



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

MECANISMO DE CONTROL DE RETRANSMISIÓN EN COMUNICACIÓN
COOPERATIVA ORIENTADO A INCREMENTAR LA SEGURIDAD VIAL EN
INTERSECCIONES VEHICULARES.

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA
INGENIERÍA, MENCIÓN ELÉCTRICA.

PABLO ANDRÉS ORTEGA MUÑOZ

PROFESORA GUÍA:
SANDRA CÉSPEDES UMAÑA, Ph.D.
PROFESOR CO-GUÍA:
SAMUEL MONTEJO SÁNCHEZ, Ph.D.

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
CESAR AZURDIA-MEZA, Ph.D.
EVELIO M. GARCIA FERNANDEZ, Ph.D.

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por ERANET-LAC ELAC2015/T10-0761.

SANTIAGO DE CHILE

2020

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA, MENCIÓN ELÉCTRICA.
POR: PABLO ANDRÉS ORTEGA MUÑOZ
FECHA: 2020
PROF. GUÍA: SANDRA CÉSPEDES UMAÑA, Ph.D.
PROF. CO-GUÍA: SAMUEL MONTEJO SÁNCHEZ, Ph.D.

MECANISMO DE CONTROL DE RETRANSMISIÓN EN COMUNICACIÓN
COOPERATIVA ORIENTADO A INCREMENTAR LA SEGURIDAD VIAL EN
INTERSECCIONES VEHICULARES.

En escenarios vehiculares, y en particular en las intersecciones urbanas, la línea de vista entre los vehículos a menudo se ve afectada por obstáculos como edificios, vehículos estacionados o en movimiento o inclusive de la vegetación que puede existir en las esquinas de una intersección. Esta obstaculización trae consigo un impacto negativo en la capacidad de los sistemas de seguridad vial para detectar vehículos vecinos que se aproximan a la intersección. De igual manera, en casos en donde los vehículos cuentan con dispositivos de comunicación inter-vehicular, los efectos causados por obstáculos llevan a una degradación del rendimiento en la conectividad debido a la atenuación severa de las señales de transmisión.

En esta tesis, se propone un mecanismo de retransmisión eficiente y robusto, cuyas decisiones estén condicionadas por la distancia de los vehículos a la intersección, permitiendo incrementar la probabilidad de entrega exitosa de paquetes, así como extender la distancia y el tiempo previo de notificación de eventos. El empleo de este mecanismo permite además reducir notablemente la carga del canal, en comparación a las demandas de capacidad de los mecanismos clásicos de retransmisión. El mecanismo propuesto está respaldado por el análisis experimental del comportamiento de un mecanismo de *beaconing* adaptativo evaluado en las comunicaciones vehiculares bajo diferentes entornos en donde se intercambian mensajes para construir conocimiento del entorno de forma cooperativa.

A mis padres y mi hermana, pilares fundamentales en mi vida.

Agradecimientos

Es ingenuo afirmar que los logros y metas que alcanzamos son netamente personales. Para mí alcanzar este logro tan importante, no solo es producto de mi esfuerzo, sino una contribución de muchas personas quienes me han brindado su apoyo, su conocimiento, su amor, su amistad y han dado lo mejor de sí, para que hoy pueda dar un paso más en mi formación académica.

Quiero agradecer en primer lugar, a mis padres y mi hermana. Cuando les conté sobre la decisión de realizar un postgrado fuera del país me dieron todo su apoyo. Para todos fue difícil que estuviera lejos de casa. Aprendí a valorar su compañía, esos pequeños detalles como es el llegar a casa y que te pregunten ¿cómo te fue hoy?. Realmente, cuando se tiene a la familia lejos y se está solo, se comprende y valora mucho más la importancia de nuestra familia. A ellos, gracias por su amor y apoyo en cada momento de mi vida.

Agradezco a Vanessa por darme ánimo cada vez que hablábamos, por apoyarme en esta decisión, por esperarme durante este par de años. Gracias por ser mi amiga, mi compañera y apoyo incondicional.

Gracias a todos los compañeros del laboratorio de comunicaciones avanzadas, por ese buen clima en el espacio, por esas tardes de charla sobre temas académicos, sociales, políticos o deportivos, son excelentes personas y espero que la vida les siga dando muchísimos más éxitos personales y profesionales. Gracias a mis amigos Jeisson y Diego, con quienes se formó una gran amistad y estuvimos apoyándonos durante esta etapa académica. Un especial agradecimiento a Adriana, fue casi un ángel durante este proceso, gracias por tu amistad, tu apoyo y por esas charlas durante el viaje en metro cuando salíamos de la universidad.

Gracias a todos los profesores que formaron parte de este proceso. Fue muy especial conocer una nueva academia. Gracias al profesor Cesar, por su apoyo, por permitirme ser auxiliar en su curso, por enseñarme temas nuevos, por estar pendiente de mi proceso académico y como olvidar el invitarme a jugar fútbol. Gracias a Sandy por sus enseñanzas, por apoyarme en mi tema de investigación y explicarme cada vez que tenía alguna duda. Gracias a Samuel, admiro de él su nobleza, su calma, es una persona que al verla transmite tranquilidad y paz. Gracias por sus enseñanzas, por corregirme durante este proceso como co-guía en esta tesis. A todos ellos gracias infinitas.

Por último, quiero agradecer a mi Profesora guía Sandra. Las palabras jamás alcanzarán para agradecerle. Desde el primer momento me brindó su apoyo, respondiendo el correo sobre la postulación, los planes académicos de la universidad, la posibilidad de una beca y el

aceptarme como su estudiante en caso de ser admitido a la universidad. Gracias profesora por su apoyo, por su tiempo, por su cordialidad, por ser como es. Gracias infinitas por haberme brindado esta oportunidad.

Tabla de Contenido

1. Introducción	4
1.1. Motivación y Antecedentes	6
1.2. Definición del problema	7
1.3. Hipótesis	8
1.4. Objetivos	9
1.4.1. Objetivo general	9
1.4.2. Objetivos específicos	9
1.5. Metodología y herramientas	9
1.5.1. Metodología	9
1.5.2. Herramientas	10
2. Marco teórico y estado el arte	13
2.1. Definición	13
2.2. Arquitectura de redes vehiculares	13
2.2.1. Características VANET	15
2.2.2. Aplicaciones	16
2.3. Estándares y protocolos en <i>VANETs</i>	18
2.4. Dedicated Short-Range Communications (DSRC) - Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE)	18
2.4.1. Capa física (PHY Layer)	20
2.4.2. Capa MAC	22
2.4.3. IEEE 1609	22
2.4.4. Descripción de los conjuntos de mensajes	22
2.5. Comunicación cooperativa inter-vehicular	27
2.5.1. Taxonomía	27
2.5.2. Diseño <i>cross-layer</i> para <i>beaconing</i> adaptativo	28
2.5.3. Métricas de desempeño	28
2.5.4. Importancia del conocimiento cooperativo	29
3. Evaluación experimental	32
3.1. Introducción	32
3.2. Modelo analítico de algoritmo de <i>beaconing</i> adaptativo	34
3.3. Pruebas experimentales y escenarios de evaluación	36
3.3.1. Mediciones de cobertura	37
3.3.2. Pruebas en ambiente controlado	37
3.3.3. Pruebas de <i>beaconing</i> en entornos vehiculares reales	43

4. Mecanismo propuesto: $RCLD_{Px}$ mecanismo de retransmisión en intersecciones vehiculares	60
4.1. Prueba de concepto: RSU como nodo de retransmisión simple	62
4.2. Modelo de propagación NLOS en intersecciones	65
4.2.1. Modelo analítico	71
4.3. Propuesta de mecanismo de control de retransmisión	74
4.3.1. Evaluación del mecanismo propuesto	78
4.3.2. Análisis: Métricas de Evaluación	80
4.3.3. Discusión de Resultados	82
5. Conclusiones y trabajo futuro	93
5.1. Conclusiones y discusión	93
5.2. Trabajo Futuro	94
6. Anexos	95
6.1. Publicaciones relacionadas a la tesis	95
6.2. Códigos	95
Bibliografía	96

Índice de Tablas

2.1. Tasa de datos en un canal OFDM para DSRC y los requisitos de rendimiento del receptor [41].	21
2.2. Descripción IEEE WAVE 1609. Adaptada de [60].	23
2.3. Servicios de seguridad y Requerimiento en casos de uso. Adaptada de [1]. . .	24
2.4. SAE J2735 DSRC Mensaje básico de seguridad Parte, Adaptada [15].	26
2.5. Marco de datos de extensión de seguridad del vehículo, requerido para algunas aplicaciones de seguridad, enviado en la Parte II de algunos <i>BSM</i> , Adaptada de [15]. .	27
2.6. Impacto de métricas y características de desempeño en el conocimiento cooperativo.	29
3.1. Parámetros de configuración experimental - Bicicleta	39
3.2. Parámetros de configuración experimental - Automóvil.	44
3.3. Error de Posición promedio percibido por la <i>OBU</i> receptora.	49
3.4. Error de Posición promedio percibido por la <i>OBU</i> receptora.	54
4.1. Parámetros de simulación.	63
4.2. Métricas de conectividad vehicular.	65
4.3. Notación de términos usados en ecuaciones.	66
4.4. Parámetros de la simulación.	70
4.5. Zonas de interferencia durante la comunicación entre <i>Tx</i> y <i>Rx</i> . (Z_I Zona de interferencia).	75
4.6. Zonas ocultas durante la comunicación entre <i>Tx</i> y <i>Rx</i> . (Z_H = Zona oculta).	75
4.7. Parámetros del escenario de evaluación.	78
4.8. Mecanismos usados en la evaluación comparativa.	80

Índice de Ilustraciones

1.1. Equipos para comunicaciones vehiculares que forman parte del grupo de investigación WiNET: a) Locomate Mobile ME OBU, b) Locomate Classic OBU y c) Locomate RSU . Tomada de [33].	11
2.1. Arquitectura <i>VANETs</i> y sus escenarios de comunicación. Adaptada de [46].	14
2.2. Intercambio de mensajes de seguridad entre vehículos. Adaptada de [15].	19
2.3. Pila de protocolo de la tecnología DSRC. Adaptada de [15].	20
2.4. Designaciones de canales banda 5.9 GHz para DSRC. Adaptada de [57].	22
3.1. Relación de parámetros relevantes que determinan el error de posición. Adaptada de [20].)	33
3.2. Error de posición promedio en metros según la velocidad y frecuencia de transmisión de <i>beacons</i> con un $D_{TbRb} = 0.001$ s.	34
3.3. Tasa de transmisión para generar un error de posición promedio de 1 m según la velocidad y aceleración del vehículo, calculada según la ecuación 3.3 y con una $D_{TbRb} = 0.001$ s	35
3.4. a) Tasa de pérdida de paquetes en función de la distancia entre transmisor y receptor. b) Escenario de evaluación, Parque Ohiggins en Santiago de Chile.	38
3.5. Ilustración de esquema para evaluación de algoritmo de <i>beacon</i> adaptativo usando <i>OBU</i> fija bajo un: a) Esquema con Bicicleta y b) Esquema con Automóvil.	38
3.6. Ilustración de esquema para evaluación de mecanismo de <i>beacon</i> adaptativo usando Bicicleta a) <i>OBU</i> instalada en bicicleta y b) lugar donde se realiza las pruebas.	39
3.7. Ilustración de esquema para evaluación de mecanismo de <i>beacon</i> adaptativo usando Automóvil a) <i>OBU</i> instalada en vehículo y b) lugar donde se realiza las pruebas.	39
3.8. Parámetros con transmisión fija $f_{T_b} = 1$ Hz. a) Velocidad y Aceleración del vehículo transmisor. b) Error de posición promedio percibido por el receptor.	40
3.9. Parámetros con transmisión fija $f_{T_b} = 5$ Hz. a) Velocidad y Aceleración del vehículo transmisor. b) Error de posición promedio percibido por el receptor.	40
3.10. $E_{promedio}$ percibido por la <i>OBU</i> fija usando frecuencia de transmisión adaptativa f_b	41
3.11. E_{prom} y E_{pmax} percibido por el nodo fijo durante la comunicación, cuando la unidad transmisora esta instalada en: a) bicicleta y b) vehículo.	42
3.12. E_{prom} y E_{pmax} percibido por el nodo fijo durante la comunicación obtenido en a) simulación [7] y b) comparación de error promedio.	42
3.13. Ilustración de esquema para evaluación de mecanismo de <i>beaconing</i> adaptativo en escenarios con: a) vehículos en igual sentido b) vehículos en sentido opuesto y c) vehículos en una intersección sin linea de vista.	43

3.14. Ubicación de la <i>OBU</i> en los vehículos de prueba (Altura aproximada 1.45m).	44
3.15. Ilustración de esquema para evaluación del mecanismo de <i>beacon</i> adaptativo.	44
3.16. Escenario en el que se realiza las pruebas donde los automóviles viajan en el mismo sentido: a) vista frontal y b) vista superior.	45
3.17. Automóviles usados en las pruebas experimentales: a) automóvil <i>Tx</i> - <i>OBU Tx</i> y b) automóvil <i>Rx</i> - <i>OBU Tx</i>	45
3.18. a). Vista interior desde el vehículo <i>Tx</i> b) Vista superior de escenario donde los vehículos viajan en el mismo sentido.	46
3.19. a) Velocidad y aceleración del vehículo <i>Tx</i> en función del tiempo y b) Intervalo de beacons y tasa de beacons del vehículo <i>Tx</i> en función del tiempo	46
3.20. a) E_{prom} percibido por <i>OBU Rx</i> con una tasa de transmisión de <i>OBU Rx</i> de 10 <i>beacons/s</i> y b) E_{prom} percibido por <i>OBU Rx</i> con una tasa de transmisión de <i>OBU Rx</i> de 5 <i>beacons/s</i>	47
3.21. a) E_{prom} percibido por <i>OBU Rx</i> con una tasa de transmisión de <i>OBU Rx</i> de 1 <i>beacons/s</i> y b) Intervalo de <i>beacons</i> vs Tasa de <i>beacons</i> del vehículo transmisor	47
3.22. a) Velocidad y aceleración del vehículo <i>Tx</i> en función del tiempo y b) Intervalo de <i>beacons</i> y tasa de <i>beacons</i> adaptativa del vehículo <i>Tx</i>	48
3.23. Error de posición E_{prom} percibido por la <i>OBU Rx</i> para una tasa de transmisión de la unidad <i>OBU Tx</i> : a) 10 <i>beacon/s</i> y b) 5 <i>beacon/s</i>	48
3.24. Error de posición E_{prom} percibido por la <i>OBU Rx</i> para una tasa de transmisión de <i>beacons</i> de la unidad <i>OBU Tx</i> : a) 10 <i>beacon/s</i> y b) Adaptativa.	49
3.25. a). Vista interior desde el vehículo <i>Tx</i> b) Vista superior de escenario donde los vehículos viajan en sentido opuesto.	50
3.26. a) Velocidad y aceleración del vehículo <i>Tx</i> en función del tiempo y b) Intervalo de <i>beacons</i> vs Tasa de <i>beacons</i> del vehículo transmisor.	50
3.27. Error de posición E_{prom} percibido por la <i>OBU Rx</i> para una tasa de transmisión de: a) 10 <i>beacon/s</i> y b) 5 <i>beacon/s</i> de la <i>OBU Tx</i>	51
3.28. a) E_{prom} percibido por <i>OBU Rx</i> con una tasa de transmisión de <i>OBU Rx</i> de 1 <i>beacons/s</i> y b) Intervalo de <i>beacons</i> vs Tasa de <i>beacons</i>	51
3.29. a) Velocidad y aceleración del vehículo <i>Tx</i> en función del tiempo y b) Intervalo de <i>beacons</i> y tasa de <i>beacons</i> adaptativa del vehículo <i>Tx</i>	52
3.30. E_{prom} percibido por <i>OBU Rx</i> con una tasa de transmisión de <i>OBU Rx</i> de: 10 <i>beacons/s</i> y b) 5 <i>beacons/s</i>	52
3.31. a) E_{prom} percibido por <i>OBU Rx</i> con una tasa de transmisión de la <i>OBU Tx</i> de 1 <i>beacons/s</i> y b) Intervalo de <i>beacons</i> y tasa de <i>beacons</i> adaptativa del vehículo <i>Tx</i>	53
3.32. Distancia y tasa de recepción del vehículo <i>Rx</i> respecto al vehículo <i>Tx</i> a una tasa de: a) 5 <i>beacons/s</i> y b) 10 <i>beacons/s</i>	53
3.33. Relación entre la distancia y la tasa de recepción percibida en el vehículo <i>Rx</i> en relación al vehículo <i>Tx</i> para una tasa de: a) 5 <i>beacons/s</i> y b) 10 <i>beacons/s</i>	54
3.34. Vista lateral superior de los escenarios de prueba para las mediciones experimentales en intersección: a) ITI San Juan Bosco, Colombia. b) Edificio Beauchef, Universidad de Chile, Chile.	56
3.35. Vista lateral superior de escenarios de intersección: a) ITI San Juan Bosco, Colombia. b) Edificio Beauchef, Universidad de Chile, Chile.	56
3.36. Tasa de pérdida de paquetes en función de la distancia entre <i>OBU Tx</i> y <i>OBU Rx</i> . a) <i>OBU Rx</i> se ubica fija a 30m de la intersección, b) <i>OBU Rx</i> ubica fija a 90m de la intersección (Edificio ITI San Juan Bosco, Colombia.)	57

3.37. a) Tasa de pérdida de paquetes en función de la distancia entre emisor y receptor. a) <i>OBU Rx</i> se ubica fija a 30m de la intersección, b) <i>OBU Rx</i> ubica fija a 70m de la intersección (Edificio Beauchef, Chile).	57
4.1. Intersecciones: a) La línea de visión entre vehículos a menudo se ve afectada por obstáculos como los edificios, b) distancias de frenado a velocidades típicas en entornos urbanos en condiciones climáticas variables.	61
4.2. La utilización de RSU como nodo de retransmisión puede aumentar la conciencia cooperativa en aplicaciones de seguridad vehicular.	61
4.3. Escenario de evaluación visto desde: a) Google Earth, b) SUMO, c) OMNeT++ sin RSU, d) OMNeT++ con RSU.	62
4.4. Número de <i>beacons</i> recibidos (NBR) por el nodo 0 como función de posición en diferentes ubicaciones de la intersección para diferentes exponentes de pérdida: a) $\alpha = 2.8$, b) $\alpha = 3.0$, y c) $\alpha = 3.5$	64
4.5. Tiempo de recepción del beacon (BRT) desde el nodo 0 como una función de la posición en la intersección para diferentes exponentes de pérdida: a) $\alpha = 2.8$, b) $\alpha = 3.0$, c) $\alpha = 3.5$	64
4.6. Parámetros básicos del modelo de pérdida en intersección.	67
4.7. Ubicación de la Intersección (Latitud 32°32.46"N - Longitud 76°32'3.35.°), ancho de la calle de $Tx = 18m$, a) Distancia de $Tx = 30 m$ al punto de la intersección, b) Distancia de $Tx = 90 m$ al punto de la intersección. (La curva azul representa las mediciones tomadas con las OBU's, mientras que la curva naranja corresponde al modelo de propagación con las mismas características).	69
4.8. Rango de comunicación y de detección de un vehículo transmisor.	70
4.9. Potencia de recepción del receptor según la ecuación 4.3. Región de comunicación en la intersección (amarillo) y Región de detección en la intersección (café).	71
4.10. Carretera urbana: Abstracción de topología.	72
4.11. Esquema propuesto: División en la intersección por zonas según de acuerdo al rango de comunicación y detección del nodo receptor.	74
4.12. Esquemas de retransmisión en intersecciones: a) La línea de visión entre los vehículos Tx y Rx [26], b) Retransmisión mediante codificación de red. Aquí los paquetes se codifican con la operación XOR y el paquete codificado se usa para la retransmisión [97].	80
4.13. Carga promedio de canal normalizada respecto a RS según diferentes posiciones del nodo transmisor: a) Z_1t , b) Z_2t	83
4.14. Carga promedio de canal normalizada respecto a RS según diferentes posiciones del nodo transmisor: a) Z_3t , b) Z_4t , c) Z_5t , d) Z_it	84
4.15. Carga promedio de canal normalizada respecto a NC de acuerdo con diferentes posiciones del nodo transmisor con respecto a diferentes zonas del nodo receptor: a) Z_1t , b) Z_2t , c) Z_3t , d) Z_4t , e) Z_5t , f) Z_it	86
4.16. Packet Delivery Ratio: de acuerdo a las zonas de los nodos de transmisión a) Z_1t y b) Z_5t respecto a las zonas Z_{1r} de los nodos receptores con diferentes densidades vehiculares en el área de transmisión: MuyBaja, Baja, Media, Alta.	88
4.17. Packet Delivery Ratio: según zonas del nodo transmisor $Z_{[1 : 5]t}$ respecto a las zonas Z_{1r} del nodo receptor con diferentes densidades vehiculares en las áreas de transmisión: a) MuyBaja, b) Baja, c) Media, d) Alta.	89

4.18. Packet Delivery Ratio: de acuerdo a las zonas de los nodos de transmisión $Z_{[1 : 2]t}$ respecto a las zonas $Z_{[1 : 4]r}$ de los nodos receptores con diferentes densidades vehiculares en el area de transmisión: a) MuyBaja, b) Baja, c) Media, d) Alta.	90
4.19. Packet Delivery Ratio: de acuerdo a las zonas de los nodos de transmisión $Z_{[4 : 5]t}$ respecto a las zonas $Z_{[1 : 2]r}$ de los nodos receptores con diferentes densidades vehiculares en el area de transmisión: a) MuyBaja, b) Baja, c) Media, d) Alta.	91

Acrónimos

ABS Anti-locking Braking System

AU Aplication Unit

BPSK Binary Phase Shift Keying

BRT Beacon Reception Time

BSM Basic Safety Message

BSS Basic Set Services

CAM Cooperative Awareness Message

CCH Control Channel

CEN European Committee for Standardization

CSMA-CA Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance

CSR Common Security Request

DENM Decentralized Environmental Notification Messages

DSRC Dedicated Short-Range Communications

ESP Electronic Stability Programme

ETSI European Telecommunications Standards Institute

FCC Federal Communications Commission

FCW Forward Collision Warning

FEC Forward Error Correction

GPS Global Position System

ICA Intersection Collision Announcement

IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers

ITS Intelligent Transportation Systems

IP Internet Protocol

IVC Inter-Vehicular Communication

LAN Local Area Network

LDM Logical Data Model

LLT Link Life Time

LOS Line Of Sight

MAC Media Access Control

MANET Mobile Networks

MAP Map Data

MFC Message Frequency Control

NBR Number of Beacons Received

NLOS Non Line Of Sight

OBU On Board Unit

OFDM Orthogonal Frequency Division Multiplexing

OMNeT++ Objective Modular Network Testbed in C++

OMS Organización Mundial de la Salud

ISO International Organization for Standardization

PDR Packet Delivery Ratio

PHY Physical

PLCP Physical Layer Convergence Procedure

PMD Physical Medium Dependent

PVD Probe Vehicle Data

RSA Road Side Alert

RSSI Received Signal Strength Indicator

RSU Road Side Unit

SAE Society of Automotive Engineers

SNR Signal-to-Noise Ratio

SPaT Signal Phase and Timing

SCH Service Channel

SUMO Simulation of Urban MObility

TCP Transmission Control Protocol

TPC Transmit Power Control

V2I Vehicle to Infrastructure

V2V Vehicle to vehicle

VANETs Vehicular *Ad Hoc* Networks

VEINS Vehicles In Network Simulation

UDP User Datagram Protocol

VSCC Vehicle Safety Communications Consortium

WAVE Wireless Access in Vehicular Enviroments

WSA Wave Service Advertisement message

WSM Wave Safety Message

Capítulo 1

Introducción

El aumento del número de vehículos en los escenarios urbanos ha traído consigo un crecimiento en la congestión vehicular, los accidentes y la contaminación ambiental, los cuales se han convertido en problemas importantes dentro de las diferentes ciudades a nivel global. El aumento de accidentes vehiculares, por su parte, demandan enormes pérdidas de vidas humanas y de bienes. Según informó la Organización Mundial de la Salud (OMS) en 2015, más de 100 millones de personas murieron en accidentes de tránsito, lo que generó en todo el mundo pérdidas económicas que ascienden a los quinientos mil millones de dólares [1].

Estos accidentes vehiculares, se presentan mayormente en las intersecciones, donde el flujo vehicular se mueve en diversas direcciones, y surgen conflictos de mayor o menor peligrosidad en función de las maniobras permitidas [2]. Los accidentes son causados en su mayoría por la falta de planeación y diseño de las intersecciones, errores humanos, falta de señalización y visibilidad entre los vehículos, regulación e incumplimiento de las normas de tránsito por parte de los usuarios lo que permite una alteración en la circulación y la seguridad vial [3].

Es por ello que, la seguridad vial representa una de las principales preocupaciones no solo para la industria automovilística si no también para agencias gubernamentales y no gubernamentales. Hasta hace pocos años, el interés principal en este campo fueron los sistemas de seguridad pasiva ¹ (p.e., chasis, cinturones de seguridad, airbag, entre otros) que permiten mitigar el impacto y aumentan la probabilidad de supervivencia de los usuarios ante una colisión vehicular. No obstante, a pesar de los enormes esfuerzos en la mejora de los sistemas actuales de seguridad, tales como control de estabilidad (ESP, por sus siglas en inglés) o sistemas antibloqueo (ABS, por sus siglas en inglés), el número de lesiones y muertes en accidentes de tráfico sigue aumentando.

En la actualidad en los vehículos se ha incorporado también diferentes sistemas de sensores ultrasónicos para la asistencia del parqueo, cámaras que se utilizan para monitorear el carril o detectar peatones, tecnología de radar que permite la detección y medición de distancia

¹En relación con los automóviles existen dos tipos de seguridad: la activa y la pasiva. Se diferencian entre sí por el tipo de función específica que cada una de ellas cumple. Mientras la función principal de la seguridad activa es prevenir accidentes, la seguridad pasiva tiene como objetivo reducir las posibles secuelas en los pasajeros y los vehículos en caso de un accidente.

respecto a los vehículos u obstáculos cercanos, entre otros [4]. Sin embargo, estos sensores tienen limitaciones, por ejemplo, el desempeño de estas tecnologías de detección puede verse afectado por factores naturales como la nieve, la lluvia y neblina, entre otros. Así, en el caso de los sensores ultrasónicos de aparcamiento las ondas sonoras pueden pasar por alto los objetos más pequeños tales como postes o bolardos y pueden perder objetos periféricos que no están directamente detrás del vehículo, tales como un andén.

Así, la comunicación cooperativa entre vehículos (IVC, por sus siglas en inglés) se presenta como la base de múltiples casos de uso de aplicaciones para la seguridad vial y gestión del tráfico. Una manera eficiente de mejorar la seguridad vial es mediante el intercambio en tiempo real de información de estado (velocidad, aceleración, posición, entre otros) entre los vehículos. La comunicación cooperativa se basa en el intercambio periódico de mensajes llamados *beacons*, los cuales contienen datos importantes de estado que son enviados vía *broadcast* a los vehículos vecinos. Con ello se pretende proporcionar a cada vehículo datos referentes a los vehículos que se encuentren en su zona de influencia, especialmente de los que no estén en su campo visual, para alertarles de posibles peligros en la carretera con tiempo suficiente para que puedan reaccionar y evitar dichos peligros [5]. Cuando se confía en este intercambio de mensajes, la información tardía o faltante (causada, por ejemplo, por mensajes perdidos) puede ocasionar graves accidentes [5]. De ahí que para estos sistemas de comunicación sea importante tener en cuenta que la periodicidad con la que se envían los *beacons* debe ajustarse a las condiciones y requerimientos del canal de comunicación, ya que una alta frecuencia de *beaconing* puede traer consigo problemas de saturación en el canal que termina causando colisiones y pérdidas en la transmisión de los mensajes [6, 7].

En las comunicaciones vehiculares los efectos de sombreado, desvanecimiento, atenuación de la señal, entre otros, causado por obstáculos tales como edificios, árboles y vehículos estacionados o en movimiento en las intersecciones representan una afectación drástica en el rango de comunicación de los vehículos. Estas obstrucciones impactan negativamente en la capacidad de los sistemas de seguridad vial para detectar y advertir a los vehículos vecinos sobre aquellos que se encuentran ocultos detrás de la intersección y con los cuales se establece visibilidad o comunicación solo segundos antes del choque, lo que impide una reacción oportuna que permita evitar la colisión o reaccionar y reducir al mínimo los daños [8, 9].

El enfoque de esta tesis radica en aumentar la probabilidad en la recepción del mensaje dentro de la comunicación ínter-vehicular en intersecciones. Los mensajes de estado deben ser recibidos por los vehículos cercanos de manera rápida y confiable, pues garantizar la recepción exitosa de estos mensajes en entornos urbanos, es un requisito de las aplicaciones de seguridad vial y un reto para las soluciones de comunicación [10]. Frente a lo expuesto se hace imperante dar solución a los problemas que puedan estar relacionados con la falta de señalización y visibilidad entre vehículos y, por ende, en su comunicación, permitiendo incrementar la probabilidad de entrega exitosa de paquetes, así como extender la distancia y el tiempo previo de notificación de eventos. Por consiguiente, los protocolos de *beaconing* adaptativo pueden ser de gran utilidad, pues, permiten utilizar de manera eficiente el canal inalámbrico proporcionando comunicaciones confiables entre los vehículos y manteniendo un conocimiento cooperativo actualizado entre los nodos. Así mismo, es necesario proveer un mecanismo para la comunicación ínter-vehicular que permita mejorar la conectividad en estos escenarios, en donde se presenta un mayor número de accidentes en comparación con

otros tipos de escenarios según las estadísticas de tránsito [11–13].

1.1. Motivación y Antecedentes

El crecimiento en el número de vehículos ha hecho que conducir sea una actividad insegura y peligrosa [13]. Por ello, la infraestructura de transporte existente requiere mejorar la seguridad y eficiencia del tráfico. Actualmente está en el proceso de despliegue una normativa que exija la incorporación de dispositivos que facilite establecer una comunicación inalámbrica entre vehículos y con ello permita el intercambio de mensajes entre sí de manera que informen sus características de movilidad de manera periódica [14]. Esta interacción entre vehículos se denomina conocimiento cooperativo inter-vehicular. El conocimiento cooperativo inter-vehicular permite mejorar la seguridad y eficiencia del tráfico gracias al intercambio de mensajes en tiempo real. El intercambio de información mediante la transmisión/recepción periódica de paquetes de un-salto o multi-salto puede ser realizada en el canal de control, utilizando la tecnología de acceso por radio *IEEE 802.11-OCB* (anteriormente denominado como 802.11p) en la banda de frecuencias de 5.9 GHz [15].

Los mensajes transmitidos por cada vehículo incluyen información de posicionamiento y el estado básico del mismo, lo cual, permite soportar protocolos de capas superiores (p.e., enrutamiento basado en posicionamiento geográfico) y diferentes aplicaciones cooperativas, incluidas las aplicaciones de seguridad vial, tales como la advertencia de colisión en intersecciones, o la asistencia de cambio de carril, las cuales aprovechan la información de posición y velocidad de los vehículos cercanos para detectar posibles peligros en la carretera con tiempo suficiente para que el conductor o vehículo autónomo reaccione [16].

Estas aplicaciones de seguridad requieren información constantemente actualizada sobre las posiciones de cada uno de los vehículos [17]. El Consorcio de Comunicaciones vehiculares Seguras (VSCC, por sus siglas en inglés) e Instituto Europeo de Normas de Telecomunicaciones (ETSI, por sus siglas en inglés) sugieren que las aplicaciones de seguridad vehicular necesitan obtener posiciones en tiempo real con errores de unos pocos metros para evitar accidentes críticos [18, 19].

Los enfoques de conocimiento cooperativo basados en el intercambio de posición y la información cinemática entre los vehículos se introducen para cumplir con las expectativas de los sistemas de transporte inteligentes. Sin embargo, el intercambio frecuente de mensajes entre los vehículos participantes impone una sobrecarga de comunicación en la red ², ya que estos mensajes son transmitidos periódicamente por todos los vehículos, por lo que parte del canal de control se encontrará ocupado por estos mensajes. Si la carga de *beaconing* es alta puede llevar a la congestión en el canal de comunicación. Esta condición en el canal afecta a las aplicaciones de seguridad vial. Por ejemplo, la carga de *beaconing* en redes de alta densidad vehicular puede afectar el rendimiento de la aplicación debido a una mayor latencia en la adquisición de los mensajes de sus vecinos o al aumento de la probabilidad de colisiones entre los paquetes, dando como resultado que se tenga una comunicación deteriorada, poco

²La limitante en la capacidad de la red tiene un impacto en la transmisión efectiva de los *beacons*, dado que si la frecuencia de transmisión del *beacon* es fija, la carga del canal puede aumentar demasiado en escenarios donde existe una alta densidad de vehículos [20]. Por otro lado intentar disminuir la frecuencia de transmisión del *beacon* no sería lo adecuado en todos los casos, ya que se estaría reduciendo la calidad de la información que se tiene de los vehículos vecinos [5].

confiable e imprecisa respecto de los datos de estado de los nodos vecinos [21].

Además de la congestión y carga de canal, existen otras razones por las cuales la transmisión/recepción de mensajes pueden fallar y tiene que ver con las características propias a las que se enfrentan los dispositivos de comunicación íter-vehicular a bordo de los vehículos. En primer lugar, las antenas en estos dispositivos suelen tener características de direccionalidad y no emitir la señal en todas las direcciones con igual potencia [22]. En segundo lugar, una señal puede ser interferida por otra, lo que hace que no sea fácil su decodificación por el receptor. Finalmente, hay pérdidas generadas en los entornos de las intersecciones urbanas debido a los efectos de propagación de la señal en este tipo de escenarios. Por lo tanto, parámetros como la congestión y carga del canal, así como los efectos en la propagación de la señal en ambientes urbanos (en especial debido a obstrucciones de edificios y construcciones en intersecciones) deben ser tenidos en cuenta a la hora de diseñar protocolos de *beaconing* adaptativos y mecanismos de comunicación cooperativa [21].

Para abordar el problema de la congestión y carga de canal, en la literatura se han propuesto varios algoritmos de *beaconing* adaptativo [7, 16, 21, 23–25] que han permitido mejorar la comunicación efectiva de los *beacons* al reducir la carga del canal y la pérdida en los mensajes. De igual manera se han propuestos mecanismos de retransmisión en intersecciones aumentando la confiabilidad en la entrega de los mensajes de notificación de estado [2, 26, 27], así como la adaptación de la transmisión de *beacons* con el menor impacto sobre los nodos vecinos. Sin embargo, estos algoritmos adaptativos se han probado solo a través de herramientas computacionales, ya sea numéricamente o simuladas.

Por lo cual, esta tesis parte de la idea de probar y evaluar el desempeño de un mecanismo de *beaconing* adaptativo usando dispositivos de comunicación íter-vehicular mediante una metodología de evaluación experimental en diferentes escenarios urbanos reales. De las observaciones obtenidas, se diseña, propone y evalúa un mecanismo de retransmisión robusto y eficiente en términos del uso del canal; que permita reducir notablemente la carga del canal, en comparación a las demandas de capacidad de los mecanismos clásicos de retransmisión e incremente la probabilidad de entrega exitosa de paquetes. Dicho mecanismo busca además extender la distancia y el tiempo previo de notificación de eventos en escenarios de intersecciones vehiculares.

1.2. Definición del problema

La mayoría de las aplicaciones cooperativas relacionadas con la seguridad vehicular se basan en el intercambio de información precisa de la posición, tanto la ubicación propia del vehículo como la ubicación relativa de sus vecinos. El intercambio de estos mensajes de una manera oportuna, confiable y eficiente se realiza mediante protocolos de *beaconing* adaptativos que permiten mantener una baja latencia en la transmisión de los mensajes, un control en la carga y congestión del canal, así como una baja tasa en la pérdida de paquetes [21].

Sin embargo, las comunicaciones entre vehículos pueden verse afectadas no solo por la congestión del canal debido a la alta densidad vehicular, si no también debido a las condiciones y desventajas presentes en entornos urbanos, tales como edificios y otros obstáculos que pueden

bloquear la transmisión entre los vehículos. Esto implica una alta probabilidad de pérdida de información debido a una atenuación en la señal que se ve reflejada en la disminución del rango de comunicación. Esto puede evidenciarse de manera más clara en las intersecciones, ya que cuando los automóviles se acercan a una intersección, la conectividad directa podría no ser posible afectando negativamente el conocimiento cooperativo entre los vehículos puesto que no existe una entrega fiable y oportuna de la posición entre los vehículos [28]. De igual manera, puede verse afectado el rango de comunicación, lo que puede comprometer la zona segura o la distancia de reacción que deben tener los vehículos para evitar accidentes [29].

En el estudio de algoritmos adaptativos de *beaconing* que permitan mantener una información precisa sobre la posición de los vehículos se han propuesto varias métricas de rendimiento en la literatura [7, 20, 30]. Igualmente, se han propuesto diferentes soluciones ante las desventajas que afectan las comunicaciones vehiculares en entornos urbanos, tales como: obstáculos, multi-trayecto en la señal, desvanecimiento, interferencia o características de radiación de las antenas entre otras [8, 31, 32]. Sin embargo, no existe amplia información respecto a pruebas experimentales en entornos vehiculares reales con estos trabajos.

Por lo tanto, es vital la evaluación en entornos urbanos, ya que la eficiencia de los sistemas de comunicación V2V en el intercambio de información depende de diversos factores, entre los cuales el ambiente circundante y la movilidad son prominentes. De igual manera existen muchos mecanismos de retransmisión que buscan hacer frente a las situaciones adversas que se presentan en el intercambio de información en entornos urbanos como las intersecciones. Aunque no se establecen mecanismos inteligentes de retransmisión ya que dan solución a un escenario en específico y, por lo general, no utilizan algoritmos inteligentes para controlar los momentos de operatividad o silencio de estos mecanismos. No obstante, aquellas propuestas que utilizan mecanismos de retransmisión, en su mayoría, solo consideran características referentes al tráfico vehicular, desconociendo aspectos de la capa física de la red que se pueden utilizar para mejorar el rendimiento de estos mecanismos mediante el diseño *cross-layer*.

1.3. Hipótesis

Con base en lo expuesto en la descripción del problema se pretende probar en esta tesis que:

- El rango máximo teórico establecido por el estándar *IEEE802.11p*, no es aplicable en entornos urbanos reales y en particular en intersecciones urbanas. A medida que aumenta la distancia entre el emisor y el receptor, se afecta drásticamente la calidad de la recepción y rango de cobertura debido a la presencia de obstáculos, velocidad y dirección de los vehículos. Esta reducción en cobertura disminuye el conocimiento cooperativo que los vehículos construyen a partir del intercambio de información periódica y conlleva riesgos en la toma de decisiones que aseguran la seguridad vial de los participantes.
- Mediante un mecanismo de retransmisión para intersecciones urbanas, que considere aspectos como distancia entre vehículos y potencia de recepción, se pretende mejorar los tiempos de conectividad entre vehículos cercanos a la intersección, reducir la carga del canal y la tasa de recepción de *beacons* en comparación con otros mecanismos del estado del arte.

1.4. Objetivos

A continuación se presenta el objetivo general y los objetivos específicos que posee el trabajo de investigación.

1.4.1. Objetivo general

Proponer y evaluar mediante un diseño *cross-layer* un mecanismo de retransmisión inteligente basado en aspectos físicos de la red, permitiendo de esta manera mejorar la conectividad vehicular en las intersecciones para beneficio de las aplicaciones de seguridad vial.

1.4.2. Objetivos específicos

- Identificar y analizar, mediante un estudio experimental con equipos comerciales y la implementación de algunos mecanismos de *beaconing* adaptativo propuestos en la literatura, bajo qué escenarios y condiciones puede verse afectado el desempeño en la comunicación de los vehículos, así como de los mecanismos evaluados.
- Proponer un mecanismo *cross-layer* que utilice información de propagación y la distancia entre vehículos para establecer un algoritmo inteligente de retransmisión que permita aumentar el rango de comunicación, mejorar la carga de canal y recepción de mensajes en escenarios de intersección.

1.5. Metodología y herramientas

1.5.1. Metodología

Inicialmente se realiza un conjunto de mediciones experimentales en diferentes escenarios para investigar y evaluar: el comportamiento y alcance de equipos comerciales usados en comunicaciones vehiculares (Locomate OBU Mobile [33]). Se evalúa el comportamiento del algoritmo propuesto en [7] bajo tres escenarios diferentes en entornos urbanos reales. Estas mediciones apuntan a resaltar cómo el entorno urbano, la movilidad, la obstaculización, entre otros aspectos, pueden afectar la calidad de la transmisión cuantificada a partir de métricas de desempeño estándar como: la tasa de pérdida de paquetes, el error de posición, rango de comunicación, entre otros.

Posterior a esto se realizan las mediciones experimentales mediante el uso de bicicletas, para validar y depurar el algoritmo implementado en los equipos comerciales. Posteriormente, se procede a la instalación de las unidades OBU al interior de un vehículo para ejecutar las pruebas del algoritmo en ambientes reales. Para ello se seleccionan tres tipos de escenarios urbanos: vehículos que viajan en el mismo sentido, vehículos que viajan en sentidos opuestos y vehículos en un cruce/intersección con un obstáculo en el cruce.

De las observaciones obtenidas se propone plantear una solución que mejore el desempeño y robustez del algoritmo implementado basado en los resultados observados en la evaluación de estos escenarios reales, ya que permite comprender cuales son las principales desventajas o características del ambiente circundante que afectan la comunicación intra-vehicular en intersecciones. Una vez identificadas las principales limitaciones presentes en los diversos entornos

urbanos, se estudia si estas pueden ser superadas por medio de mecanismos de retransmisión con el objetivo de mejorar la conectividad y desempeño en las comunicaciones cooperativas, principalmente en intersecciones cuyo escenario presenta la mayor tasa de accidentalidad respecto a otros entornos viales.

Finalmente se discuten los resultados obtenidos de la etapa experimental, se lleva a cabo la implementación a través de análisis matemático y de simulaciones realizadas donde se evalúa un mecanismo de retransmisión en intersecciones con el fin de incrementar y/o mejorar el conocimiento cooperativo vehicular por medio de aspectos de la capa física de la red que se pueden utilizar para mejorar el rendimiento de estos mecanismos y la conectividad mediante el diseño de *cross-layer*.

1.5.2. Herramientas

En el marco del desarrollo de la presente tesis se hace uso de diferentes herramientas de software y hardware. El hardware con el que se cuenta corresponde a unidades comerciales para el uso en comunicaciones vehiculares. Estas unidades serán instaladas al interior de los vehículos permitiendo que se lleven a cabo las pruebas correspondientes de comunicación entre vehículos en diferentes escenarios urbanos.

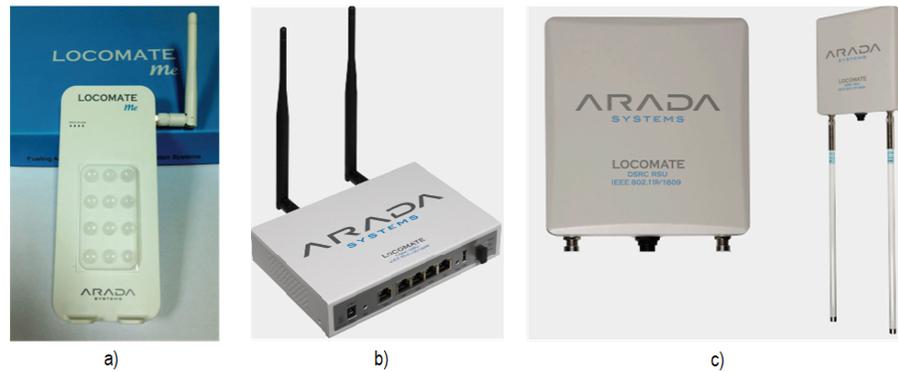
Las redes vehiculares se consideran una especialización de las Redes Móviles *Ad Hoc* MANET (Mobile *Ad Hoc* Networks) y su principal diferencia es que los nodos están restringidos a moverse únicamente a lo largo y ancho de las vías. En una VANET (Vehicular *Ad Hoc* NETWORK), cada vehículo se define como un nodo de la red y está equipado con una unidad de comunicación a bordo denominada OBU (On- Board Unit) y una unidad de aplicación llamada AU (Application Unit). La función de la *OBU* es intercambiar información con otros vehículos o con puntos de acceso estacionarios ubicados alrededor de las carreteras, denominados *RSU* (Road-Side Unit); mientras que las *AU* hacen referencia a los dispositivos que muestran información al usuario [34,35].

Actualmente el grupo de Investigación en Wireless Networking *WiNet* de la Universidad de Chile, cuenta con equipos comerciales [33] (Ver Figura 1.1) en los cuales se implementan y programan las pruebas experimentales, que permiten tener un análisis práctico de lo desarrollado durante la investigación.

Dentro de las especificaciones técnicas de estos equipos, se tiene:

- Hardware
 - MIPS processor running at 680MHz
 - Flash – 16MB
 - SDRAM – 64MB
 - Gigabit Ethernet Interface
 - Atheros AR5414 based WLAN Mini PCI
 - Output power @ 23dBm
 - Integrated GPS device, with external RF antenna
- Protocolo Wave (Wireless Access in Vehicular Environments)

Figura 1.1: Equipos para comunicaciones vehiculares que forman parte del grupo de investigación WiNET: a) Locomate Mobile ME OBU, b) Locomate Classic OBU y c) Locomate RSU . Tomada de [33].



