- [13] IEEE Computer Society, «IEEE Standard for Information technology- Telecommunications and information exchange between systems-Local and metropolitan area networks-Specific requirements Part 11 : Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and

Physical Layer (PHY) Specifications; Amendment 6: Wireless Access in Vehicular Environments», *IEEE Std 80211p*, 2010.

[14] D. Eckhoff, A. Brummer, y C. Sommer, «On the impact of antenna patterns on VANET simulation», en *2016 IEEE Vehicular Networking Conference (VNC)*, 2016, pp. 1-4.

[15] R. L. Jesch, «Measured vehicular antenna performance», *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 34, n.º 2, pp. 97-107, may 1985.

[16] L. Reichardt, T. Fugen, y T. Zwick, «Influence of antennas placement on car to car communications channel», en *2009 3rd European Conference on Antennas and Propagation*, 2009, pp. 630-634.

[17] J. Karedal *et al.*, «Radio Channel Measurements at Street Intersections for Vehicle-to-Vehicle Safety Applications», 2010, pp. 1-5.

[18] M. Gandhi y M. A. Khan, «Performance analysis of metrics of broadcasting protocols in VANET», en *2014 Innovative Applications of Computational Intelligence on Power, Energy and Controls with their impact on Humanity (CIPECH)*, 2014, pp. 315-321.

[19] S. Bolufé Aguila, «Algoritmo distribuido de beaconing basado en el ajuste dinámico de los parámetros de transmisión para Redes Ad-hoc Vehiculares», Thesis, Universidad Central «Marta Abreu» de Las Villas. Facultad de Ingeniería Eléctrica. Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones, 2016.

[20] G. Y. Li, «Adaptive and Opportunistic QoS-based Routing Protocol in VANETs», thesis, Paris 11, 2015.

[21] S. Al-Sultan, M. M. Al-Doori, A. H. Al-Bayatti, y H. Zedan, «A comprehensive survey on vehicular Ad Hoc network», *J. Netw. Comput. Appl.*, vol. 37, pp. 380-392, ene. 2014.

[22] M. Di Felice, A. J. Ghandour, H. Artail, y L. Bononi, «Enhancing the performance of safety applications in IEEE 802.11 p/WAVE Vehicular Networks», en *2012 IEEE International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM)*, 2012, pp. 1–9.

[23] M. Ahyar y R. F. Sari, «Performance evaluation of multi-channel operation for safety and non-safety application on vehicular ad hoc network IEEE 1609.4», *Int. J. Simulation–Systems Sci. Technol.*, vol. 14, n.º 1, pp. 16–22, 2013.

[24] S. J. Elias, M. N. B. M. Warip, R. B. Ahmad, y A. H. A. Halim, «A comparative study of IEEE 802.11 standards for non-safety applications on vehicular ad hoc networks: a congestion control perspective», en *Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science*, 2014, vol. 2, p. 33.

[25] C. D. Wang y J. P. Thompson, «Apparatus and method for motion detection and tracking of objects in a region for collision avoidance utilizing a real-time adaptive probabilistic neural network», US5613039A, 18-mar-1997.

[26] IEEE Computer Society, «IEEE Standard for Information technology–Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks–Specific requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and

Physical Layer (PHY) Specifications», *IEEE Std 80211-2016 Revis. IEEE Std 80211-2012*, dic. 2016.

[27] C. Campolo, A. Molinaro, R. Scopigno, S. Ozturk, y J. M. Mišić, «The MAC Layer of VANET», en *Vehicular ad hoc Networks*, Springer, Cham, 2015, pp. 83-122.

[28] J. B. Kenney, «Dedicated short-range communications (DSRC) standards in the United States», *Proc. IEEE*, vol. 99, n.º 7, pp. 1162–1182, 2011.

[29] ETSI Standard, Intelligent Transport Systems (ITS), «Access layer specification for Intelligent Transport Systems operating in the 5 GHz frequency band», nov. 2012.

[30] Q. Chen, D. Jiang, y L. Delgrossi, «IEEE 1609.4 DSRC multi-channel operations and its implications on vehicle safety communications», en *2009 IEEE Vehicular Networking Conference (VNC)*, 2009, pp. 1-8.

[31] R. M. Scopigno, A. Autolitano, y W. Xiang, «The Physical Layer of VANETs», en *Vehicular ad hoc Networks*, Springer, Cham, 2015, pp. 39-82.

[32] X. Xie, B. Huang, S. Yang, y T. Lv, «Adaptive Multi-Channel MAC Protocol for Dense VANET with Directional Antennas», 2009, pp. 1-5.

[33] N. Betancourt Sánchez y M. Martínez Pérez., «Interfaz para la medición de patrones de radiación de antena», Thesis, Universidad Central «Marta Abreu» de Las Villas, 2007.