- 802.11p (WAVE)
- IEEE 1609.2
- IEEE 1609.3
- IEEE 1609.4
- SAE J2735

- Frecuencia
 - 5.85 - 5.925 GHz
 - 5.7 - 5.8 GHz (Europa)

- GPS
 - Con antena RF embebida
 - Precisión menor a 1 metro

- Acceso
 - SSH
 - Telnet
 - Bluetooth

- Mensajes DSRC
 - BSM Part I, BSM Part II, SAE J2735
 - SPAT, MAP, TIM

- DSRC Radio
 - 5.9 GHz
 - Potencia +24 dBm 16 QAM

Se cuenta con las siguientes herramientas de software que son usadas en el presente trabajo:

- Objective Modular Network Testbed in C++ (OMNeT++)

Es una herramienta extensible y modular, basada en C++ y dedicada principalmente a la creación de simulaciones de red. La palabra red se entiende en un sentido más amplio, ya que incluye no sólo redes cableadas e inalámbricas, sino redes dentro del chip, redes de colas, redes de sensores, redes inalámbricas ad-hoc, redes fotónicas, etc.

Es libre para uso académico y es ya una plataforma ampliamente utilizada por la comunidad científica mundial [36].

- Simulation of Urban MObility (SUMO)

Permite la simulación en grandes redes de carreteras. El generador de tráfico tiene la opción de importar topologías de diferentes fuentes, incluso crearlas desde cero. Las trazas de salida pueden ser utilizadas directamente por simuladores de redes [37].

- Vehicles In Network Simulation (VEINS)

Está compuesto por el simulador de redes basado en eventos OMNET++ y el generador de movilidad microscópico SUMO, trabajando de manera acoplada y en tiempo real [38].

Adicional a este software especializado en simulaciones para redes vehiculares, se cuenta con MATLAB la cual es una herramienta de software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado con un lenguaje de programación propio y en la que se realizan las principales simulaciones teóricas en esta investigación.

Capítulo 2

Marco teórico y estado el arte

En este capítulo se describen los principales conceptos fundamentales en relación con las comunicaciones íter-vehiculares. De igual manera, se enuncia los enfoques más importantes en materia de desarrollo e investigación de mecanismos para conocimiento cooperativo, así como, algunos mecanismos para mejorar la conectividad en ambientes obstruidos.

2.1. Definición

El concepto de redes carentes de infraestructura cableada derivó en las conocidas Redes *Ad Hoc* inalámbricas, donde el término “*Ad Hoc*” establece la característica principal de su comportamiento y aplicación. Los principios de estas redes se atribuyen a la necesidad que presentan los usuarios para crear sus propias redes y así poder atender necesidades concretas de desplazamiento o de movilidad. Esta necesidad fue el motivo principal para crear y desarrollar redes sin infraestructura fija, las cuales están compuestas por nodos de fácil despliegue y cuyos costos en ocasiones son menores que los de una red fija [39].

Las redes vehiculares *Ad Hoc VANETs* se clasifican como una aplicación de la red móvil *Ad Hoc MANETs*. Básicamente, las *VANETs* son redes *Ad Hoc* enfocadas en entornos vehiculares, donde los vehículos representan los nodos de la red, los cuales pueden comunicarse entre sí y además pueden establecer comunicación con la infraestructura desplegada a lo largo de la carretera. Estas redes son importantes debido a que existe un continuo intercambio de información entre los usuarios que transitan en sus vehículos, así como el intercambio de información desde y hacia los proveedores de servicios que poseen su infraestructura desplegada a lo largo de las carreteras. Su estudio cobra importancia dado que son tecnologías que están en crecimiento y están desplegándose con fuerza en el área de las telecomunicaciones [40].

2.2. Arquitectura de redes vehiculares

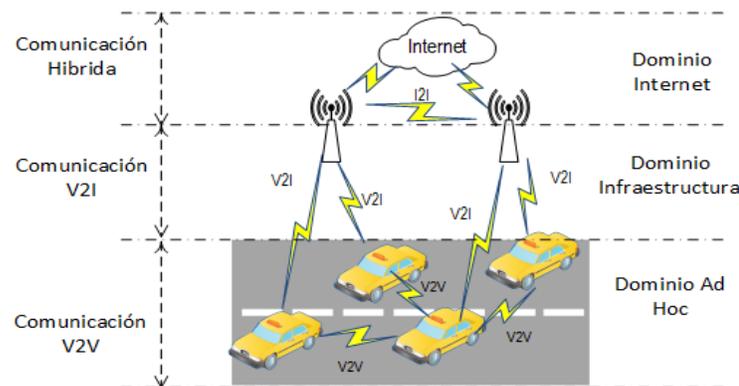
Se han definido dos tipos o escenarios de comunicación en las redes vehiculares:

- *Comunicación vehículo a vehículo (V2V, por sus siglas en inglés):*
Permite la comunicación vehicular directa sin depender de un soporte fijo de infraestructura y se puede emplear principalmente para aplicaciones de seguridad, no seguridad y

difusión.

- *Comunicación vehículo a infraestructura (V2I, por sus siglas en inglés):*
Permite que un vehículo se comunique con la infraestructura de carretera principalmente para aplicaciones de información y recolección de datos.
- *Comunicación infraestructura a infraestructura (I2I, por sus siglas en inglés):*
Permite que la comunicación entre infraestructuras de carreteras principalmente para que las *RSU* puedan intercambiar datos importantes entre ellas respecto a los mensajes de estado que reciben de los vehículos.
- *Arquitectura híbrida: combina la comunicación V2V y V2I:*
En este escenario, un vehículo puede comunicarse con la infraestructura de la carretera, ya sea en un solo salto o multisalto, dependiendo de la distancia, es decir, si puede o no acceder directamente a la unidad de carretera. Permite la conexión hacia Internet o a redes externas, así como a vehículos que están lejos.

Figura 2.1: Arquitectura *VANETs* y sus escenarios de comunicación. Adaptada de [46].



Los principales componentes de una arquitectura *VANET* son:

- *OBU* – es un dispositivo inalámbrico, instalado en el interior de un vehículo, el cual es usado para intercambiar información con una *RSU* u otras *OBUs*. Con recursos RCP (Resources Command Processor), así como recursos que incluyen lectura/escritura para almacenar la información recibida o enviada pertenecientes a las aplicaciones de seguridad vial. La *OBU* está equipada con un dispositivo de radio para la comunicación inalámbrica de corto alcance, basada en la tecnología de radio *IEEE 802.11-OCB* [41–44].
Este dispositivo de red se utiliza para enviar, recibir y enrutar paquetes de datos. La *OBU* también se puede equipar con otras interfaces de red basadas en otras tecnologías de radio como redes celulares y WLAN. Su principal funcionamiento es proveer acceso al medio inalámbrico, encaminamiento *Ad Hoc* geográfico, control de la congestión de red, transferencia confiable de mensajes, seguridad de datos y soporte para movilidad IP [45].
- *AU* – es una entidad situada dentro del vehículo que permite ejecutar múltiples aplicaciones las cuales pueden usar la capacidad de comunicación de la *OBU*. Las *AUs* pueden ser equipos dedicados a: aplicaciones de seguridad vial, sistema de navegación con capacidad de comunicación o como dispositivo móvil como puede ser un asistente

personal digital que ejecute aplicaciones de Internet. La *AU* puede conectarse de forma física en la *OBU*, sin embargo la distinción entre la *AU* y la *OBU* es lógica [45].

- *RSU* – es un dispositivo ubicado usualmente en posiciones fijas a lo largo de carreteras, o en sitios importantes como intersecciones, aparcamientos o señales de tránsito, etc. La *RSU* está equipada con un dispositivo de red para la comunicación inalámbrica basada en la tecnología de radio *IEEE 802.11-OCB*. También puede estar equipada con otras interfaces de red inalámbricas cuyo propósito es la comunicación con una red basada en infraestructura.

Las principales funciones asociadas a la *RSU* son [45]:

1. Extender el rango de comunicación de la red *Ad Hoc* mediante la redistribución de información hacia las *OBUs*, y hacia otras *RSU* dado el intercambio de información con las *OBUs*.
2. Proveer a las *OBUs* conectividad a Internet.
3. Proveer conectividad a aplicaciones de seguridad vial mediante la comunicación I2V, que tienen como objetivo advertir a los vehículos dentro del área de cobertura acerca de accidentes, sitios donde se están desarrollando trabajos de construcción, entre otros.

2.2.1. Características VANET

Las *VANETs* presentan características muy puntuales que las diferencian respecto a las *MANETs*. Estas características pueden enumerarse así [46]:

1. *Topología altamente dinámica*: una red vehicular es altamente dinámica por dos razones: velocidad de los vehículos y características de propagación de la transmisión. Los vehículos tienen altas velocidades cercanas a los de 50 km/h en ambientes urbanos y más de 100 km/h en autopistas. Así mismo, pueden moverse en direcciones diferentes. Por lo tanto, los vehículos pueden unirse rápidamente o salir de la red en un período de tiempo muy corto, lo que lleva a frecuentes y rápidos cambios de topología.

Existen tres tipos de vías principales que influyen directamente en el grado de previsibilidad de los movimientos de los vehículos:

- a) Autopistas: es una carretera formada por dos o más carriles, se caracteriza por recibir un importante afluente de automóviles de diverso tipo y por conectar las áreas internas de una ciudad con las de otra o con las rutas de tipo rural. Debido a su función de garantizar un adecuado flujo vehicular, se caracteriza por no tener intersecciones, semáforos o cruces de nivel permitiendo la circulación a gran velocidad de los vehículos.
- b) Carreteras rurales: se encuentran principalmente fuera de las ciudades o en límites urbanos. La baja densidad vehicular en estas carreteras normalmente no permite formar una red
- c) Carreteras internas de la ciudad: en este tipo de carreteras se presenta una alta densidad vehicular. En el interior de la ciudad existen numerosas carreteras pequeñas y otras de mayor tamaño conocidas como vías principales, las cuales se encuentran interrumpidas por intersecciones donde las edificaciones que se encuentran en los cruces o esquinas impactan de forma negativa en la comunicación inalámbrica.

2. *Desconexión frecuente:* la topología altamente dinámica hace que ocurran cambios frecuentes en la conectividad, por lo que el vínculo entre dos vehículos puede desaparecer rápidamente mientras transmiten información.
3. *Comunicación geográfica:* los vehículos a los que se llega normalmente dependen de su ubicación geográfica. Así como en un *clustering* donde las redes de un vehículo de destino o un grupo de vehículos de destino están definidas por un ID o un ID de grupo.
4. *Movilidad y predicción restringida:* las *VANET* presentan una topología altamente dinámica, pero los vehículos suelen seguir un cierto patrón de movilidad restringido debido a las carreteras, las calles y autopistas, los semáforos, el límite de velocidad, las condiciones de tráfico y el comportamientos de conducción de los conductores. Así, dado el patrón de movilidad, es más factible predecir la posición futura del vehículo.
5. *Modelo de propagación:* típicamente, las *VANET* operan en tres ambientes: carretera, rural y ciudad. En una autopista, generalmente se supone que el modelo de propagación es espacio libre, pero la señal puede sufrir interferencia por la reflexión de algunas de las edificaciones circundantes a las carreteras. En una ciudad, su entorno hace que la complejidad en la comunicación aumente debido a la densidad variable de vehículos y la presencia de edificios, árboles y otros objetos que actúan como obstáculos para la propagación de la señal. Dichos obstáculos causan efectos de *shadowing* relacionados con la disminución de la potencia recibida por un vehículo al encontrarse detrás de un obstáculo, *multipath* asociado a la diferencia de fase con la señal que llega a otro vehículo, producto de los obstáculos, que hace que esta tome distintas rutas causando que la amplitud de la señal cambie rápida y constantemente lo que lleva a una variación en la intensidad de la señal recibida conocida como *fading effects*.
6. *Autonomía:* hace referencia a la libertad que tiene cada nodo de la red para acceder al medio, transmitir, enrutar y recibir paquetes cuando lo requiera sin estar bajo la influencia de un control centralizado. De modo que las *OBU* y las *RSU* manejan dichas tareas de manera independiente.
7. *Suministro de energía ilimitado:* los nodos no tienen restricciones en el consumo de energía dado que la batería de los vehículos proporciona una cantidad suficiente para la operación de la *OBU* y/o *AU*.
8. *Alta capacidad computacional:* las *OBU* en los nodos deben manejar, dependiendo de la aplicación, elevados flujos de tráfico de red con baja prioridad (en un streaming de video) o bajas tasas de datos con alta prioridad (aplicaciones de seguridad). Además, controlan el enrutamiento y la conexión con las *RSU*, por lo que los dispositivos requieren capacidad computacional para realizar dichas tareas simultáneamente y sin latencias muy elevadas (en especial en aplicaciones críticas).

2.2.2. Aplicaciones

La eficiencia y seguridad en el transporte vehicular son dos parámetros importantes usados para clasificar las aplicaciones de *VANET* basadas en su propósito primario. Sin embargo, la eficiencia y la seguridad no están completamente separadas entre sí. Por el contrario, estos y otros aspectos deben ser considerados en conjunto en el diseño de las aplicaciones de *VANET*. Por ejemplo, una falla del motor o un accidente que involucre dos o más vehículos puede provocar un atasco en el tráfico. Un mensaje de carácter informativo en este tipo de situaciones permitiría advertir a los vehículos circundantes de manera oportuna provocando

que los usuarios de los vehículos tomen vías alternas y en ultimas se disminuye el colapso en la vía afecta. De esta manera el objetivo de las VANET aumento la eficiencia.

Además, dependiendo de diferentes factores como la importancia de la localización del accidente, el sistema de transporte puede calcular y sugerir rutas alternativas a un gran conjunto de vehículos considerando una visión más amplia de las demandas de tráfico para disminuir el impacto de este evento a regiones no cercanas del accidente. En este caso, el objetivo es aumentar la eficiencia general del transporte. En ambos casos, una notificación temprana del evento puede ayudar a un conductor o un pasajero a decidir: una nueva ruta a utilizar, elegir un medio de transporte diferente o incluso permanecer en la ubicación actual en caso de un problema de tráfico grave. En este caso, un objetivo adicional es proporcionar a las personas información útil en la planificación de una actividad relacionada con el sistema de transporte [46].

Las aplicaciones vehiculares pueden contribuir considerablemente a la reducción de los accidentes de tráfico. En [47], se indica que el 60 % de los accidentes se pueden evitar, si los conductores reciben un mensaje de estado de advertencia con unos segundos de anticipación que permitan maniobrar o evitar un riesgo inminente ante una colisión.

- *Intersecciones*: – las intersecciones son uno de los escenarios que más desafíos presentan a los conductores y en donde ocurre la mayor tasa de accidentalidad y fatalidad [11, 48, 49]. La línea de vista entre los vehículos a menudo se ve afectada por obstáculos como edificios, vehículos estacionados o en movimiento e inclusive de la vegetación que puede existir en las esquinas de la intersección [8]. Esta obstaculización trae consigo un impacto negativo en la capacidad de los sistemas de seguridad vial para detectar vehículos vecinos que se aproximan a la intersección [50]. Por ejemplo, de acuerdo a la DGT de España (Dirección General de tráfico) el 40 % de los accidentes de tráfico se producen en cruces e intersecciones, donde el 21,5 % de los fallecidos en siniestros viales fueron en este tipo de escenarios [49]. Una aplicación de seguridad vial puede gestionar el tráfico en las intersecciones, mitigando riesgos de colisión y aumentando el conocimiento cooperativo al alertar a los conductores sobre posibles peligros en la carretera con tiempo suficiente, de manera que puedan reaccionar y evitarlos [51].
- *Vías de alta velocidad*: – los escenarios viales como las autopistas permiten a los conductores viajar a altas velocidades, lo que trae consigo que ante una situación inminente de peligro los conductores cuenten con un periodo muy corto para reaccionar y evitar el accidente. Sin embargo, si ocurriese el accidente se puede diseminar un mensaje de alerta vía *broadcast* que permita advertir a los vehículos cercanos sobre lo ocurrido, de esta manera es posible mitigar un evento de mayor magnitud como es un choque en cadena o en su defecto que el conductor al recibir el mensaje pueda decidir cambiar su ruta evitando ir en dirección de un posible atasco vial [52].
- *Congestión en carreteras*: – las aplicaciones de seguridad vial pueden proveer a los conductores las mejores trayectorias hacia sus destinos [53]. Conocer el estado vial de las carreteras en tiempo real (accidentes, atascos, construcciones en proceso, manifestaciones sobre la carretera, entre otros), le permite al conductor tomar la mejor ruta para llegar a su destino.

El trabajo desarrollado en esta tesis esta ligado con el primer grupo dentro de esta cate-

gorización. Dentro del cual se buscará proponer un mecanismo de retransmisión que permita mejorar la conectividad en intersecciones.

2.3. Estándares y protocolos en *VANETs*

El desarrollo de estándares se lleva a cabo en diferentes organizaciones que establecen los requisitos normativos y técnicos relacionados con las comunicaciones en redes vehiculares. En la actualidad dos de los enfoques más importantes en materia de desarrollo e investigación de las redes *VANET* son el enfoque norteamericano y el enfoque europeo. Estos comparten ciertas similitudes, pero a su vez cada uno presenta características singulares [54].

- *IEEE*: – Estados Unidos ha sido uno de los pioneros en sistemas de transporte inteligente (ITS, por sus siglas en inglés), en donde se han puesto en marcha varios proyectos piloto y se han realizado diversos avances relacionados con redes vehiculares. En el año 2002, la a Sociedad de Transporte Inteligente de América (ITSA, por sus siglas en inglés) recomendó la adopción de un único estándar para la capa física y para la capa de acceso al medio propio de las *VANET*. En consecuencia, en el año 2004 se consolidó el grupo de trabajo IEEE Task Force p (TFp, por sus siglas en inglés) con el objetivo de definir una arquitectura de comunicación para entornos vehiculares basada en la tecnología inalámbrica para redes de área local *IEEE 802.11*, denominada *IEEE 802.11-OCB*. Más adelante, el grupo de trabajo desarrolló un conjunto de especificaciones de las capas de red, transporte y aplicación para las comunicaciones vehiculares, que se denomina *IEEE 1609*. Los estándares *IEEE 802.11-OCB* e *IEEE 1609* definen el acceso inalámbrico en entornos vehiculares (*WAVE*, por sus siglas en inglés). *WAVE* proporciona una arquitectura para las comunicaciones *V2X*, destinada al uso de aplicaciones de seguridad y eficiencia vial.
- *ETSI*: – Europa de igual manera ha desarrollado su propio enfoque de ITS, que aunque posee ciertas similitudes en comparación con el enfoque de la *IEEE* tiene algunas diferencias muy puntuales, básicamente se aprecian en la utilización de protocolos propios en la capa MAC (tales como el DCC (Decentralized Congestion Control)). Este estándar se desarrolla en conjunto por varias entidades, entre las cuales se resaltan el proyecto de investigación COMeSafety, el CEN (European Committee for Standardization), además de todos los grupos de trabajo de la *ETSI* como son la TC (Technical Committee for Intelligent Transport Systems), ITS (Intelligent Transportation Systems) y WG (Working Groups), cada uno con un énfasis en cada aspecto de la arquitectura de red [55, 56].

2.4. Dedicated Short-Range Communications (DSRC) - Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE)

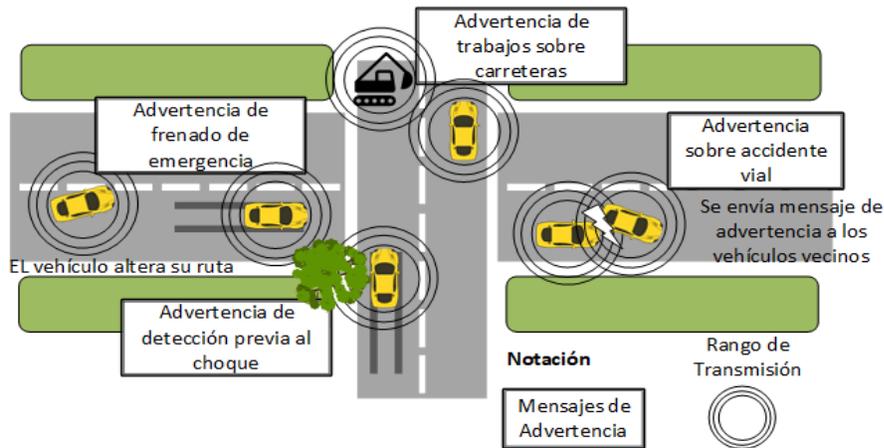
La tecnología DSRC fue diseñada para entornos vehiculares, al utilizar la interfaz inalámbrica, esta tecnología permite una comunicación eficiente donde los vehículos se comunican con otros vehículos cercanos, así como también hacia afuera de la red mediante dispositivos ubicados a lo largo de la carretera (*RSU*). Los proveedores de dispositivos inalámbricos han desarrollado activamente conjuntos de chips y módulos integrados que brindan sopor-

te DSRC. Los dispositivos integrados no solo proporcionan la tecnología DSRC, sino que también son compatibles con los Sistema de Posicionamiento Global (GPS, por sus siglas en inglés) y el protocolo CAN bus. Las compañías de automóviles y transporte también han estado integrando activamente equipos que soporten el protocolo en vehículos y desarrollando varias aplicaciones bajo DRSC [33].

El estándar WAVE describe la función y los servicios que coordinan la operación en un entorno que varía rápidamente y en donde se intercambian mensajes sin tener que unirse a un conjunto de servicios básicos (BSS, por sus siglas en inglés). *IEEE 802.11-OCB* también define técnicas y funciones de interfaz que son controladas por la capa MAC. Por lo tanto, está limitado por el alcance del estándar *IEEE 802.11*, lo que significa que las capas físicas y MAC funcionan dentro de un único canal lógico [15].

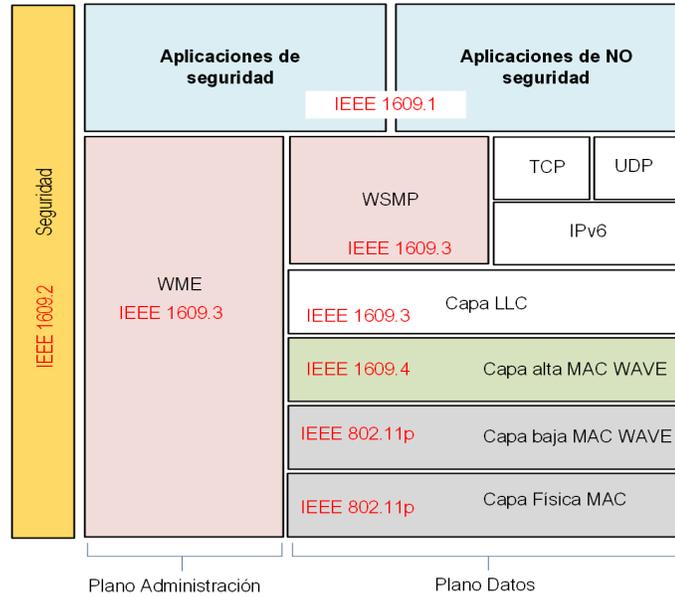
El objetivo principal de las comunicaciones vehiculares es la prevención de accidentes vehiculares y la notificación ante una eventualidad como se ilustra en la Figura 2.2. Para ello, cada vehículo cuenta con una *OBU* que soporta la tecnología DSRC, la cual permite transmitir periódicamente mensajes que contienen información propia del vehículo tal como su velocidad, aceleración, posición, entre otras. Dicha información es receptionada por los vehículos vecinos quienes también cuentan con su propia *OBU*.

Figura 2.2: Intercambio de mensajes de seguridad entre vehículos. Adaptada de [15].



En 1999, la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC, por sus siglas en inglés) asignó 75 MHz de ancho de banda en la frecuencia de 5,9 GHz para los servicios de ITS denominados DSRC. En el año 2002, la ITSA recomendó la adopción de un único estándar para la capa física y para la capa de acceso al medio propio de las *VANET*. La Figura 2.3 ilustra la pila de protocolos para la comunicación basada en DSRC, que incluye protocolos y estándares destinados a utilizarse en las distintas capas. En las capas PHY y MAC, DSRC utiliza el acceso inalámbrico *IEEE 802.11-OCB* para entornos vehiculares (WAVE), una versión modificada del estándar *IEEE 802.11* (WiFi) [57].

Figura 2.3: Pila de protocolo de la tecnología DSRC. Adaptada de [15].



En la parte superior de la pila, el estándar SAE J2735 *Message Set Dictionary* especifica un conjunto de formatos de mensajes que admiten una variedad de aplicaciones vehiculares. El más importante de estos, es el mensaje de seguridad básico (BSM, por sus siglas en inglés), que transmite información crítica del estado del vehículo (velocidad, aceleración, posición, entre otros) en apoyo de las aplicaciones de seguridad V2V. Los vehículos que intercambian *BSM* frecuentes pueden rastrear la posición y el movimiento de los demás y tomar medidas para evitar posibles colisiones. SAE J2735 define la sintaxis del mensaje, pero deja otras normas para la seguridad en comunicaciones V2V que se especifican en el estándar como los requisitos de rendimiento mínimo en comunicaciones emergente definidos en la SAE J2945.1. Entre los temas que se abordarán en SAE J2945.1 se encuentran la velocidad y potencia de transmisión de los mensajes *BSM*, la precisión de los elementos de datos de *BSM* y el control de congestión de canales [58].

2.4.1. Capa física (PHY Layer)

La capa PHY se define en *IEEE 802.11p* [41] enmendado por *IEEE 802.11-OCB* [42]. Se divide en dos subcapas: la capa PMD (Physical Medium Dependent) y la capa PLCP (Physical Layer Convergence Protocol). Como su nombre indica, el PMD se conecta directamente con el medio inalámbrico, utiliza la técnica de multiplexación por división de frecuencias ortogonales (OFDM, por sus siglas en inglés), originalmente añadida a *802.11* en la enmienda *802.11a*. El PLCP define la correspondencia entre la trama MAC y la unidad de datos de capa PHY básica, el símbolo OFDM.

El mecanismo de multiplexación OFDM admite diferentes velocidades de datos que están determinadas por la tasa de codificación y el tipo de modulación. La FCC asignó el espectro de 5.850 GHz a 5.925 GHz, es decir, la banda de 5.9 GHz, para la operación DSRC en los Estados Unidos. Este espectro se divide en siete canales de 10 MHz con una banda de guarda de 5 MHz en el extremo inferior, como se ilustra en la Figura 2.4. Los pares de canales de 10

MHz también se pueden combinar en un canal de 20 MHz.

Hay cuatro técnicas de modulación disponibles para su uso en una subportadora, cada una de las cuales corresponde a un número diferente de bits codificados por cada símbolo de subportadora. La corrección de errores hacia adelante (FEC, por sus siglas en inglés) es un tipo de mecanismo de corrección de errores que permite su corrección en el receptor sin retransmisión de la información original, lo que reduce la tasa de bits efectiva del usuario, pero también mejora la probabilidad de decodificación exitosa. Ocho combinaciones de velocidad de modulación y velocidad de codificación FEC se especifican en *IEEE 802.11*, como se muestra en la Tabla 2.1, donde también se indica los valores de sensibilidad ¹ de acuerdo al estándar. Por ejemplo, la codificación por desplazamiento de fase binaria (BPSK, por sus siglas en inglés) usa un bit por símbolo de subportadora y, por lo tanto, 48 bits por símbolo OFDM. Con una tasa de codificación igual a 1/2, siendo 24 bits de información y 24 bits de redundancia por símbolo OFDM. Con 24 bits de datos por símbolo OFDM y un $8\mu\text{s}$ período de símbolo, la velocidad de datos resultante es de 3Mb/s [41].

Tabla 2.1: Tasa de datos en un canal OFDM para DSRC y los requisitos de rendimiento del receptor [41].

Modulación	Tasa de codificación de bit (Mbps)	Tasa de codificación	Tasa de datos (Mbps)	Sensibilidad mínima (dBm)-20 Mhz	Sensibilidad mínima (dBm)-10 Mhz	Sensibilidad mínima (dBm)-5 Mhz
BPSK	6	1/2	3	- 82	- 85	- 88
BPSK	6	3/4	4.5	- 81	- 84	- 87
QPSK	12	1/2	6	- 79	- 82	- 85
QPSK	12	3/4	9	- 77	- 80	- 83
16-QAM	24	1/2	12	- 74	- 77	- 80
16-QAM	24	3/4	18	- 70	- 73	- 76
64-QAM	36	2/3	24	- 66	- 69	- 72
64-QAM	36	3/4	27	- 65	- 68	- 71

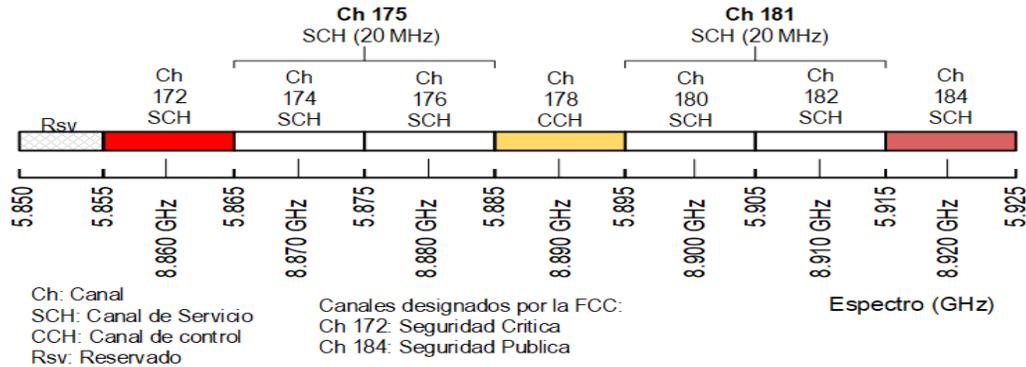
Las pruebas de DSRC en Estados Unidos se han enfocado en canales de 10 MHz, basados en el deseo de admitir muchas aplicaciones en paralelo, y en pruebas físicas que sugieren que este ancho es adecuado para el retardo y el análisis de ensanchamiento espectral causado por la velocidad de cambio de tiempo en el canal de radio móvil, y que se define como el rango de frecuencias sobre el cual el espectro Doppler recibido es esencialmente distinto de cero, a esta medida se le conoce como *spreads doppler* [59].

Como se ilustra en la Figura 2.4, el canal 178 se usa como canal de control (CCH, por sus siglas en inglés) mientras que los canales 174, 176, 180 y 182 se usan como canales de servicio (SCH, por sus siglas en inglés). Los canales 184 y 172 quedan para uso futuro. El esquema de acceso de capa física múltiple generalmente funcionará usando el canal CCH y al menos un canal SCH; mientras que en el modo de capa física única no es posible usar múltiples canales. A diferencia de otras tecnologías de redes de área local (LAN, por sus siglas en inglés), se requerirá que los dispositivos WAVE monitoreen dos canales, el canal CCH y el canal de SCH. El canal CCH se utiliza para anunciar un servicio y los mensajes cortos del estándar WAVE que utiliza la aplicación de seguridad, mientras que el canal SCH transporta los datos de la pila de IPv6 [60].

Para adaptarse a esta capacidad limitada del dispositivo de capa física única, se requie-

¹La sensibilidad del equipo receptor es un parámetro de gran importancia, pues determina fundamentalmente el alcance del sistema. Este valor de sensibilidad, o nivel mínimo de señal que se necesita para un correcto funcionamiento, es decir, la señal mínima que es capaz de recibir el receptor de forma inteligible.

Figura 2.4: Designaciones de canales banda 5.9 GHz para DSRC. Adaptada de [57].



re la sincronización para garantizar que todos los dispositivos WAVE monitoreen el canal CCH en el mismo intervalo de tiempo. Tan pronto como un grupo de dispositivos WAVE se sincronizan, pueden monitorear y/o utilizar simultáneamente el canal de control. En [61] el estándar WAVE actual sigue un mecanismo de sincronización simple en el cual todos los dispositivos WAVE alinean sus recursos de radio a un periodo fijo de tiempo sincronizado.

2.4.2. Capa MAC

El propósito de la capa MAC es establecer los mecanismos de acceso al canal de comunicación, de manera que un conjunto de estaciones puedan compartir eficientemente el medio inalámbrico. El estándar *IEEE 802.11-OCB* define el uso de CSMA/CA para las comunicaciones V2X. La capa MAC también considera aspectos de la transmisión como la probabilidad de recepción de paquetes, el tiempo de acceso al canal, el control de congestión y la priorización de los mensajes [42, 44].

2.4.3. IEEE 1609

Como se indica en la Tabla 2.2, el estándar de la serie *IEEE 1609* consta de tres estándares publicados y cuatro estándares no publicados en desarrollo. WAVE Physical Layer se basa en *IEEE 802.11*, sin embargo, debido al entorno operativo de las redes de vehículos; se realiza una modificación de la norma que se conoce como *IEEE 802.11-OCB* [62].

2.4.4. Descripción de los conjuntos de mensajes

Esta sección presenta una descripción general de los conjuntos de mensajes usados por las principales entidades de estandarización como lo son ETSI y la IEEE. Un mensaje *VANET* se refiere a una entidad de capa aplicación en la arquitectura de referencia de comunicación ITS estandarizada [44, 63].

En general, las especificaciones de un mensaje incluyen una definición de diccionario de datos (o definición de formato de mensaje) que define la sintaxis y la semántica del mensaje, y un protocolo de comunicación relacionado para el intercambio de mensajes. Una entidad de mensaje se basa en las pilas de protocolo de la capa inferior para la disseminación. El punto de acceso al servicio (SAP, por sus siglas en inglés) permite el intercambio de datos entre

Tabla 2.2: Descripción IEEE WAVE 1609. Adaptada de [60].

Estándar WAVE	Descripción
IEEE P1609.0	Define la arquitectura general de WAVE, el modelo de comunicación, los mecanismos de acceso al medio inalámbrico en ambientes vehiculares, la estructura general de los componentes como <i>OBU</i> , <i>RSU</i> e interfaces WAVE.
IEEE P1609.2	Especifica los servicios de seguridad en los sistemas WAVE, define los formatos de los mensajes y su procesamiento.
IEEE 1609.3	Describe los servicios de la capa de red para entornos vehiculares, especifica las funciones de enrutamiento y direccionamiento basados en el nivel 3 del modelo de referencia OSI y de los protocolos IP, UDP, TCP y WSMP.
IEEE 1609.4	Describe la operación multicanal que implementa la capa física, incluyendo los parámetros para la priorización de mensajes, temporizadores, conmutación del canal y primitivas diseñadas para el funcionamiento multicanal.
IEEE P1609.5	Define los servicios de gestión de comunicaciones en apoyo de la conectividad inalámbrica entre comunicación v2V, y comunicación v2i
IEEE 1609.11	Define un nivel básico de interoperabilidad técnica para equipos de pago electrónico, es decir, entre <i>OBU</i> y <i>RSE</i> que utiliza DSRC.
IEEE 1609.12	Especifica las asignaciones de identificadores WAVE definidos en la serie de estándares IEEE 1609.

capas. Los datos intercambiados a través de SAP para la transmisión de mensajes incluye la carga útil del mensaje.

La Tabla 2.3 enumera los requisitos para los casos de usuario de los servicios de seguridad [1]. La frecuencia mínima de los mensajes periódicos del servicio de seguridad varía de 1Hz a 10Hz y el tiempo de reacción de la mayoría de los conductores oscila entre 0,6 s y 1,4 s [64]. Por lo tanto, es razonable restringir el tiempo máximo de latencia a no más de 100 ms. Por ejemplo, la latencia máxima de la advertencia de detección previa al choque es de 50 ms.

Hay dos tipos de mensajes de seguridad que pueden ser difundidos por las aplicaciones de seguridad en redes *VANET*:

- *Mensajes periódicos*: – este tipo de mensajes contienen datos importantes utilizados por otros vehículos para tomar las medidas adecuadas a fin de evitar que surjan situaciones inseguras. Esto se hace procesando los datos recibidos del remitente, que incluyen la velocidad del vehículo, la ubicación actual, la dirección y otros datos de aplicaciones que no son de seguridad, para que los vehículos puedan evitar cualquier situación insegura. Es necesario difundir mensajes periódicos que contengan información importante para otros vehículos, lo que puede ocasionar que se desperdicie el ancho de banda asignado a la comunicación.
- *Mensajes conducidos por eventos*: – son mensajes de alta prioridad que se envían solo cuando se detectan condiciones peligrosas. Estos eventos contienen la ubicación del remitente, el tipo de evento y la hora. La dificultad con los mensajes basados en eventos es que el remitente debe garantizar la entrega rápida del mensaje a otros vehículos si desean obtener algún beneficio de su contenido.

Dado que los requisitos de seguridad y fiabilidad son muy estrictos debido a las características de los servicios de seguridad [63], tanto la ETSI como la IEEE considera estos dos tipos

Tabla 2.3: Servicios de seguridad y Requerimiento en casos de uso. Adaptada de [1].

Categoría	Servicio de seguridad	Casos de uso	Objetivo	Frecuencia mínima - Máxima latencia
Categoría I	Advertencia Estado de Vehículo	Luces de frenado de emergencia	Advertir una desaceleración repentina al vehículo vecino	10 Hz - 100 ms
		Advertencia de condición anormal	Advertir el estado anormal del vehículo	1 Hz - 100 ms
		Aviso de vehículo en sentido contrario	Evitar accidentes debido a un vehículo en contra vía	10 Hz - 100 ms
		Notificación de sitio peligroso Aviso de obras en la vía	Advertir al conductor sobre posibles riesgos Advertir sobre obras en construcción en la carretera	10 Hz - NA 2 Hz - 100 ms
Categoría II	Tipo de Advertencia Vehicular	Advertencia de emergencia de vehículo	Reducir el tiempo de intervención en la emergencia	1 Hz - 100 ms
		Advertencia de vehículo lento	Mejorar la fluidez vehicular	2 Hz - 100 ms
		Advertencia de motocicleta	Prevención de Colisión	2 Hz - 100 ms
		Carretera en mal estado	Prevención de Colisión	1 Hz - 100 ms
		Aviso de colisión en intersección	Prevención de Colisión	10 Hz - 100 ms
		Aviso de colisión frontal	Prevención de Colisión	10 Hz - 100 ms
Categoría III	Advertencia de peligro en el tráfico	Forma incorrecta de conducir	Forma incorrecta de conducir - Advertencia mejorar	10 Hz - 100 ms
		Advertencia de vehículo estacionado	Evitar la sucesión de colisiones	10 Hz - 100 ms
		Advertencia de condiciones de tráfico	Reducir el riesgo de colisión frontal cuando hay atascos	1 Hz - 100 ms
		Advertencia en violación de señal	Reducir el riesgo de violar señales de tráfico	10 Hz - 100 ms
		Advertencia de trabajos sobre carretera	Reducir el riesgo de accidentes al nivel de la obra en la carretera	2 Hz - 100 ms
Categoría IV	Advertencia dinámica vehicular	Datos descentralizados de automóviles flotantes	Proveer seguridad y fluidez en el tráfico	10 Hz - 100 ms
		Advertencia de adelantamiento de un vehículo	Reduce el riesgo de accidente	10 Hz - 100 ms
		Asistencia de cambio de carril	Seguridad activa en la carretera	10 Hz - 100 ms
		Advertencia de detección previa al choque	Mitigación de impacto de accidente	10 Hz - 50 ms
		Cooperación en la reducción de visual debido a luminosidad de faros	Prevenir colisiones frontales	2 Hz - 100 ms

de mensajes. Los mensajes por eventos se conocen como *DENM* (Decentralized Environmental Notification Messages) [65], en cambio los mensajes periódicos en la ETSI son conocidos como *CAM* (Cooperative Awareness Message) y para la IEEE se conoce como *BSM* (Basic Safety Message), a continuación se explica en qué consiste cada uno:

- *CAM* y *BSM*: – estos mensajes contienen la información instantánea de un vehículo (como ubicación, velocidad, rumbo, aceleración, entre otras.) que son enviadas o difundidas periódicamente al área de interés principalmente para propósitos de advertencia en la carretera, por ejemplo, los casos de uso de las categorías II, como se muestra en la Tabla 2.3.
- *DENM*: – estos mensajes suelen ser activados por eventos especiales, por ejemplo, casos de uso en las categorías I, III y IV en la Tabla 2.3. El propósito de DEN es notificar a los vehículos en el área de interés de los peligros potenciales.
- El mensaje *SPAT* está especificado por SAE DSRC, se ha extendido para su despliegue en América del Norte, la UE y Japón. Se transmite desde una *RSU* para proporcionar la fase e información de tiempo de uno o un conjunto de semáforos. Este mensaje que proporciona el estado de los semáforos y la información de tiempo mediante un mensaje transmitido por las *RSU* para los vehículos o dispositivos móviles. Un mensaje *SPAT* puede incluir información del estado del semáforo de una o múltiples intersecciones. El receptor debe procesar los datos *SPAT* recibidos junto con los datos de la topología de intersección, con el fin de hacer coincidir los datos de estado de cada semáforo individual con el segmento de carretera en la intersección a la que se encuentra la información de estado del semáforo pertinente. Los mensajes *SPAT* y *MAP* están estandarizados por comité técnico en la norma SAE J2735, actualmente en revisión para tener en cuenta los requisitos regionales de EE. UU., Europa y Japón [66].
- El mensaje *MAP* está especificado por SAE DSRC, se ha extendido para su despliegue

en América del Norte, la UE y Japón. Se transmite desde una *RSU* para proporcionar información sobre la topología y geometría de un segmento de carretera o un área de intersección. Esto es utilizado por el receptor para mapear los datos *SPAT* a la topología de intersección para hacer coincidir cada uno de los datos de estado del semáforo en el segmento de carretera.

Como se indicó anteriormente se han definido las especificaciones de un mensaje mediante el uso de un diccionario de datos (o definición de formato de mensaje) que define la sintaxis y la semántica del mensaje. En la IEEE este corresponde a la SAE J2735, en donde se especifica cada uno de estos mensajes (incluidos los descritos anteriormente). Se hará una breve descripción de los mensajes que definen la estructura de los conjuntos de mensajes DSRC soportados por las unidades comerciales que fueron usadas en este proyecto.

SAE J2735 DSRC Message Set

Define el formato de cada uno de los tipos de mensaje [60]. Cada mensaje se define como una colección de estructuras de datos llamadas *elementos de datos* y *marcos de datos*. Un *elemento de datos* es la estructura de datos más básica en el estándar J2735. Un *marco de datos* es una estructura de datos más compleja, compuesta por uno o más elementos de datos u otros marcos de datos. El estándar J2735 define la sintaxis (longitud, formato) y la semántica de cada elemento de datos y marco de datos.

- El *mensaje de alerta de carretera* - (*RSA*, por sus siglas en inglés): El mensaje *RSA* se usa para enviar alertas de peligros cercanos a los nodos vecinos. Los mensajes típicos serían “derrumbe en carretera” o “construcción cercana” o “ambulancia aproximándose”, entre otros. Aquí se admite una gama completa de mensajes, pero las que tratan con peligros móviles, zonas de construcción y eventos en el camino son los que con mayor frecuencia son usados.
- El *mensaje de solicitud de seguridad común* - (*CSR*, por sus siglas en inglés): – El mensaje *CSR* proporciona un medio mediante el cual un vehículo que participa en el intercambio del mensaje de seguridad básico puede unificar solicitudes a otros vehículos para proporcionar información adicional que pueda ser requerida por las aplicaciones activas en su entorno. Los vehículos que responden agregarán esta información al lugar apropiado en el mensaje de seguridad básico cuando lo transmiten. Operacional adicional los conceptos se explican con más detalle en otras cláusulas de este estándar.
- El *mensaje de alerta de vehículo de emergencia* - (*EVA*, por sus siglas en inglés): – El mensaje *EVA* se utiliza para transmitir mensajes de advertencia a los nodos vecinos. Este mensaje agrega algunos datos adicionales respecto al tipo general de vehículo involucrado y otros datos útiles. Este mensaje puede ser utilizado por vehículos de servicios privados y públicos, y donde la prioridad relativa de cada uno (así como certificados de seguridad) se determina en la capa de aplicación.
- El *mensaje de alerta de colisión* - (*ICA*, por sus siglas en inglés): – El mensaje *ICA* proporciona datos del vehículo para construir un mapa de zona de choque en una intersección cuyo objetivo es la prevención de colisiones. Esto se hace mediante la identificación de la intersección sobre la que se informa, la ruta y aceleraciones recientes de los vehículos que van al encuentro.
- El *mensaje de seguridad básico* - (*BSM*, por sus siglas en inglés): – El mensaje *BSM* es

quizás el mensaje más importante en el estándar J2735. Como se indicó anteriormente este mensaje contiene la información instantánea de un vehículo como es ubicación, velocidad, rumbo, aceleración entre otras.

Dado que este último mensaje corresponde al evaluado en la presente tesis, se ofrece una breve descripción de este tipo de mensaje. El *BSM* tiene dos partes. La Parte I (ver Tabla 2.4) incluye información crítica del estado que debe enviarse en cada *BSM*. La estructura de esta parte enfatiza los datos más críticos y eficientes. La Parte II (ver Tabla 2.5) es un área opcional donde se pueden incluir elementos de datos y marcos adicionales. En esta segunda parte se brinda tres formas de flexibilidad: 1) inclusión de algunos tipos de datos a una frecuencia menor que la tasa general de *BSM*; 2) evolución en la definición de nueva información de estado (por ejemplo, de nuevos tipos de sensores) y nuevas aplicaciones; y 3) personalización de mensajes para incluir características específicas de la compañía automovilística.

La Tabla 2.4 enumera el contenido de los mensajes *BSM* de la primera parte, que está presente en cada transmisión de *BSM*. La primera columna de la tabla utiliza la terminología de la estructura de datos oficial del estándar. El contenido del mensaje consume 39 bytes, y la codificación DER (Distinguished Encoding Rules) de los elementos individuales agrega una sobrecarga aproximadamente igual.

Tabla 2.4: SAE J2735 DSRC Mensaje básico de seguridad Parte, Adaptada [15].

Data item name, Element/Frame, and Length	Descripción
DSRC_MessageID element, 1 byte	El primer elemento en cada mensaje, utilizado para determinar cómo analizar el resto del mensaje.
MsgCount element, 1 byte	Un número de secuencia, que se incrementa con cada transmisión sucesiva de un <i>BSM</i> por un vehículo dado, usado principalmente para estimar estadísticas de error.
TemporaryID element, 4 bytes	Un valor elegido aleatoriamente y mantenido constante durante unos minutos, ayuda a un receptor a correlacionar una secuencia de <i>BSM</i> de un remitente determinado.
Dsecond element, 2 bytes	La hora actual, módulo de un minuto, con resolución de 1 milisegundo.
Latitude, Longitude 2 elements, 4 bytes each	Latitud geográfica y longitud con resolución 1/10 micro grado.
Elevation element, 2 bytes	Posición sobre o debajo del nivel del mar con resolución 0.1 metro.
PositionAccuracy frame, 4 bytes	Transmite el único error de posición de desviación estándar a lo largo de los ejes semi mayor y semi menor, y el rumbo del eje semi mayor.
TransmisinAndSpeed frame, 2 bytes	3 bits codifican la configuración de transmisión del vehículo (engranaje). 13 bits transmiten la velocidad del vehículo sin firmar, resolución 1 cm/segundo.
Heading element, 2 bytes	Dirección de la brújula del movimiento del vehículo, resolución 1/80 grados.
SteeringWheel Angle element, 1 byte	Posición actual del volante (el ángulo de la dirección por sí solo se puede utilizar para determinar hacia dónde apuntan las ruedas delanteras), resolución 1.5 grados. La rotación en sentido horario es un ángulo positivo.
AccelerationSet4Way frame, 7 bytes	Proporciona aceleración longitudinal, aceleración lateral, aceleración vertical y velocidad de cambio del ángulo de rumbo.
BrakeSystemStatus frame, 2 bytes	Transmite si el frenado está activo o no en cada una de las cuatro ruedas, también transmite el estado de los siguientes sistemas de control: control de tracción, frenos antibloqueo, control de estabilidad, refuerzo de freno y frenos auxiliares.
VehicleSize frame, 3 bytes	Dimensión del vehículo en largo y ancho, resolución 1 cm.

Tabla 2.5: Marco de datos de extensión de seguridad del vehículo, requerido para algunas aplicaciones de seguridad, enviado en la Parte II de algunos *BSM*, Adaptada de [15].

Data item name, Element/Frame, and Length	Descripción
EventFlags element, 2 bytes	Un elemento de datos que consiste en banderas de eventos de un solo bit. Los ejemplos incluyen: pérdida de control de tracción, frenado abrupto, Violación de la línea de parada de intersección, pinchazo entre otros.
PathHistory frame, variable length	Se utiliza para transmitir dónde ha estado un vehículo. Es decir, la trazabilidad de cada una de las posiciones previas durante el recorrido.
PathPrediction frame, 3 bytes	Indica la ruta que un transmisor espera recorrer. Donde el radio de curvatura son 2 bytes y la confianza de predicción de 1 byte.
RTCMPackage frame, variable	Transmite datos de corrección de GPS en el estilo RTCM. La longitud variable depende de los números de satélites a la vista

2.5. Comunicación cooperativa inter-vehicular

En esta sección se realiza una revisión sobre los conceptos fundamentales en la comunicación cooperativa entre vehículos cuyos servicios se basan en el intercambio de información entre vehículos y la infraestructura. Para apoyar eficazmente las aplicaciones de seguridad vehicular, cada vehículo necesita recibir continuamente información actualizada de sus vehículos vecinos relevantes.

2.5.1. Taxonomía

Los mecanismos de *beaconing* adaptativo van ajustando ciertos parámetros de comunicación (frecuencia, potencia, tamaño de la ventana entre otros) para la transmisión de estos mensajes. De acuerdo al parámetro de ajuste es posible categorizar el mecanismo de *beaconing* como se indica a continuación:

Categorías de *beaconing*:

La adaptabilidad del protocolo de *beaconing* se puede clasificar en cuatro categorías: 1) Control en la frecuencia del mensaje - (*MFC*, por sus siglas en inglés), 2) Control en la potencia de transmisión - (*TPC*, por sus siglas en inglés), 3) *Miscelánea* e 4) *Híbrido*.

En *MFC*, se busca adaptar la cantidad de beacons enviados en un periodo de tiempo, tiene como principal objetivo mejorar la utilización del canal de control. En *TPC* es similar al anterior, pero en este enfoque se busca controlar la potencia de transmisión. Esto permite que en ambientes de mayor densidad vehicular se pueda reducir el área de cobertura de los nodos, evitando así interferencia con los nodos vecinos y, por ende, disminuir la probabilidad de colisiones.

Otros enfoques se centran en aspectos de conmutación multicanal para la adaptabilidad de beacons. A esto hace referencia el concepto *Miscelánea*, donde incluye la adaptación del tamaño de la ventana de contención, tasa de datos, sincronización de intervalos de transmisión, etc. Finalmente la categoría *Híbrido* hace referencia al uso o combinación entre parámetros de las categorías mencionadas. Por ejemplo, dadas las limitaciones del canal de comunicación, ajustar de manera simultánea la frecuencia en la transmisión y la potencia para utilizar eficientemente los canales compartidos.

2.5.2. Diseño *cross-layer* para *beaconing* adaptativo

El diseño de capas cruzadas o *cross-layer* por su término en inglés, hace referencia al desarrollo de algoritmos adaptativos que permiten obtener un mejor desempeño mediante el aprovechamiento de la dependencia entre los protocolos de las diferentes capas del modelo de comunicaciones.

La capa física (PHY) enlaza varios vehículos dentro del rango de transmisión a través del canal inalámbrico. La comunicación inalámbrica en la capa *PHY* en *VANETs* como se ha mencionado se ve afectada por el cambio dinámico con el que varía el estado del canal producto del movimiento de los vehículos y los obstáculos que se presentan. Por ejemplo, algunas soluciones de *cross-layer* observan la condición del canal para así transmitir oportunamente los mensajes cuando la condición del canal es buena [15, 67, 68]. La condición del canal no solo afecta la capacidad de transmisión, sino que también afecta la capacidad de recepción de los vehículos.

En un diseño *cross-layer*, por ejemplo, se pueden considerar cualidades del canal, tales como relación señal-ruido (*SNR*, por sus siglas en inglés) o indicador de fuerza de la señal recibida (*RSSI*, por sus siglas en inglés). Dado que la frecuencia de envío puede afectar gravemente el rendimiento de la comunicación, la información de realimentación de la condición del canal es útil para mejorar el rendimiento. El flujo de control típico en este tipo de soluciones consiste en tres pasos principales: primero, elegir los valores iniciales de los parámetros objetivo (umbral), segundo, observar la condición del sistema y, finalmente, ajustar los parámetros en consecuencia a lo observado.

2.5.3. Métricas de desempeño

Existen diferentes métricas que se usan para definir el nivel de conocimiento cooperativo provisto por los protocolos de *beaconing* en redes vehiculares. A continuación se describen las más utilizadas de acuerdo a la literatura [20, 53, 63, 69]:

- *Razón de entrega de paquetes*: – se define como la razón que existe entre el número total de paquetes que se reciben y el número total de paquetes que se deben recibir.
- *Número de colisiones*: – es la cantidad de colisiones que ocurren debido a la expiración simultánea de los contadores de backoff. Cuando dos o más transceptores inalámbricos no se detectan y transmiten paquetes simultáneamente, causan colisión en el área de alcance común a los distintos remitentes.
- *Carga total de beaconing*: – es la carga existente en el punto de la red al cual un nodo pertenece. Está determinada por el tamaño de *beacon*, frecuencia y potencia de transmisión de los nodos vecinos. Se puede expresar en términos de carga relativa del canal normalizada y/o tiempo de ocupación del canal.
- *Tamaño de la base de datos* (LDM, por sus siglas en inglés): – se relaciona con el número de nodos circundantes de los que se recibe información. Cantidad de vehículos registrados en la base de datos LDM.
- *Número de terminales ocultos*: – es la cantidad de nodos circundantes fuera del rango de comunicación los cuales pueden causar interferencia.
- *Error de posición promedio real percibido*: – es el error de posición promedio que un

vehículo computa respecto a sus vecinos, incluyendo el efecto de las colisiones y asumiendo que el evento de búsqueda de posición está uniformemente distribuido en el intervalo de tiempo inherente a la recepción de los *beacons*.

Estas métricas, son dependientes de las características propias de la tecnología, condiciones de propagación, escenario en donde se evalúa el protocolo, entre otros. Entre las más importantes están:

- *Demora de extremo a extremo*: – Se define como el tiempo que consume un paquete en viajar desde el transmisor hasta el receptor.
- *Intervalo de beacon*: – Duración del tiempo entre la emisión de dos *beacon* sucesivos. Es el inverso de la frecuencia de transmisión de *beacons*. Un menor intervalo de *beacon* resulta en una mayor frecuencia de transmisión.
- *Rango de comunicación*: – Está directamente relacionado con la potencia de transmisión del nodo e impacta en la cantidad de vehículos que reciben los *beacons* y en los que sufren interferencia.

En la Tabla 2.6 se muestra la influencia de las distintas métricas en el nivel de conocimiento cooperativo de la red vehicular. La *razón de entrega de paquetes* impacta directamente en la relevancia contextual de la información de posición. Un mayor *número de colisiones* incrementa el error de posición, disminuyendo el nivel de conocimiento cooperativo. Un crecimiento en la *carga total de beaconing* se traduce en un mayor número de colisiones y una menor razón de entrega de paquetes, lo que tiende a incrementar el error de posición.

Tabla 2.6: Impacto de métricas y características de desempeño en el conocimiento cooperativo.

Métrica	Valor	Nivel de Conocimiento
Razón de entrega de paquetes	Crece	Aumenta
	Decrece	Disminuye
Número de colisiones	Crece	Disminuye
	Decrece	Aumenta
Intervalo de beacon	Crece	Disminuye
	Decrece	Aumenta
Error de posición promedio real percibido	Crece	Disminuye
	Decrece	Aumenta
Carga total de <i>beaconing</i>	Crece	Disminuye
	Decrece	Aumenta
Rango de comunicación	Crece	Aumenta
	Decrece	Disminuye
Tamaño de la base de datos LDM	Crece	Aumenta
	Decrece	Disminuye
Número de terminales ocultos	Crece	Disminuye
	Decrece	Aumenta
Demora de extremo a extremo	Crece	Disminuye
	Decrece	Aumenta

2.5.4. Importancia del conocimiento cooperativo

Un desafío principal en las redes inalámbricas es utilizar los recursos disponibles de manera eficiente para maximizar el rendimiento de la red [70], mitigar la interferencia [71], controlar la congestión y ahorrar energía mediante la cooperación [72] y los esquemas de retransmisión.

La IEEE trabaja continuamente en el desarrollo de los protocolos de comunicación vehicular que sean eficientes para la mejora del acceso inalámbrico en entornos vehiculares [73]. Entre estos estudios, en los últimos años, varias investigaciones han abordado los principales

desafíos en redes *VANETs*, incluyendo el posicionamiento del vehículo, el control de la congestión, los protocolos de enrutamiento y disseminación de mensajes [74]. Para una parte de las aplicaciones de seguridad vial, es fundamental el posicionamiento del vehículo para una variedad de aplicaciones vehiculares tales como sistemas de transporte inteligentes, servicios basados en la ubicación, alerta y prevención de colisiones [75].

Por lo cual, el conocimiento de la posición en tiempo real de los nodos es una suposición hecha por un conjunto de protocolos, algoritmos y aplicaciones que dependen de dicho posicionamiento para la toma de decisiones. Esta es una suposición muy razonable, ya que se espera que los vehículos cuenten con *OBUs* y *GPS* que tengan la capacidad de comunicarse de manera inalámbrica, así como de proveer localización ya que son aspectos clave para la evolución de los sistemas de transporte inteligente.

En [76] el autor presenta un mecanismo de posicionamiento cooperativo implícito - (*ICP*, por sus siglas en inglés) que explota la conectividad V2V de una manera innovadora, evitando el uso de mediciones explícitas de V2V tales como el rango. En el enfoque ICP, los vehículos localizan conjuntamente características físicas no cooperativas (como personas, semáforos o automóviles inactivos) en las áreas circundantes, y los utilizan como puntos de referencia comunes para refinar sus estimaciones de ubicación. El mecanismo de localización se valida en diferentes escenarios de tráfico, incluido un área de cruce con condiciones heterogéneas en términos de densidad de características y conectividad V2V, y un área urbana real mediante el uso de SUMO para la generación de datos de tráfico.

En [77] se propone el mecanismo de mejora de la localización - (*VLOCI*, por sus siglas en inglés). Aquí se supone que todos los vehículos viajan solo en un carril. El mecanismo VLOCI intenta mejorar la ubicación de cada vehículo solo en una dimensión. La posición de cada nodo se estima en función de la posición de sus vecinos y sus distancias correspondientes. Ese trabajo tiene dos contribuciones: primero, propone un nuevo método de distancia recorrida a través del uso de códigos ortogonales positivos (POC, por sus siglas en inglés), donde supone que los vehículos usan un control de acceso al medio basado en POC. El MAC basado en POC es una mejora del estándar *IEEE 802.11p WAVE*, que reduce la probabilidad de colisión de paquetes en el canal inalámbrico. Los códigos POC están sincronizados y su temporización de llegada se usa para estimar la distancia entre dos pares de nodos. Como segunda contribución, propone un filtro de Kalman para reducir el comportamiento no lineal del sistema de localización.

En [78] se aborda uno de los componentes funcionales clave de la aplicación de advertencia de colisión cooperativa, que es la estimación precisa de las posiciones relativas de todos los vehículos vecinos con base al intercambio en tiempo real de sus coordenadas de posición GPS. Se propone una solución de funcionalidad de posicionamiento relativo durante cortes de GPS persistentes. Con base en los resultados, se evalúa de forma cualitativa diversas técnicas de posicionamiento relativo y de localización por radio, de manera experimental se evalúa la técnica de medición del alcance de la señal recibida.

La mayoría de los mecanismos propuestos intentan por medio de protocolos y algoritmos entregar una información lo más precisa posible respecto a la posición del vehículo [70, 76–80]. Ya sea mediante la predicción de la posición del vehículo de acuerdo al historial de su información cinemática, mediante correcciones o cálculos matemáticos de la información

entregada por sus sistemas de navegación o sensores. Lo claro es que inicialmente toda la información relativa a la posición vehicular se basa principalmente en el intercambio de los paquetes entregados por los vehículos y cuya información de posición es suministrada por el GPS. Ante una desconexión temporal de los sistemas de navegación tales como el GPS, por ejemplo, durante 30 segundos de interrupción, el error acumulado no será inferior a 10 metros cuando el automóvil se esté moviendo a 60 km/h.

En [7, 20] se controla la carga del canal ajustando la frecuencia de transmisión de los *beacons* dependiendo de la situación actual del tráfico mientras se mantiene un error de posición apropiado entre dos *beacons* consecutivos. Para encontrar esta adaptación óptima los autores toman como elemento de diseño información macroscópica como lo es la velocidad y aceleración del auto [21], a partir de ahí se usa como métrica de desempeño el error de posición promedio entre dos *beacons* consecutivos y se ajusta la tasa de transmisión con el objetivo de mantener este error en un valor apropiado. Este algoritmo permite que el vehículo emisor envíe a su nodo vecino información acerca de su posición a una tasa que permita mantener un error de posición a un valor apropiado. De esta manera el nodo receptor puede conocer de manera actualizada la posición de su vecino.

Sin embargo, la mayoría de estos mecanismos no pasan de ser probados solo a través de herramientas computacionales o numéricas. Por lo cual, se hace necesario probar y evaluar el desempeño de estos mecanismos y los dispositivos de comunicación DSRC/WAVE en escenarios urbanos reales. Ya que la eficiencia de tales sistemas de comunicación y mecanismos depende de varios factores, entre los cuales el ambiente circundante y la movilidad son de gran importancia.

De los mecanismos propuestos en la literatura, se procede a evaluar uno que sea susceptible a la implementación en entornos urbanos reales mediante el uso de equipos OBUs que permitan la comunicación inter-vehicular. Por tal motivo, se escoge el mecanismo propuesto en [7, 20] que corresponde a una propuesta reciente. En el capítulo siguiente se describe la evaluación experimental del algoritmo seleccionado para la realización de pruebas en diferentes escenarios vehiculares. Dada la importancia que tiene la recepción exitosa de la señal del GPS integrado en la unidad *OBU* las pruebas se llevan a cabo en ambientes urbanos abiertos, debido a que las señales del GPS a menudo son filtradas o alteradas cuando los vehículos están en túneles, debajo de los pasos elevados o entre los rascacielos. Además, los vehículos también pueden experimentar interrupciones sostenidas en la recepción de la señal del GPS debido a la alta actividad solar, interferencia terrestre y desvanecimiento multirayecto que puedan crear intervalos de desconexión que impidan el suministro constante respecto a la posición actual entregada por el GPS.

Capítulo 3

Evaluación experimental

La presente sección describe un conjunto de mediciones experimentales empleando protocolos para el conocimiento cooperativo en diferentes escenarios para: investigar y evaluar experimentalmente los parámetros físicos de los equipos que soportan el estándar IEEE 802.11-OCB y la tecnología DSRC. Además, se implementa en las unidades OBUs el mecanismo de *beaconing* adaptativo seleccionado [7]. El objetivo es valorar el impacto causado por el entorno circundante en el desempeño y calidad en la comunicación V2V a partir de las métricas de desempeño estándar como son: la tasa de pérdida de paquetes, el error de posición, rango de comunicación, entre otros.

3.1. Introducción

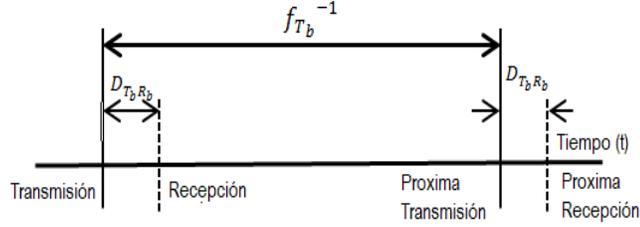
En las *VANETs* los *beacons* necesitan ser transmitidos frecuentemente para mantener un conocimiento preciso del entorno vehicular. El correcto funcionamiento en varios casos de uso relacionados con la seguridad vial y la gestión del tráfico depende de la información registrada en la base de datos que se actualiza en tiempo real.

En [7] el autor lleva a cabo el análisis matemático, simulación y evaluación de desempeño de las métricas propuestas en [20]. Aquí el autor propone controlar la carga de *beaconing* ajustando la frecuencia de transmisión de acuerdo a la velocidad y aceleración de los vehículos, mientras se mantiene una exactitud de posición apropiada para el correcto funcionamiento de las aplicaciones de seguridad vial. Debido a los buenos resultados obtenidos por los autores en simulaciones y dado que su implementación se puede llevarla a cabo en las unidades *OBU*, se opta por seleccionar este mecanismo para ser evaluado en entornos urbanos reales con el equipo experimental. El objetivo principal de este mecanismo es lograr mantener un error de posición cercano a 1 m mientras controla la carga del canal. Este mecanismo se puede considerar como un diseño *cross-layer* dado que adapta la tasa de transmisión con la que son enviados los *beacons* usando como variables de entrada la velocidad y aceleración de los vehículos.

El mecanismo adaptativo para la transmisión del *beacon*, usa como criterio las siguientes métricas [20]: *el error mínimo*, *error máximo* y *error promedio* de la última información de posición respecto a la posición física actual del vehículo. Los parámetros relevantes para esta

métrica son la velocidad del vehículo v , la tasa de transmisión del *beacon* f_{T_b} y el retardo de transmisión $D_{T_b R_b}$.

Figura 3.1: Relación de parámetros relevantes que determinan el error de posición. Adaptada de [20].)



- *Error de posición mínimo* (E_{pmin}): – representa el error de posición que ocurre debido al desplazamiento del vehículo durante la transmisión. Este valor $D_{T_b R_b}$ está asociado al retardo de la transmisión cuyo valor típico es de 0.001 s.
- *Error de posición máximo* (E_{pmax}): – constituye el error de posición que se produce cuando la posición de un vehículo es buscada en la tabla de vecinos un instante de tiempo antes de recibir el próximo *beacon* de ese vehículo. Este error es aproximadamente igual a la distancia que recorre el vehículo en un intervalo de tiempo igual al inverso de la frecuencia de transmisión de *beacons*.
- *Error de posición promedio* (E_{prom}): – es el error medio asumiendo que el evento de búsqueda de posición está distribuido uniformemente en el intervalo de tiempo mínimo y máximo entre la recepción de dos *beacons* consecutivos, Los parámetros de tiempo que influyen en el error de posición promedio se puede escribir como:

$$E_{prom} = \frac{E_{pmin} + E_{pmax}}{2} = \frac{v(D_{T_b R_b} + f_b^{-1})}{2}. \quad (3.1)$$

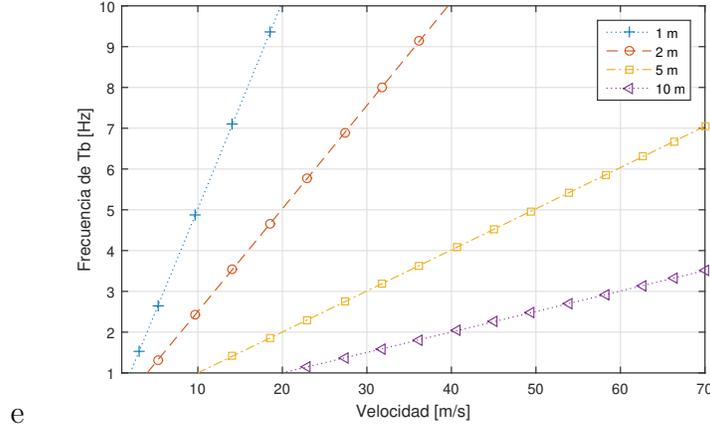
Los esquemas de *beaconing* que usan frecuencia y potencia de transmisión fija presentan ciertos inconvenientes, ya que, el utilizar una alta f_{T_b} conlleva a un menor error de posición, pero esto incrementa la probabilidad de colisión en ambientes con alta densidad vehicular. Reducir la f_{T_b} en estos escenarios disminuye la probabilidad de colisión, pero incrementa el error de posición, degradando de manera significativa el nivel de conocimiento cooperativo.

El algoritmo propuesto en [7] permite resolver este tipo de problema mediante la transmisión adaptativa de *beaconing* donde se controla la frecuencia y potencia de transmisión del *beacon*. Aquí, la variante implica que cada vehículo ajuste dinámicamente la frecuencia de transmisión de los *beacons* en función de su velocidad y aceleración para generar un error de posición promedio límite definido en 1 m. De igual manera, controla la potencia de transmisión del *beacon* P_{T_b} en función de la carga relativa del canal de comunicación, lo cual permite reducir la probabilidad de colisión y la tasa de pérdida de paquetes. Sin embargo, este último parámetro de control no se evalúa en esta tesis.

Basado en la ecuación 3.1, en la cual se fundamenta la propuesta del mecanismo adaptativo de *beaconing*, se puede observar el impacto de la velocidad (v) del vehículo en el error de posición promedio y máximo (ver Figura 3.2). La velocidad de un vehículo varía en un rango

de 0 a 150 km/h, que depende de muchos factores y condiciones. La evaluación se realiza tomando como referencia cuatro valores típicos de velocidad en diferentes escenarios: áreas residenciales (30 km/h \approx 8.33 m/s), áreas metropolitanas (50 km/h \approx 13.88 m/s), carreteras rurales (100 km/h \approx 27.7 m/s) y autopistas (150 km/h \approx 54 m/s) [5]. En esta evaluación se asumirá la velocidad constante en los vehículos.

Figura 3.2: Error de posición promedio en metros según la velocidad y frecuencia de transmisión de *beacons* con un $D_{TbRb} = 0.001$ s.



La Figura 3.2 establece la relación de diferentes tasas de *beacon* y la velocidad de los vehículos respecto al error de posición promedio establecida en la ecuación 3.1. En la grafica se observa un nivel de error de posición promedio entre 0 m y 10 m con una tasa de *beacons* de 0 Hz a 10 Hz. Si se transmite a una tasa de 10 beacons/s se puede mantener un error de 1 m solo hasta los 70 Km/h \approx 20 m/s. Mantener un error cercano a los 5 m se logra transmitiendo 5 beacons/s solo hasta velocidades cercanas a los 180 km/h \approx 50 m/s, una exactitud de 2 m con una transmisión de 10 beacons/s solo se logra hasta velocidades cercanas a los 145 km/h \approx 40 m/s.

3.2. Modelo analítico de algoritmo de *beaconing* adaptativo

El objetivo de esta sección es entender en detalle el algoritmo propuesto en [7] donde se analiza el modelo matemático propuesto del mecanismo de *beaconing* adaptativo. Este mecanismo se implementa en la unidades *OBUs* mediante la configuración de la API de los dispositivos. De acuerdo a la cinemática, se puede expresar la ecuación 3.1 como función de la velocidad (v_i) y aceleración (a_c) de cada nodo (n_i),

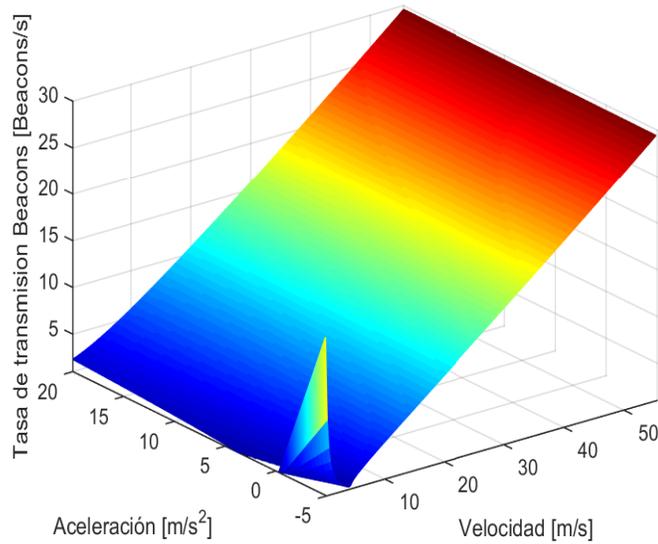
$$2E_{prom} = v_i D_{TbRb} + I_b \left(v_i + \frac{a_c I_b}{2} \right) + D_{TbRb} (a_c I_b + v_i), \quad (3.2)$$

Desarrollando matemáticamente 3.2 se obtiene 3.3, que es un polinomio de segundo grado con la forma siguiente: $AI_b^2 + BI_b + C$, donde A, B y C son constantes y $A \neq 0$.

$$a_c I_b^2 + 2(V_i - a_c D_{TbRb}) I_b + 4(V_i D_{TbRb} - E_{prom}) = 0, \quad (3.3)$$

Con el objetivo de validar la relación existente entre la velocidad y la aceleración desarrollada por un vehículo respecto a la tasa de transmisión de *beacons* para mantener un error de posición establecido de 1 m entre dos *beacons* consecutivos, se evalúa gráficamente la ecuación 3.3 para diferentes valores de velocidad y aceleración, en este caso se establece un rango de velocidad de $[0 \text{ m/s a } 60 \text{ m/s}]$ y una aceleración $[-6 \text{ m/s}^2 \text{ a } 20 \text{ m/s}^2]$. De la Figura 3.3 para una velocidad de 20 km/h (5.5 m/s) y una aceleración de 0.5 m/s^2 (área residencial), el vehículo debe utilizar una tasa de 3 [beacons/s] para generar un error de posición promedio igual a un metro. Para entornos rurales con una velocidad próxima a los 50 km/h (13.8 m/s) y aceleración de 2.5 m/s^2 se debe utilizar una tasa de 7 [beacons/s] (ver Figura 3.3).

Figura 3.3: Tasa de transmisión para generar un error de posición promedio de 1 m según la velocidad y aceleración del vehículo, calculada según la ecuación 3.3 y con una $D_{TbRb} = 0.001 \text{ s}$



De las ecuaciones planteadas en esta sección, en [7] se define el **Algoritmo1** el cual se implementa en los equipos de prueba para evaluar de manera experimental el algoritmo propuesto por el autor. En el **Algoritmo1** se puede observar que el vehículo presenta básicamente cuatro condiciones de movimiento: parada, aumento de velocidad, disminución de velocidad y velocidad constante, de acuerdo a estas condiciones se realiza la asignación y ajuste del parámetro de transmisión de *beacons*.

En el pseudocódigo se detalla el mecanismo implementado en las unidades OBU donde se ejecuta el mecanismo adaptativo de la tasa de envío de los *beacons* en tiempo real de acuerdo a la velocidad y la aceleración del vehículo n_i (Línea 5) y el error de posición deseado (Línea 6). El siguiente intervalo de *beacon* para n_i se calcula en cada transmisión de *beacons*. Las líneas 7-28 implican las decisiones asociadas de acuerdo con el estado de movimiento de n_i : **reposo** (línea 12-13), la tasa de transmisión del *beacon* está configurada en 1 beacons/s equivalente

al valor mínimo de tiempo requerido para el rendimiento adecuado de aquellas aplicaciones menos exigentes según la ETSI [81]; **movimiento acelerado** (Línea 14-17); **movimiento uniforme** (Línea 18-21); **desaceleración** (Línea 22-27) para notificar con inmediatez a los vehículos circundantes un posible frenado, se establece un intervalo crítico de *beacon* ($I_{bc}=0.2s$). Dado que la ecuación cinemática es de orden 2, cuando se encuentran dos soluciones válidas, se selecciona aquella que genera la carga de canal más baja (cómo se observa en las Líneas 15 y la Línea 24).

Resultado: Frecuencia de transmisión de *beacons* f_{T_b}

- 1 inicialización;
- 2 **Input:** $V_i, a_c, D_{TbRb}, E_{prom}$
- 3 **Output:** f_{T_b}
- 4 *Algoritmo a ejecutarse en cada transmisión de beacons*
- 5 Get V_i, a_c
- 6 Set E_{prom}
- 7 $A \leftarrow a_c$
- 8 $B \leftarrow 2(V_i - a_c D_{TbRb})$
- 9 $C \leftarrow 4(V_i D_{TbRb} - E_{prom})$
- 10 $D \leftarrow B^2 - 4AC$
- 11 $I_{b_{1,2}} \leftarrow (-B \pm \sqrt{D})/2A$
- 12 **si** $v_i=0$ & $a_c=0$ **entonces**
- 13 | $I_b \leftarrow 1$;
- 14 **si no**, **si** $v_i \geq 0$ & $a_c > 0$ **entonces**
- 15 | I_b *maximo* $\{I_{b_{1,2}}\}$;
- 16 | **si** $I_{b_i} > 1$ **entonces**
- 17 | | $I_b \leftarrow 1$;
- 18 **si no**, **si** $v_i > 0$ & $a_c = 0$ **entonces**
- 19 | $I_b \leftarrow 2(E_{prom} - V_i D_{TbRb})/v_i$
- 20 | **si** $I_{b_i} > 1$ **entonces**
- 21 | | $I_b \leftarrow 1$;
- 22 **si no**, **si** $v_i > 0$ & $a_c < 0$ **entonces**
- 23 | **si** $D > 0$ **entonces**
- 24 | | I_b *maximo* $\{I_{b_{1,2}}\}$;
- 25 | | **si** $I_{b_i} > I_{bc}$ **entonces**
- 26 | | | $I_b \leftarrow I_{bc}$;
- 27 | **si no**, **si** $D \leq 0$ **entonces**
- 28 | | $I_b \leftarrow I_{bc}$;
- 29 $f_{T_b} \leftarrow 1/I_{bc}$;

Algoritmo 1: Mecanismo adaptativo de frecuencia de transmisión de *beacons* propuesto en [7] e implementado en la unidades *OBU* para evaluación experimental.

3.3. Pruebas experimentales y escenarios de evaluación

En esta parte se pretende evaluar el rango de comunicación entre las unidades *OBUs* en función de la distancia existente entre ellas. Posterior a estas mediciones, se lleva a cabo la evaluación experimental mediante el uso de bicicletas, con ello se busca principalmente

validar y depurar el algoritmo implementado en las unidades *OBUs*. Una vez se depura el mecanismo en las unidades *OBUs* se procede a instalar estas unidades en el interior de los vehículos en donde se procede a evaluar el mecanismo de *beaconing* adaptativo propuesto en [7] en ambientes vehiculares más realistas. Para ello se escogen tres escenarios urbanos: vehículos viajando en el mismo sentido, vehículos viajando en sentido opuesto y vehículos en un cruce/intersección donde existe obstaculización (edificaciones) en el cruce.

3.3.1. Mediciones de cobertura

Las primeras pruebas de campo consisten en evaluar el rango máximo de conectividad entre los equipos. Para ello se usa dos unidades *OBU*, ambas unidades tienen línea de vista. La primera *OBU* se considera como un transmisor mientras que la segunda *OBU* se considera como un receptor, esta última se deja en una posición fija durante la evaluación. La *OBU* transmisora se ubica a diferentes distancias desde la posición 0 m hasta la posición de 300 m respecto a la unidad receptora.

El objetivo principal es evaluar la tasa de pérdida de paquetes de acuerdo a la distancia entre la *OBU* transmisora y la receptora. En la Figura 3.4a se puede observar que, para distancias inferiores a 80 m, se alcanza una tasa de recepción de *beacons* cercana al 100 %. No obstante, para distancias superiores a 80 m e inferiores a 160 m se alcanza un porcentaje por encima del 90 %. Sin embargo, la tasa de pérdida de paquetes disminuye hasta en un 50 % para distancias superiores a 160 m, lo que indica que para estas distancias hay una degradación en la comunicación, implicando una pérdida mayor al 50 % de los paquetes, afectando el conocimiento cooperativo en comunicaciones que superen estas distancias Tx/Rx .

Los resultados mostrados en [73,82] se asemejan a los resultados encontrados en la evaluación experimental realizada. De hecho, ambos resultados ilustran el efecto que la distancia entre el transmisor y el receptor puede tener en la calidad de la recepción. En nuestros resultados se observa que a medida que aumenta la distancia entre los nodos, la tasa de recepción disminuye notablemente. En ambos resultados también se demuestra que el rango máximo estipulado en el estándar *IEEE 802.11p* no es aplicable en entornos reales, tal como se demuestra en [73,82] y en las mediciones realizadas. Se concluye que 160 m es el máximo rango práctico entre los nodos en donde se obtiene una tasa de recepción por encima del 90 %.

3.3.2. Pruebas en ambiente controlado

Para obtener resultados preliminares que permitan depurar y evaluar el comportamiento del mecanismo implementado en las *OBUs*, se usa inicialmente como vehículo una bicicleta. El objetivo es validar el funcionamiento del mecanismo y, una vez se valida y depura en su programación, se procede a usar automóviles en escenarios urbanos.

Metodología usando *OBU* fija

Para evaluar experimentalmente el mecanismo propuesto en [7] se emplea una *OBU* fija que actúa como receptor y una *OBU* portátil móvil que actúa como transmisor (ver Figura 3.5). La velocidad de datos se estableció en 6 Mbps y el tamaño promedio del paquete se fijó en 81 bytes.

Figura 3.4: a) Tasa de pérdida de paquetes en función de la distancia entre transmisor y receptor. b) Escenario de evaluación, Parque Ohiggins en Santiago de Chile.

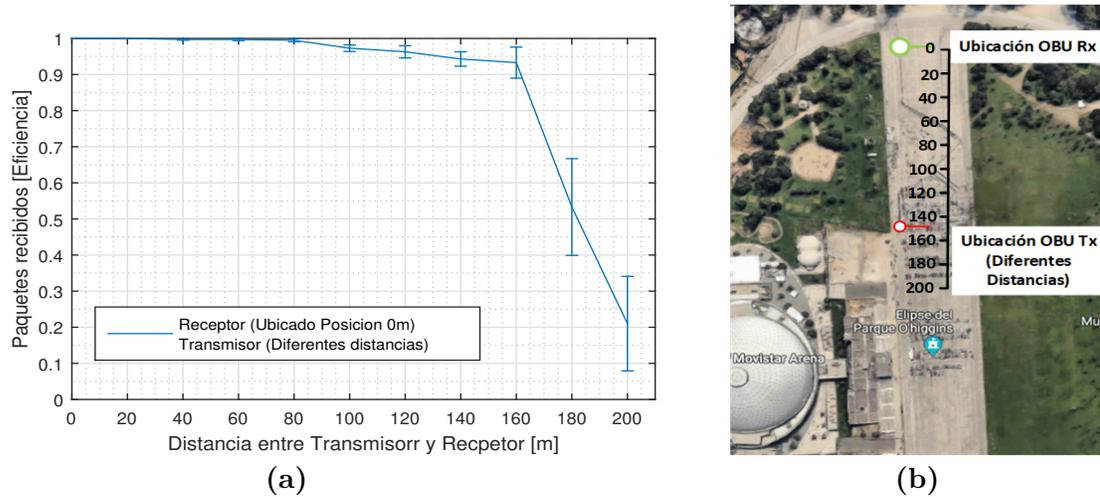
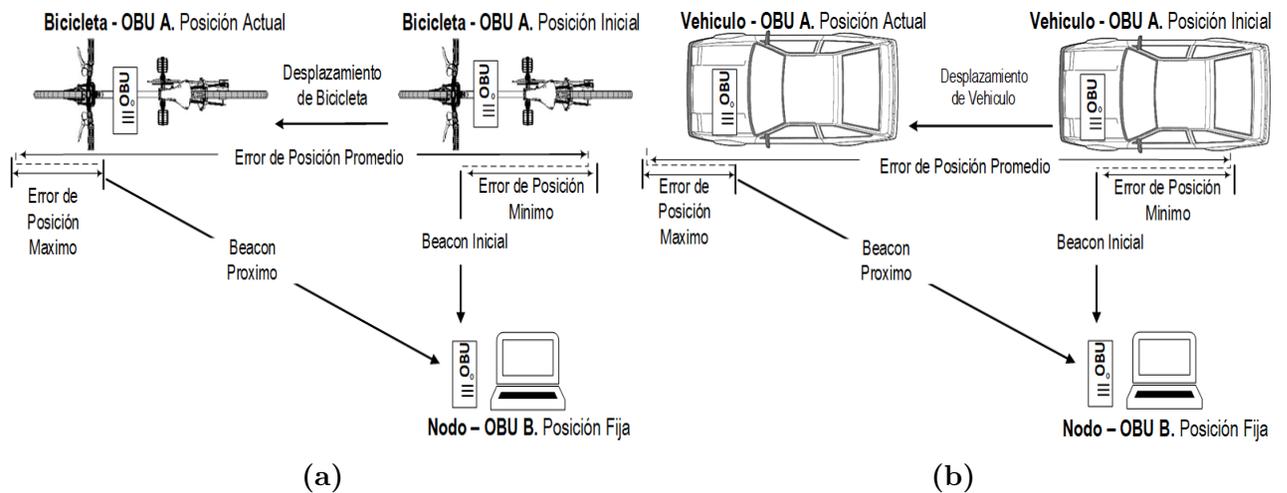


Figura 3.5: Ilustración de esquema para evaluación de algoritmo de *beacon* adaptativo usando *OBU* fija bajo un: a) Esquema con Bicicleta y b) Esquema con Automóvil.



Escenario de prueba con *OBU* fija

El escenario de la prueba se encuentra en el Parque O'Higgins, ubicado en Santiago de Chile (ver Figuras 3.6b y 3.7b). La distancia recorrida por la *OBU* móvil (ver Figuras 3.6a y 3.7a) es de aproximadamente 200 metros, mientras que la *OBU* fija es ubicada en el medio de la ruta, con el objetivo de evaluar el error de posición percibido por esta, así como validar el rango de cobertura. Los parámetros de evaluación se muestran en la Tabla 3.1. Para evaluar el mecanismo, y dada la poca velocidad que es posible alcanzar con la bicicleta, se analiza el error percibido por la *OBU* fija cuando la tasa de transmisión era de 1 beacons/s, posterior a ello se analiza el error percibido cuando la tasa de transmisión es adaptativa, en esta parte de las pruebas también se usa un automóvil para la unidad móvil, con el objetivo de validar el comportamiento de la configuración.

Figura 3.6: Ilustración de esquema para evaluación de mecanismo de *beacon* adaptativo usando Bicicleta a) *OBU* instalada en bicicleta y b) lugar donde se realiza las pruebas.

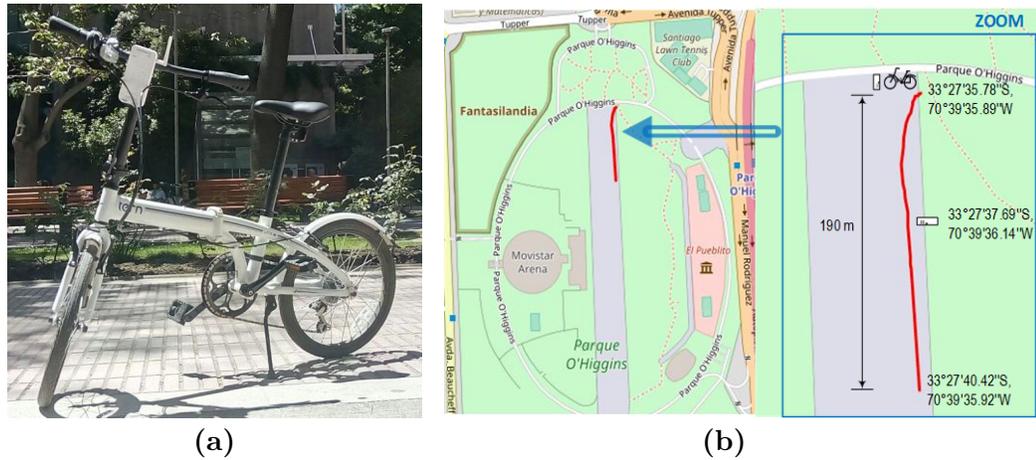


Figura 3.7: Ilustración de esquema para evaluación de mecanismo de *beacon* adaptativo usando Automóvil a) *OBU* instalada en vehículo y b) lugar donde se realiza las pruebas.

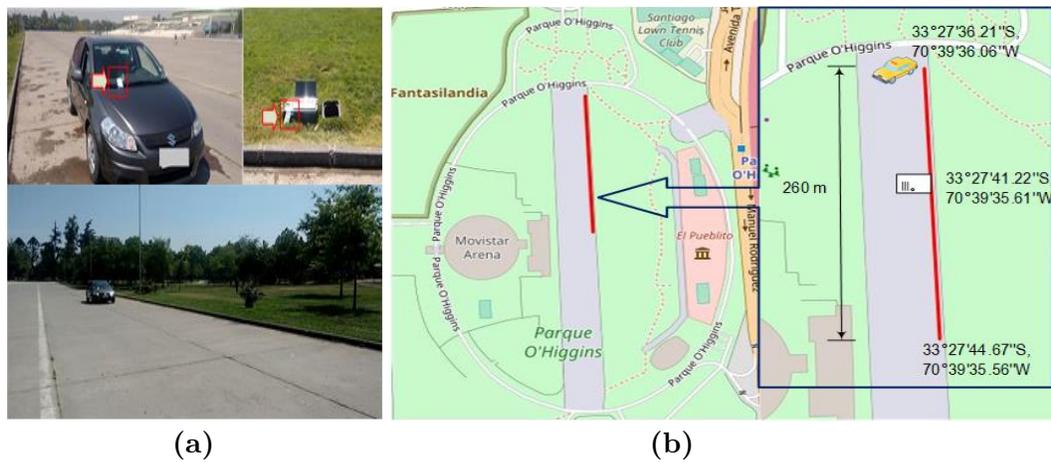


Tabla 3.1: Parámetros de configuración experimental - Bicicleta

Parámetro	Valor
Posición <i>OBU</i> Fija	33° 27' 37.69\"S, 70° 39' 36.14\"W
Posición <i>OBU</i> Móvil	Inicial: 33° 27' 35.78\"S, 70° 39' 35.89\"W Final: 33° 27' 40.42\"S, 70° 39' 35.92\"W
Velocidad del Vehículo	(0 m/s - 6 m/s) Bicicleta - (0 m/s - 20 m/s) Automóvil
Distancia promedio recorrida	190m
Frecuencia	5.9 GHz
Channel Bandwidth	10 MHz
Error de Posición deseado	1 m
Data Rate	6 Mbps
Potencia de Transmisión	20 mW

En las Figuras 3.8a a 3.9a, se muestran los resultados de varias pruebas con el vehículo en movimiento, donde se observa el comportamiento del automóvil respecto a su velocidad y aceleración. De estas pruebas se ilustra el error de posición promedio experimentado por la

OBU fija durante el tiempo de comunicación con la *OBU* automóvil, tal como se observa en las Figuras 3.8b a 3.9b. Como se observa en las Figuras 3.8 a 3.9, los cambios de velocidad y aceleración afectan el E_{prom} percibido por la *OBU* fija, el cual aumenta ante los cambios crecientes en la velocidad y aceleración. Sin embargo, al aumentar la frecuencia de transmisión de los *beacons* f_{T_b} el E_{prom} percibido por la *OBU* disminuye.