[34] C. A. Balanis, *Antenna theory: analysis and design*. John Wiley & Sons, Ltd, 2016.

[35] A. Kwoczek, Z. Raida, J. Lacik, M. Pokorny, J. Puskely, y P. Vagner, «Influence of car panorama glass roofs on Car2Car communication (poster)», en *2011 IEEE Vehicular Networking Conference (VNC)*, 2011, pp. 246-251.

[36] S. Kaul *et al.*, «Effect of Antenna Placement and Diversity on Vehicular Network Communications», 2007, pp. 112-121.

[37] D. Kornek, M. Schack, E. Slotke, O. Klemp, I. Rolfes, y T. Kurner, «Effects of Antenna Characteristics and Placements on a Vehicle-to-Vehicle Channel Scenario», en *2010 IEEE International Conference on Communications Workshops*, 2010, pp. 1-5.

[38] J. Volakis, *Antenna Engineering Handbook, Fourth Edition*, Edición: 4. New York: McGraw-Hill Education, 2009.

[39] Edith Condo Neira, «Antenna Evaluation for Vehicular Applications in Multipath Environment», Degree of Licentiate of Engineering, Communication System Group Department of Signals and Systems Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2017.

[40] J. McLean, R. Sutton, y R. Hoffman, «Interpreting Antenna Performance Parameters for EMC Applications», *TDK RF Solution*, 2016.

[41] A. Thiel, O. Klemp, A. Paiera, L. Bernadó, J. Karedal, y A. Kwoczek, «In-situ vehicular antenna integration and design aspects for vehicle-to-vehicle communications», en *Proceedings of the Fourth European Conference on Antennas and Propagation*, 2010, pp. 1–5.

- [42] C. V. S. C. Consortium, «Vehicle safety communications project: Task 3 final report: identify intelligent vehicle safety applications enabled by DSRC», *Natl. Highw. Traffic Saf. Adm. US Dep. Transp. Wash. DC*, 2005.
- [43] ETSI Standard, Intelligent Transport Systems (ITS), «European Profile Standard on the Physical and Medium Access Layer of 5 GHz ITSs». 2009.
- [44] M. Boban y P. M. d'Orey, «Exploring the practical limits of cooperative awareness in vehicular communications», *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 65, n.º 6, pp. 3904–3916, 2016.
- [45] P. M. d'Orey y M. Boban, «Empirical evaluation of cooperative awareness in vehicular communications», en *2014 IEEE 79th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, 2014, pp. 1–5.
- [46] M. Boban y P. M. d'Orey, «Measurement-based evaluation of cooperative awareness for V2V and V2I communication», en *2014 IEEE Vehicular Networking Conference (VNC)*, 2014, pp. 1–8.
- [47] R. K. Schmidt, T. Leinmuller, E. Schoch, F. Kargl, y G. Schafer, «Exploration of adaptive beaconing for efficient intervehicle safety communication», *IEEE Netw.*, vol. 24, n.º 1, pp. 14–19, 2010.
- [48] ETSI Standard, «Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Definitions». jun-2009.
- [49] J. Lee y B. Park, «Development and evaluation of a cooperative vehicle intersection control algorithm under the connected vehicles environment», *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 13, n.º 1, pp. 81–90, 2012.
- [50] J. Ploeg, A. F. Serrarens, y G. J. Heijenk, «Connect & Drive: design and evaluation of cooperative adaptive cruise control for congestion reduction», *J. Mod. Transp.*, vol. 19, n.º 3, pp. 207–213, 2011.
- [51] ETSI Standard, «Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Part 2: Specification of Cooperative Awareness Basic Service». 2014.
- [52] Y. Li *et al.*, «Modeling and simulation for microscopic traffic flow based on multiple headway, velocity and acceleration difference», *Nonlinear Dyn.*, vol. 66, n.º 1, pp. 15–28, oct. 2011.
- [53] J. Breu, A. Brakemeier, y M. Menth, «Analysis of cooperative awareness message rates in vanets», en *2013 13th International Conference on ITS Telecommunications (ITST)*, 2013, pp. 8–13.
- [54] C. Sommer, D. Eckhoff, R. German, y F. Dressler, «A computationally inexpensive empirical model of IEEE 802.11 p radio shadowing in urban environments», en *2011 Eighth International Conference on Wireless On-Demand Network Systems and Services*, 2011, pp. 84–90.
- [55] José María Hernández Rábanos, *TRASMISIÓN POR RADIO*. La Habana, Cuba: EDITORIAL UNIVERSITARIA FÉLIX VARELA, 2015.