Figura 3.8: Parámetros con transmisión fija $f_{T_b} = 1$ Hz. a) Velocidad y Aceleración del vehículo transmisor. b) Error de posición promedio percibido por el receptor.

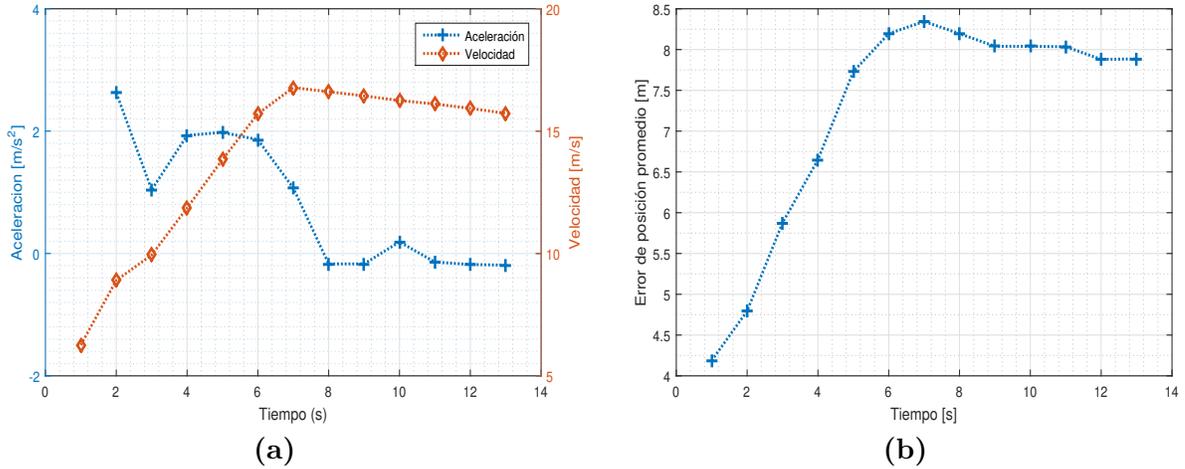
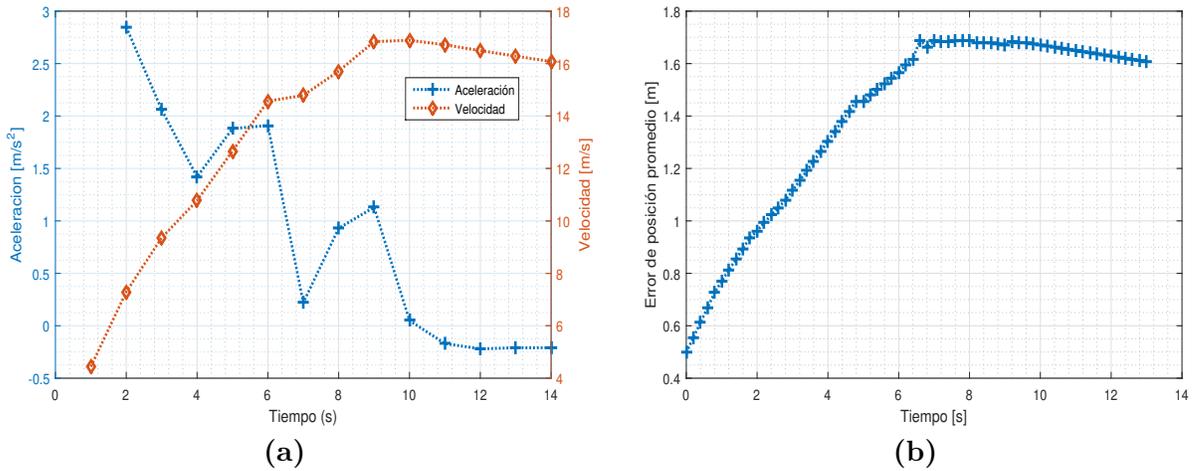


Figura 3.9: Parámetros con transmisión fija $f_{T_b} = 5$ Hz. a) Velocidad y Aceleración del vehículo transmisor. b) Error de posición promedio percibido por el receptor.

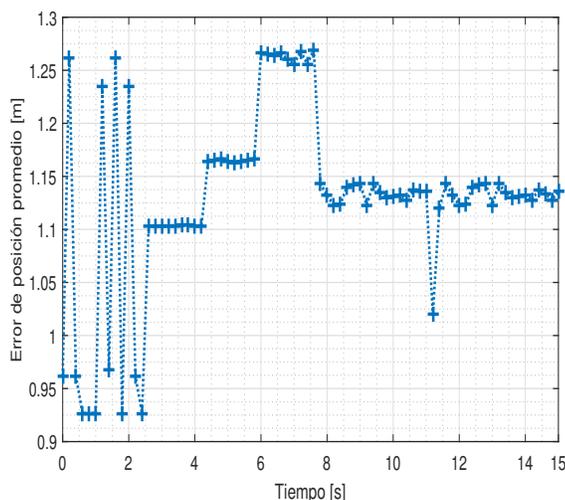


Para comprender esta afirmación se toma como referencia las Figuras 3.8 y 3.9. En el tiempo posterior a 10 s se puede observar que el vehículo alcanza una velocidad promedio cercano a los 16 m/s, dado que la frecuencia de transmisión es $f_{T_b} = 1$ Hz, esto implica que el vehículo se ha desplazado unos 16 m entre los dos *beacons* consecutivos. Por lo tanto, el E_{prom} de acuerdo con la ecuación 3.1) percibido por la *OBU* fija es cercano a 8 m/s. Por lo tanto, al aumentar la la frecuencia de transmisión a $f_{T_b} = 5$ Hz, se envía un *beacon* cada 0.2 s.

Esto conlleva que el E_{prom} percibido por la *OBU* fija se reduce en proporción a la frecuencia de envío, obteniéndose un E_{prom} cercano a 1.6 m.

La Figura 3.10 corresponde al E_{prom} experimentado por la *OBU* fija durante el tiempo de comunicación con la unidad *OBU* móvil, pero en este prueba se ejecuta el mecanismo de *beacon* adaptativo el cual se encuentra implementado en la *OBU* móvil. Como se observa el $E_{promedio}$ disminuye considerablemente, ya que la tasa de transmisión de los *beacons* se ajusta de acuerdo a la velocidad y aceleración presente en la unidad *OBU* móvil.

Figura 3.10: $E_{promedio}$ percibido por la *OBU* fija usando frecuencia de transmisión adaptativa f_b .



Al realizar la prueba con la transmisión adaptativa, se establece la frecuencia a $f_{Tb} = 1$ Hz solo para el estado inicial. Cuando la velocidad aumenta durante el experimento, el mecanismo implementado en la *OBU* toma la velocidad entre dos *beacons* consecutivos y calcula la f_b para la siguiente transmisión del *beacons*. El objetivo es mantener el error de posición a un valor deseado de 1 m.

En la Figura 3.11 se muestra la mejora de la transmisión adaptativa *vs* el mecanismo de *beaconing* fijo. Tanto la posición E_{prom} y E_{pmax} se reduce cuando la frecuencia se adapta de acuerdo a la velocidad del vehículo. En estos resultados preliminares, el E_{prom} mediante la transmisión adaptativa de *beaconing* es de 1.3 m y 1.15 m para bicicleta y automóvil, respectivamente.

Basado en los resultados experimentales con automóviles obtenidos en la Figura 3.11b, en donde se alcanza una velocidad promedio cercana a los 16.69 m/s se lleva a cabo una simulación usando este mismo parámetro de configuración de acuerdo al mecanismo propuesto en [7]. En la Figura 3.12a se obtienen los resultados de error de posición para los mismos valores de f_b usados en la etapa experimental. En la Figura 3.12b se comparan los resultados del error de posición promedio obtenidos de manera experimental y simulada.

Figura 3.11: E_{prom} y E_{pmax} percibido por el nodo fijo durante la comunicación, cuando la unidad transmisora esta instalada en: a) bicicleta y b) vehículo.

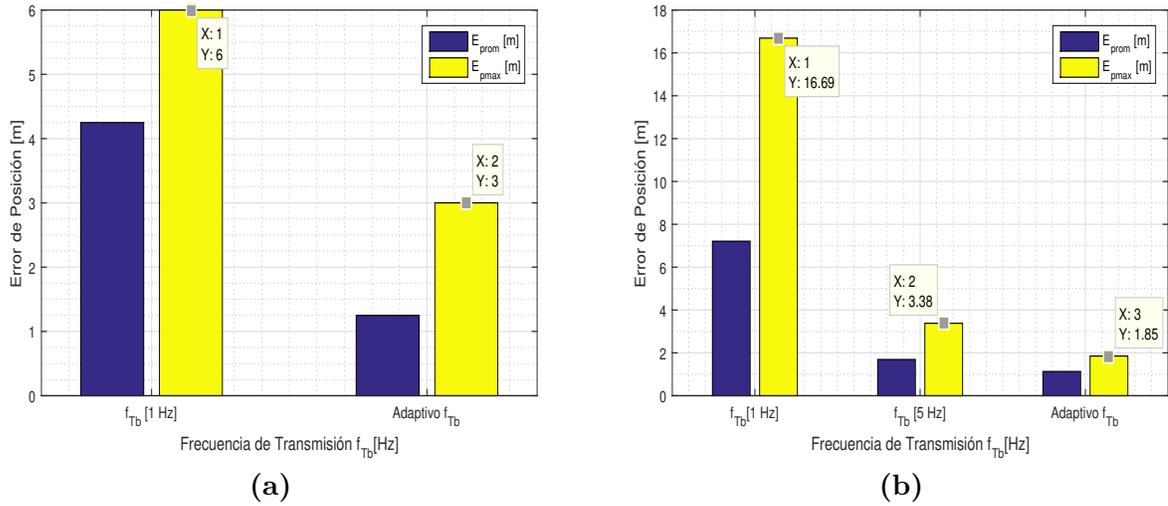
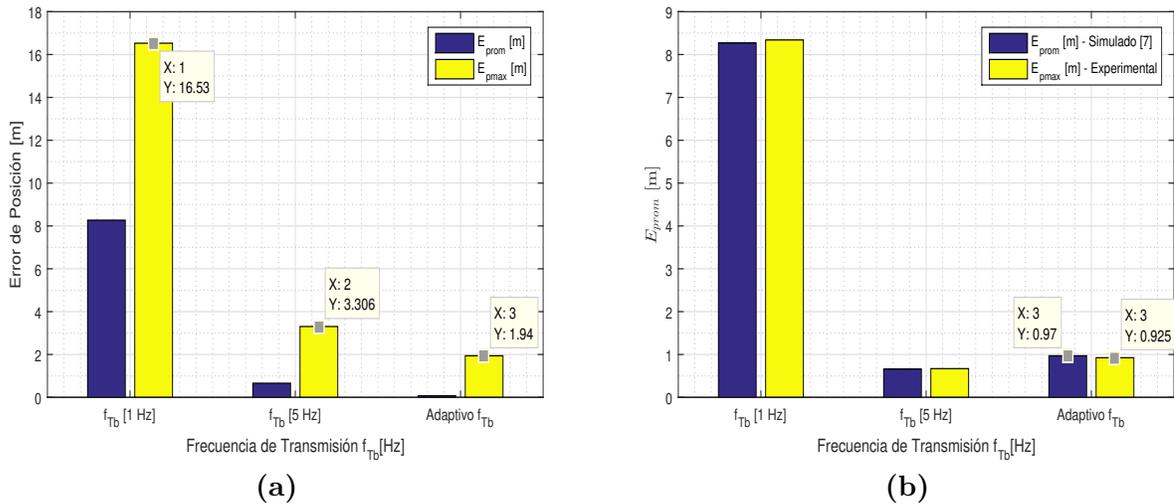


Figura 3.12: E_{prom} y E_{pmax} percibido por el nodo fijo durante la comunicación obtenido en a) simulación [7] y b) comparación de error promedio.

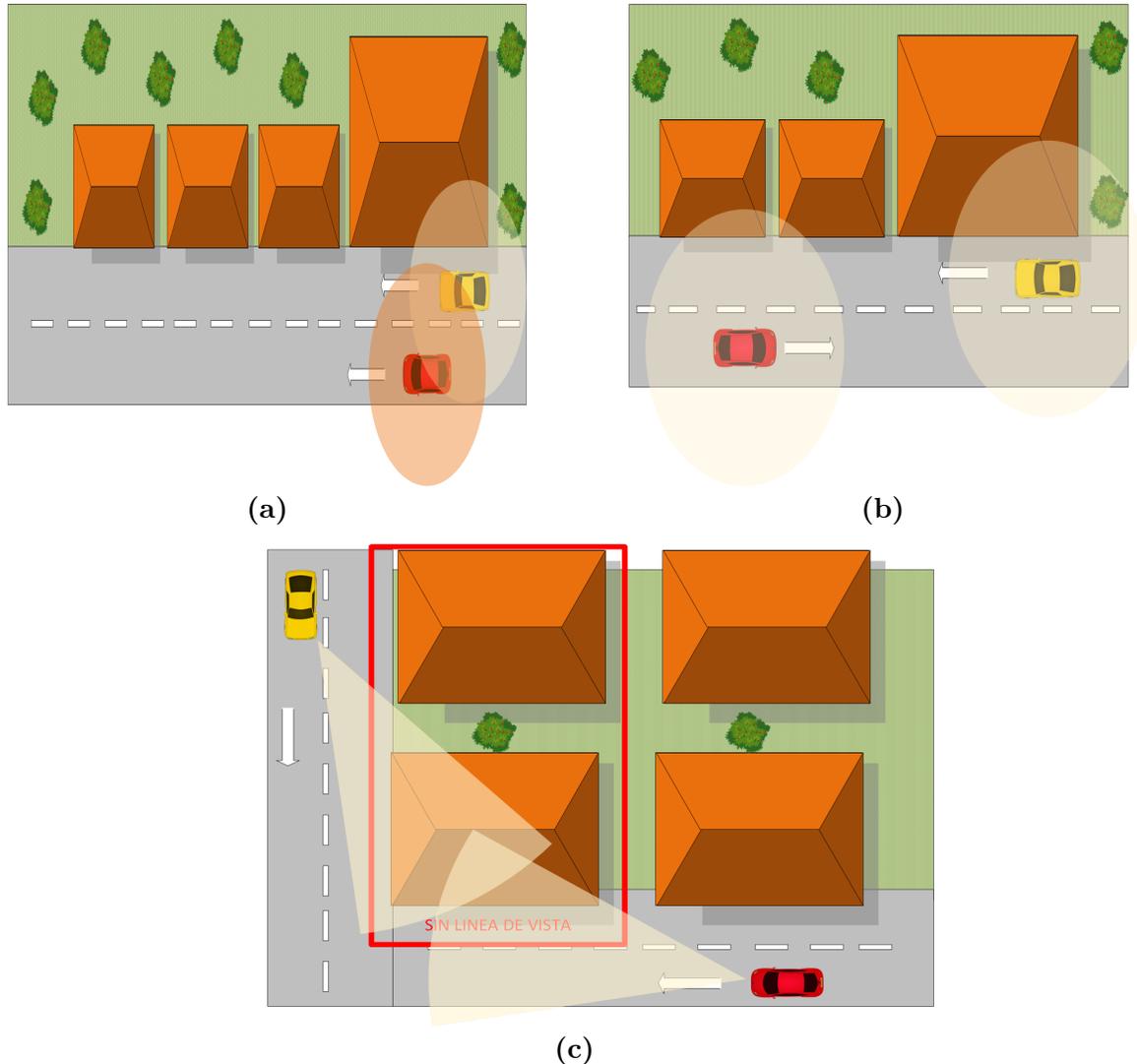


Cabe destacar la deferencia que se presenta en los resultados respecto a la adaptabilidad de la frecuencia f_b en la Figura 3.12b, la cual se debe al margen de precisión presente en el GPS [33]. Debido a este margen, al aumentar la frecuencia de transmisión f_b de los *beacons* la coordenada GPS obtenida en el próximo *beacons* no varía demasiado, por lo cual, la diferencia (refiérase a distancia percibida) entre dos *beacons* consecutivos no es tan alta (En cambio ante una f_b más baja, sí se nota los cambios en las coordenadas GPS recibidas. Así mismo, en la simulación no se presentan los inconvenientes que existen en la recepción de la señal GPS en ambientes reales). Finalmente, estos resultados experimentales preliminares son consistentes con los resultados simulados del mecanismo propuesto en [7].

3.3.3. Pruebas de *beaconing* en entornos vehiculares reales

Las pruebas realizadas se llevan a cabo sobre tres escenarios presentes en entornos vehiculares: 1) Los vehículos van en el mismo sentido, 2) Los vehículos van en sentido contrario y 3) Los vehículos se encuentran en una intersección (ver Figura 3.13). En los tres escenarios es fundamental conocer la posición del vehículo vecino por la importancia que esta implica en las aplicaciones de seguridad vial.

Figura 3.13: Ilustración de esquema para evaluación de mecanismo de *beaconing* adaptativo en escenarios con: a) vehículos en igual sentido b) vehículos en sentido opuesto y c) vehículos en una intersección sin línea de vista.



Metodología usando automóviles

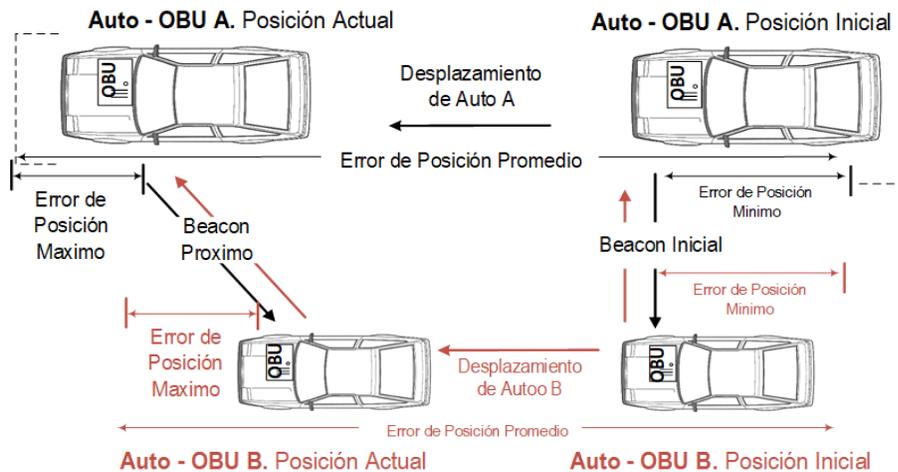
Al igual que la metodología empleada en la sección anterior, se procede a evaluar el mecanismo de *beaconing* adaptativo, pero en este caso ambas *OBUs* se encuentran en movimiento e instaladas en automóviles (ver Figura 3.14). Se evalúa el desempeño teniendo en cuenta el error de posición promedio E_{prom} percibido por la *OBU* receptora. El mecanismo se emplea y ejecuta en la *OBU* transmisora, donde la tasa de transmisión de *beacons* se adapta de

acuerdo a la velocidad y aceleración del vehículo, tal como se explica en la sección 3.2.

Figura 3.14: Ubicación de la *OBU* en los vehículos de prueba (Altura aproximada 1.45m).



Figura 3.15: Ilustración de esquema para evaluación del mecanismo de *beacon* adaptativo.



El objetivo no es solo evaluar el desempeño del mecanismo, sino comprender que factores del ambiente circundante pueden afectar la recepción del mensaje enviado por el transmisor, en este caso ligado a la precisión en la información de posición. En la Tabla 3.2 se indica los parámetros de configuración para la evaluación experimental.

Tabla 3.2: Parámetros de configuración experimental - Automóvil.

Parámetro	Valor
Velocidad del vehículo	(0 m/s - 20 m/s)
Distancia promedio recorrida	250m
Frecuencia	5.9 GHz
Ancho de banda del canal	10 MHz
Error de posición deseado	1 m
Tasa de datos	6 Mbps
Potencia de transmisión	20 mW

Escenario 1: Ambos vehículos en igual sentido

El primer escenario para evaluar corresponde al de la Figura 3.13a, aquí ambos vehículos viajan en la misma dirección. El escenario donde se realiza estas pruebas corresponde a una vía ubicada en la ciudad de Cali, Colombia, donde se puede alcanzar una velocidad máxima de 60 Km/h (ver Figura 3.16). Para realizar estas pruebas se utilizan dos automóviles. Cabe anotar que la *OBU* transmisora corresponde a la unidad en la que se implementa el mecanismo de transmisión de *beaconing* adaptativo [7]. Por lo tanto, es en la *OBU* receptora en la que se lleva a cabo el análisis, ya que es en esta donde se analiza el error de posición promedio percibido por esta unidad.

Figura 3.16: Escenario en el que se realiza las pruebas donde los automóviles viajan en el mismo sentido: a) vista frontal y b) vista superior.

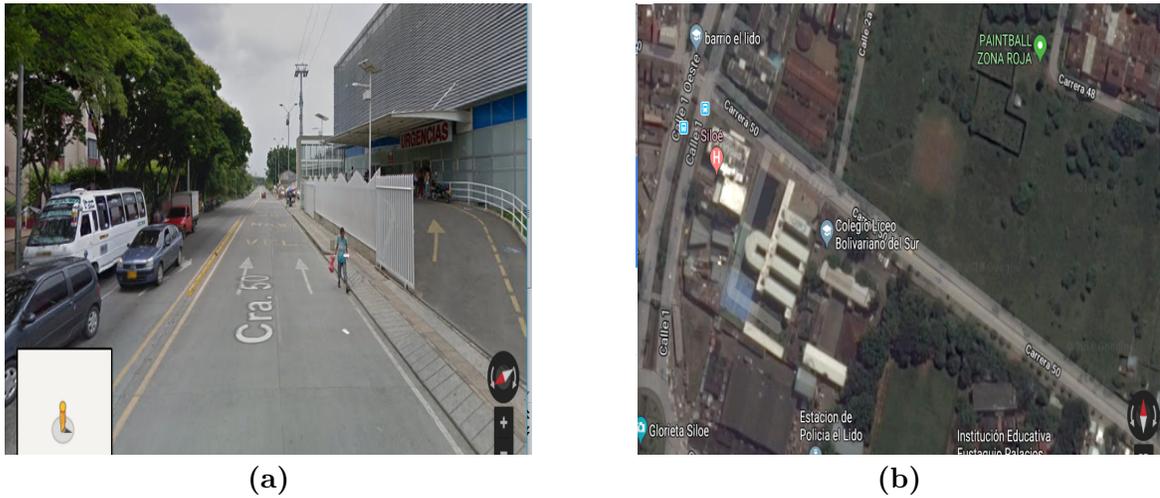
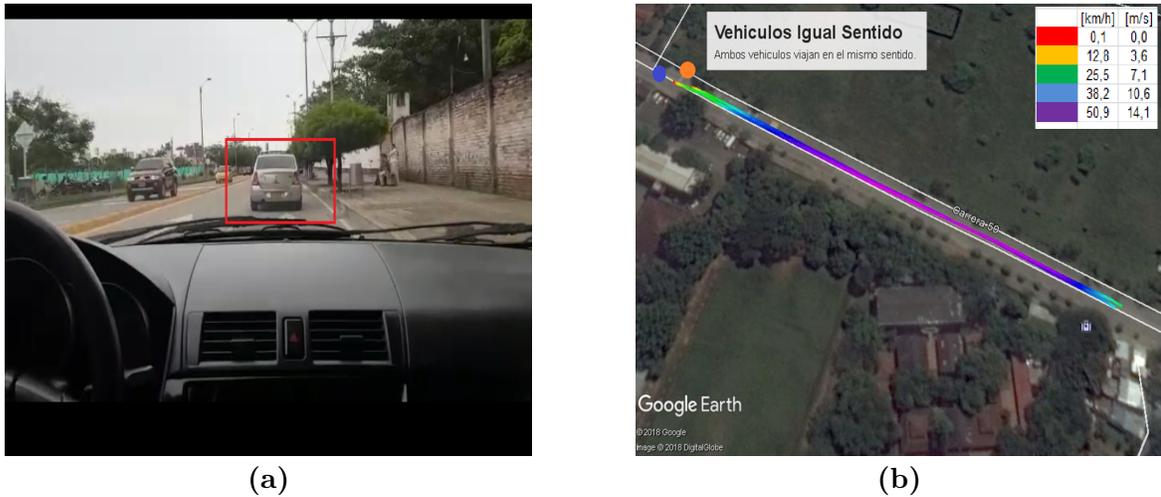


Figura 3.17: Automóviles usados en las pruebas experimentales: a) automóvil *Tx* - *OBU Tx* y b) automóvil *Rx* - *OBU Tx*

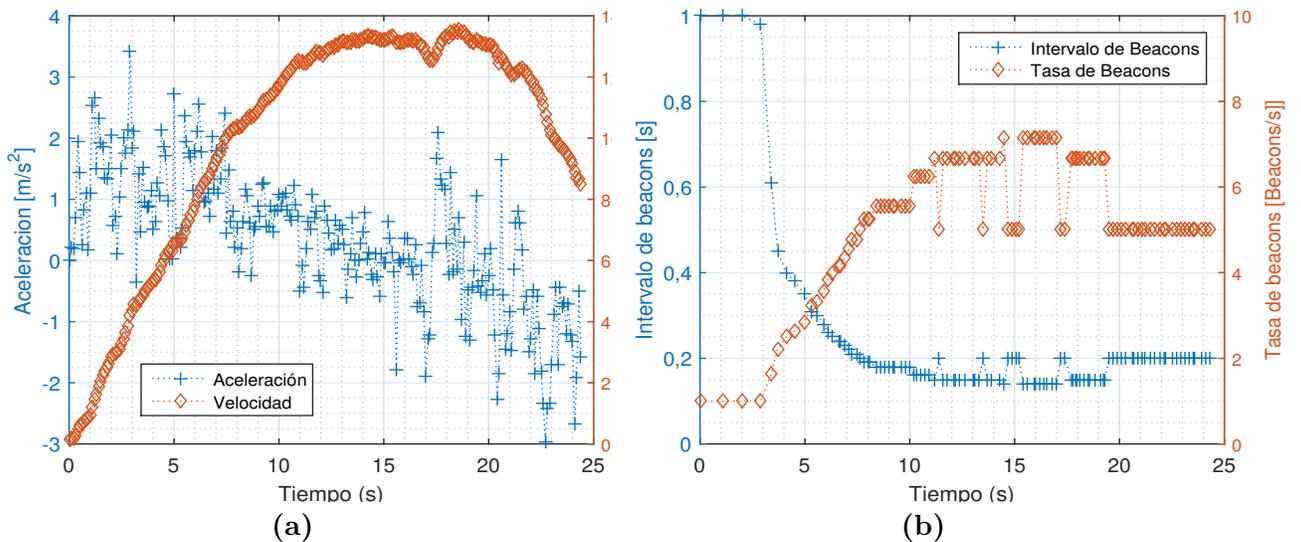


Figura 3.18: a). Vista interior desde el vehículo T_x b) Vista superior de escenario donde los vehículos viajan en el mismo sentido.



En la Figura 3.19a se observa la velocidad y aceleración experimentada por el vehículo con la unidad transmisora $OBU Tx$ en función del tiempo. En la Figura 3.19b se observa los intervalos y tasa de envío de transmisión de los *beacons* por parte del vehículo transmisor, esta tasa de transmisión es adaptativa de acuerdo a la velocidad y aceleración experimentada en el vehículo transmisor. El algoritmo implementado en la $OBU Tx$ intenta ajustar la frecuencia de transmisión de los *beacons* f_b con el objetivo de ajustar y mantener un error de posición E_{prom} percibido por la $OBU Rx$ cercano a 1 m.

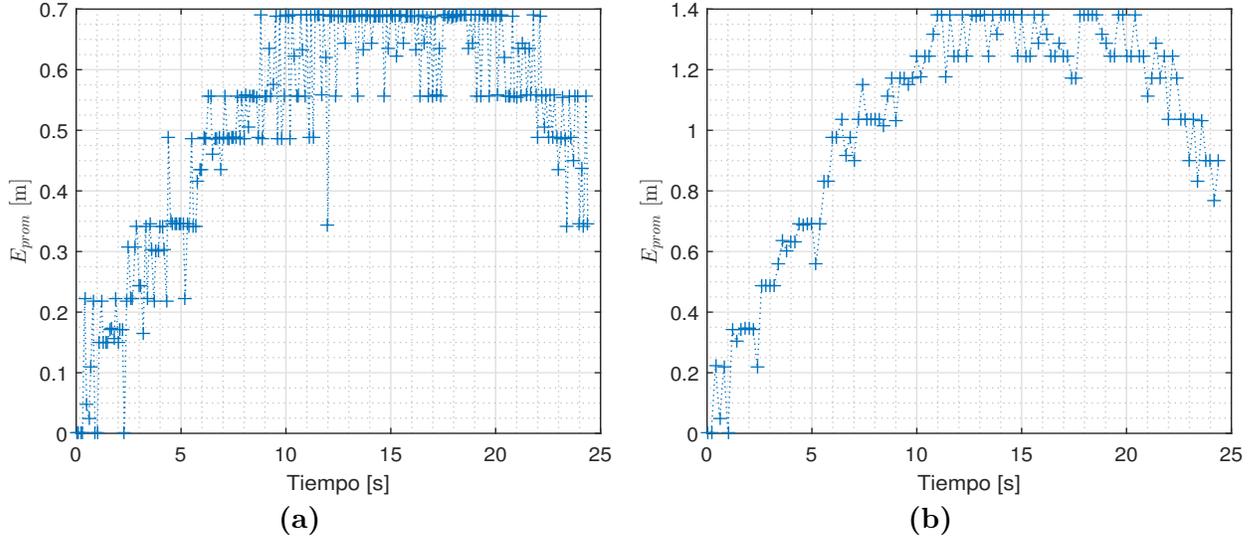
Figura 3.19: a) Velocidad y aceleración del vehículo T_x en función del tiempo y b) Intervalo de beacons y tasa de beacons del vehículo T_x en función del tiempo



En la Figura 3.20 se observa el error de posición promedio E_{prom} percibido por el vehículo con la $OBU Rx$ durante un intervalo de tiempo, donde la tasa de transmisión de *beacons* por parte de la $OBU Tx$ se realiza a una tasa fija de 0.1 s y 0.2 s, es decir, a una f_b de 10 Hz y

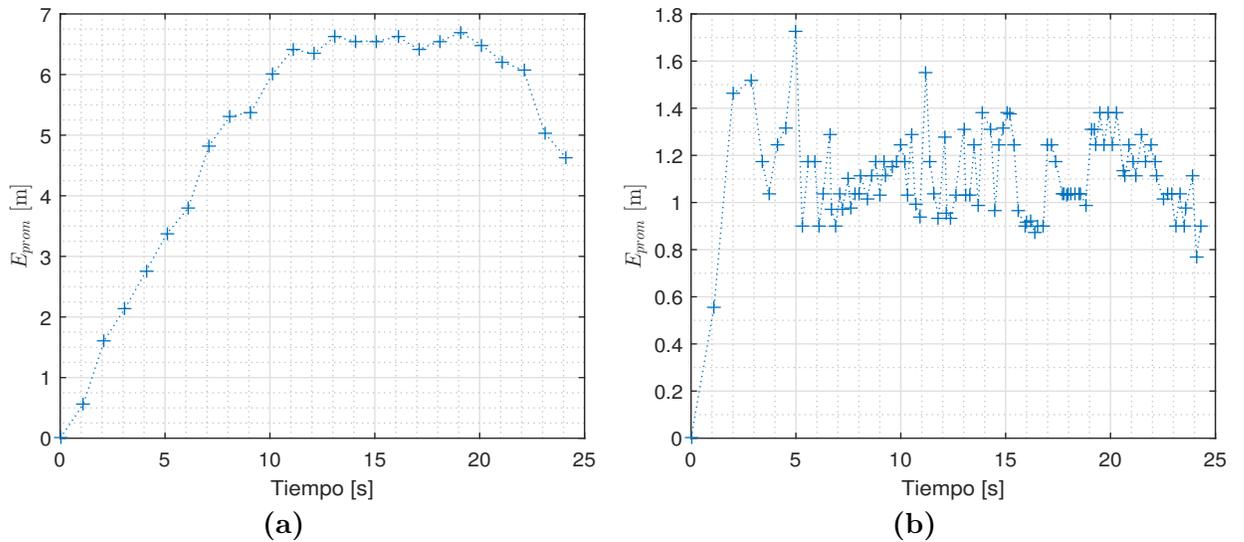
5 Hz respectivamente.

Figura 3.20: a) E_{prom} percibido por *OBU Rx* con una tasa de transmisión de *OBU Rx* de 10 *beacons/s* y b) E_{prom} percibido por *OBU Rx* con una tasa de transmisión de *OBU Rx* de 5 *beacons/s*



De igual manera, en la Figura 3.21a se observa el error de posición promedio E_{prom} percibido por el vehículo con la unidad receptora *OBU Rx* durante un intervalo de tiempo cuando la tasa de envío de *beacons* por parte de la *OBU Tx* se realiza a una tasa fija de 1 *beacon/s* (es decir, $f_b = 1$ Hz). Así, se evidencia en la Figura 3.21b donde se observa el error de posición promedio E_{prom} percibido por el vehículo con la *OBU Rx* durante un intervalo de tiempo cuando la tasa de envío de *beacons* por parte de la *OBU Tx* se realiza de manera adaptativa, ya que en esta prueba el algoritmo implementado en la *OBU Tx* se ejecuta.

Figura 3.21: a) E_{prom} percibido por *OBU Rx* con una tasa de transmisión de *OBU Rx* de 1 *beacons/s* y b) Intervalo de *beacons* vs Tasa de *beacons* del vehículo transmisor



Se realiza nuevamente otra prueba, donde la Figura 3.22 muestra la velocidad y aceleración experimentada por el vehículo con la *OBU Tx* en función del tiempo, así mismo se observa el intervalo y tasa adaptativa en la transmisión de los *beacons* por parte del vehículo transmisor. En la Figuras siguientes 3.3.3 e 3.24 se muestra el error de posición promedio E_{prom} percibido por el vehículo con la unidad receptora *OBU Rx*. Durante el intervalo de tiempo de la prueba, el mecanismo empleado en la unidad *OBU Tx* ajusta la tasa de transmisión de los *beacons* teniendo en cuenta la velocidad y aceleración propia del vehículo.

Figura 3.22: a) Velocidad y aceleración del vehículo *Tx* en función del tiempo y b) Intervalo de *beacons* y tasa de *beacons* adaptativa del vehículo *Tx*

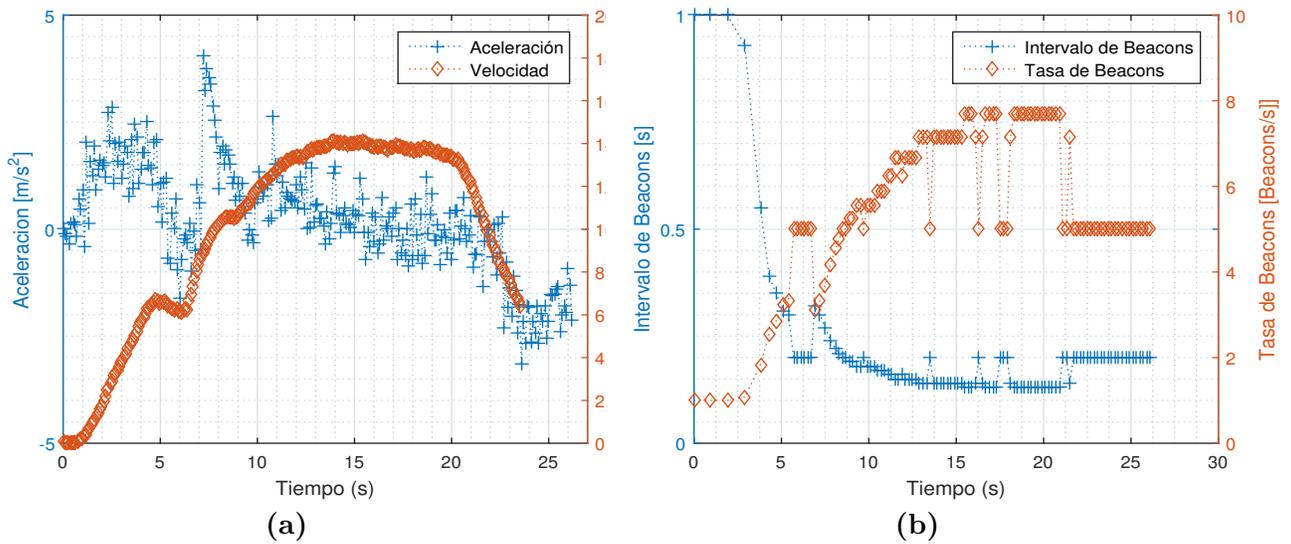


Figura 3.23: Error de posición E_{prom} percibido por la *OBU Rx* para una tasa de transmisión de la unidad *OBU Tx*: a) 10 beacon/s y b) 5 beacon/s.

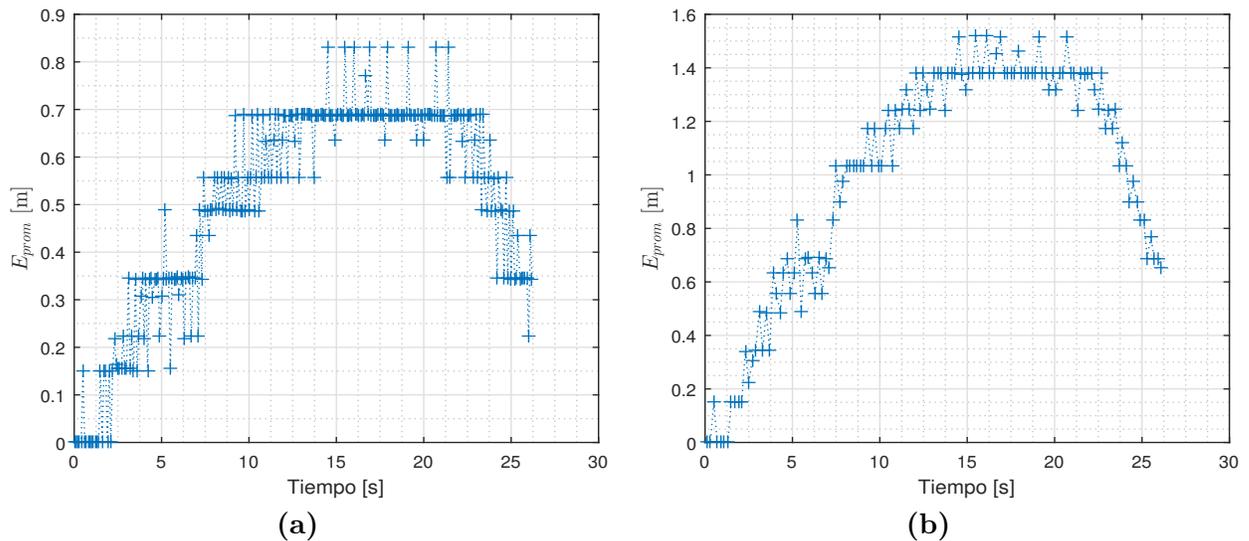
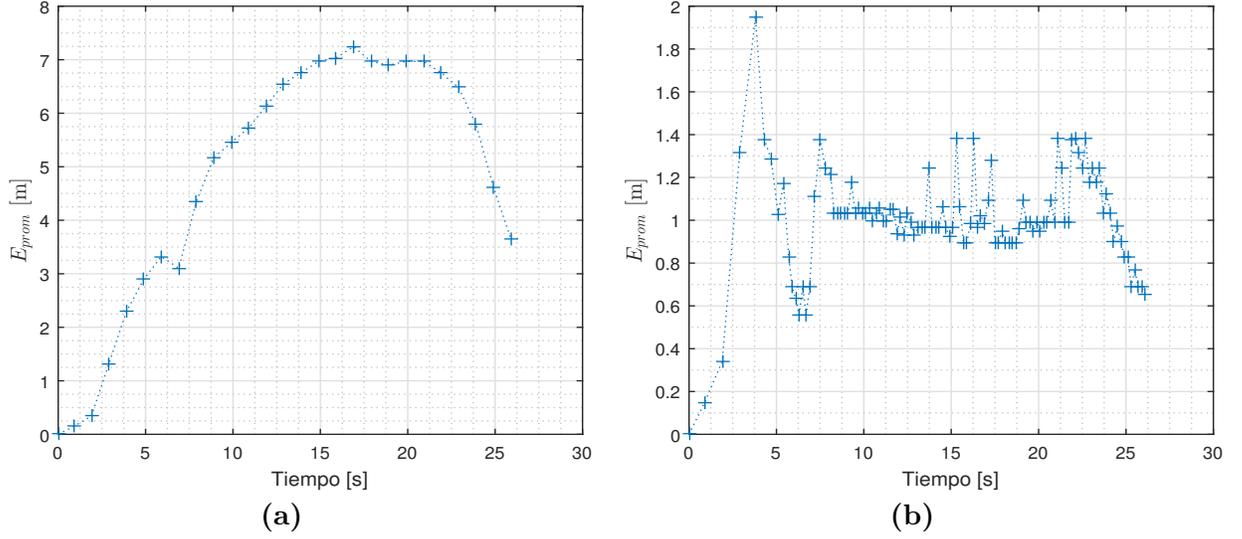


Figura 3.24: Error de posición E_{prom} percibido por la *OBU Rx* para una tasa de transmisión de *beacons* de la unidad *OBU Tx*: a) 10 *beacon/s* y b) Adaptativa.



La Tabla 3.3 muestra los datos obtenidos en las pruebas realizadas con los vehículos cuando viajan en el mismo sentido. El E_{prom} corresponde al valor medio obtenido durante el período en el cual los vehículos se encuentran en movimiento. Mientras que, el $E_{prom} máx$ corresponde al máximo valor medido del E_{prom} durante este periodo. Como se indica en el mecanismo evaluado, la tasa de transmisión inicial del *beacon* inicia con una $f_b = 1 Hz$. Por lo cual, durante los primeros segundos de evaluación se observa un error de posición más alto que en el resto del tiempo. Donde el $E_{prom} máx$ normalmente corresponde a los primeros 5 s de la prueba. Ahora bien, teniendo en cuenta todo el periodo evaluado, el E_{prom} promedio obtenido en las dos pruebas para una f_b adaptativa es 1.106 m y 1.003 m con una desviación estándar de 0.208 m y 0.218 m respectivamente. Dichos resultados concuerdan con el valor deseado del E_{prom} de 1 m que busca mantener el mecanismo de *beaconing* adaptativo seleccionado. En suma, se confirma el objetivo del mecanismo evaluado e implementado en la unidad transmisora *OBU Tx* y su buen desempeño en este tipo de escenario.

Tabla 3.3: Error de Posición promedio percibido por la *OBU* receptora.

Tasa de <i>beaconing</i> <i>beacon/s</i>	Error de posición promedio		Desviación estándar [m]	Error de posición promedio		Desviación estándar [m]
	E_{prom} [m]	$E_{prom} máx$ [m]		E_{prom} [m]	$E_{prom} máx$ [m]	
1	4.918	6.690	2.048	4.812	0.832	2.363
5	1.017	1.380	0.373	1.000	1.519	0.436
10	0.510	0.691	0.188	0.502	0.619	0.221
Adaptativo	1.106	1.725	0.208	1.003	1.950	0.248

Escenario 2: Ambos vehículos en sentido opuesto

Para la ejecución de las pruebas en este escenario, los automóviles se conducen sobre una carretera con doble carril tal que permite la conducción en doble sentido 3.13b. La distancia inicial entre ellos fue de aproximadamente 300 m. Una vez se está al extremo de la calle, se inicia la conducción de los vehículos en sentido para que se encuentren.

Figura 3.25: a). Vista interior desde el vehículo T_x b) Vista superior de escenario donde los vehículos viajan en sentido opuesto.

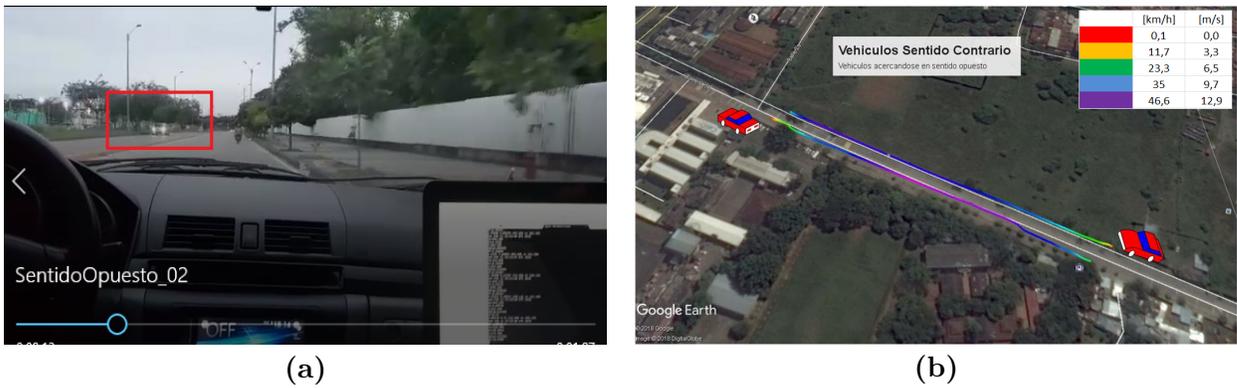
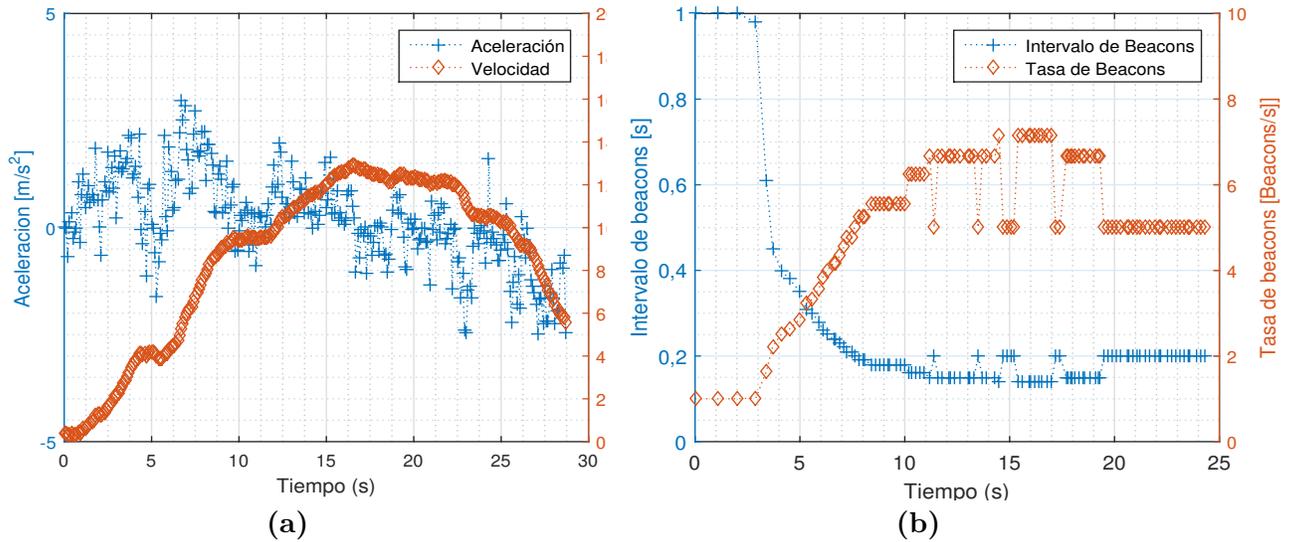


Figura 3.26: a) Velocidad y aceleración del vehículo T_x en función del tiempo y b) Intervalo de beacons vs Tasa de beacons del vehículo transmisor.



En la Figura 3.25 se puede apreciar el interior del vehículo $OBU T_x$ con la línea de vista hacia el vehículo $OBU R_x$. También es posible ver un vídeo correspondiente a las pruebas realizadas en los escenarios hasta aquí evaluados: <https://www.youtube.com/watch?v=7iEjH3LqNP0&t=50s>.

La Figura 3.26 muestra la velocidad y aceleración experimentada por el vehículo con $OBU T_x$ en función del tiempo, así como los intervalos y tasa de envío de transmisión de los beacons por parte del vehículo transmisor. En la Figuras siguientes 3.27 e 3.28 se grafica el error de posición promedio E_{prom} percibido por el vehículo con la $OBU R_x$ durante un intervalo de tiempo cuando la tasa de envío de beacons por parte de la $OBU T_x$ se realiza a diferentes tasas de transmisión y de manera adaptativa (ver Figura 3.28b).

Figura 3.27: Error de posición E_{prom} percibido por la *OBU Rx* para una tasa de transmisión de: a) 10 *beacon/s* y b) 5 *beacon/s* de la *OBU Tx*.

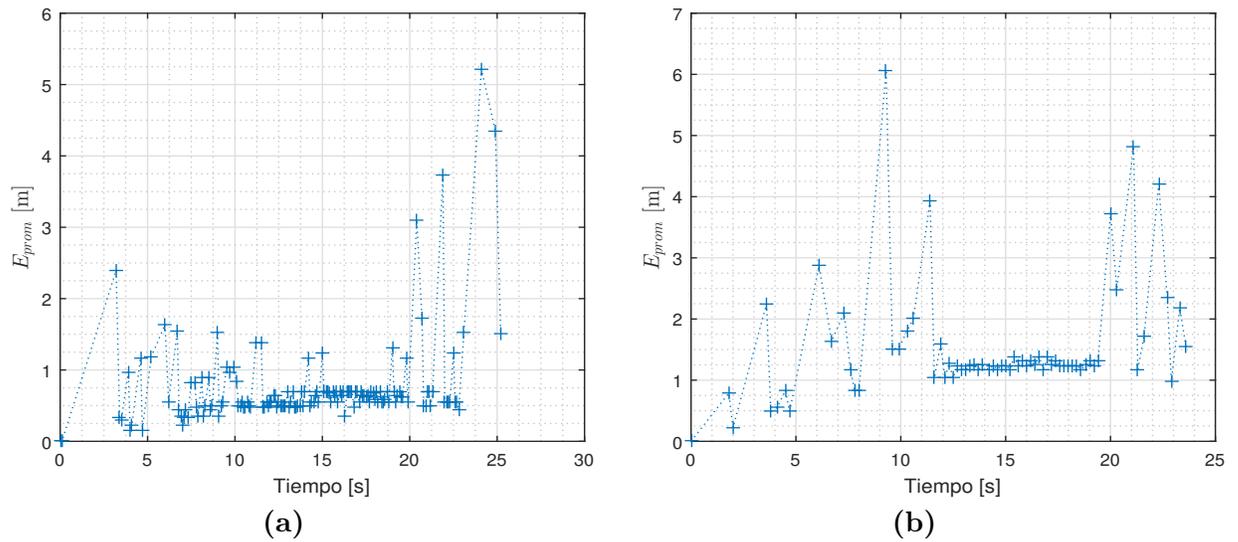
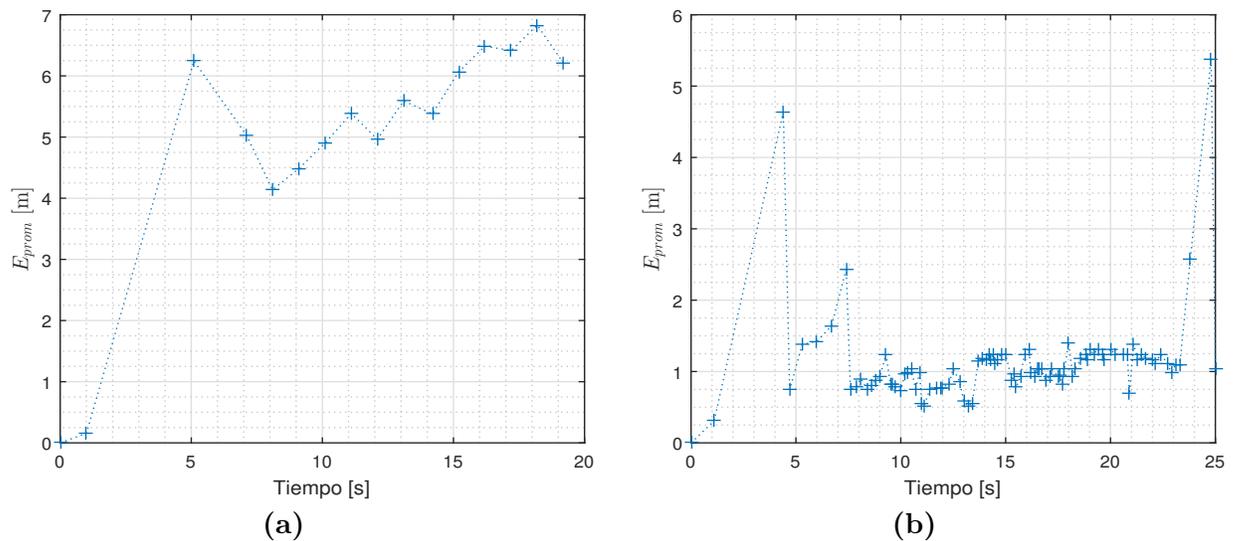


Figura 3.28: a) E_{prom} percibido por *OBU Rx* con una tasa de transmisión de *OBU Rx* de 1 *beacons/s* y b) Intervalo de *beacons* vs Tasa de *beacons*.



En la Figura 3.29a se observa la velocidad y aceleración experimentada por el vehículo con la *OBU Tx* en función del tiempo. En la Figura 3.29b se observa los intervalos y tasa de envío de transmisión de los *beacons* por parte del vehículo transmisor. El algoritmo implementado en la *OBU Tx* intenta ajustar la frecuencia de transmisión de los *beacons* f_b con el objetivo de ajustar y mantener un error de posición E_{prom} percibido por la *OBU Rx* cercano a 1 m. En la Figura 3.30 se observa el error de posición promedio E_{prom} percibido por el vehículo con la *OBU Rx* durante un intervalo de tiempo cuando la tasa de envío de *beacons* por parte de la *OBU Tx* se realiza a una tasa fija de 0.1 s y 0.2 s, es decir a una f_b de 10 Hz y 5 Hz respectivamente.

Figura 3.29: a) Velocidad y aceleración del vehículo Tx en función del tiempo y b) Intervalo de $beacons$ y tasa de $beacons$ adaptativa del vehículo Tx .

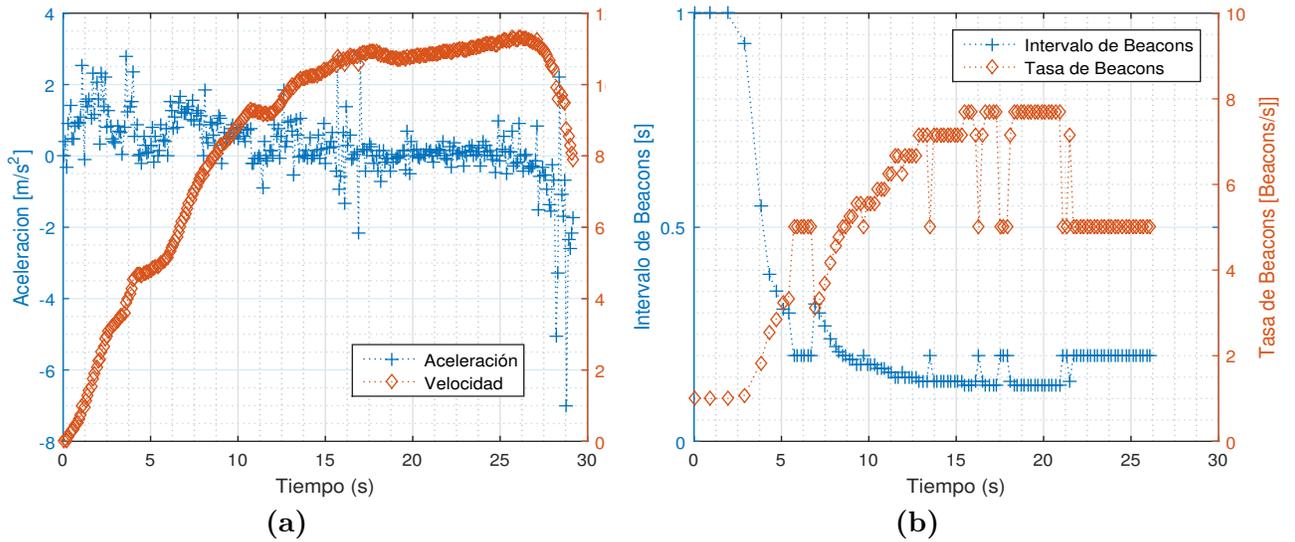
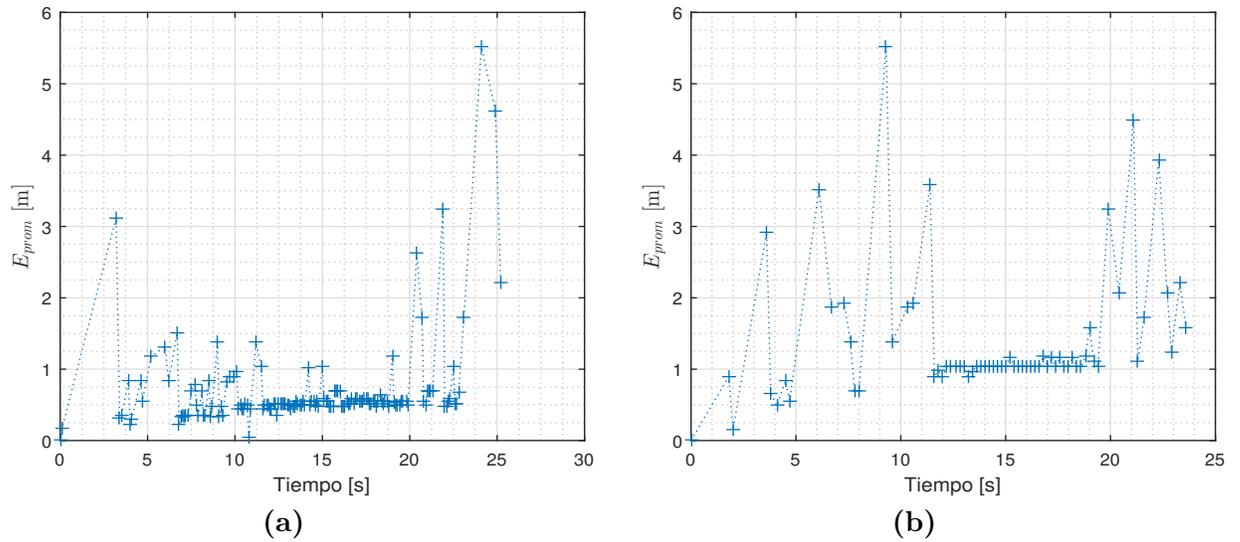
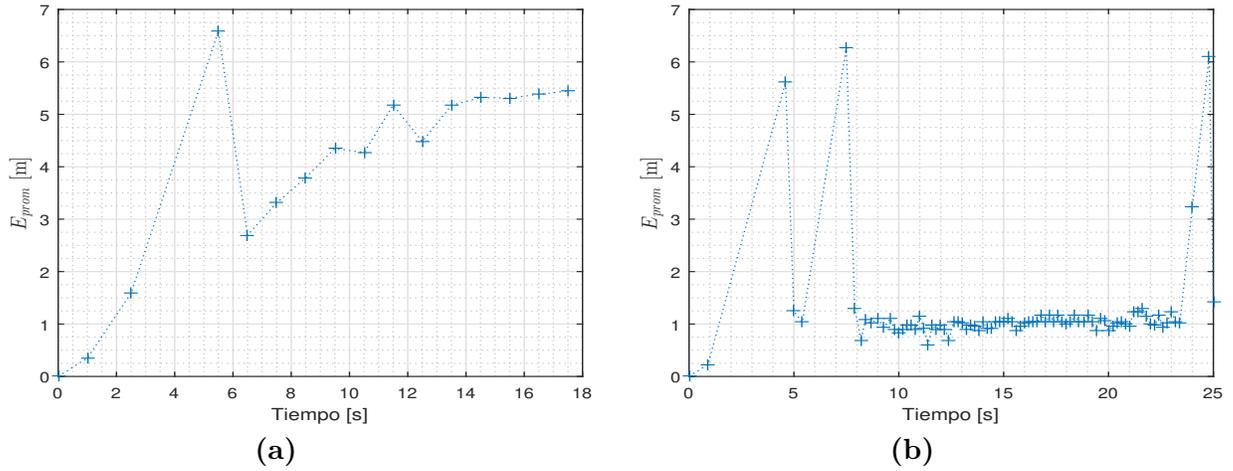


Figura 3.30: E_{prom} percibido por $OBU Rx$ con una tasa de transmisión de $OBU Rx$ de: 10 $beacons/s$ y b) 5 $beacons/s$



En la Figura 3.31 se observa el error de posición promedio E_{prom} percibido por el vehículo con la $OBU Rx$ respecto a la tasa de transmisión de 1 s e adaptativa del vehículo $OBU Tx$ para mantener un E_{prom} cercano a 1 m.

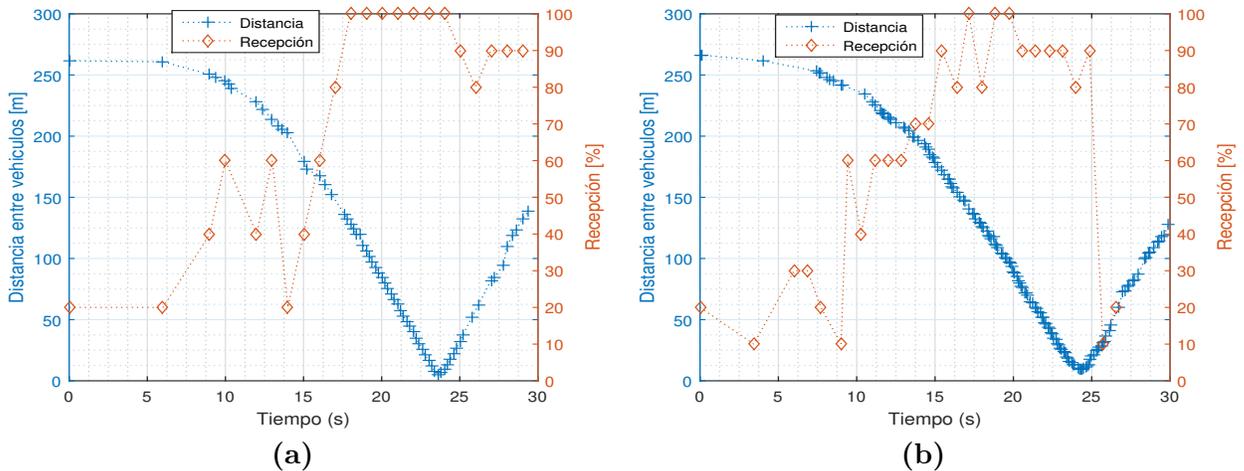
Figura 3.31: a) E_{prom} percibido por *OBU Rx* con una tasa de transmisión de la *OBU Tx* de 1 *beacons/s* y b) Intervalo de *beacons* y tasa de *beacons* adaptativa del vehículo *Tx*.



En las Figuras 3.27, 3.28, 3.30, 3.31 se aprecian dos cosas:

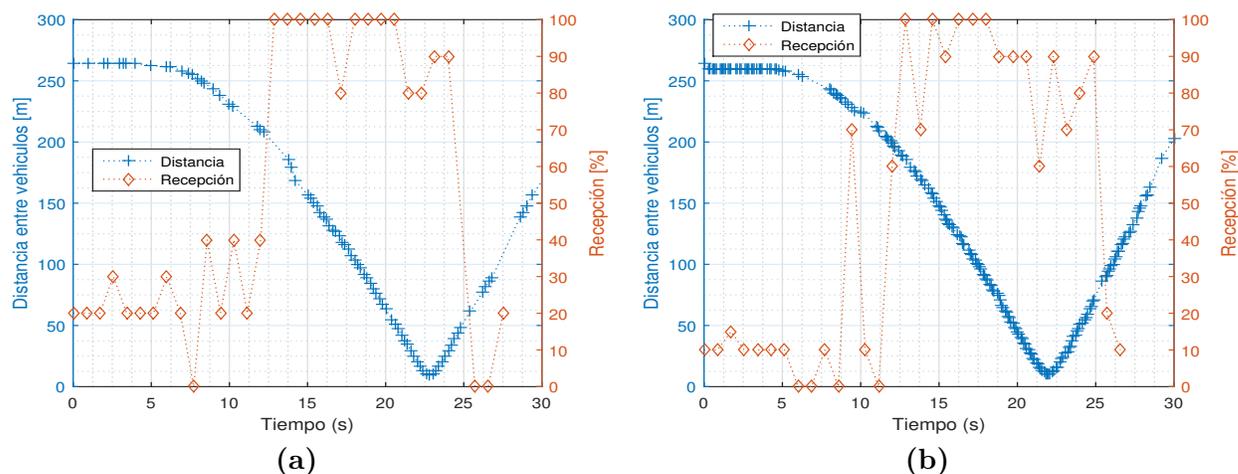
- En los instantes iniciales y finales del tiempo de comunicación ($20s < tiempo < 10s$) entre los vehículos, el E_{prom} percibido por el vehículo receptor aumenta por encima del deseado que es 1 m. Esto se debe, a que durante este intervalo de tiempo la tasa de recepción de estos mensajes de estado por parte del vehículo receptor disminuye debido a la distancia existente entre los vehículos.
- En el intervalo de comunicación ($10s < tiempo < 20s$), el E_{prom} percibido por el vehículo receptor disminuye y se acerca al valor deseado de 1 m. Esto se debe, a que durante este intervalo de tiempo los vehículos se aproximan entre ellos y se encuentran en el rango de comunicación de 160 m en donde la tasa de recepción está por encima del 90% (ver Sección 3.3.1).

Figura 3.32: Distancia y tasa de recepción del vehículo *Rx* respecto al vehículo *Tx* a una tasa de: a) 5 *beacons/s* y b) 10 *beacons/s*.



Para validar estas apreciaciones, se lleva a cabo un par de mediciones más, las cuales se muestran en las Figuras 3.32-3.33. En estas figuras, se muestra la distancia existente entre los vehículos a medida que estos se acercan en relación a la tasa de recepción percibida en el vehículo receptor.

Figura 3.33: Relación entre la distancia y la tasa de recepción percibida en el vehículo Rx en relación al vehículo Tx para una tasa de: a) 5 *beacons/s* y b) 10 *beacons/s*.



De las Figuras 3.32 y 3.33, se aprecia que, cuando la distancia entre los vehículos es inferior a 160 m, el vehículo receptor OBU Rx presenta una tasa de recepción por encima del 90 %. Este valor está muy acorde a las mediciones obtenidas en la sección 3.3.1. Sin embargo, también se observa que, si la tasa de transmisión de *beacons* aumenta por parte de la OBU Tx , en aquellas distancias por fuera del rango de cobertura experimental establecido en la sección 3.3.1 tienden a tener una mayor probabilidad de recepción por parte de la unidad OBU Rx en el vehículo receptor.

De la anterior afirmación, suponga que el alcance o rango de cobertura de una OBU se puede representar por porcentajes de receptividad (sensibilidad), tal que entre más cerca esté la OBU transmisora respecto a la OBU receptora existe una mayor probabilidad de recepción tal como se observa en la Figura 3.4a mostrada en la sección 3.3.1. Se aprecia que, a una tasa de transmisión baja, la cantidad de paquetes recibidos en distancias superiores al rango ideal es muy baja. Sin embargo, cuando las pruebas fueron realizadas con una tasa de transmisión más alta, los *beacons* recibidos aumentan.

Tabla 3.4: Error de Posición promedio percibido por la OBU receptora.

Tasa de <i>beaconing</i>	Error de posición promedio		Desviación estándar	Error de posición promedio		Desviación estándar
Beacons/s	E_{prom} [m]	E_{prom} máx[m]	[m]	E_{prom} [m]	E_{prom} máx[m]	[m]
1	4.893	6.829	2.027	3.951	6.587	1.909
5	1.530	6.070	0.997	1.404	5.518	0.963
10	0.755	5.219	0.660	0.705	5.508	0.682
Adaptativo	1.120	5.380	0.666	1.202	6.279	0.974

La Tabla 3.4 muestra los datos obtenidos en las pruebas realizadas con los vehículos cuando viajan en sentido opuesto. El E_{prom} corresponde al valor medio obtenido durante el

periodo en el cual se realiza la prueba. Mientras que el $E_{prom} máx$ corresponde al máximo valor medido del E_{prom} durante este periodo. El $E_{prom} máx$ en esta prueba presenta valores altos debido a que para el intervalo de tiempo de ($20s < tiempo < 10s$) se presenta una baja tasa de recepción de *beacons*. Por lo cual, aunque el vehículo transmisor *OBU Tx* (donde se implementa y ejecuta el mecanismo de *beaconing* adaptativo) ajuste la tasa de transmisión de *beacons*, la distancia entre los vehículos durante este intervalo de tiempo es superior (ver Figura 3.32a y 3.33a) al rango máximo experimental obtenido en las pruebas (160 m). Por lo tanto, la tasa de recepción en el vehículo *Rx* es baja. Por lo que, los *beacons* consecutivos recibidos no corresponden necesariamente a los *beacons* consecutivos transmitidos por la *OBU Tx*, lo que implica que, al calcular la distancia entre ellos se tenga unos valores altos en el error de posición percibido.

No obstante, el error de posición promedio obtenido en las pruebas para una f_b adaptativa es 1.120 m y 1.202 m con una desviación estándar de 0.666 m y 0.974 m respectivamente. Estos resultados se ajustan al valor deseado del E_{prom} de 1 m. Aunque la desviación estándar presenta un valor cercano a 1 m, esto se debe a los datos de E_{prom} percibidos por el vehículo receptor *OBU Rx* en el intervalo de prueba ($20s < tiempo < 10s$). Cabe destacar, que durante el intervalo de comunicación ($10s < tiempo < 20s$) la tasa de recepción del vehículo *Rx* presenta un porcentaje por encima del 90 %, y es ahí donde el E_{prom} percibido por el vehículo receptor se acerca al valor deseado de 1 m. Además, se destaca que el E_{prom} percibido por el vehículo *Rx* permite que exista una información actualizada respecto a la posición del vehículo *OBU Tx* con un valor cercano al deseado de acuerdo al mecanismo de *beaconing* adaptativo empleado. Adicional, esta distancia de comunicación sigue siendo útil en este tipo de escenarios, donde el conocimiento preciso de la posición es importante para las aplicaciones de seguridad vial [83].

Escenario 3: Vehículos en una intersección

El escenario siguiente por evaluar corresponde a mediciones realizadas en una intersección vehicular. Las intersecciones seleccionadas se encuentran obstruidas en su cruce por edificaciones que impiden u obstruyen la línea de vista entre los vehículos que tienen instaladas las *OBUs*. Estas mediciones buscan evaluar el impacto en la tasa de recepción de los *beacons* en el vehículo receptor a distintas distancias del vehículo transmisor respecto al cruce de la intersección. La recepción de estos mensajes permite evaluar el desempeño en la capacidad de los sistemas de seguridad vial para detectar vehículos vecinos que se aproximan a la intersección.

En el momento en que se inicia las pruebas con los vehículos se observa que no existía comunicación entre ellos, esta comunicación solo se dio cuando los vehículos se encontraban cerca muy cerca al cruce de la intersección. De esta manera, se toma la decisión de evaluar el rango de comunicación usando como métrica la tasa de recepción de los *beacons* entre las unidades *OBU*. La metodología en este escenario, consiste en ubicar la unidad receptora *OBU Rx* en una posición fija, variando la ubicación de la unidad transmisora *OBU Tx* a lo largo de la carretera respecto al centro de la intersección.

La primer medición se realiza en una intersección la cual se encuentra obstruida por un edificio construido de ladrillo y el cual tiene una altura aproximada de 10 m (ver Figura 3.34a). La metodología en las pruebas de medición en este punto consisten en ubicar en una

posición fija la unidad *OBU Rx* respecto al centro de la intersección, y variar la posición de la unidad transmisora *OBU Tx* a lo largo de la carretera respecto al centro de la intersección, de esta manera, se evalúa la tasa de recepción de *beacons* en la unidad *OBU Rx*. La segunda medición, se realiza en una intersección donde la línea de vista se encuentra obstruida por un edificio con una altura aproximada de 25 m de altura y construido por dos capas de cristal Low E, que en su interior contiene una lámina que bloquea el 50 % de la radiación solar (ver Figura 3.34b).

Figura 3.34: Vista lateral superior de los escenarios de prueba para las mediciones experimentales en intersección: a) ITI San Juan Bosco, Colombia. b) Edificio Beauchef, Universidad de Chile, Chile.

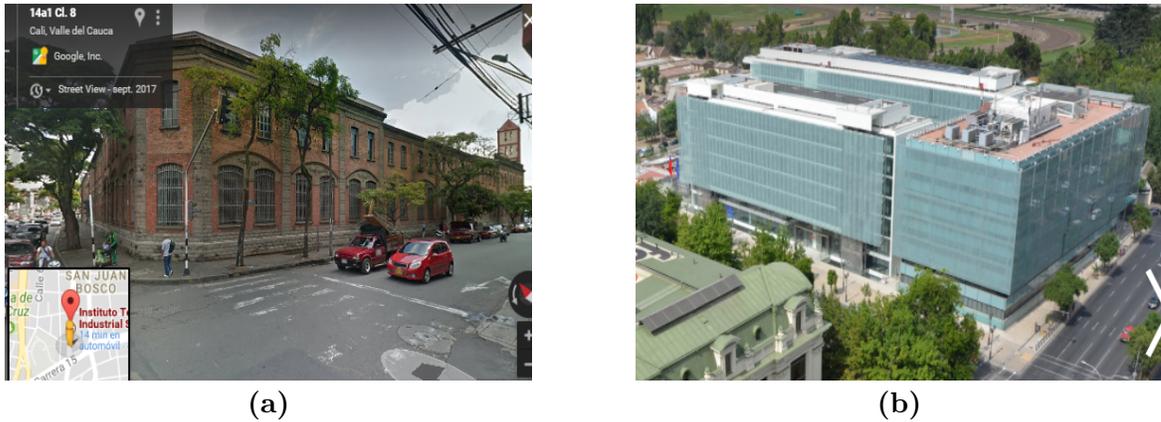


Figura 3.35: Vista lateral superior de escenarios de intersección: a) ITI San Juan Bosco, Colombia. b) Edificio Beauchef, Universidad de Chile, Chile.



En la Figura 3.35a se muestran los resultados obtenidos en las pruebas realizadas en la primer intersección donde se ubica la unidad receptora *OBU Rx* en dos posiciones fijas, y se procede a variar la distancia de la unidad transmisora *OBU Tx* en intervalos de 10 m respecto al centro de la intersección hasta alcanzar una distancia aproximada de 120 m. En la Figura 3.36a, los resultados obtenidos corresponden a la primer medición donde la unidad receptora *OBU Rx* se ubica en una posición fija a 30 m del centro de la intersección. Por lo tanto, se procede a variar la posición de la unidad transmisora *OBU Tx* respecto al centro de

la intersección, con el objetivo de evaluar la tasa de recepción en la unidad *OBU Rx* respecto a la posición de la unidad *OBU Tx*. Los resultados muestran que, cuando la unidad *OBU Tx* está a una distancia inferior a 90 m del centro de la intersección, la unidad *OBU Rx* presenta una tasa de recepción cercana al 80 %. La segunda posición fija en la que se ubica la unidad *OBU Rx* corresponde a 90 m respecto al centro de la intersección. En la figura 3.36b se alcanza una tasa de recepción en la unidad *OBU Rx* superior al 80 % para distancias de hasta 20 m de variación en la unidad *OBU Tx*.

Figura 3.36: Tasa de pérdida de paquetes en función de la distancia entre *OBU Tx* y *OBU Rx*. a) *OBU Rx* se ubica fija a 30m de la intersección, b) *OBU Rx* ubica fija a 90m de la intersección (Edificio ITI San Juan Bosco, Colombia.)

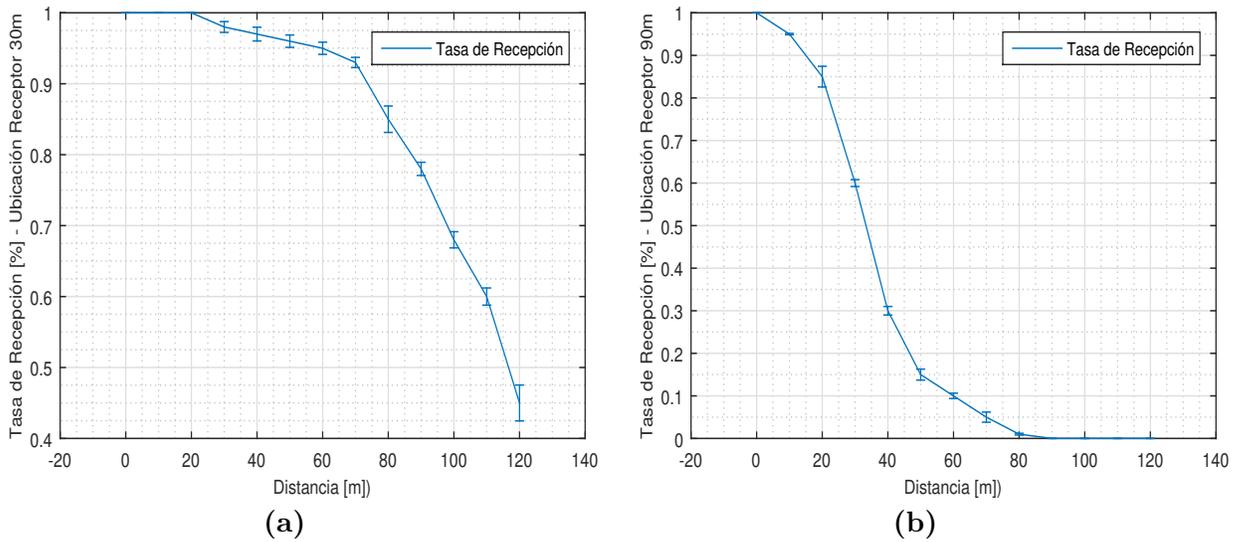
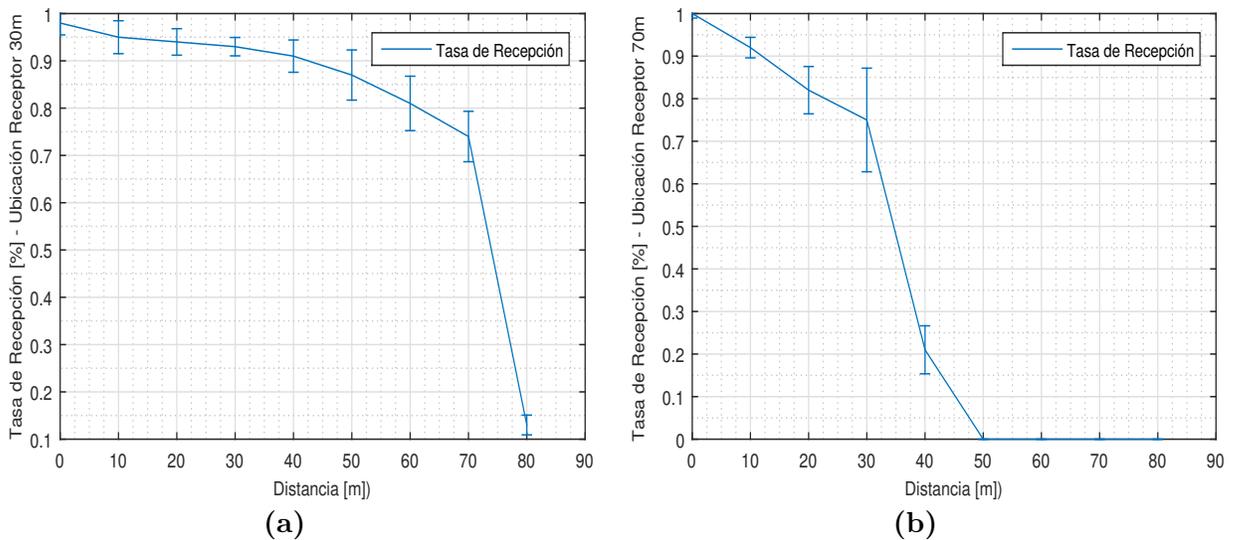


Figura 3.37: a) Tasa de pérdida de paquetes en función de la distancia entre emisor y receptor. a) *OBU Rx* se ubica fija a 30m de la intersección, b) *OBU Rx* ubica fija a 70m de la intersección (Edificio Beauchef, Chile).



En la segunda intersección (ver Figura 3.35b), se emplea la misma metodología que en la anterior, en donde se ubica la unidad receptora *OBU Rx* en dos posiciones fijas, y se varia la distancia de la unidad transmisora *OBU Tx* respecto al centro de la intersección a una distancia aproximada de 80 m.

En la Figura 3.37a, los resultados obtenidos corresponden a la primer medición donde la unidad receptora *OBU Rx* se ubica en una posición fija a 30 m del centro de la intersección. Por lo tanto, se procede a variar la posición de la unidad transmisora *OBU Tx* respecto al centro de la intersección, Los resultados obtenidos muestran que, cuando la unidad *OBU Tx* está a una distancia inferior a 60 m del centro de la intersección, la unidad *OBU Rx* presenta una tasa de recepción cercana al 80%. En la segunda posición fija en la que se ubica la unidad *OBU Rx* corresponde a 70 m respecto al centro de la intersección, como se observa en la Figura 3.36b se alcanza una tasa de recepción en la unidad *OBU Rx* superior al 80% para una distancia de hasta 20 m de variación en la unidad *OBU Tx*.

Algo muy particular que se observa en las Figuras 3.37a e 3.37b son los cambios abruptos en la tasa de recepción de la unidad *OBU Rx*. En donde, se pasa de tener una tasa de recepción de *beacons* de 0% a iniciarse la comunicación en un intervalo de 10 m (En la Figura 3.37a en la distancia 70 m a 80 m, y en la Figura 3.37b en el intervalo de 40 m a 50 m). Estos cambios abruptos en la tasa de recepción permiten comprender como el material con el que se construyen las edificaciones, la altura, entre otros factores, no solo obstruye la línea de vista entre los vehículos, sino que afecta drásticamente la comunicación ínter-vehicular, más explícitamente en la recepción de los mensajes de estado entre las unidades *OBUs*.

Lo anterior se puede comprender, teniendo en cuenta el efecto de sombreado y la atenuación que causan obstrucciones tales como: arboles, vehiculos o en este caso las edificaciones en las intersecciones, y que, degradan notablemente la comunicación inalámbrica entre las unidades *OBUs*. Es claro, en este punto que el rango de comunicación está relacionado con la tasa de recepción de los mensajes de estado (teniendo en cuenta que se está evaluando la comunicación directamente entre estas dos unidades *OBU* sin interferencias de otras unidades), y que en ambientes NLOS este rango de comunicación se reduce drásticamente respecto a los escenarios LOS.

Finalmente, al evaluar el mecanismo de *beaconing* seleccionado bajo 3 escenarios vehiculares evaluados: vehículos viajando en el mismo sentido, vehículos viajando en sentido opuesto y finalmente el escenario de una intersección vehicular, los resultados obtenidos nos permiten realizar la siguiente conclusión:

En los dos primeros escenarios de evaluación donde existe línea de vista entre los vehículos, se observa en los resultados obtenidos que no existe mayor complejidad en la evaluación y desempeño del mecanismo de *beaconing* adaptativo implementado en las unidades *OBUs*, y que, el error de posición promedio se ajusta al valor deseado de 1 m. Sin embargo, en el tercer escenario la línea de vista entre los unidades se ve afectada por las edificaciones, degradando la comunicación inalámbrica entre los dispositivos *OBUs*. Este problema tiene un impacto negativo en la capacidad de los sistemas de seguridad vial para detectar vehículos vecinos que se aproximan a la intersección [50]. De tal manera que, aun cuando los vehiculos cuenten con dispositivos que permitan la comunicación inalámbrica entre ellos, los efectos del sombreado causado por estos obstáculos, lleva a una degradación del rendimiento en la conectividad

debido a la atenuación severa de las señales de transmisión (tal como se observa en los resultados obtenidos en el escenario 3). Por lo tanto, el mecanismo de *beaconing* adaptativo empleado que permite ajustar la tasa de transmisión para que la *OBU* receptora perciba un error de posición deseado, solo presenta un desempeño ideal en los escenarios con línea de vista, dado que en las intersecciones solo existe comunicación en las zonas más cercanas a la intersección. Por lo tanto, los vehículos que se aproximan a la intersección, solo conocerán la ubicación de sus vecinos cuando ambos se encuentran cerca al punto de la intersección, lo que da como resultado una gran posibilidad de un accidente al no contar con tiempo suficiente para realizar una maniobra que le permita evadir o evitar el choque inminente.

Para superar la degradación de las comunicaciones en las intersecciones y mejorar la comunicación en escenarios NLOS, en la literatura se han realizado varios trabajos previos que proponen el uso de RSU y otros vehículos como nodos de retransmisión [8,84–87]. Los mecanismos propuestos permiten en diferentes medidas mejorar la relación de entrega de mensajes de seguridad, reducir la carga del canal y aumentar la conciencia cooperativa mejorando de esta manera la seguridad vial en entornos de intersección.

De acuerdo a lo anterior, y con base a los resultados experimentales obtenidos en esta sección, en el siguiente capítulo se presenta una propuesta de un mecanismo de retransmisión para intersecciones urbanas, mediante el diseño de un mecanismo *cross-layer* que considera aspectos como la distancia entre los vehículos y la potencia recibida. De esta manera se propone una solución que permita mejorar la comunicación inalámbrica en intersecciones urbanas en comparación con otros mecanismos propuestos en la literatura con el objetivo de mejorar la conectividad entre los vehículos y reducir la carga del canal.

Capítulo 4

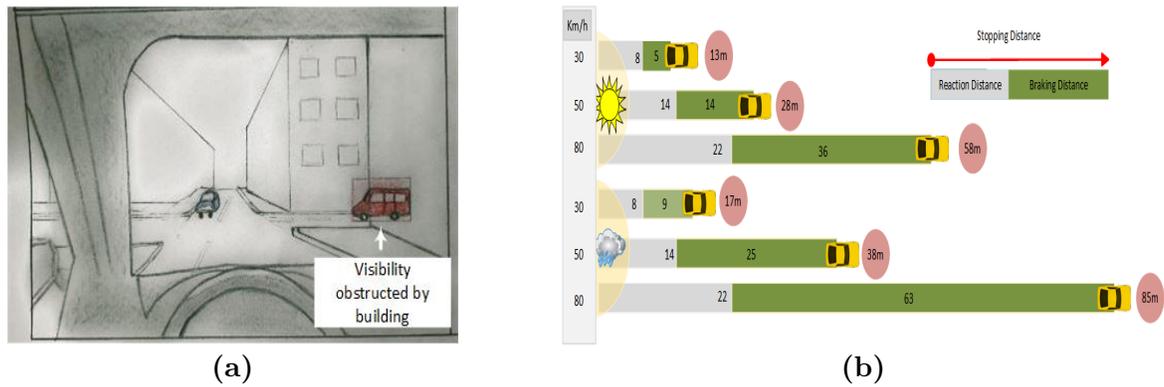
Mecanismo propuesto: $RCLD_{Px}$ mecanismo de retransmisión en intersecciones vehiculares

En el momento en que los vehículos tienen línea de vista o comunicación entre ellos, podría llegar a ser muy tarde ya que muchos conductores no tienen en cuenta un importante factor a la hora de conducir: la distancia de parada. Y es que el exceso de velocidad y de confianza en el estilo de manejo hacen que una persona no tome la suficiente distancia con los vehículos a su alrededor. La distancia de parada (S_d) corresponde a la distancia recorrida por un vehículo desde el momento en que comienza a frenar hasta el momento en que se detiene por completo. Esta distancia está compuesta por dos parámetros: la distancia de reacción (R_d), que indica qué tanta distancia recorre un automóvil desde el momento en que el conductor reacciona a un peligro hasta el momento en que pisa el freno; y la distancia de frenado (B_d), que se refiere a la distancia que recorre un vehículo desde el punto en que sus frenos se aplican por completo hasta el momento en que se detiene en su totalidad.

La distancia de reacción se puede expresar como $R_d = v \times t_r$, donde v y t_r corresponden a la velocidad del vehículo y al tiempo de reacción, respectivamente. Aquí el parámetro t_r generalmente toma el valor de 1 s [88]. La distancia de frenado definida como $B_d = \frac{v^2}{2\mu g}$, donde μ corresponde al coeficiente de fricción, que generalmente adquiere valores de 0,4 y 0,7 para carreteras mojadas y secas, respectivamente [89, 90]. La Figura 4.1 ilustra las diferentes distancias de frenado según las velocidades típicas en entornos urbanos en condiciones climáticas variables.