- [56] T. S. Rappaport, *Wireless communications: principles and practice*, vol. 2. prentice hall PTR New Jersey, 1996.
- [57] C. Sommer, S. Joerer, y F. Dressler, «On the applicability of two-ray path loss models for vehicular network simulation», en *2012 IEEE Vehicular Networking Conference (VNC)*, 2012, pp. 64–69.
- [58] S. Moser, S. Eckert, y F. Slomka, «An approach for the integration of smart antennas in the design and simulation of vehicular ad-hoc networks», 2012, pp. 36-41.
- [59] «Vehicles in Network Simulation». [En línea]. Disponible en: <http://veins.car2x.org/>.
- [60] «Sitio Web OpenStreetMap». [En línea]. Disponible en: <http://www.openstreetmap.org/>.
- [61] «OMNeT++ Simulator». [En línea]. Disponible en: <http://www.omnetpp.org/>.
- [62] «Simulation of Urban Mobility». [En línea]. Disponible en: <http://sumo.sourceforge.net/>.
- [63] F. K. Karnadi, Z. H. Mo, y K. Lan, «Rapid Generation of Realistic Mobility Models for VANET», en *2007 IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, 2007, pp. 2506-2511.
- [64] J. Breu, A. Brakemeier, y M. Menth, «A quantitative study of Cooperative Awareness Messages in production VANETs», *EURASIP J. Wirel. Commun. Netw.*, vol. 2014, n.º 1, p. 98, 2014.
- [65] S. Krauss, P. Wagner, y C. Gawron, «Metastable states in a microscopic model of traffic flow», *Phys. Rev. E*, vol. 55, n.º 5, pp. 5597-5602, may 1997.
- [66] J. A. Casanova Rodríguez, «Evaluación de los protocolos IEEE 802.11p/1609.4 en entornos VANETs usando un modelo de movilidad realista», Thesis, Universidad Central «Marta Abreu» de Las Villas. Facultad de Ingeniería Eléctrica. Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones, 2016.

Anexos

Anexo I. Función que calcula el número de terminales ocultos

```
void BasePhyLayer::HiddenTerminalFinder(AirFrame *frame){
// creación de variables que se usan en la función
double Hr; //Altura de la antena receptora
double Ht; //Altura de la antena transmisora
double HideTermDis=0; //Inicio del rango del terminal oculto (distancia)
double Prx; //Potencia del nodo receptor (sensibilidad)
double Ptx; //Potencia del nodo transmisor
double Gamma_dto; //Valor umbral gamma que permite la decodificación exitosa
double Mi; //Coeficiente de pérdidas por trayectoria
double dist; //Distancia entre el nodo trasmisor y el receptor
long statNumbHidenterminl; //Número de terminales ocultos

//Se obtienen los datos de movilidad del nodo trasmisor
POA& senderPOA=frame->getPoa();

//se obtienen los datos de movilidad referentes al nodo receptor
BaseMobility* ownMobility = ChannelMobilityAccessType::get(this->getParentModule());
Coord ownPos = ownMobility->getCurrentPosition();
Coord ownOrient = ownMobility->getCurrentOrientation();

// se calculan las ganancias de las antenas receptora y trasmisora
double ownGain = antenna->getGain(ownPos, ownOrient, senderPOA.pos);
double otherGain = senderPOA.antenna->getGain(senderPOA.pos, senderPOA.orientation,
ownPos);

// mensaje con las ganancias de las antenas receptora y trasmisora
coreEV << "Sender's antenna gain: " << otherGain << endl;
coreEV << "Own (receiver's) antenna gain: " << ownGain << endl;

// se obtienen los valores referentes al escenario (.ini)

Ptx = par("TrasmissionPower").doubleValue();
Prx = par("sensitivity").doubleValue();
Prx = FWMath::dBm2mW(Prx);
Gamma_dto = par("gamma_dto").doubleValue();
double Mi = par("mi").doubleValue();
Hr = ownPos.z;
Ht = senderPOA.pos.z;

// mensaje con los valores de potencia y sensibilidad
coreEV << "RECEPTION POWER" << Prx << " mW"<< endl;
coreEV << "TRASMITION POWER " << Ptx << " mW"<< endl;
```

```

// Calculo de la Dto para una determinada dirección
HideTermDis=(sqrt(Hr*Ht*sqrt((Ptx*ownGain*otherGain)/Prx)))/(1+pow(Gamma_dto,(1/Mi)));

// mensaje con la Dto
coreEV << "The Distance from the Hide Terminal is " << HideTermDis << endl;

// Calculo de la distancia entre los nodos
const Coord senderPosition(senderPOA.pos.x, senderPOA.pos.y);
const Coord receiverPosition(ownPos.x, ownPos.y);
dist = senderPosition.distance(receiverPosition);

// Condición que prueba si el nodo está en el área de terminales ocultos
if (dist > HideTermDist){
    statNumbHideterminl++;
coreEV << "One more Hidden Terminal" << endl;}