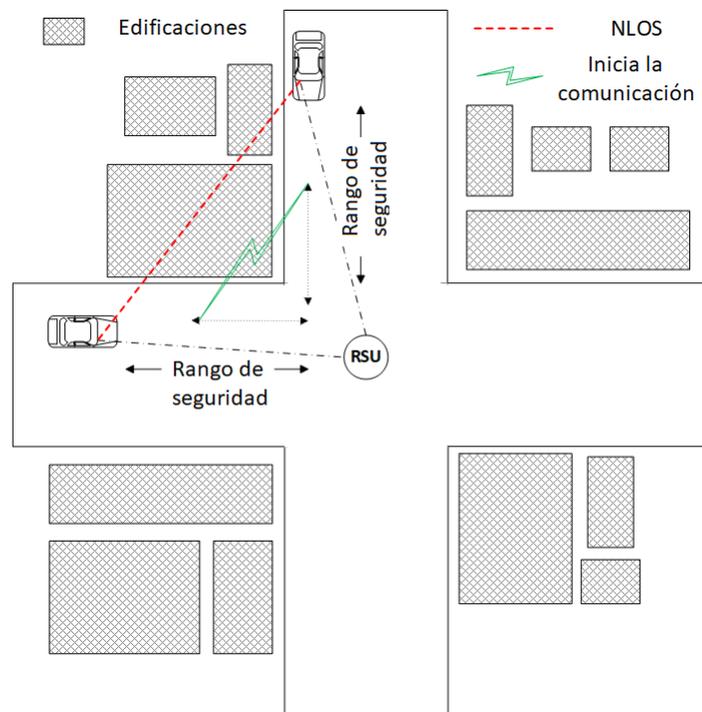
En [8] los autores examinan el uso de vehículos estacionados como nodos de retransmisión para mejorar la conciencia cooperativa y la seguridad vial en entornos urbanos y suburbanos. Aquí los autores demuestran que, en entornos de baja densidad, usar vehículos estacionados como nodos de retransmisión es un mecanismo efectivo ya que mejora la conciencia cooperativa entre todos los nodos cercanos.

Figura 4.1: Intersecciones: a) La línea de visión entre vehículos a menudo se ve afectada por obstáculos como los edificios, b) distancias de frenado a velocidades típicas en entornos urbanos en condiciones climáticas variables.



Sin embargo, esto requiere una alta densidad de tráfico y un alto porcentaje de vehículos equipados (es decir, una penetración sustancial en el mercado de dispositivos DSRC). Una posible solución al bajo porcentaje de vehículos equipados con DSRC, así como al problema de degradación de la comunicación en intersecciones, es utilizar una RSU dedicada como nodo de retransmisión. Colocar una RSU en una posición estratégica puede fortalecer la conectividad entre los vehículos que viajan en carreteras perpendiculares de una intersección obstruida (ver Figura 4.2).

Figura 4.2: La utilización de RSU como nodo de retransmisión puede aumentar la conciencia cooperativa en aplicaciones de seguridad vehicular.

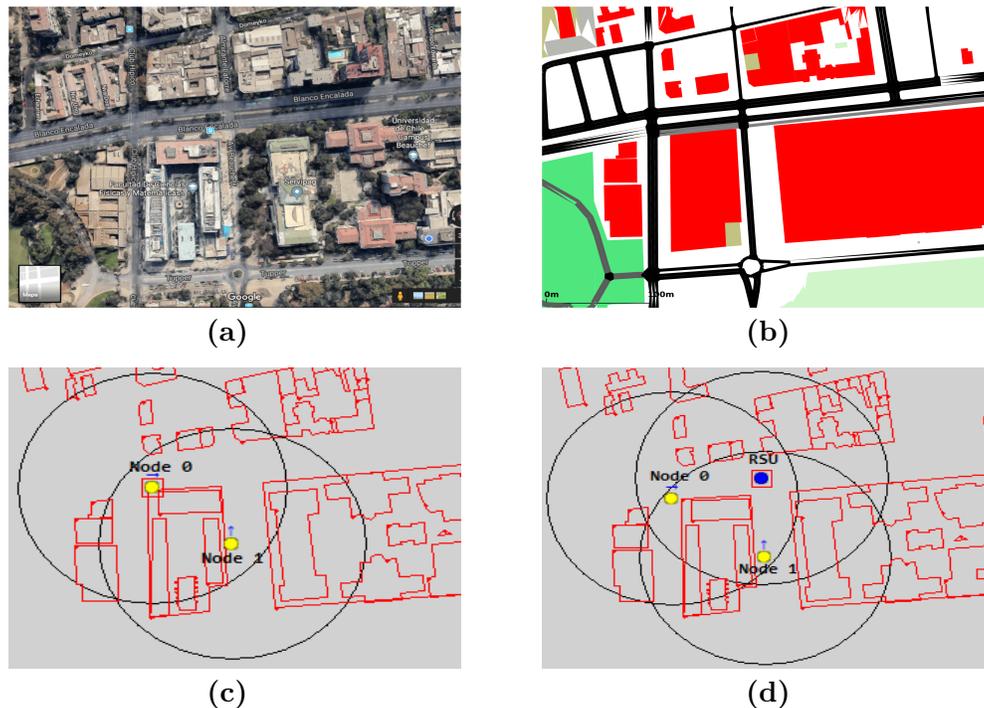


4.1. Prueba de concepto: RSU como nodo de retransmisión simple

En esta sección, se analiza cómo una RSU puede mejorar la conectividad en las intersecciones urbanas bloqueadas por un edificio. Se utiliza un marco de simulación realista para evaluar la conectividad proporcionada por el sistema en términos de las siguientes métricas de rendimiento: posición de notificación, número de *beacons* recibidas y tiempo de vida del enlace. Se examina el peor de los casos, donde se considera que un edificio obstruye totalmente el enlace de comunicación entre los vehículos (escenario evaluado en el capítulo anterior). Además, se estudia el impacto del uso de diferentes valores del exponente de pérdida de ruta para la línea directa de conectividad. Se evalúa la experimentación mediante Veins [9], el cual acopla bidireccionalmente el simulador de red OMNeT++ y el simulador de tráfico vial SUMO.

Se utiliza como escenario de prueba la intersección urbana ubicada en la calle Beauchef con Blanco Encalada, en Santiago, Chile (ver Figura 3.34b y 3.35b). El escenario visto desde Google Earth y el simulador de tráfico SUMO se ilustra en la Figura 4.3a y la Figura 4.3b, respectivamente.

Figura 4.3: Escenario de evaluación visto desde: a) Google Earth, b) SUMO, c) OMNeT++ sin RSU, d) OMNeT++ con RSU.



En esta intersección, se ejecutan dos evaluaciones. En el primero, dos vehículos se mueven en caminos perpendiculares bloqueados por un edificio, como se muestra en la Figura 4.3c. En el segundo, se ubica una RSU en la intersección para retransmitir los *beacons* recibidas del Nodo 1, como se muestra en la Figura 4.3d. En estos experimentos, solo el Nodo 1 transmite regularmente *beacons*. La idea es evaluar la capacidad del Nodo 1 para notificar su presencia al Nodo 0 sin y con ayuda de un nodo retransmisor como es una RSU. Los valores de *path*

loss exponent $\alpha = \{2.8, 3.0, 3.5\}$ se seleccionan de acuerdo a lo propuesto en literatura [91]. Las comunicaciones se establecen en el canal de control sin considerar el efecto causado por la operación multicanal. El tamaño de los mensajes es de 250 bytes y se transmiten con una prioridad correspondiente a la categoría de acceso de voz. Cada vehículo tiene 5 m de largo, 2 m de ancho y una aceleración máxima de 0.8 m/s^2 , una desaceleración máxima de 4.5 m/s^2 y una velocidad máxima de 50 km/h. La altura de la antena de los vehículos es de 1.5 m, mientras que la altura de la RSU dedicada es de 2.2 m. La Tabla 4.1 incluye los parámetros adicionales de simulación.

Tabla 4.1: Parámetros de simulación.

Parámetro	Valor
CCH Frecuencia central	5,890 GHz
Ancho de canal	10 MHz
Potencia de transmisión	20 dBm
Tasa de Beacon	10 beacon/s
Tamaño de Beacon	250 bytes
CW	(3, 7)
AIFSN	2
Exponente de pérdida de ruta	(2.8, 3.0, 3.5)
Sensitividad del receptor	- 90 dBm
Potencia de ruido termico	- 110 dBm
Tasa de datos	6 Mbps
Tipo de antena	Omnidireccional

Para evaluar la conectividad proporcionada por el sistema sin RSU y con RSU, se calcula en el Nodo 0 las siguientes métricas:

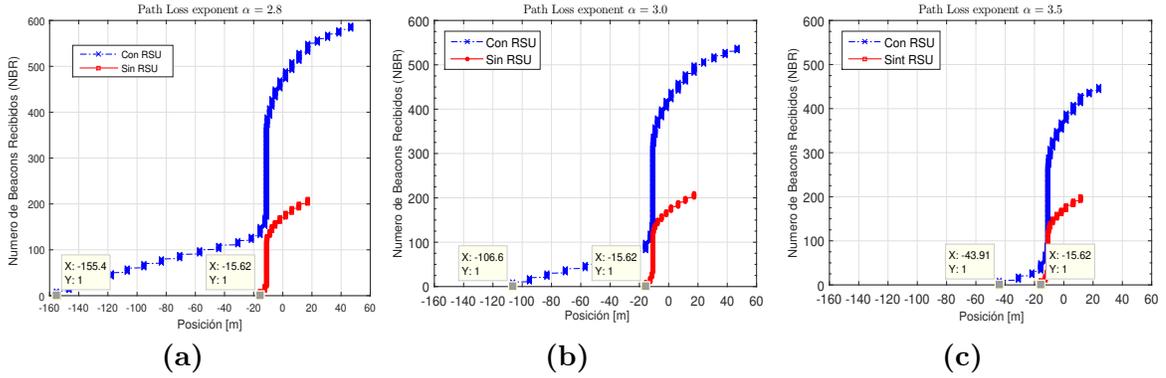
- Número de *beacons* recibidas - NBR (Number of beacons received): el *NBR* está directamente relacionado con el conocimiento recopilado por el vehículo al acercarse a la intersección.
- Tiempo de recepción de beacon - BRT (Beacon reception time): el *BRT* registra el tiempo en que se reciben las *beacons* durante la duración del enlace.
- Tiempo de vida del enlace - LLT (Link Life Time): el *LLT* está relacionado con BRT; y corresponde al tiempo de conectividad entre los dos vehículos.

Los valores negativos de la posición de notificación significan que el vehículo no ha llegado a la intersección, mientras que cero significa que el nodo está en la intersección, y los valores positivos significan que el vehículo pasó la intersección.

La Figura 4.4 muestra los beneficios potenciales de usar una *RSU* en una intersección obstruida en términos de *NBR* por el Nodo 0. Sin una *RSU*, la construcción bloquea las transmisiones directas entre vehículos, reduciendo drásticamente su rango de comunicación. En esta situación, la conectividad solo es posible cuando los vehículos están muy cerca de la intersección. De hecho, el Nodo 0 es consciente de la presencia del Nodo 1 cuando se encuentra a 15.61 m del cruce de intersección.

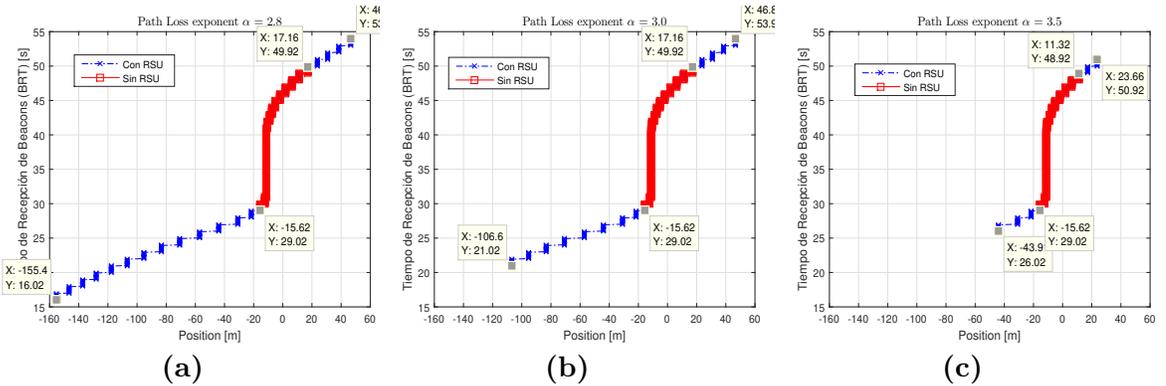
Esta posición de notificación puede no ser suficiente para reaccionar ante situaciones potencialmente peligrosas. Sin embargo, la notificación de la posición aumenta significativamente con la presencia de una *RSU*. La Figura 4.4a muestra que el nodo 0 recibe el primer *beacon* del nodo 1 cuando se encuentra a 155,43 m desde el punto de cruce para un $\alpha = 2.8$. Además,

Figura 4.4: Número de *beacons* recibidos (NBR) por el nodo 0 como función de posición en diferentes ubicaciones de la intersección para diferentes exponentes de pérdida: a) $\alpha = 2.8$, b) $\alpha = 3.0$, y c) $\alpha = 3.5$.



con una mala recepción (es decir, $\alpha = 3.5$) la posición de notificación sigue siendo dos veces en comparación con la situación sin la *RSU*, como se muestra en la Figura 4.4c.

Figura 4.5: Tiempo de recepción del beacon (BRT) desde el nodo 0 como una función de la posición en la intersección para diferentes exponentes de pérdida: a) $\alpha = 2.8$, b) $\alpha = 3.0$, c) $\alpha = 3.5$.



La Figura 4.5 muestra el *BRT* calculado por el Nodo 0, que incluye implícitamente el *LLT* de los vehículos mientras se acercan a la intersección. La *RSU* aumenta significativamente el *LLT* y reduce la distancia entre el punto en que se recibió el primer *beacon* con respecto al cruce de la intersección, especialmente para los exponentes de pérdida de trayectoria más bajos. La Figura 4.5a muestra un aumento en *LLT* de 17 s cuando la *RSU* se utiliza como nodo de retransmisión para un $\alpha = 2.8$. Con el exponente de pérdida más alto $\alpha = 3.5$, la *RSU* aún continúa proporcionando una ganancia de 5 s en *LLT*, y la primera notificación se realiza con 3 s de anticipación. Este tiempo de anticipación es vital para el desempeño de los sistemas de prevención de colisiones de vehículos, que deben alertar a los conductores con suficiente tiempo y distancia para tomar las medidas adecuadas. La Tabla 4.2 muestra un resumen de las métricas estudiadas para los diferentes exponentes de pérdida.

Es claro que, disponer de una *RSU* como nodo retransmisor en una posición estratégica en la intersección trae consigo beneficios en la comunicación, aumentando el rango de comunicación, y el tiempo de vida del enlace. Sin embargo, este es un mecanismo de simple

Tabla 4.2: Métricas de conectividad vehicular.

Métricas	Intersección obstruida por el edificio					
	Sin RSU			Con RSU		
	$\alpha = 2.8$	3.0	3.5	$\alpha = 2.8$	3.0	3.5
NBR	210	210	200	590	540	450
LLT [s]	20.9	20.9	19.9	37.9	32.9	24.9
Posición de notificación [m]	-15.61	-15.61	-15.61	-155.43	-100.64	-43.91

retransmisión que inundaría el canal de mensajes redundantes aun cuando exista comunicación entre los vehículos, causando un incremento de carga en el canal de comunicación.

Por lo tanto, en este capítulo se presenta un diseño *cross-layer* de un mecanismo de retransmisión inteligente basado en aspectos físicos de la red, que permite de esta manera mejorar la conectividad vehicular, la carga de canal y la tasa de recepción de mensajes. Los mecanismos inteligentes deben aplicarse en estas soluciones para controlar el momento en que la *RSU* debe participar como nodo de retransmisión o permanecer en silencio. Definir un mecanismo eficiente para habilitar el nodo retransmisor en las zonas de obstrucción, permitirá mejorar el uso y la carga del canal, aumentando la probabilidad de recepción de los mensajes, así como los beneficios mostrados en esta sección referente a mejorar el rango de comunicación y el tiempo de vida del enlace que son de gran utilidad para las aplicaciones de seguridad.

En [92] el autor ha demostrado el impacto de los modelos de radio propagación en las evaluaciones de desempeño de redes vehiculares. Como se menciona en las secciones anteriores, varias campañas de medición [50,93] confirman que los modelos de propagación utilizados en simulaciones para ambientes LOS, no presentan el detalle necesario de lo que ocurre con la propagación de la señal en entornos NLOS, en especial en escenarios de intersecciones viales. En la próxima sección se expone el modelo de propagación propuesto en [50] para entornos NLOS en intersecciones, y el cual fue evaluado en [26,94] bajo pruebas experimentales reales, en donde se determinó que el modelo representa en mejor detalle las características propias de este tipo de escenarios. A continuación, se enuncia en la Tabla 4.3 donde se indica la notación de cada uno de los parámetros que se usan a lo largo de las secciones posteriores. El objetivo de esta tabla es tener una referencia de cada uno de los términos de las ecuaciones para un mejor entendimiento.

4.2. Modelo de propagación NLOS en intersecciones

En [50] se presenta un modelo de propagación que permite simular la comunicación NLOS en las intersecciones y es particularmente útil en escenarios suburbanos. Los autores desarrollaron un modelo de pérdida de trayectoria y desvanecimiento NLOS de 5.9 GHz basado en mediciones del mundo real en una selección representativa de intersecciones en la ciudad de Munich. En el modelo, la pérdida de trayectoria depende del ancho de la calle, la distancia desde el transmisor (*Tx*)/receptor(*Rx*) al centro de intersección, la distancia del transmisor a la pared y la frecuencia de la portadora.

En este modelo de propagación la pérdida de la señal recibida depende del ancho de la calle, la distancia desde el transmisor (*Tx*)/receptor(*Rx*) hasta el centro de intersección y la frecuencia de la portadora. El modelo de pérdida se calcula en la Ecuación 4.1 de la siguiente manera:

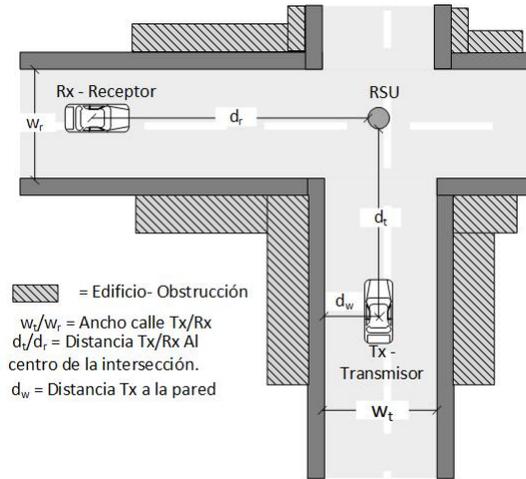
Tabla 4.3: Notación de términos usados en ecuaciones.

Notación	Definición
λ	Longitud de onda
α	Exponente de pérdida de propagación
CL_m	Carga de canal normalizada de acuerdo al esquema m
CL_b	Carga de canal normalizada básica
d_t	Distancia del transmisor al centro de la intersección
d_r	Distancia del receptor al centro de la intersección
d_w	Distancia Tx a la pared
d_b	Distancia crítica
D_h	Tiempo de transmisión del preámbulo + Capa física
D_b	Tiempo de duración de transmisión del <i>beacon</i>
D_s	Duración de slot
f_b	Frecuencia de transmisión del <i>beacon</i>
f_c	Frecuencia de la portadora
h_t, h_r	Altura de las antenas Tx y Rx
i_s	Tipo de entorno, el valor es suburbano específico ($i_s = 1$) o urbano ($i_s = 0$)
I_b	Intervalo de <i>beacon</i>
k	Sub-índice de vehículo transmisor
lwl	Longitud de línea vertical
m	Sub-índice de mecanismo evaluado. ($m = RS$ es Retransmisión simple), ($m = NC$ es NetworkCode), ($m = LOS$ es Line-Of-Sight) o ($m = RCLD_{Px}$ es el esquema propuesto)
n	Número de vehículos
N_r	Número de retransmisiones
N_s	Número de ranuras
O_{NC}	Ocupación de canal mecanismo NC.
P_L	Modelo de propagación
P_t	Potencia de transmisión
P_r	Potencia de recepción
\mathcal{P}_a	Probabilidad de que un host intente transmitir en un ranura de tiempo
\mathcal{P}_i	Probabilidad de que ninguno de los otros nodos en el rango de comunicación transmita cuando <i>Tx</i> inicia la transmisión
\mathcal{P}_h	Probabilidad de que ninguno de los nodos del área potencial de nodos ocultos transmita durante el período
\mathcal{PDR}_m	Razón de entrega de paquetes, donde m representa el mecanismo evaluado.
$\mathcal{P}_{r,t}$	Probabilidad que <i>Rx</i> reciba exitosamente el <i>beacon</i> de <i>Tx</i>
$\mathcal{P}_{t,r}$	Probabilidad que <i>Tx</i> transmita exitosamente el <i>beacon</i> a <i>Rx</i>
$\mathcal{P}_{t,rsu}$	Probabilidad de transmisión exitosa de <i>Tx</i> a la <i>rsu</i>
$\mathcal{P}_{rsu,r}$	Probabilidad de transmisión exitosa de <i>rsu</i> a <i>Rx</i>
\mathcal{P}_{relay}	Probabilidad de retransmisiones durante la simulación
r	Vehículo receptor
R	Tasa de datos
S	Tamaño del <i>beacon</i>
t	Vehículo transmisor
X_σ	Fading parameter
x_t, x_r, x_{rsu}	Posición de los nodos
w_t, w_r	Ancho de la calle Tx y Rx
$Z_i t$	Zona i de transmisión, donde $i = [1:5]$
$Z_j r$	Zona j de recepción, donde $j = [1:5]$
Z_I	Zonas de interferencia
Z_H	Zonas ocultas

$$P_L[\text{dB}] = 3,75 + 2,94i_s + \begin{cases} 10 \log_{10} \left(\left(\frac{d_t^{0,957}}{(d_w w_r)^{0,81}} \frac{4\pi d_r}{\lambda} \right)^\alpha \right), & \text{if } d_r \leq d_b \\ 10 \log_{10} \left(\left(\frac{d_t^{0,957}}{(d_w w_r)^{0,81}} \frac{4\pi d_r^2}{\lambda d_b} \right)^\alpha \right), & \text{if } d_r > d_b \end{cases} \quad (4.1)$$

Donde i_s es el parámetro del entorno (1 para el entorno suburbano y 0 para el urbano). Los parámetros d_t (d_r) denotan la distancia del transmisor y receptor $Tx/(Rx)$ al centro de intersección, w_r es el ancho de la calle del receptor Rx , d_w es la distancia del transmisor Tx a la pared, d_b denota la distancia crítica, λ es la longitud de onda y α es el exponente de pérdida, cuyo valor se establece en 2.69.

Figura 4.6: Parámetros básicos del modelo de pérdida en intersección.



Este modelo utiliza una distancia de equilibrio d_b que depende solo de la altura del transmisor y del receptor, así como de la longitud de onda. Dependiendo de la distancia del receptor y la distancia de equilibrio, el modelo explica el hecho de que predomine la difracción a mayores distancias del receptor. En otras palabras una mayor pérdida está presente en distancias altas del receptor (debido a una difracción, en lugar de una reflexión predominante), determinada por este parámetro de equilibrio, el cual se calcula de la siguiente forma:

$$d_b = \frac{4h_t h_r}{\lambda}, \quad (4.2)$$

donde h_t, h_r es la altura de las antenas en el transmisor y receptor t y r .

El *path loss exponent* en escenarios NLOS es 2.69. El desvanecimiento se modela como una variable aleatoria gaussiana, denotada por X_σ , con media cero y desviación estándar de $\sigma=4.1$ dB. Aquí se supone que la potencia de transmisión es P_t , la señal recibida es una función de la distancia entre Tx/Rx al centro de intersección, donde el potencia recibida en el nodo Rx se puede expresar como:

$$P_r[\text{dB}] = P_t - P_L + X_\sigma, \quad (4.3)$$

En el lado del receptor, la señal recibida se decodifica para obtener el mensaje de seguridad. Recibir el mensaje de seguridad correctamente depende en gran medida de la calidad de la señal recibida, es decir que la potencia de la señal recibida supere el valor especificado por la sensibilidad de la unidad receptora. Asumiendo que el ecualizador y la codificación del canal pueden compensar el efecto de desvanecimiento por múltiples trayectos, la probabilidad de recepción de un mensaje de seguridad correcto es una función de la potencia de la señal recibida.

Con base a los datos medidos en [93], el autor aplica una operación de ajuste para obtener la relación entre la probabilidad de recepción correcta del mensaje de seguridad y la potencia recibida, donde la potencia de la señal recibida corresponde a la propuesta en el modelo citado en [50]. La tasa de error del mensaje en comparación con la potencia recibida suele ser una función de error *erf*, y una función *erf* suele ser aproximada por una función exponencial. De esta manera, se puede expresar la probabilidad de que no se reciba correctamente un mensaje de seguridad en función de la potencia recibida como:

$$\mathcal{P}_f(P_r) = ae^{-bP_r}, \quad (4.4)$$

donde a y b son los coeficientes de ajuste de los datos medidos, donde $a = 1,319e^{-26}$ y $b = -0,6473$.

Por lo que, la probabilidad de una correcta recepción del mensaje de seguridad se puede calcular como:

$$\mathcal{P}_e = 1 - \mathcal{P}_f, \quad (4.5)$$

En [94] el autor lleva a cabo una campaña de mediciones en la ciudad de Brunswick (Alemania) en intersecciones seleccionadas con condiciones de tráfico diferentes. Para cuantificar los efectos de los edificios, el tráfico y la topología de las intersecciones, se selecciona 9 escenarios en 6 intersecciones diferentes en un entorno urbano. En [26] se selecciona 9 mediciones (2 suburbanas y 7 urbanas) realizadas sobre cuatro intersecciones con distintas medidas en el ancho de las calles. Los resultados experimentales de estos trabajos validan el modelo de propagación [50] el cual presenta el detalle necesario de lo que ocurre con la propagación de la señal en entornos NLOS.

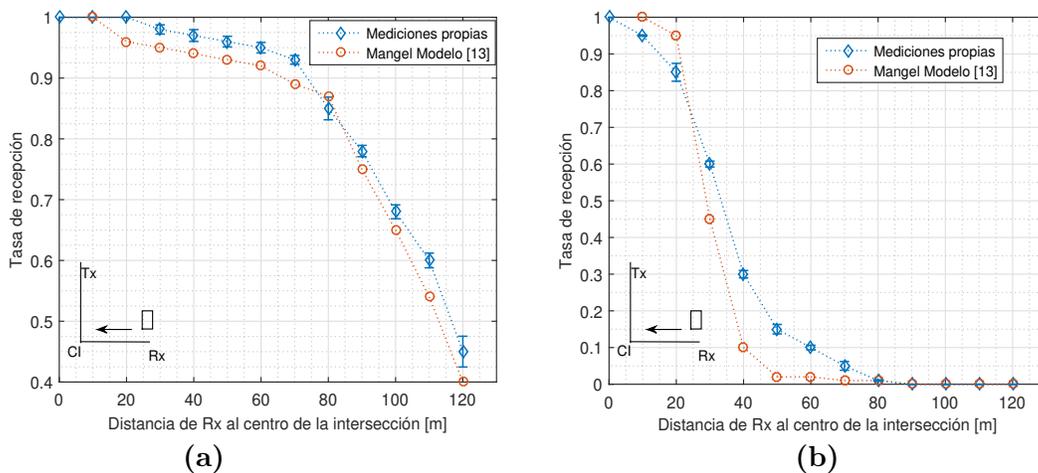
La intersección usada en nuestras mediciones tiene características similares a los escenarios empleados en los cuales se basa el modelo de propagación propuesto en [50]. Esta intersección también es muy similar a los escenarios empleados en [26, 94] que permiten validar mediante una campaña de mediciones mucho más detallada y extensa el modelo de propagación propuesto en [50].

Las mediciones se toman en una intersección (ver Figura 3.34a), donde se varia la distancia desde Tx/Rx respecto al centro de intersección. Se usan dispositivos OBUs comerciales [33] empleados en comunicaciones V2V en entornos reales. En la Figura 4.7 se observa la relación de entrega cuando la posición del transmisor Tx se ubica a una posición fija al centro de intersección de 30 m a 90 m respectivamente. La posición de la unidad receptora Rx varía

de 0 m a 100 m a lo largo del centro de la intersección. La curva roja en las Figuras 4.7 permite tener una comparación entre los resultados obtenidos de manera experimental y la curva bajo el modelo teórico con las condiciones presentadas en la evaluación experimental.

Cuando se ubica el transmisor Tx a 30 m del centro de intersección, y la unidad receptora Rx se encuentra a distancias por encima de 80 m respecto al centro de la intersección, la tasa de recepción de mensajes por parte de la unidad receptora Rx cae por debajo del 80 %. Cuando se aumenta la distancia de la unidad transmisora Tx a 90 m respecto al centro de la intersección, la comunicación entre las unidades se degrada aún más, presentándose una caída en la tasa de recepción en la unidad Rx por debajo del 80 % a una distancia de aproximadamente 25 m respecto al centro de la intersección. para las distancias más lejanas al centro de la intersección, la influencia de los edificios en la comunicación es evidente. Se observa una similitud entre las mediciones tomadas experimentalmente y la obtenida bajo las mismas condiciones usando el modelo propuesto en [50].

Figura 4.7: Ubicación de la Intersección (Latitud 326'32.46"N - Longitud 7632'3.35.º), ancho de la calle de $Tx = 18m$, a) Distancia de $Tx = 30 m$ al punto de la intersección, b) Distancia de $Tx = 90 m$ al punto de la intersección. (La curva azul representa las mediciones tomadas con las OBUs, mientras que la curva naranja corresponde al modelo de propagación con las mismas características).



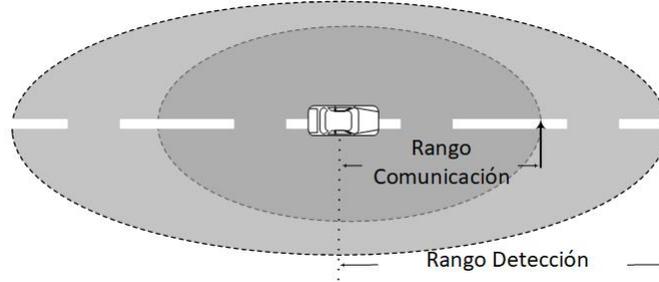
Rango de transmisión en intersecciones

Las comunicaciones vehiculares se basan en el estándar *802.11-OCB*. En [43] se establecen las variantes de transmisión definidas por el estándar respecto a los niveles de sensibilidad de acuerdo a las tasas de transmisión. Estas mismas variantes son especificadas en el datasheet de los equipos usados en las pruebas experimentales [33].

El Indicador de intensidad de la señal recibida (RSSI, por sus siglas en inglés) es una medida de qué tan bien el receptor del dispositivo puede escuchar la señal recibida. Teniendo en cuenta las diferentes demandas de intensidad de la señal, el rango de transmisión de un vehículo se puede dividir en dos rangos, dependiendo de la distancia al vehículo transmisor [95]. El *rango de comunicación* es el área en donde los valores de relación de señal a ruido más interferencia, junto con la potencia de señal recibida permiten la correcta decodificación del mensaje recibido. El *Rango de detección de la portadora* es el área donde es

posible detectar una transmisión en curso (es decir detecta si el canal está ocupado), pero no implica necesariamente que pueda establecer una comunicación exitosa. Esta detección de la portadora se puede realizar debido a que en la trama del paquete transmitido, el preámbulo y PLCP se codifican con la razón más robusta (3 Mbps), mientras que la carga útil se codifica según la tasa de transmisión que se esté usando, en nuestro caso tanto en las pruebas experimentales como simuladas se usa una tasa de 6 Mbps (ver Figura 4.8).

Figura 4.8: Rango de comunicación y de detección de un vehículo transmisor.



En consecuencia, teniendo en cuenta los parámetros mostrados en [33,43,96], se establecen los valores de potencia donde el valor de -82 dBm corresponde a la sensibilidad en el rango de comunicación, y -92 dBm corresponde a la sensibilidad en el rango de detección de la portadora.

Se usa la ecuación 4.5 del modelo de propagación en [50] para calcular la potencia recibida entre un par transmisor/receptor. Para ello, se realiza la simulación de todas las combinaciones posibles de posición de los pares transmisor/receptor respecto al centro de la intersección. Los resultados de la simulación son obtenidos mediante la computación de los datos obtenidos en una serie de 200 repeticiones, teniendo como parámetros de simulación los datos mostrados en la Tabla 4.4. La posición de los nodos transmisor y receptor Tx / Rx varían en sus posiciones iniciales respecto al centro de la intersección de 1m a 160m en intervalos de 1m, donde se obtiene la figura 4.9.

Tabla 4.4: Parámetros de la simulación.

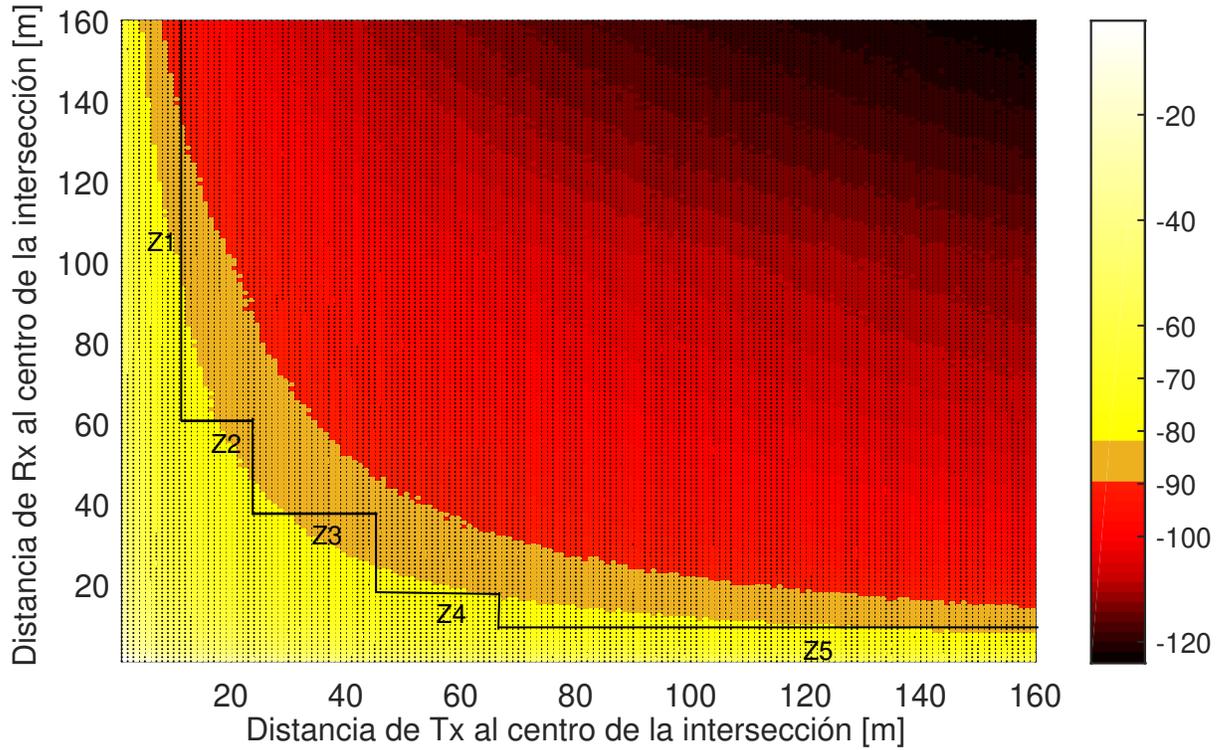
Parámetro	Valor
Canal	5.9 GHz
Potencia de transmisión P_t	20 dBm
Ancho de la calle Rx/Tx w_r, w_t	18 m
Distancia del Tx a la pared d_w	5 m
Distancia crítica d_b^*	10 0m
Altura de las antenas r/t	1.5 m
Intervalo de <i>beacon</i> I_b	0.1 s
Tamaño promedio del mensaje S	80 Bytes
Tasa de datos R	6.0 Mbps

*Todos los parámetros son usados en la simulación

De la Figura 4.9, se muestra la potencia recibida en el par transmisor/receptor a diferentes distancias entre ellos respecto al centro de la intersección. El nivel de potencia recibida en el receptor debe ser tal, que alcance un nivel de potencia mínimo para mantener una conexión. Es decir, la potencia recibida debe superar el umbral de sensibilidad en el receptor permitiendo de esta manera que exista una comunicación exitosa entre los nodos. En conclusión, la Figura muestra que de acuerdo a la posición en la que se encuentran los vehículos y/o nodos

pares transmisor/receptor, se puede conocer el nivel en la potencia de recepción en cada uno de ellos, estableciendo de esta manera su rango máximo de comunicación y rango máximo de detección.

Figura 4.9: Potencia de recepción del receptor según la ecuación 4.3. Región de comunicación en la intersección (amarillo) y Región de detección en la intersección (café).



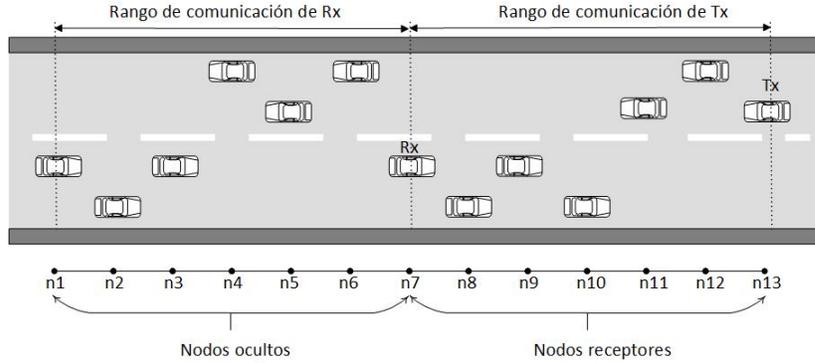
4.2.1. Modelo analítico

Para comprender el mecanismo de retransmisión propuesto en esta tesis, es necesario comprender la base sobre la que parte idea. El modelo descrito en [97, 98] consiste en dividir el intervalo de *beacon* en ranuras de transmisión. La duración de un slot es igual al tiempo que requiere transmitir un *beacon*. El intervalo de *beacon* I_b es el tiempo dentro del cual se debe transmitir un *beacon*, ya que al cumplirse ese periodo se realiza la transmisión del próximo *beacon*. Se asume que todos los slots tienen las mismas duraciones, denotadas como D_b . El número de ranura de transmisión se da como $N_s = I_b / D_b$.

Si se considera que dos nodos están uno dentro del rango de transmisión del otro, se debe tener en cuenta la probabilidad de que ambos inicien la transmisión al mismo tiempo, así como la probabilidad de que un nodo oculto interfiera con una transmisión en curso. Un escenario típico es ilustrado en la Figura 4.10. Se escoge el vehículo receptor en medio de la calle y en un extremo al vehículo transmisor, este escenario representa una distribución uniforme de nodos vecinos entre estos dos vehículos, donde $n/2$ nodos están localizados en el mismo lado del vehículo Tx y $n/2$ nodos están ubicados al otro lado. Se asume que todos los nodos tienen el mismo rango de transmisión y recepción. Se puede observar los nodos n_{8-13} están en el rango de recepción de Rx así como en el de Tx . Los nodos n_{1-6} que están dentro

de la región de recepción de Rx pero fuera de la región de Tx en consecuencia pueden causar el problema del terminal oculto. Se identifica esta área como un área potencial de nodos ocultos n_{1-6} . Como el mecanismo CSMA no puede coordinar las transmisiones entre Tx y los nodos en esa posible área de nodos ocultos, los paquetes transmitidos simultáneamente causaran una colisión en Rx . Para simplificar, solo se considera el peor de los casos, en el que todos los nodos $n/2$ es decir los nodos n_{1-6} se consideran como potenciales nodos ocultos de Tx .

Figura 4.10: Carretera urbana: Abstracción de topología.



El tiempo requerido para transmitir un *beacon* (D_b) se puede definir como:

$$D_b = D_h + \frac{S}{R}, \quad (4.6)$$

Donde D_h se estima como el tiempo necesario para transmitir el preámbulo y la cabecera *PCLP*, S se define como el tamaño del paquete en bits y R la razón de datos en *bps*. La probabilidad de que para un slot dado un nodo intente una transmisión (si detecta el medio desocupado) se denota como \mathcal{P}_a y se calcula como:

$$\mathcal{P}_a = \frac{1}{N_s} = \frac{D_b}{I_b}, \quad (4.7)$$

Por lo tanto, la probabilidad de que ninguno de los otros nodos dentro del rango de recepción de Tx transmita cuando Tx inicia la transmisión se define como:

$$\mathcal{P}_i = (1 - \mathcal{P}_a)^{n/2}, \quad (4.8)$$

Un incremento en el número de slots produce una disminución en \mathcal{P}_a y un crecimiento en $(1-\mathcal{P}_a)$.

Las transmisiones de Tx pueden sufrir interferencia de los terminales ocultos que inician una transmisión: a) durante el tiempo de transmisión de Tx y b) durante el slot previo al slot de transmisión de Tx . Por tanto, el periodo de vulnerabilidad de *beacon* o periodo

de interferencia es el doble de la demora de transmisión de *beacon* $2D_b$. La ecuación 4.9, establece la probabilidad de que ninguno de los nodos en el área potencial de nodos ocultos de *Tx* transmita durante ese período. La duración de este período es de $2D_b$, ya que *Rx* necesita un canal inactivo cuando *Tx* comienza a transmitir para evitar una posible colisión.

$$\mathcal{P}_h = \left((1 - \mathcal{P}_a)^{n/2} \right)^2, \quad (4.9)$$

Finalmente, la probabilidad de que *Tx* transmita exitosamente a *Rx* se modela como la probabilidad que, dado el medio libre y $n/2$ receptores compartidos, solo *Tx* inicie una nueva transmisión, es decir que $n/2$ nodos no inicien una transmisión al mismo tiempo en el slot de transmisión de *Tx*, multiplicada por la probabilidad de que $n/2$ terminales ocultos no interfieran con la transmisión de *Tx* hacia *Rx*. Esta probabilidad se denota como:

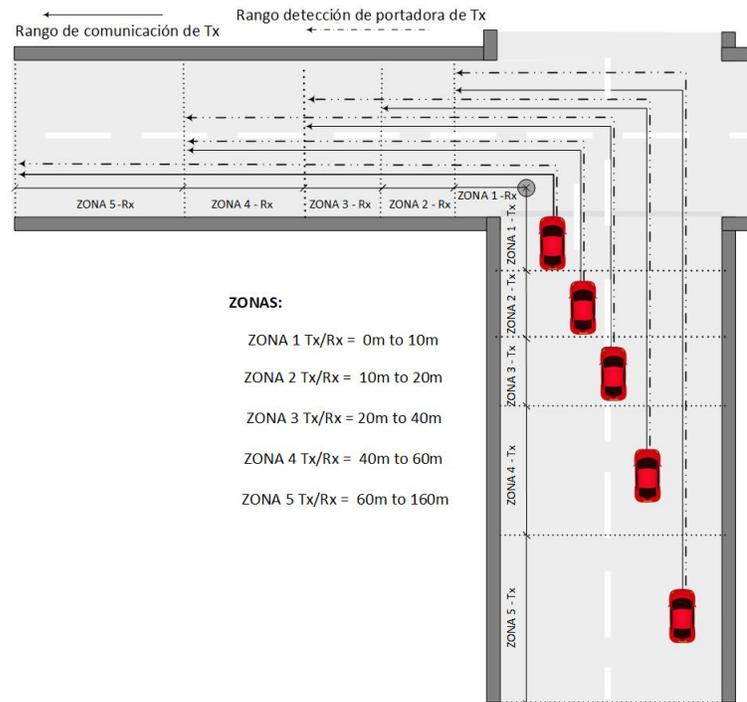
$$\mathcal{P}_{t,r} = \mathcal{P}_i \mathcal{P}_h, \quad (4.10)$$

La probabilidad de recepción exitosa del nodo *Rx*, puede definirse como el producto de la probabilidad de recepción exitosa de acuerdo al modelo de propagación que se establezca (en este caso el modelo propuesto en [50]) y la probabilidad de transmisión exitosa de *Tx*, es decir:

$$\mathcal{P}_{r,t} = \mathcal{P}_m \mathcal{P}_{t,r}, \quad (4.11)$$

De acuerdo al modelo analítico de esta sección y a los valores de la potencia de recepción mostrados en la Figura 4.9, se propone dividir la intersección en zonas de acuerdo a la potencia en la señal recibida basada en la distancia entre los pares transmisor/receptor. Para ello se cruza las áreas bajo la curva y de acuerdo al nivel de potencia de la señal se establece si el nivel de la potencia de la señal recibida permite superar el umbral para establecer una comunicación exitosa entre los nodos (rango de comunicación), o permite detectar una comunicación en curso, es decir, detectar si el canal está ocupado (rango de detección).

Figura 4.11: Esquema propuesto: División en la intersección por zonas según de acuerdo al rango de comunicación y detección del nodo receptor.



4.3. Propuesta de mecanismo de control de retransmisión

Al dividir la intersección en estas zonas o áreas, es posible establecer qué si el nivel de la potencia de la señal recibida supera el umbral para garantizar una comunicación exitosa entre los nodos, o permite detectar una comunicación en curso, se puede conocer las zonas en los cuales nodos presentan interferencia en la comunicación o se pueden tomar como nodos ocultos en la comunicación.

Por lo tanto, la propuesta de dividir la intersección por zonas respecto al rango de comunicación y detección (ver Figura 4.11), permite establecer las zonas ocultas y de interferencia entre los pares transmisor/receptor. Por un lado, las zonas de interferencia corresponden a aquellas zonas donde los vehículos pueden causar colisión en la comunicación entre un par transmisor/receptor ya que se encuentran en el mismo rango de comunicación. Por otro lado, las zonas ocultas corresponden a aquellas áreas que no son detectadas por el transmisor una vez se inicia la comunicación entre un par transmisor/receptor. Por lo que estos vehículos pueden iniciar una comunicación con el receptor causando una colisión que impiden la recepción exitosa del *beacon* en la comunicación del par transmisor/receptor (ver Tablas 4.5 y 4.6). El mecanismo de retransmisión propuesto es el siguiente:

- Cuando la RSU recibe los mensajes transmitidos por los vehículos que se encuentra a lo largo de la carretera, esta conoce la posición (gracias a los *beacons* recibidos que contienen información de estado) de cada uno de los vehículos. Por lo tanto, puede asignar en su tabla de vecinos la zona en la cual se encuentra ubicado el vehículo

transmisor (ver Algoritmo 2).

- Una vez la RSU clasifica en la zona que corresponda al vehículo. procede a validar en su tabla de vecinos, si existen vehículos que se encuentran en zonas que están fuera del rango de comunicación del vehículo transmisor y, si es así, procede retransmitir el *beacon* recibido con el objetivo de aumentar la probabilidad de recepción exitosa del mensaje para aquellos vehículos que se encuentran por fuera del rango de comunicación del vehículo transmisor (ver Algoritmo 3).

Este mecanismo propuesto establece una retransmisión justa, en el sentido que solo retransmite el *beacon* en caso que existan vehículos por fuera del rango de comunicación del vehículo transmisor. De esta forma, se pretende aumentar la probabilidad de recepción exitosa del *beacons* hacia los vehículos que se encuentran por fuera del alcance del nodo *Tx*, en especial a los vehículos que se encuentran más cerca de la intersección y que son de suma importancia para cualquier aplicación de seguridad vial. Aumentar la probabilidad de recepción del *beacon*, permite mejorar el conocimiento cooperativo del vehículo y su entorno circundante al desplazarse sobre una intersección. Dada la simetría de la intersección y que las zonas propuestas tienen las mismas dimensiones para cada calle, la lógica del mecanismo propuesto se cumple de manera indistinta en la que se encuentre vehículo transmisor. Sin embargo, para una mejor comprensión se recomienda asumir el sentido de la calle vertical como zona de transmisión y la calle horizontal como zona de recepción.

Tabla 4.5: Zonas de interferencia durante la comunicación entre *Tx* y *Rx*. (Z_I Zona de interferencia).

Zonas	Z_1r	Z_2r	Z_3r	Z_4r	Z_5r
	Z_I	Z_I	Z_I	Z_I	Z_I
Z_1t	$Z_{[1:5]r}, Z_{[1:5]t}$	$Z_{[1:5]r}, Z_{[1:4]t}$	$Z_{[1:5]r}, Z_{[1:3]t}$	$Z_{[1:5]r}, Z_{[1:2]t}$	$Z_1r, Z_{[1:5]t}$
Z_2t	$Z_{[1:5]r}, Z_{[1:4]t}$	$Z_{[1:5]r}, Z_{[1:4]t}$	$Z_{[1:4]r}, Z_{[1:3]t}$	$Z_{[1:4]r}, Z_{[1:2]t}$	-
Z_3t	$Z_{[1:5]r}, Z_{[1:4]t}$	$Z_{[1:4]r}, Z_{[1:4]t}$	$Z_{[1:4]r}, Z_{[1:3]t}$	-	-
Z_4t	$Z_{[1:3]r}, Z_{[1:5]t}$	$Z_{[1:3]r}, Z_{[1:4]t}$	-	-	-
Z_5t	$Z_1r, Z_{[1:5]t}$	-	-	-	-

Tabla 4.6: Zonas ocultas durante la comunicación entre *Tx* y *Rx*. (Z_H = Zona oculta).

Zones	Z_1r	Z_2r	Z_3r	Z_4r	Z_5r
	Z_H	Z_H	Z_H	Z_H	Z_H
Z_1t	-	-	-	-	-
Z_2t	Z_5r	Z_5r	Z_5r	-	-
Z_3t	Z_5r	Z_5r	Z_5r	-	-
Z_4t	$Z_{[4:5]r}$	$Z_{[4:5]r}$	-	-	-
Z_5t	$Z_{[2:5]r}$	$Z_{[2:5]r}$	-	-	-

Resultado: Asignación de vehículos en áreas correspondientes de las calles

```
1 inicialización;
2 Entrada:  $d_t, T_x, ID_{T_x}$  donde  $ID_{T_x}$  es un identificador del vehiculo que permite identificar
   el sentido del vehiculo en la intersección: 1= Vertical o 2 = Horizontal
3 Salida:
4 inicio
5   seleccionar  $ID_{T_x}$  hacer
6     caso 1 hacer
7       si  $d_t \geq 60m$  entonces
8          $Z_{5t} \leftarrow T_x$ 
9       fin
10      si  $40m \leq d_t < 60m$  entonces
11         $Z_{4t} \leftarrow T_x$ 
12      fin
13      si  $20m \leq d_t < 40m$  entonces
14         $Z_{3t} \leftarrow T_x$ 
15      fin
16      si  $10m \leq d_t < 20m$  entonces
17         $Z_{2t} \leftarrow T_x$ 
18      fin
19      si  $10m < d_t$  entonces
20         $Z_{1t} \leftarrow T_x$ 
21      fin
22    fin
23    caso 2 hacer
24      si  $d_t \geq 60m$  entonces
25         $Z_{5r} \leftarrow T_x$ 
26      fin
27      si  $40m \leq d_t < 60m$  entonces
28         $Z_{4r} \leftarrow T_x$ 
29      fin
30      si  $20m \leq d_t < 40m$  entonces
31         $Z_{3r} \leftarrow T_x$ 
32      fin
33      si  $10m \leq d_t < 20m$  entonces
34         $Z_{2r} \leftarrow T_x$ 
35      fin
36      si  $10m < d_t$  entonces
37         $Z_{1r} \leftarrow T_x$ 
38      fin
39    fin
40  fin
41 fin
```

Algoritmo 2: Asignación de vehículos en áreas correspondientes de las calles horizontal y vertical (Según la dirección del vehículo es la asignación en las zonas T_x o R_x , donde H (Horizontal) corresponden a los vehículos de la zona R_x y V (Vertical) corresponde a los vehículos de la zona T_x).

Resultado: Mecanismo control de retransmisión

- 1 inicialización;
- 2 **Entrada:** Z_{jt} , Z_{ir} donde $i, j = [1:5]$
- 3 **Salida:** $Relay=[1,0]$ (1=*Enabled* 0=*Disable*, La retransmisión inicialmente esta deshabilitada)

4 **inicio**

```

5   seleccionar  $Z_{jt}$  hacer
6   |   caso 1 hacer
7   |   |    $Relay=0$ 
8   |   |   fin
9   |   |   caso 2 hacer
10  |   |   |   si  $Z_{5r} \neq \{\emptyset\}$  entonces
11  |   |   |   |    $Relay=1$ 
12  |   |   |   |   en otro caso
13  |   |   |   |   |    $Relay=0$ 
14  |   |   |   |   |   fin
15  |   |   |   |   fin
16  |   |   |   caso 3 hacer
17  |   |   |   |   si  $Z_{[4:5]r} \neq \{\emptyset\}$  entonces
18  |   |   |   |   |    $Relay=1$ 
19  |   |   |   |   |   en otro caso
20  |   |   |   |   |   |    $Relay=0$ 
21  |   |   |   |   |   |   fin
22  |   |   |   |   |   fin
23  |   |   |   |   fin
24  |   |   |   caso 4 hacer
25  |   |   |   |   |   si  $Z_{[3:5]r} \neq \{\emptyset\}$  entonces
26  |   |   |   |   |   |    $Relay=1$ 
27  |   |   |   |   |   |   en otro caso
28  |   |   |   |   |   |   |    $Relay=0$ 
29  |   |   |   |   |   |   |   fin
30  |   |   |   |   |   |   fin
31  |   |   |   |   |   caso 5 hacer
32  |   |   |   |   |   |   |   si  $Z_{[2:5]r} \neq \{\emptyset\}$  entonces
33  |   |   |   |   |   |   |   |    $Relay=1$ 
34  |   |   |   |   |   |   |   |   en otro caso
35  |   |   |   |   |   |   |   |   |    $Relay=0$ 
36  |   |   |   |   |   |   |   |   |   fin
37  |   |   |   |   |   |   |   |   fin
38  |   |   |   |   |   |   fin
39  |   |   |   fin
40  |   fin
41  fin

```

Algoritmo 3: Mecanismo de control de retransmisión de *beacons* recibido por la RSU.

Para comprender en detalle el mecanismo propuesto, visualice la Figura 4.11 y las Tablas 4.5 y 4.6. Suponga entonces que un vehículo ubicado en la Z_{3t} transmite un *beacon*, por tanto:

- La RSU recibe este *beacon* y al conocer la posición del vehículo lo asigna en la zona que corresponde. En este caso, en la zona Z_{3t} (ver Algoritmo 2 Línea 13-14).
- De esta manera se actualiza la tabla de vecinos en la RSU, en donde además se encuentran clasificados los vehículos que han transmitido con anterioridad (ver Algoritmo 2 Línea 13-14).
- De acuerdo a la Figura 4.11, el vehículo al encontrarse en la zona Z_{3t} de transmisión, presenta un rango de comunicación que le permite alcanzar a los vehículos de la $Z_{[1:3]r}$, y también tener comunicación con los vehículos que se encuentran en su misma calle y con quienes tiene línea de vista, es decir con $Z_{[1:5]t}$. Por lo que, si solo existen vehículos

en esas zonas no hay necesidad de retransmitir el *beacon* recibido por la RSU.

- Sin embargo, si en la tabla de vecinos existe al menos un vehículo en la zona de recepción $Z_{[4 : 5]r}$ hacia el cual el vehículo transmisor no tiene la capacidad de alcanzar debido a que su rango de comunicación no lo permite, La RSU retransmitiría este *beacon* vía broadcast. El objetivo no es solo incrementar la probabilidad de recepción exitosa en los vehículos más cercanos a la intersección, sino principalmente la de entregar el mensaje a los vehículos que se encuentran por fuera del rango de comunicación del vehículo transmisor (ver Algoritmo 3 línea 16-21).

4.3.1. Evaluación del mecanismo propuesto

En esta sección, se evalúa el mecanismo de retransmisión propuesto como solución que permita mejorar la conectividad y desempeño en la comunicación en intersecciones urbanas en comparación con otros mecanismos propuestos en la literatura [27, 99]

Escenario de evaluación

El escenario de evaluación plantea una intersección, la cual se asume es simétrica. Por simplicidad se asume que el carril vertical y horizontal presentan solo una dirección de flujo de vehículos. La Tabla 4.7 establece los principales parámetros de simulación con el que se realiza las pruebas y se evalúa cada uno de los esquemas.

Tabla 4.7: Parámetros del escenario de evaluación.

Parámetro	Valor
Frecuencia de portadora f_C	5.9 GHz
Potencia de transmisión P_t	20 dBm
Ancho de la carretera del vehículo transmisor y receptor w_r, w_t	18 m
Distancia de t a la pared d_w	5 m
Intervalo de <i>beacon</i> I_b	0.1 s
Tamaño del mensaje S	80 Bytes
Tasa de datos R	6.0 Mbps
Tiempo de transmisión del preámbulo + Capa física D_h	40 μ s
Longitud de la calle L_s	16 0m
Densidad vehicular [<i>MuyBaja Baja Medio Alta</i>]	[8 20 48 96]
Iteraciones de evaluación por mecanismo	500
Umbral lvl	18 m

Esquemas de Retransmisión Evaluados

Con el objetivo de validar el comportamiento del mecanismo de retransmisión propuesto para intersecciones, se toma como mecanismos de comparación dos propuestas que son usadas exclusivamente en intersecciones [27, 99] junto con el esquema de retransmisión simple, en el cual la RSU retransmite todos los *beacons* recibidos.

En [27] se propone usar la información de ubicación para permitir que el nodo retransmisor juzgue la relación posicional entre el vehículo transmisor y el nodo receptor. El nodo retransmisor puede obtener la información de la posición del transmisor cuando recibe el *beacon* por primera vez. La RSU se comporta como nodo retransmisor, una vez recibe el *beacon* del par transmisor/receptor conoce la posición de los vehículos, y establece por medio del ángulo formado entre las posiciones del par transmisor/receptor, si existe línea de vista entre los vehículos, garantizando que pueda existir comunicación directa entre los vehículos.

El mecanismo considera calcular la distancia vertical lvl como se muestra en la Figura 4.12a, la cual se obtiene como función de la posición de los nodos involucrados, es decir Tx , Rx y RSU . En otras palabras, se controla el rango de supresión configurando el valor umbral de la distancia vertical.

De acuerdo a esto, cuando el vehículo está en el mismo camino hacia el nodo retransmisor, la distancia vertical lvl máxima es casi igual al ancho de la carretera. Entonces, cuando el valor lvl es mayor que el ancho de la carretera, permite identificar que el vehículo está fuera del rango de supresión de retransmisión, por lo tanto el vehículo aún puede tener la posibilidad de retransmitir su *beacon* a través de la *RSU*. Pero, cuando el valor de lvl es menor que el ancho de la carretera w_s , el nodo retransmisor puede identificar que el vehículo está dentro del rango de supresión de retransmisión, es decir que hay línea de vista entre ellos por lo cual se hace innecesaria la retransmisión (ver Algoritmo 4).

Resultado: Mecanismo de control de retransmisión LOS

```

1 inicialización;
2 Entrada:  $x_{Tx}, x_{Rx}, x_{rsu}$  Posición de los nodos
3 Salida:  $lvl, Relay=[1,0]$  ( $1=Enabled$   $0=Disable$ , Inicialmente la retransmisión esta
   deshabilitada)
4 si  $lvl < w_s$  entonces
5   |  $Relay=0$ 
6 en otro caso
7   |  $Relay=1$ 
8 fin

```

Algoritmo 4: Mecanismo de retransmisión dependiendo de la distancia lvl formada entre los nodos Tx , Rx y rsu

La línea de longitud vertical lvl , como se observa en la Figura 4.12a, se obtiene de acuerdo a la ecuación 4.12, con base en la posición de los tres nodos Tx , Rx y RSU . De tal manera que podemos expresar esta distancia como:

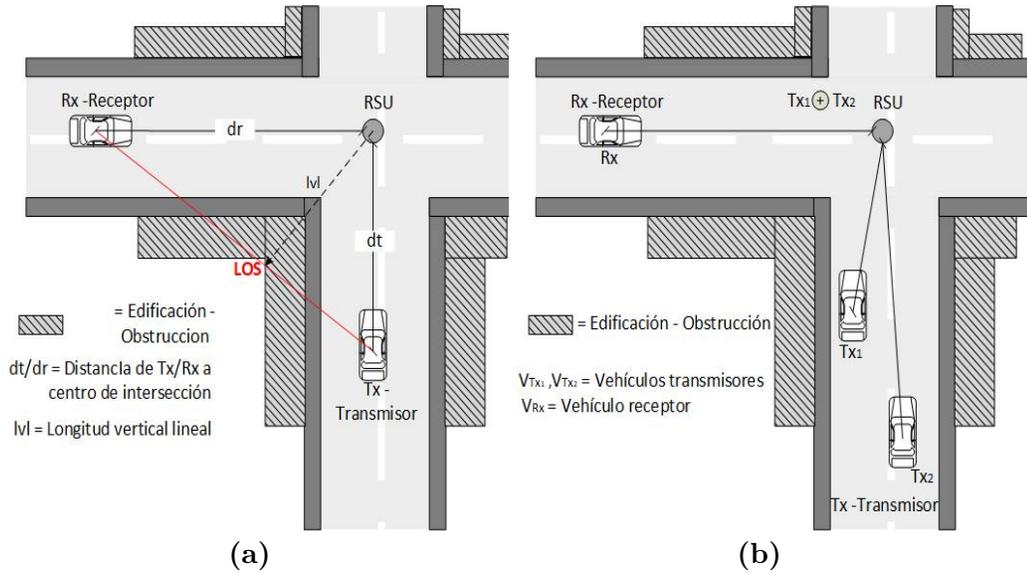
$$lvl = x_{Tx} - x_{Rx} - \frac{(x_{Rx} - x_{Tx})(x_{rsu} - x_{Tx})}{x_{rsu} - x_{Tx}^2} (x_{rsu} - x_{Rx}), \quad (4.12)$$

El otro mecanismo a comparar es el propuesto en [99], se indica como el modelo de networkcoding (*NC*) que permite mejorar la carga del canal al enviar mensajes vía broadcast. Para ello, los *beacons* están codificados en una operación *OR* exclusiva (*XOR*). La codificación de red es una técnica en la que los mensajes transmitidos se codifican y decodifican para aumentar el rendimiento del canal, reducir los retrasos y hacer que la red sea más sólida. En la codificación de red, los algoritmos algebraicos se aplican a los datos para acumular las diversas transmisiones. Las transmisiones recibidas se decodifican en sus destinos. Esto significa que se requieren menos transmisiones para transmitir todos los datos, pero esto requiere más procesamiento en los nodos intermedios y terminales.

El mecanismo *NC* propone una codificación de red basada en un XOR en el que el nodo retransmisor recibe una cantidad de mensajes originales para codificar. La probabilidad de recepción condicional (CRP, por sus siglas en inglés) se define como la probabilidad de que un paquete sea recibido por un vehículo vecino dado que la entrega exitosa del transmisor

es conocida. En este mecanismo, la *RSU* realiza una *XOR* entre los dos mensajes recibidos, enviando este paquete codificado hacia el receptor, el paquete en el receptor se decodifica y recupera la información completa si puede recibir uno de los paquetes individuales por parte de uno de los transmisores. Esto significa que requiere menos retransmisiones para enviar todos los datos de los nodos que están dentro del rango de comunicación (Ver Figura 4.12b).

Figura 4.12: Esquemas de retransmisión en intersecciones: a) La línea de visión entre los vehículos *Tx* y *Rx* [26], b) Retransmisión mediante codificación de red. Aquí los paquetes se codifican con la operación *XOR* y el paquete codificado se usa para la retransmisión [97].



Finalmente se tiene el mecanismo propuesto en esta tesis ($RCLD_{Px}$), que considera aspectos como la distancia entre vehículos y potencia de recepción permitiendo establecer las zonas ocultas y de interferencia respecto al vehículo transmisor. De esta manera, la RSU procede a validar en la tabla de vecinos, si existen vehículos que se encuentran en zonas que están fuera del rango de comunicación del vehículo transmisor y, si es así, procede retransmitir el *beacon*. En la Tabla 4.8 se establece la notación de los mecanismos de retransmisión a evaluar.

Tabla 4.8: Mecanismos usados en la evaluación comparativa.

(m) Mecanismo a evaluar	Descripción
RS	Retransmisión Simple
LOS	Línea de Vista [27]
NC	Codificación de red [99]
$RCLD_{Px}$	Mecanismo propuesto

4.3.2. Análisis: Métricas de Evaluación

A continuación se hace una breve explicación sobre dos métricas cuantitativas de rendimiento que son utilizadas para este estudio:

1. NCL (Normalized Channel Load) : Se define como la carga generada por todos los nodos en cada uno de los mecanismos evaluados, donde la normalización se hace respecto al mecanismo de retransmisión simple y networkcoding.

2. PDR (Packet Delivery Ratio) : Se define como la razón de los *beacons* recibidos satisfactoriamente en relación a los *beacons* enviados en la transmisión.

Cuando en el rango de comunicación existen n vehículos transmitiendo a una frecuencia de f_b y enviando paquetes de tamaño S . La carga básica del canal, CL_b se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$CL_b = \frac{n \cdot f_b \cdot S}{R}, \quad (4.13)$$

Dependiendo del mecanismo que se evalúa, la retransmisión de *beacons* hace que la carga percibida en el canal aumente en relación al número de retransmisiones realizadas. Por lo tanto, la carga total, CL_m , de cada uno de los mecanismos evaluados, se calcula como la carga básica más la carga generada por el número de retransmisiones, tal como se indica en la siguiente ecuación:

$$CL_m = CL_b + \frac{N_r \cdot S}{R}, \quad (4.14)$$

donde:

- f_b , se define como la frecuencia de transmisión del nodo. $[Beacons/s]$.
- S , se define como el tamaño del *beacon* en $[bits]$.
- R , se define como la data rate. $[bits/s]$
- n , se define como el número de nodos en el rango de comunicación.
- N_r , se define como el número de retransmisiones.
- m , mecanismo de evaluación seleccionado.

El *PDR* para los esquemas *RS, LOS, NC* y *RCLD_{P_x}* se puede definir como:

$$PDR_m = \mathcal{P}_{t-r} + \mathcal{P}_{relay}((1 - \mathcal{P}_{t,r})\mathcal{P}_{t,rsu}\mathcal{P}_{rsu,r}), \quad (4.15)$$

Donde \mathcal{P}_{relay} de acuerdo a la ecuación 4.16 se define como la tasa de retransmisión durante la simulación del mecanismo de retransmisión a evaluar:

$$\mathcal{P}_{relay} = \frac{\text{Cantidad de retransmisiones}}{\text{Cantidad de transmisiones}}, \quad (4.16)$$

La ecuación planteada en 4.15, se explica de la siguiente manera:

En caso de no haber retransmisión ($\mathcal{P}_{relay}=0$) el *PDR* corresponde solo a la probabilidad de comunicación exitosa entre el nodo receptor y el nodo transmisor, definida como $\mathcal{P}_{t,r}$. Sin embargo, si se realizan retransmisiones durante la simulación ($\mathcal{P}_{relay}>0$) la probabilidad de comunicación exitosa entre los nodos *Tx/Rx*, corresponde a la probabilidad de comunicación

exitosa directa entre los nodos $P_{t,r}$ más la probabilidad de la retransmisión, que sería la probabilidad de que el nodo Tx se comunique exitosamente con el nodo RSU definida como $P_{t,rsu}$ multiplicada por la probabilidad de comunicación exitosa de la RSU hacia el nodo Rx denominada como $P_{rsu,r}$

En cuanto al esquema de networking (NC), es claro que corresponde a un mecanismo enfocado en reducir la carga de canal al enviar dos *beacons* en una misma retransmisión más que en un algoritmo de control de retransmisiones. Este esquema es muy similar a un retransmisor simple, pero con la ventaja de que la carga de canal es más reducida. Teniendo en cuenta la Figura 4.12b, se tiene que $\mathcal{P}_{t_1,rsu}$, $\mathcal{P}_{t_2,rsu}$ denota la probabilidad de transmisión exitosa del *beacon* del nodo t_1 y t_2 hacia las *rsu*. Además se tiene que $\mathcal{P}_{rsu,r}$ se denota como la probabilidad de transmisión exitosa del *beacon* formado por los dos *beacons* originales de Tx_1 y Tx_2 desde la *rsu* hacia el nodo Rx . Por lo que finalmente, la probabilidad de que el nodo Rx decodifique y reciba exitosamente el *beacon* $Tx_1 \oplus Tx_2$ es:

$$PDR_{NC} = \mathcal{P}_{t_1,rsu} \mathcal{P}_{t_2,rsu} \mathcal{P}_{rsu,r} (\mathcal{P}_{t_1,r} + (1 - \mathcal{P}_{t_1,r}) \mathcal{P}_{t_2,r}) \quad (4.17)$$

4.3.3. Discusión de Resultados

A través de la herramienta matemática *Matlab* se implementa las ecuaciones matemáticas y análisis desarrollado en la sección previa, se evalúa los mecanismos de retransmisión discutidos en esta sección, De acuerdo a los parámetros establecidos en la Tabla 4.7, se estudia la intersección bajo diferentes densidades vehiculares. La *RSU* cumple la función del nodo retransmisor y ejecuta el mecanismo a evaluar de acuerdo al mensaje recibido por parte del nodo transmisor.

Channel Load Normalized

En las Figuras 4.13 y 4.14 se toma como marco de referencia el esquema de retransmisión simple *RS* para la normalización de la carga de canal. En la retransmisión simple, los *beacons* recibidos por la *RSU* son retransmitidos. En el mecanismo *LOS* la *RSU* analiza la posición en la que se encuentra el par nodo transmisor/receptor y establece si realiza o no la retransmisión del *beacon* recibido. Por lo tanto, en el mecanismo *NLOS* en las zonas más cercanas a la intersección se reduce la necesidad de que la *RSU* realice retransmisión ya que es posible que exista línea de vista entre los vehículos. Sin embargo, cuando los nodos receptores se encuentran en las zonas más lejanas se hace necesario la retransmisión por parte de la *RSU* presentándose un comportamiento muy cercano al de la retransmisión simple, tal como se observa en la Figura 4.14d.

Para el mecanismo propuesto $RCLD_{Px}$, en la Figura 4.13a, se puede observar que si en un momento dado los nodos transmisores se encuentran en la zona Z_1t , sin importar la ubicación de los otros nodos en la carretera, no existiría la necesidad de realizar una retransmisión por parte de la *RSU*. Esto se debe, de acuerdo el mecanismo propuesto $RCLD_{Px}$ cuando cualquier transmisión se lleva a cabo desde la ubicación Z_1t , la transmisión será detectada por todos los vehículos. Por lo tanto, no habrá vehículo oculto para este escenario. Además, los vehículos en el zona Z_1t tienen la mayor cobertura de comunicación debido al enlace de comunicación *LOS* con todos los demás vehículos. Bajo estas condiciones, el esquema propuesto $RCLD_{Px}$,

reduce a la mitad la carga de canal (50 %) respecto a la generada en un esquema de *RS*.

Por lo tanto, aun cuando la *RSU* recibe *beacons* de cualquier zona de la intersección, la carga de canal disminuye notablemente en comparación con los demás esquemas para las primeras zonas. Cuando el nodo *RSU* recibe *beacons* por parte de cualquier vehículo, y teniendo en cuenta la ubicación de los demás vecinos, se puede establecer que si los vehículos vecinos se encuentra en la primer zona de comunicación, la carga del canal en el esquema propuesto es del 50 % en comparación al esquema *LOS* que ofrece una carga del 65 %. A medida que los vehículos se encuentran en las zonas más lejanas aumenta la carga del canal por encima del 90 % debido a la necesidad de retransmitir. Sin embargo, el esquema propuesto presenta una reducción cercana al 10 % para las primeras cuatro zonas. Dado que en las primeras zonas existe comunicación entre los vehículos, no es necesario retransmitir los mensajes recibidos que llegan a la *RSU* como sí ocurre con los otros esquemas. Esta reducción del 10 % representa una mejora notable en la reducción de la carga de canal respecto a los esquemas comparados.

Figura 4.13: Carga promedio de canal normalizada respecto a RS según diferentes posiciones del nodo transmisor: a) Z_{1t} , b) Z_{2t} .

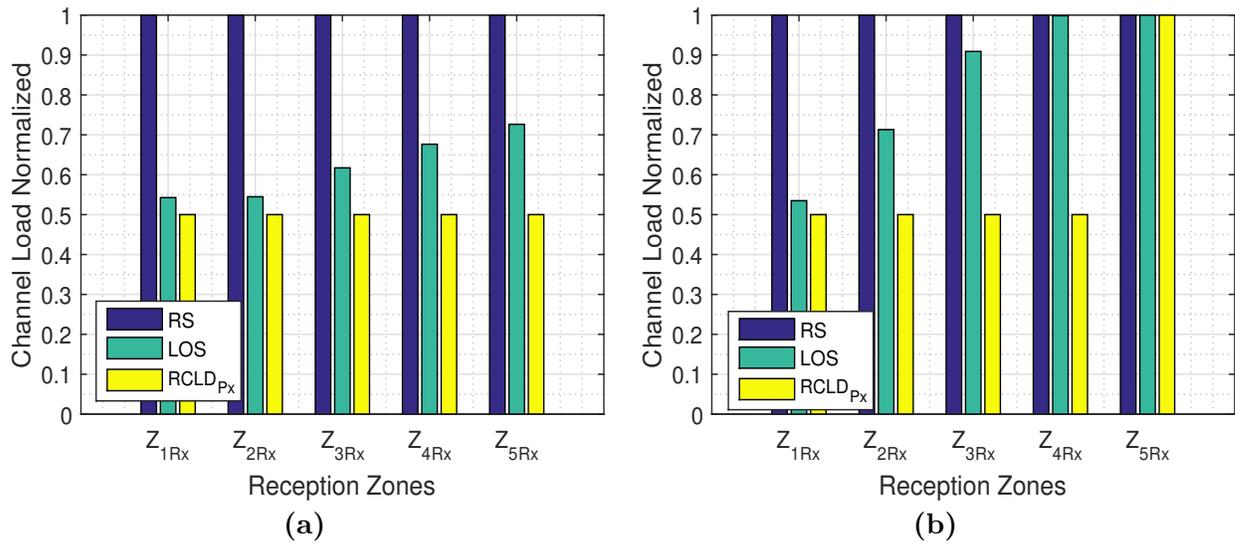
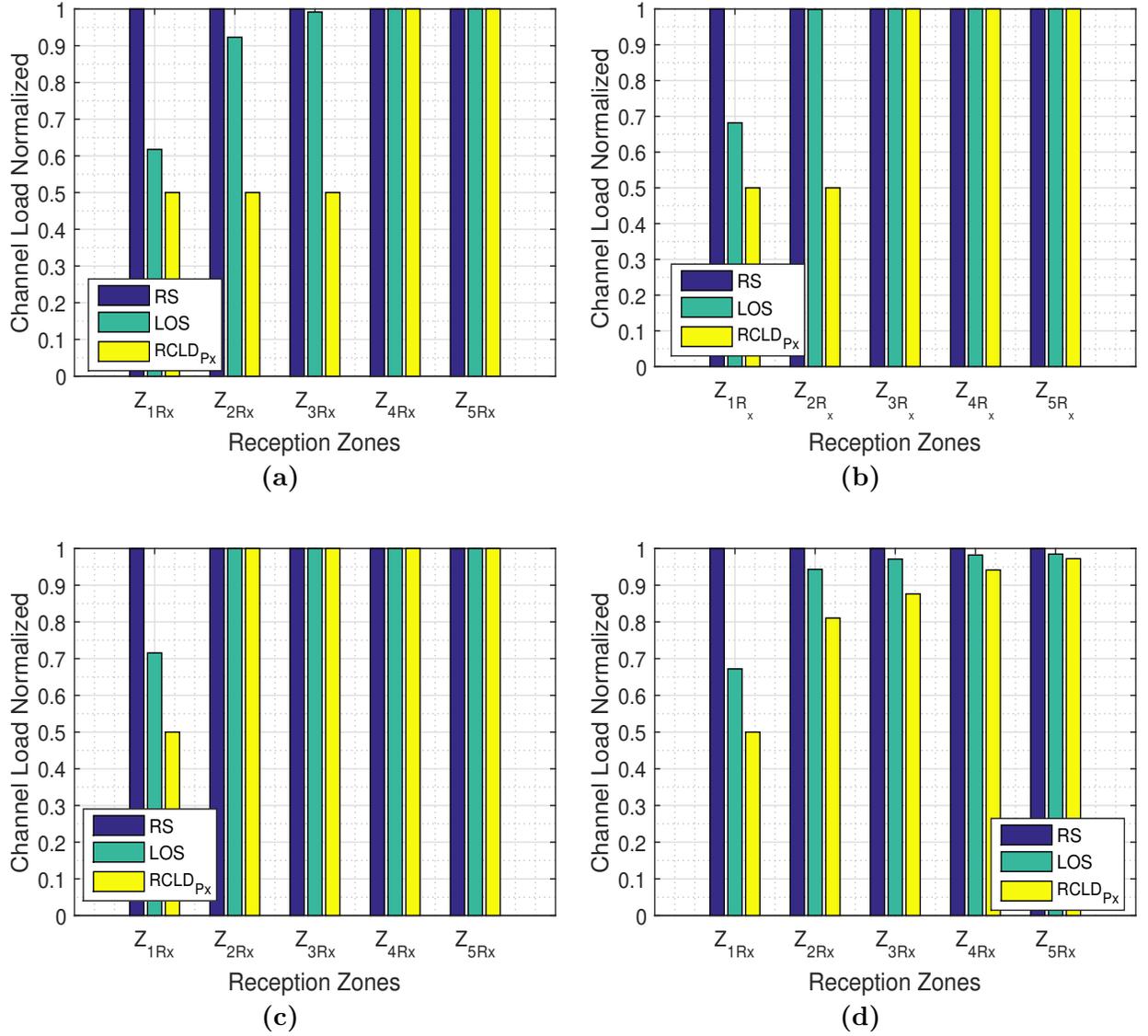


Figura 4.14: Carga promedio de canal normalizada respecto a RS según diferentes posiciones del nodo transmisor: a) Z_{3t} , b) Z_{4t} , c) Z_{5t} , d) Z_{it} .



El mecanismo Networkcoding NC más que un mecanismo de retransmisión representa un esquema en la manera que se transmiten los mensajes. Lo que permite reducir la carga del canal al enviar en una misma transmisión dos *beacons* codificados mediante una XOR. Considere el esquema de retransmisión simple RS que transmite un *beacons* sin cambiar la carga útil. El tiempo de ocupación del canal usando el esquema de RS para retransmitir un paquete es $D_b + D_{b_{RS}}$, donde D_b y $D_{b_{RS}}$ es el tiempo de transmisión del paquete normal y el tiempo del paquete retransmitido, respectivamente. En tanto, el esquema NC combina dos *beacons* usando la operación XOR, y envía un paquete codificado. El tiempo de ocupación en el esquema NC para transmitir el paquete codificado es $2 D_b + D_{b_{NC}}$, donde $D_{b_{NC}}$ es el tiempo de transmisión del paquete codificado.

En general, el esquema RS necesita dos envíos para transmitir dos *beacons* nativos (es decir, para cada envío dado dos *beacons* por dos transmisores diferentes) recibidos por el

nodo retransmisor), mientras que el mecanismo NC necesita solo uno. Teniendo en cuenta lo anterior, se puede definir el tiempo de ocupación del canal en un mecanismo NC como:

$$O_{NC} = \frac{2D_b + D_{b_{NC}}}{2(D_b + D_{b_{RS}})}, \quad (4.18)$$

Al asumir el mismo tamaño del *beacon* en ambos esquemas, se puede afirmar que el tiempo de transmisión de cada mensaje es igual en ambos esquemas ($D_{b_{RS}} = D_{b_{NC}}$). Reemplazando en la ecuación 4.18 se tiene que el tiempo de ocupación del canal es $O_{NC} = 0,75$. Este tiempo de ocupación del canal, está muy relacionado con la carga del canal. Si se toma como esquema de comparación al mecanismo RS , es posible decir que el mecanismo NC se comporta de la misma manera, pero aquí los *beacons* retransmitidos corresponden a paquetes codificados. La carga generada por un esquema RS corresponde a dos veces la carga básica generada por los nodos que están en la zona de comunicación (carga básica + carga básica retransmitida).

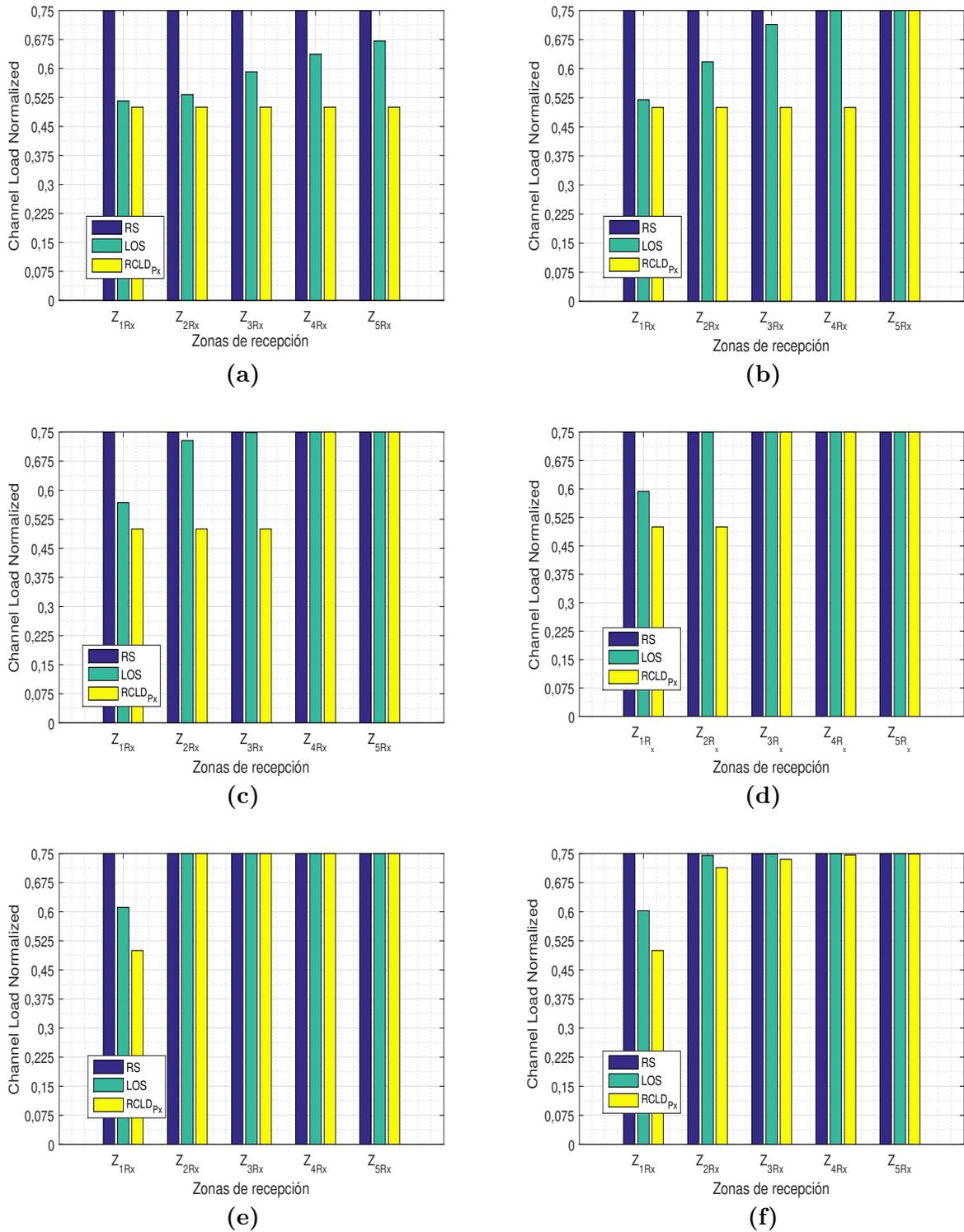
Por lo tanto, el esquema NC presenta la misma carga básica generada por los nodos de la zona de comunicación más la carga generada por las retransmisiones, que en este caso corresponden a la mitad de las retransmisiones generadas en un mecanismo de retransmisión simple RS . Lo anterior implica una carga normalizada con respecto al mecanismo RS de 0.75 para un esquema NC .

Hasta aquí, analíticamente se demuestra que el mecanismo NC reduce la carga de canal. Lo que muestra la Figura 4.15 representa la normalización de los mecanismos evaluados respecto al mecanismo NC . Se puede apreciar que bajo ciertas condiciones los demás mecanismos presentan una reducción de la carga de canal por debajo de NC . Sin embargo, de la Figura se puede apreciar dos cosas: 1) si los nodos se encuentra en la primer zona Tx/Rx para el mecanismo propuesto presenta una reducción de la carga de canal hasta en un 50 % y 2) en escenarios de mayor densidad y en donde los nodos se encuentran más alejados, la carga de canal tiende a tener el mismo comportamiento de NC . No obstante, se puede observar, que el mecanismo propuesto $RCLD_{Px}$ presenta una reducción en la carga del canal por encima del esquema NC en las zonas más cercanas de comunicación y respecto a los demás mecanismos evaluados.

En los mecanismos evaluados se usa el método de retransmisión propio de cada uno de ellos. Sin embargo, para cada uno de ellos se aplica el principio de codificación que emplea el mecanismo NC , en donde la RSU codifica dos *beacons* recibidos y de acuerdo al principio de los mecanismos RS , LOS o el propuesto $RCLD_{Px}$, decide si es necesario o no realizar la retransmisión del mensaje. En las Figuras 4.15 para la retransmisión simple, todos los *beacons* que son recibidos por la RSU son siempre retransmitidos, por lo tanto, el comportamiento de la carga del canal es igual al que se presenta en el mecanismo NC . En decir, que el mecanismo de RS no presenta ninguna mejora significativa en la carga del canal respecto al mecanismo de NC . Sin embargo, en los otros dos esquemas se observan mejoras respecto a la carga de canal en referencia al mecanismo NC .

Al establecerse línea de vista entre los nodos, se reduce las retransmisiones por parte del nodo retransmisor RSU , lo que representa una reducción en la carga del canal. En la Figura

Figura 4.15: Carga promedio de canal normalizada respecto a NC de acuerdo con diferentes posiciones del nodo transmisor con respecto a diferentes zonas del nodo receptor: a) Z_{1t} , b) Z_{2t} , c) Z_{3t} , d) Z_{4t} , e) Z_{5t} , f) Z_{it} .



4.15a cuando los paquetes codificados provienen de las primeras zonas, y en la lista de vecinos de la *RSU* solo existen nodos en la primer zona de recepción, la carga de canal se reduce

en un 30% respecto al mecanismo NC . Aún si existen nodos en las zonas más lejanas, por ejemplo en la Z_5r , se pueden obtener una reducción en la carga del canal del 10% respecto al esquema NC .

En el mecanismo propuesto $RCLD_{Px}$ cuando los *beacons* recibidos por la RSU vienen de nodos que se encuentran en las zonas más cercanas a la intersección, no existe necesidad de realizar una retransmisión. Por lo tanto, el mecanismo propuesto permite garantizar una reducción en la carga del canal del 30% respecto al mecanismo NC , independiente de la zona en la que se encuentran los nodos vecinos (ver Figura 4.15a). El mecanismo propuesto permite reducir la carga de canal en las zonas más cercanas en hasta un 20% como se observa en las gráficas de la Figura 4.15a cuando los nodos vecinos se encuentran en las primeras zonas de recepción, ya que en estas zonas se posible que exista comunicación con los nodos transmisores.

Packet Delivery Ratio - PDR

El análisis inicial del PDR se realiza bajo dos condiciones que corresponden al mejor y peor escenario que se tiene en la comunicación en la intersección. La primera, se asume que los nodos transmisores se encuentran en la primera zona Z_1t , de esta manera se garantiza que existe alcance con todas las demás zonas y no se tienen nodos ocultos. La segunda, corresponde a asumir que los nodos transmisores se encuentran en la zona más lejana Z_5t , y que, los nodos receptores se encuentran en la zona más cercana a la intersección Z_1r , que corresponde al escenario donde se presenta mayor cantidad de nodos ocultos $Z_{[2 : 5]r}$.

En la Figura 4.16 los mecanismos LOS y RS no tienen en cuenta la influencia de los nodos de las zonas de interferencias y/o ocultos, es por esa razón que el PDR presenta resultados por encima de los otros mecanismos. Sin embargo, es pertinente recordar que en los esquemas LOS y RS se realizan retransmisiones de todos los *beacons* recibidos por la RSU lo que implica un aumento en la carga de canal.

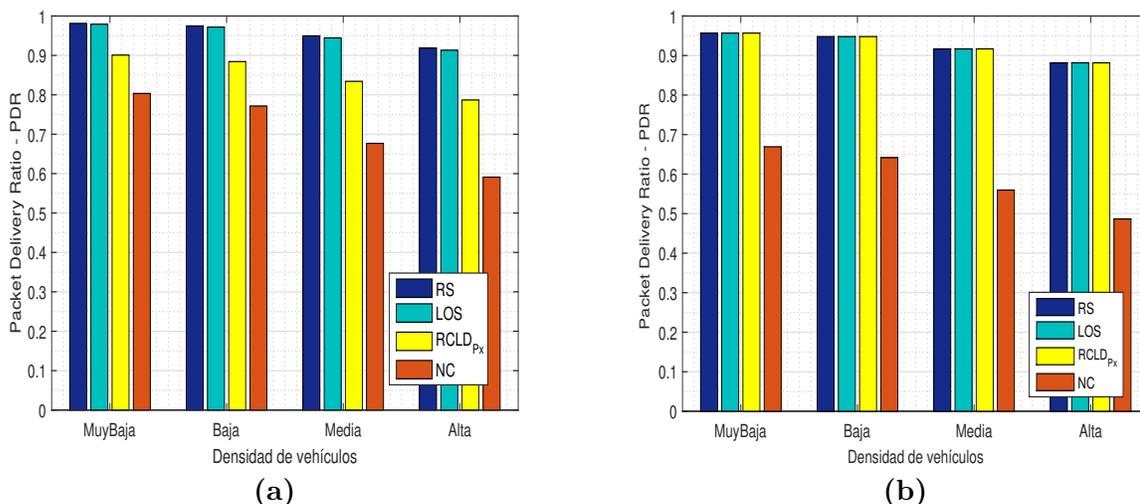
Aun así, el mecanismo propuesto $RCLD_{Px}$ presenta un PDR por encima del 80% bajo las condiciones de las zonas de evaluación. En cambio, en el esquema NC el PDR esta por debajo de los otros mecanismos debido a la menor probabilidad de decodificar con éxito los paquetes retransmitidos por la RSU .