```

Anexo II. Modificaciones a la capa PHY

```

void BasePhyLayer::initialize(int stage) {

//Función encargada de inicializar las características de cada nodo creado en //el
escenario
    ChannelAccess::initialize(stage);{
        //se crea el Contador de terminales ocultos y se inicializa al crearse un nodo
        statNumbHideterminl=0;
        (...)
    }

}

void BasePhyLayer::finish(){
    // Función encargada de finalizar cada nodo creado
    recordScalar("NumberOfHiddenTerminal",statNumbHideterminl);//guarda el escalar

    decider->finish();

    (...)
}

}

```

Anexo III. Función que calcula el EPPReal

```

void BasePhyLayer::EPPReal(AirFrame *frame){

    double velocityTx;//Velocidad del nodo transmisor
    double velocityRx;//Velocidad del nodo receptor
    double velocityRxTx;//Velocidad relativa entre el nodo Rx y Tx
    double RxAngle;//Ángulo relativo al receptor
    double TxAngle;//Ángulo relativo al transmisor
    double acceleration;//Aceleración

```

```

    double EPPRealValue;//Error de Posición promedio guardado como vector
    double Ib=par("Ib").doubleValue();//Intervalo de Beacon
    double Cp;//Número de paquetes perdidos consecutivamente
    double DTxRx;//Demora de transmisión recepción

//Se obtienen los datos de movilidad del nodo trasmisor(Tx)
POA& senderPOA = frame->getPoa();//Se obtienen datos de posición Tx
cModule *sender=frame->getSenderModule(); //Se obtiene un puntero al Tx
velocityTx = sender->getSpeed();//Se obtiene la velocidad del nodo Tx

//Se obtienen los datos de movilidad referentes al nodo receptor(Rx)
BaseMobility* ownMobility=ChannelMobilityAccessType::get(this->getParentModule());
Coord ownPos = ownMobility->getCurrentPosition();
Coord ownOrient = ownMobility->getCurrentOrientation();

//se obtiene la velocidad relativa entre los dos nodos
velocityRx = BasetraciUtil->getSpeed();//Se obtiene la velocidad del nodo receptor

//se obtiene la demora de TxRx
Signal& s = frame->getSignal();
simtime_t delay = simTime() - s.getSendingStart();
DTxRx=delay.dbl();

//se obtienen los ángulos relativos entre el Tx y el Rx
RxAngle= getRelativeAngle(ownPos, ownOrient, senderPOA.pos);
TxAngle= getRelativeAngle(senderPOA.pos, senderPOA.orientation, ownPos);

//Se calcula la velocidad relativa entre el Tx y el Rx y el valor de Cp
velocityRxTx=getRelativeVelocity(velocityRx, velocityTx, RxAngle, TxAngle);
acceleration = BasetraciUtil->getAcceleration();//Se asume aceleración constante
Cp=MacPerdConsec->getCp();

EPPRealValue= (velocityRxTx*DTxRx + Ib*(Cp+1)*(velocityRxTx +
(acceleration*Ib*(Cp+1))/2) + DTxRx *(acceleration*Ib*(Cp+1)*velocityRxTx))/2;

simtime_t tr = simTime();//Se obtiene estampa de tiempo
EPPRealValueVect.recordWithTimestamp(tr, EPPRealValue); //Se guarda un vector con
//los valores de EPPReal
//y una estampa de tiempo
}

```

Anexo IV. Función que calcula el ángulo entre los vehículos

```

double BasePhyLayer::getRelativeAngle(Coord ownPos, Coord ownOrient, Coord otherPos) {
    // Cálculo de la línea de vista
    Coord los = otherPos - ownPos;
    // Cálculo del ángulo entre los vehículos
    double angle = atan2(los.y, los.x) - atan2(ownOrient.y, ownOrient.x);

    // Comprobar que el ángulo este entre:[0, 2*PI)
    angle = fmod(angle, 2*M_PI);//fmod(x,y) Devuelve el resto de la división entre x/y
    if (angle < 0)
        angle += 2*M_PI;

    return angle;
}

```

Anexo V. Función que calcula la velocidad relativa entre dos nodos

```
double BasePhyLayer::getRelativeVelocity(double VRx, double VTx, double RxAngle,
double TxAngle) {
    // Se asume que las velocidades son vectores y se suman vectorialmente
    double Vr=0;
    double velocityX=0;
    double velocityY=0;

    velocityX=VTx*cos(TxAngle)-VRx*cos(RxAngle); // Suma de las componentes del eje X
    velocityY=VTx*sin(TxAngle)-VRx*sin(RxAngle); // Suma de las componentes del eje Y
    Vr=std::sqrt(pow(velocityX,2)+pow(velocityY,2)); // Se calcula el valor absoluto
    return Vr;
}
```