La anterior conclusión, se explica a continuación: en el mecanismo $RCLD_{Px}$, los nodos transmisores no necesitan que sus *beacons* sean retransmitidos por el nodo RSU debido que en las zonas evaluadas se garantiza que existe comunicación entre los nodos transmisores/-receptores. Sin embargo, en el mecanismo NC cuando la RSU recibe los *beacons* de un par de nodos transmisores y codifica el paquete para ser retransmitido, la decodificación exitosa en el receptor depende de que un *beacon* original por parte de los nodos originalmente transmisores se haya recibido correctamente. Por lo tanto, la probabilidad de recepción exitosa en el mecanismo NC (ver ecuación 4.17) depende de la probabilidad de éxito en la recepción del paquete enviado por la RSU y de la probabilidad de recepción exitosa de alguno de los *beacons* originales de los nodos transmisores. En cambio, en el esquema propuesto $RCLD_{Px}$ al no realizar la retransmisión del *beacons* recibido, ni codificar un paquete para ser retransmitido, la probabilidad de recepción exitosa en el receptor solo depende de la transmisión exitosa del nodo transmisor. En pocas palabras, que la recepción efectiva en el mecanismo

NC depende de dos condiciones que deban cumplirse, reduce la probabilidad de recepción exitosa, dado que a medida que un nodo transmisor se aleja del centro de la intersección, esta probabilidad disminuye rápidamente.

La Figura 4.16a pone en evidencia que al variar la densidad vehicular, aumenta los nodos en las zonas de interferencia y ocultas afectando la recepción exitosa de los *beacons* en los nodos receptores.

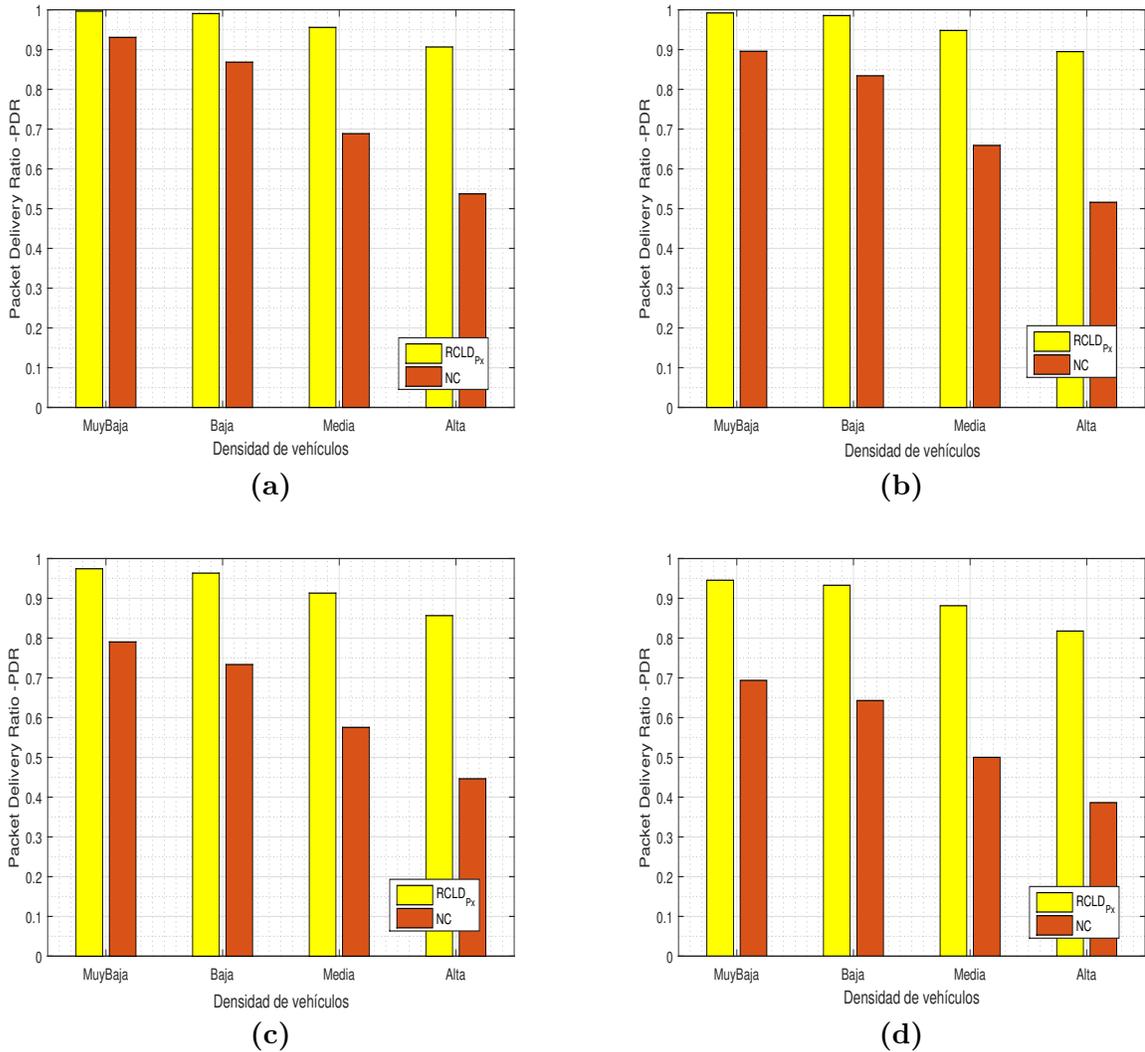
Figura 4.16: Packet Delivery Ratio: de acuerdo a las zonas de los nodos de transmisión a) Z_{1t} y b) Z_{5t} respecto a las zonas Z_{1r} de los nodos receptores con diferentes densidades vehiculares en el área de transmisión: MuyBaja, Baja, Media, Alta.



A medida que los nodos se alejan del centro de la intersección, la potencia recibida por los nodos receptores disminuye. Por lo tanto, los mecanismos propuestos en la literatura y evaluados en esta sección llevan a que exista la retransmisión del *beacon* por parte de la *RSU* con el objetivo de aumentar la probabilidad de recepción exitosa en los nodo receptores. Por consiguiente, las zonas de interés evaluadas, que corresponde a los peores casos donde se realiza la retransmisión, se tiene que los resultados serán muy similares, debido a que se usa el mismo modelo de propagación y ecuaciones formuladas en la sección 4.2. Por lo tanto, se hace interesante comparar el mecanismo propuesto $RCLD_{Px}$ junto con el mecanismo NC el cual en la sección anterior demostró tener una mejora en la carga del canal respecto a los otros mecanismos propuestos en la literatura [27, 99].

Desde el punto de vista de la recepción, los vehículos receptores de la zona Z_{1r} no presentan vehículos ocultos cuando la transmisión se origina desde la zona Z_{1t} . Sin embargo, a medida que aumenta la densidad vehicular el rendimiento del PDR se ve afectado por las colisiones de paquetes de vehículos ocultos en la comunicación entre los nodos dependiendo de las zonas establecidas en las que se encuentren los nodos. En el mecanismo propuesto $RCLD_{Px}$ la *RSU* solo analiza el *beacon* recibido del vehículo transmisor y toma la decisión de retransmitirlo o no, dependiendo de la tabla de vecinos de las zonas $Z_{[1 : 5]r}$. En tanto, el mecanismo NC recibe dos *beacons* enviados por un par de vehículos transmisores y codifica este mensaje para retransmitirlo.

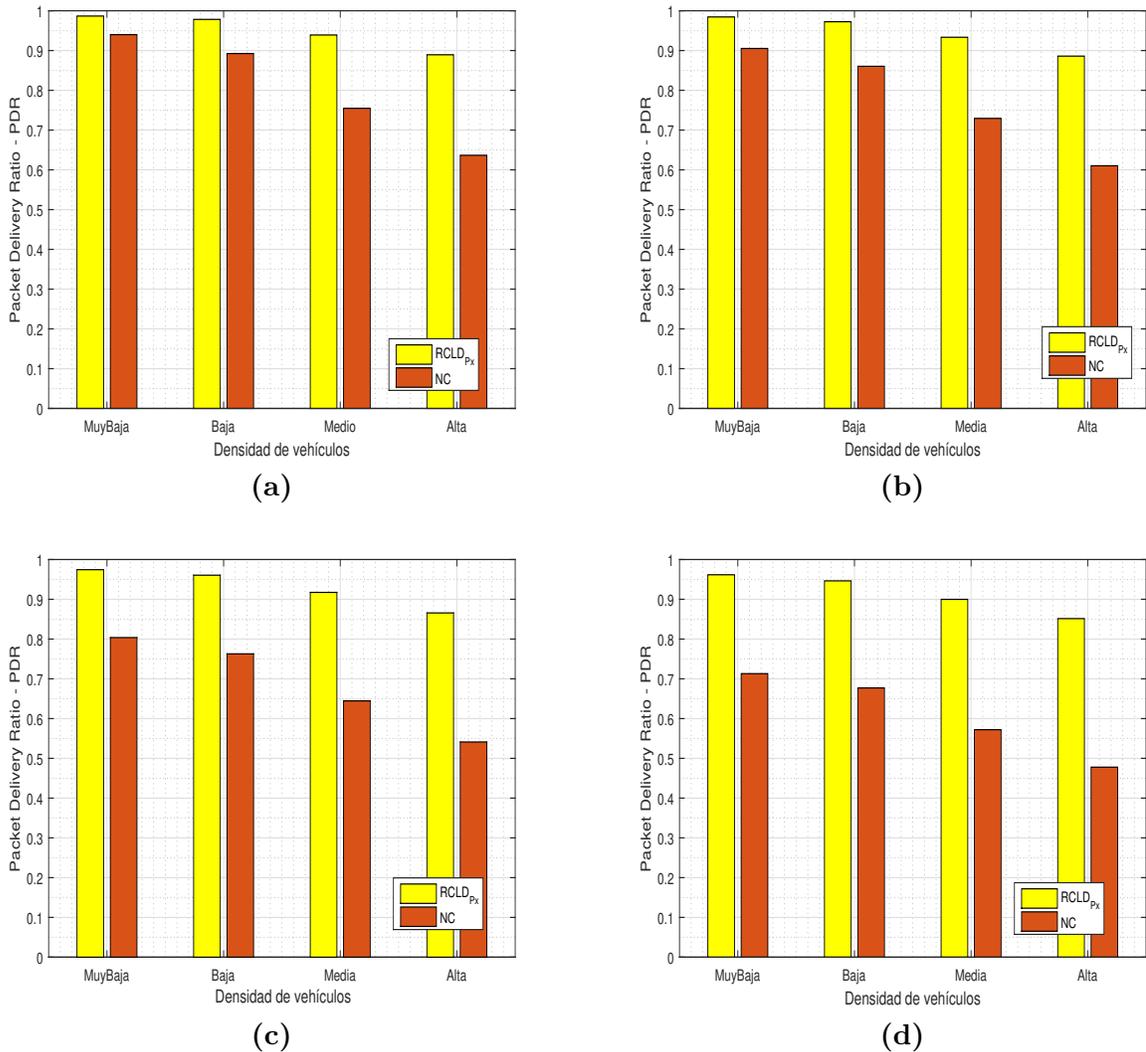
Figura 4.17: Packet Delivery Ratio: según zonas del nodo transmisor $Z_{[1 : 5]t}$ respecto a las zonas Z_{1r} del nodo receptor con diferentes densidades vehiculares en las áreas de transmisión: a) MuyBaja, b) Baja, c) Media, d) Alta.



Ahora suponga que, el par transmisor de nodos se encuentran ubicados en la zona Z_{3t} y Z_{4t} , de acuerdo a la Figura 4.11 es posible tener comunicación con vehículos de las zonas $Z_{[1 : 3]r}$ y $Z_{[1 : 2]r}$ respectivamente. Por lo que, si existen vehículos solo en las zonas $Z_{[4 : 5]r}$, de acuerdo al mecanismo $RCLD_{Px}$ la probabilidad de recepción exitosa en estas zonas es siempre cero, ya que, el rango de comunicación del vehículo transmisor no alcanza esas zonas. Por lo tanto, aún cuando el esquema NC codifique el paquete y lo retransmita, la decodificación exitosa en el receptor necesita que un *beacon* original se haya recibido correctamente. Mientras que, el modelo propuesto $RCLD_{Px}$ recibe el *beacon* de cada nodo y toma la decisión de retransmitirlo o no, aumentando la probabilidad de éxito en la recepción del mensaje.

De la Figura 4.17 y 4.18, se pueden tener dos conclusiones: 1) el mecanismo propuesto garantiza un *PDR* por encima del 80 % para escenarios de alta densidad vehicular y del 90 % para las densidades más bajas en aquellas zonas donde existe comunicación. Esta tasa de recepción exitosa en los nodos receptores se realiza sin necesidad de realizar retransmisión

Figura 4.18: Packet Delivery Ratio: de acuerdo a las zonas de los nodos de transmisión $Z_{[1 : 2]t}$ respecto a las zonas $Z_{[1 : 4]r}$ de los nodos receptores con diferentes densidades vehiculares en el area de transmisión: a) MuyBaja, b) Baja, c) Media, d) Alta.

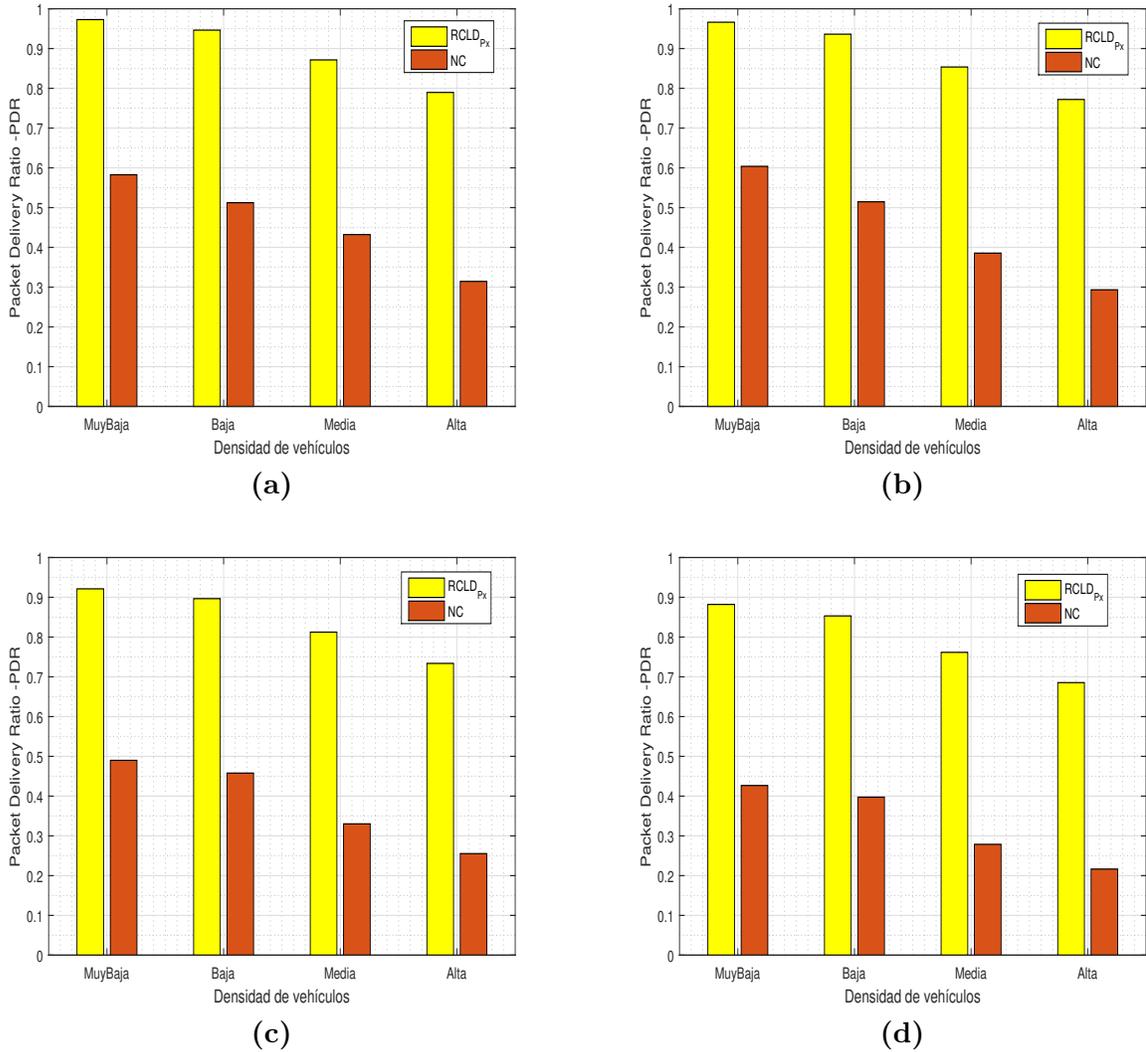


de los *beacons* parte de la *RSU*. 2) Aunque existe comunicación entre las zonas evaluadas, el esquema *NC* presenta un *PDR* inferior al esquema propuesto debido a que a medida que vehículos transmisores se alejan del centro de la intersección, la probabilidad de recepción exitosa para decodificar el paquete enviado por la *RSU* disminuye.

La Figura 4.19 pone en evidencia el problema que implica usar el mecanismo *NC* sin ningún tipo de mecanismo de control. El paquete enviado por la *RSU* proviene de los *beacons* recibidos por un par de vehículos transmisores t_1 y t_2 , por lo cual el paquete recibido por el vehículo receptor corresponde a $(t_1 \oplus t_2)$. Este paquete solo se puede decodificar, si se garantiza que al menos uno de los *beacons* transmitidos por los vehículos t_1 o t_2 lleguen exitosamente al receptor.

Si uno o los dos *beacons* provienen de las zonas más lejanas, la probabilidad de que el paquete enviado por la *RSU* sea decodificado en el receptor depende de recibir exitosamente

Figura 4.19: Packet Delivery Ratio: de acuerdo a las zonas de los nodos de transmisión $Z_{[4 : 5]t}$ respecto a las zonas $Z_{[1 : 2]r}$ de los nodos receptores con diferentes densidades vehiculares en el area de transmisión: a) MuyBaja, b) Baja, c) Media, d) Alta.



el *beacon* original de los vehículos t_1 o t_2 , la cual disminuye drásticamente debido a que estos *beacons* de los transmisores pueden venir de las zonas más lejanas, e inclusive puede que la probabilidad de éxito sea cero si la zona en la que se encuentra el nodo receptor se encuentra fuera de las zonas de cobertura por parte del nodo transmisor. En conclusión, el esquema *NC* puede representar un complemento para un mecanismo de control de retransmisión inteligente, tal que mejorar la carga de canal, pero puede traer consigo una disminución drástica en el PDR cuando el mensaje codificado proviene de las zonas más lejanas al centro de la intersección.

Por lo tanto, el mecanismo de control de retransmisión propuesto en esta tesis, el cual considera como parámetros de decisión la distancia entre vehículos y la potencia de recepción, ofrece un *PDR* por encima del 80 % inclusive en escenarios de alta densidad vehicular en donde el mecanismo *NC* ofrece solo ofrece un *PDR* del 30 %. De igual manera, aunque el esquema *NC* presenta una mejora significativa en la carga de canal en comparación con

los demás mecanismos evaluados, su *PDR* tiende a ser mas bajo que los otros mecanismos evaluados.

Capítulo 5

Conclusiones y trabajo futuro

5.1. Conclusiones y discusión

El trabajo realizado en esta tesis comprende la evaluación experimental en comunicaciones cooperativas bajo entornos urbanos reales, permitiendo evaluar parámetros físicos de la red por medio de equipos comerciales que soportan el estándar *IEEE 802.11-OCB* y la tecnología DSRC. Se analiza el impacto del entorno y de la distancia entre nodos en su operación, determinando los límites en la utilización del estándar *802.11p* en entornos urbanos reales y las prestaciones que se pueden obtener en función de la distancia. Estas evaluaciones y resultados confirman la hipótesis planteada en este documento contribuyendo al conocimiento sobre comunicaciones vehiculares bajo entornos reales. El rango máximo teórico establecido por el estándar *IEEE802.11p*, no es aplicable en entornos urbanos reales y en particular en intersecciones urbanas. En base a las pruebas realizadas se concluye que en entornos con línea de vista el rango de comunicación real entre nodos es de 160 m.

La evaluación mediante pruebas experimentales de un mecanismo de retransmisión implementado en unidades comerciales usadas para comunicaciones vehiculares bajo distintos escenarios urbanos, permitió establecer que, es en escenarios de intersecciones donde los efectos de sombreado causado por los obstáculos, lleva a una degradación del rendimiento del mecanismo implementado debido a la atenuación severa de las señales de transmisión que afecta la conectividad entre los vehículos. Por lo que se hace necesario el uso de mecanismos de retransmisión que permitan mejorar la conectividad, la entrega de mensajes y el rango de comunicación aumentando la conciencia cooperativa mejorando de esta manera la seguridad vial en entornos de intersecciones.

Se propuso un mecanismo de retransmisión *RCLD_{Px} crosslayer* que considera la distancia entre vehículos y potencia de recepción. En general, el mecanismo de retransmisión propuesto ofrece una mejora en la carga de canal, ya que evita las retransmisiones redundantes que se presentan en los otros mecanismos evaluados. El mecanismo *RCLD_{Px}*, reduce a la mitad la carga de canal (50 %) cuando las transmisiones de los vehículos se originan en la primera zona de la intersección. Además, permite garantizar una reducción en la carga del canal del 30 % respecto al mecanismo *NC*, independiente de la zona en la que se encuentran los nodos vecinos. Así como también, permite reducir la carga de canal en las zonas más cercanas en

hasta un 20 % cuando los nodos vecinos se encuentran en las primeras zonas de recepción.

El mecanismo $RCLD_{P_x}$ propuesto garantiza un PDR por encima del 80 % para escenarios de alta densidad vehicular y del 90 % para las densidades más bajas para aquellas zonas donde no existe comunicación. Aunque el esquema NC presenta una mejora significativa en la carga de canal en comparación con los demás mecanismos, el PDR de este mecanismo tiene a ser mas bajo que los otros. La razón parece ser simple, y es que este mecanismo al codificar los mensajes recibidos para realizar la retransmisión, implica el hecho de que el receptor debe poder recibir al menos uno de los mensajes del transmisor original, por lo cual, si los mensajes originales vienen de zonas de mayor lejanía, la probabilidad de éxito de recepción es baja o inclusive puede llegar a ser nula.

Es posible extender este mecanismo a cualquier otra intersección teniendo en cuenta que la propuesta presenta mejoras significativas en entornos de baja y media densidad, ya que en entornos de alta densidad el mecanismo propuesto tiende a comportarse como una mecanismo de retransmisión simple. Sin embargo, es necesario considerar los parámetros básicos del modelo de propagación [50], el cual es la base fundamental del mecanismo de retransmisión propuesto.

5.2. Trabajo Futuro

En el trabajo futuro, se espera poder evaluar experimentalmente el mecanismo propuesto, tal que se pueda extender las capacidades del mecanismo $RCLD_{P_x}$ en intersecciones reales, donde se pueda evaluar el desempeño del mecanismo en tiempo real. En el corto plazo, es posible simular otros escenarios de intersecciones urbanas, para obtener una parametrización del mecanismo propuesto, tal que, la propuesta pueda extenderse u adaptarse a diferentes escenarios de intersecciones urbanas.

Capítulo 6

Anexos

6.1. Publicaciones relacionadas a la tesis

En el transcurso de la realización de este trabajo se han producido publicaciones respecto al trabajo presentado en este documento, tales publicaciones se detallan a continuación:

- Conferencias
 1. Pablo Ortega, Sandra Cespedes, Sandy Bolufe and Cesar Azurdia, “Experimental Evaluation of Adaptive Beaconing for Vehicular Communications”, 6th International Workshop on ADVANCEs in ICT Infrastructures and Services, 2018.
 2. Pablo Ortega, Sandy Bolufé, Sandra Cespedes, Cesar Azurdia, Samuel Montejó, Fermin Barbosa, “Connectivity Improvement in Urban Intersections Obstructed by Buildings using RSUs”, Spring School on Systems and Networks (SSN 2018), Valdivia - Chile, pp 1-4.
 3. Vicente Matus, Cesar A. Azurdia-Meza, Sandra Cespedes, Pablo Ortega, Samuel Montejó-Sanchez, Javier Rojas, Ismael Soto. “Implementation of a Low-Cost Vehicular VLC System and CAN Bus Interface,” 2018 11th International Symposium on Communication Systems, Networks Digital Signal Processing (CSNDSP), Budapest, Hungary, 2018, pp. 1-5.

6.2. Códigos

Los códigos de lo realizado en este trabajo se puede encontrar en los siguientes enlaces:

- <https://github.com/pabloortega07/MecanismoPropuesto>
- <https://github.com/pabloortega07/RetransmisionSimple>

Bibliografía

- [1] K. Zheng, S. Member, Q. Zheng, P. Chatzimisios, and S. Member, “Heterogeneous Vehicular Networking : A Survey on Architecture , Challenges , and Solutions ITS AC SC WAVE,” vol. 17, no. 4, pp. 2377–2396, 2015.
- [2] S. Kühlmorgen, A. González, A. Festag, and G. Fettweis, “Improving communication-based intersection safety by cooperative relaying with joint decoding,” in *2017 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, June 2017, pp. 679–684.
- [3] W. Verdecia, “Estudios de seguridad en intersecciones semaforizadas mediante observación de conflictos de tránsito,” p. 113. [Online]. Available: http://www.institutoivia.com/doc/Estudios_de_seguridad_en_intersecciones_semaforizadas_mediante_observación_de_conflictos_de_tránsito._Wilma_Verdecia_Soto.pdf
- [4] A. M. Cailean, B. Cagneau, L. Chassagne, V. Popa, and M. Dimian, “A survey on the usage of DSRC and VLC in communication-based vehicle safety applications,” *Proceedings of the 2014 IEEE 21st Symposium on Communications and Vehicular Technology in the BeNeLux, IEEE SCVT 2014*, pp. 69–74, 2014.
- [5] D. Jiang and L. Delgrossi, “IEEE 802 . 11p : Towards an International Standard for Wireless Access in Vehicular Environments,” *Group*, pp. 2036–2040, 2008.
- [6] M. R. Jabbarpour, R. Md Noor, R. H. Khokhar, and C.-H. Ke, “Cross-layer congestion control model for urban vehicular environments,” *J. Netw. Comput. Appl.*, vol. 44, pp. 1–16, Sep. 2014. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jnca.2014.05.002>
- [7] S. Bolufe, S. Montejo, C. A. Azurdia, C. Sandra, R. D. Souza, and E. M. G. Fernandez, “Dynamic Control of Beacon Transmission Rate with Position Accuracy in Vehicular Networks,” no. SSN2017: III Spring School on Networks. Pucon, Chile, October 2017, pp. 1–4, 2017.
- [8] C. Sommer, D. Eckhoff, and F. Dressler, “IVC in cities: Signal attenuation by buildings and how parked cars can improve the situation,” *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 13, no. 8, pp. 1733–1745, 2014.
- [9] C. Sommer, D. Eckhoff, R. German, and F. Dressler, “A computationally inexpensive empirical model of ieee 802.11p radio shadowing in urban environments,” in *2011 Eighth International Conference on Wireless On-Demand Network Systems and Services*, Jan 2011, pp. 84–90.

- [10] M. Li, K. Zeng, and W. Lou, "Opportunistic broadcast of event-driven warning messages in vehicular ad hoc networks with lossy links," *Computer Networks*, vol. 55, no. 10, pp. 2443–2464, 2011.
- [11] "Statistisches Bundesamt, Verkehrsunfalle. Germany," 2016.
- [12] "Traffic Safety Basic Facts 2016: Junctions, Technical Report, European Commission, Directorate General for Transport," *European Commission*, 2016.
- [13] E. FARS. National highway traffic safety administration. accedido por ultima vez: Dic 7 2019. [Online]. Available: <https://www-fars.nhtsa.dot.gov/Main/index.aspx>
- [14] Eu regional and urban development - smart cities: European commission. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/info/eu-regional-and-urban-development/topics/cities-and-urban-development/city-initiatives/smart-cities_en
- [15] J. B. Kenney, "Dedicated short-range communications (DSRC) standards in the United States," *Proceedings of the IEEE*, vol. 99, no. 7, pp. 1162–1182, 2011.
- [16] M. Sepulcre, J. Gozalvez, J. Harri, and H. Hartenstein, "Application-based congestion control policy for the communication channel in VANETs," *IEEE Communications Letters*, vol. 14, no. 10, pp. 951–953, 2010.
- [17] F. Ahmed-Zaid, F. Bai, S. Bai, C. Basnayake, B. Bellur, S. Brovold, G. Brown, L. Caminiti, D. Cunningham, H. Elzein, K. Hong, J. Ivan, D. Jiang, J. Kenney, H. Krishnan, J. Lovell, M. Maile, D. Masselink, E. McGlohon, P. Mudalige, Z. Popovic, V. Rai, J. Stinnett, L. Tellis, K. Tirey, and S. VanSickle, "VSC-A Final Report," *Nhtsa*, no. September, pp. 1–102, 2011.
- [18] ETSI, "TS 101 539-3 Intelligent Transport Systems (ITS); V2X Applications; Part 3: Longitudinal Collision Risk Warning (LCRW) application requirements specification," *Etsi*, vol. 1, pp. 1–29, 2013. [Online]. Available: http://www.etsi.org/deliver/etsi{}_ts/101500{}_101599/10153903/01.01.01{}_60/ts{}_10153903v010101p.pdf
- [19] Its, "TS 101 539-2 - V1.1.1 - Intelligent Transport Systems (ITS); V2X Applications; Part 2: Intersection Collision Risk Warning (ICRW) application requirements specification," vol. 1, pp. 1–30, 2018.
- [20] R. K. Schmidt, T. Leinmüller, E. Schoch, F. Kargl, and G. Schäfer, "Exploration of adaptive beaconing for efficient intervehicle safety communication," *IEEE Network*, vol. 24, no. 1, pp. 14–19, 20.
- [21] S. A. A. Shah, E. Ahmed, F. Xia, A. Karim, M. Shiraz, and R. M. Noor, "Adaptive Beaconing Approaches for Vehicular Ad Hoc Networks: A Survey," *IEEE Systems Journal*, pp. 1–15, 2016.
- [22] A. Kwoczek, Z. Raida, J. Láčík, M. Pokorný, J. Puskely, and P. Vágner, "Influence of car panorama glass roofs on car2car communication (poster)," in *2011 IEEE Vehicular Networking Conference (VNC)*, Nov 2011, pp. 246–251.

- [23] A. Daniel, D. C. Popescu, and S. Olariu, “A study of beaconing mechanism for vehicle-to-infrastructure communications,” *IEEE International Conference on Communications*, pp. 7146–7150, 2012.
- [24] M. Sepulcre, J. Gozalvez, O. Altintas, and H. Kremo, “Adaptive Beaconing for Congestion and Awareness Control in Vehicular Networks,” pp. 81–88, 2014.
- [25] M. Sepulcre, J. Mittag, P. Santi, H. Hartenstein, and J. Gozalvez, “Congestion and awareness control in cooperative vehicular systems,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 99, no. 7, pp. 1260–1279, July 2011.
- [26] T. Abbas, A. Thiel, T. Zemen, C. F. Mecklenbräuker, and F. Tufvesson, “Validation of a non-line-of-sight path-loss model for v2v communications at street intersections,” in *2013 13th International Conference on ITS Telecommunications (ITST)*, Nov 2013, pp. 198–203.
- [27] K. Cao, A. Kinoshita, Y. Takaki, C. Ohta, and H. Tamaki, “Efficient urban broadcast protocol for v2v communications with relay control,” in *2013 IEEE Vehicular Networking Conference*, Dec 2013, pp. 24–30.
- [28] Y. Li, J. Liao, T. Li, X. Zhu, L. Zhang, and S. Xie, “Analysis of packets delivery probability on intersections for vanets in city scenarios,” in *2010 2nd IEEE International Conference on Network Infrastructure and Digital Content*, Sept 2010, pp. 474–478.
- [29] H. Chen, L. Cao, and D. B. Logan, “Investigation into the effect of an intersection crash warning system on driving performance in a simulator,” *Traffic Injury Prevention*, vol. 12, no. 5, pp. 529–537, 2011, pMID: 21972864. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/15389588.2011.603169>
- [30] R. K. Schmidt, R. Lasowski, T. Leinmiiller, C. Linnhoff-Popien, and G. Schäfer, “An approach for selective beacon forwarding to improve cooperative awareness,” in *2010 IEEE Vehicular Networking Conference*, Dec 2010, pp. 182–188.
- [31] D. B. Rawat and S. Shetty, “Enhancing connectivity for spectrum-agile Vehicular Ad hoc NETWORKS in fading channels,” *IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Proceedings*, no. Iv, pp. 957–962, 2014.
- [32] R. H. Ordonez-Hurtado and R. N. Shorten, “Using stationary vehicles to enhance cooperative positioning in Vehicular Ad-hoc Networks,” *2014 International Conference on Connected Vehicles and Expo, ICCVE 2014 - Proceedings*, pp. 867–868, 2014.
- [33] ARADA. Locomate classic on board unit obu-200. [Online]. Available: <http://www.aradasystems.com/>
- [34] R. Baldessari, A. Festag, A. Matos, J. Santos, and R. Aguiar, “Flexible connectivity management in vehicular communication networks,” in *Proceedings of 3rd International Workshop on Intelligent Transportation*, 2006.
- [35] G. Karagiannis, O. Altintas, E. Ekici, G. Heijenk, B. Jarupan, K. Lin, and T. Weil,

- “Vehicular networking: A survey and tutorial on requirements, architectures, challenges, standards and solutions,” *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 13, no. 4, pp. 584–616, Fourth 2011.
- [36] Omnet. Objective modular network testbed in c++. [Online]. Available: <https://omnetpp.org/doc/omnetpp/manual/>
- [37] SUMO. Simulation of urban mobility. [Online]. Available: <http://sumo.dlr.de/index.html>
- [38] Veins. vehicular in network simulation. [Online]. Available: <http://veins.car2x.org/>
- [39] E. Morgado Reyes, “Prestaciones de las Redes Ad Hoc Inalámbricas: Teoría a través de Capas,” *Universidad Rey Juan Carlos, España*, 2009.
- [40] M. Torres Giraldo, “Estudio y simulación de redes ad-hoc vehiculares vanets,” *Universidad Católica de Pereira, Ingeniería de Sistemas y Telecomunicaciones*.
- [41] “Ieee standard for information technology– 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 802.11p-2010 (Amendment to IEEE Std 802.11-2007 as amended by IEEE Std 802.11k-2008, IEEE Std 802.11r-2008, IEEE Std 802.11y-2008, IEEE Std 802.11n-2009, and IEEE Std 802.11w-2009)*, pp. 1–51, July 2010.
- [42] “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 802.11-2016 (Revision of IEEE Std 802.11-2012)*, pp. 1–3534, Dec 2016.
- [43] “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 802.11-2012 (Revision of IEEE Std 802.11-2007)*, pp. 1–2793, March 2012.
- [44] “Ieee draft 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 : Wireless access in vehicular environments,” *IEEE Unapproved Draft Std P802.11p /D10.0, Jan 2010*, 2010.
- [45] S. Al-sultan, M. M. Al-doori, A. H. Al-bayatti, and H. Zedan, “Journal of Network and Computer Applications A comprehensive survey on vehicular Ad Hoc network,” *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 37, pp. 380–392, 2014. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jnca.2013.02.036>
- [46] F. Domingos, D. Cunha, L. Villas, A. Boukerche, G. Maia, A. C. Viana, R. A. F. Mini, and A. A. F. Loureiro, “Data Communication in VANETs: Survey, Applications and Challenges,” vol. 44, pp. 90–103, 2016. [Online]. Available: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01369972>

- [47] C. Wang and J. 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," Mar. 18 1997, uS Patent 5,613,039. [Online]. Available: <https://www.google.com/patents/US5613039>
- [48] U. D. of Transportation. The national intersection safety problem. [Online]. Available: https://safety.fhwa.dot.gov/intersection/other_topics/fhwasa09027/resources/Intersection%20Safety%20Issue%20Brief%202.pdf
- [49] DGT. Seguridad vial - estadística e indicadores - publicaciones. [Online]. Available: dgt.es/es/explora/en-cifras/accidentes.shtml
- [50] T. Mangel, O. Klemp, and H. Hartenstein, "A validated 5.9 ghz non-line-of-sight path-loss and fading model for inter-vehicle communication," in *2011 11th International Conference on ITS Telecommunications*, Aug 2011, pp. 75–80.
- [51] M. R. Hafner, D. Cunningham, L. Caminiti, and D. D. Vecchio, "Cooperative collision avoidance at intersections: Algorithms and experiments," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 14, no. 3, pp. 1162–1175, Sept 2013.
- [52] S. Panichpapiboon and W. Pattara-atikom, "A review of information dissemination protocols for vehicular ad hoc networks," *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 14, no. 3, pp. 784–798, Third 2012.
- [53] P. M. d'Orey and M. Ferreira, "Its for sustainable mobility: A survey on applications and impact assessment tools," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 15, no. 2, pp. 477–493, April 2014.
- [54] K. Abboud, H. A. Omar, and W. Zhuang, "Interworking of DSRC and Cellular Network Technologies for V2X Communications : A Survey," 2016.
- [55] H. Hartenstein and L. P. Laberteaux, "A tutorial survey on vehicular ad hoc networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 46, no. 6, pp. 164–171, June 2008.
- [56] W. Jian, C. Shankwitz, A. Menon, Cai Baigen, and Shangguan Wei, "Connected vehicle GID transmission and reception test with DSRC," *Proceedings of the 2012 IEEE-APS Topical Conference on Antennas and Propagation in Wireless Communications, APWC'12*, pp. 1229–1232, 2012.
- [57] S. Gao, A. Lim, and D. Bevly, "An empirical study of DSRC V2V performance in truck platooning scenarios," *Digital Communications and Networks*, vol. 2, no. 4, pp. 233–244, 2016. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.dcan.2016.10.003>
- [58] U. D. O. TRANSPORTATION. Sae j2735 - dedicated short range communications (dsrc) message set dictionary. [Online]. Available: <https://www.standards.its.dot.gov/Factsheets/Factsheet/71>
- [59] F. Bai, D. D. Stancil, and H. Krishnan, "Toward understanding characteristics of dedicated short range communications (dsrc) from a perspective of vehicular network

- engineers,” in *Proceedings of the Sixteenth Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, ser. MobiCom '10. New York, NY, USA: ACM, 2010, pp. 329–340. [Online]. Available: <http://doi.acm.org/10.1145/1859995.1860033>
- [60] S. A. M. Ahmed, S. H. S. Ariffin, and N. Faisal, “Overview of wireless access in vehicular environment (wave) protocols and standards,” *Indian Journal of Science and Technology*, vol. 6, no. 7, pp. 4994–5001, 2013.
- [61] Y. L. Morgan, “Managing DSRC and WAVE Standards Operations in a V2V Scenario,” *International Journal of Vehicular Technology*, vol. 2010, pp. 1–18, 2010. [Online]. Available: <http://www.hindawi.com/journals/ijvt/2010/797405/>
- [62] L. Lin and J. A. Misener, *Message Sets for Vehicular Communications*. Cham: Springer International Publishing, 2015, pp. 123–163. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-319-15497-8_5
- [63] *Intelligent transport systems (ITS); Framework for public mobile networks in cooperative ITS (C-ITS)*. ETSI Tech. Committee Intell. Transp. Syst., Sophia Antipolis, France, Tech. Rep. 102962, 2012.
- [64] Y. Wu, H. Yuan, H. Chen, and J. Li, “A study on reaction time distribution of group drivers at car-following,” in *2009 Second International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation*, vol. 3, Oct 2009, pp. 452–455.
- [65] A. Bohm, M. Jonsson, and E. Uhlemann, “Adaptive cooperative awareness messaging for enhanced overtaking assistance on rural roads,” in *2011 IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall)*, Sept 2011, pp. 1–5.
- [66] C. O. Dsrc and M. E. S. Et, “DRAFT SAE J2735 Dedicated Short Range Communications (DSRC) Message Set Dictionary Prepared,” pp. 1–239, 2018.
- [67] M. Sander Frigau, “Cross-layer transmit power and beacon rate adaptation for VANETs,” *Proceedings of the third ACM international symposium on Design and analysis of intelligent vehicular networks and applications - DIVANet '13*, no. November 2013, pp. 129–136, 2013. [Online]. Available: <http://dl.acm.org/citation.cfm?doid=2512921.2518070>
- [68] T. Tielert, D. Jiang, Q. Chen, L. Delgrossi, and H. Hartenstein, “Design methodology and evaluation of rate adaptation based congestion control for vehicle safety communications,” in *2011 IEEE Vehicular Networking Conference (VNC)*, Nov 2011, pp. 116–123.
- [69] Vehicle safety communications applications vsc-a, first annual report, u.s. dept. trans., nat. highway traffic safety admin., rep. dot hs 811 073. [Online]. Available: <https://www.nhtsa.gov/DOT/NHTSA/NRD/Multimedia/PDFs/Crash%20Avoidance/2009/811073.pdf>
- [70] S. Soroush-Jahromi, J. Abouei, G. Mirjalily, and M. R. Taban, “A congestion efficient cooperative positioning scheme for vehicular networks,” in *2017 Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE)*, May 2017, pp. 1713–1718.

- [71] B. Banitalebi and J. Abouei, “An efficient multiple access interference suppression scheme in asynchronous femtocells,” *IET Communications*, vol. 7, no. 14, pp. 1439–1448, September 2013.
- [72] A. Mohammadi, M. R. Taban, J. Abouei, and H. Torabi, “Fuzzy likelihood ratio test for cooperative spectrum sensing in cognitive radio,” *Signal Processing*, vol. 93, no. 5, pp. 1118 – 1125, 2013. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165168412004434>
- [73] A. Sassi, F. Charfi, L. Kamoun, Y. Elhillali, and A. Rivenq, “Experimental measurement for vehicular communication evaluation using obu arada system,” in *2015 International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)*, Aug 2015, pp. 1358–1364.
- [74] F. Librino, M. E. Renda, and P. Santi, “Multihop beaconing forwarding strategies in congested ieee 802.11p vehicular networks,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 65, no. 9, pp. 7515–7528, Sept 2016.
- [75] M. Rohani, D. Gingras, and D. Gruyer, “A novel approach for improved vehicular positioning using cooperative map matching and dynamic base station dgps concept,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 17, no. 1, pp. 230–239, Jan 2016.
- [76] G. Soatti, M. Nicoli, N. Garcia, B. Denis, R. Raulefs, and H. Wymeersch, “Implicit Cooperative Positioning in Vehicular Networks,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, pp. 1–15, 2018.
- [77] P. H. Mohammadabadi and S. Valaee, “Cooperative node positioning in vehicular networks using inter-node distance measurements,” *IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, PIMRC*, vol. 2014-June, no. 1, pp. 1448–1452, 2014.
- [78] V. Kukshya, H. Krishnan, and C. Kellum, “Design of a system solution for relative positioning of vehicles using vehicle-to-vehicle radio communications during gps outages,” in *VTC-2005-Fall. 2005 IEEE 62nd Vehicular Technology Conference, 2005.*, vol. 2, Sept 2005, pp. 1313–1317.
- [79] H. Du, W. Li, N. Zhang, K. Zhao, J. Wang, and Z. Shao, “A vehicle cooperative positioning enhancement for gnss-dark areas based on grw model,” in *2015 International Conference on Wireless Communications Signal Processing (WCSP)*, Oct 2015, pp. 1–6.
- [80] X. Peng, “Positioning Algorithm for Vehicular Ad Hoc Networks,” no. 61300039, pp. 2283–2287, 2016.
- [81] ETSI, “ETSI TR 102 638 V1.1.1 (2009-06): Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Definitions,” *ETSI, Sophia Antipolis Cedex, France*, vol. 1, pp. 1–81, 2009. [Online]. Available: [http://scholar.google.com/scholar?hl=en{%}7B{%}&{%}7DbtnG=Search{%}7B{%}&{%}7Dq=intitle:Intelligent+Transport+Systems+\(ITS\);+Vehicular+](http://scholar.google.com/scholar?hl=en{%}7B{%}&{%}7DbtnG=Search{%}7B{%}&{%}7Dq=intitle:Intelligent+Transport+Systems+(ITS);+Vehicular+)

- [82] J. Gozalvez, M. Sepulcre, and R. Bauza, "Ieee 802.11p vehicle to infrastructure communications in urban environments," *IEEE Communications Magazine*, vol. 50, no. 5, pp. 176–183, May 2012.
- [83] M. Efatmaneshnik, N. Alam, A. Balaei, A. Kealy, and A. Dempster, "Cooperative positioning in vehicular networks," *Wireless Technologies in Vehicular Ad Hoc Networks: Present and Future Challenges*, pp. 245–270, 01 2012.
- [84] P. Ortega, S. Boluf, C. Sandra, C. A. Azurdia-meza, and S. Montejo, "Connectivity Improvement in Urban Intersections Obstructed by Buildings using RSUs."
- [85] G. Korkmaz, E. Ekici, F. Özgüner, and U. Özgüner, "Urban multi-hop broadcast protocol for inter-vehicle communication systems," in *Proceedings of the 1st ACM International Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks*, ser. VANET '04. New York, NY, USA: ACM, 2004, pp. 76–85. [Online]. Available: <http://doi.acm.org/10.1145/1023875.1023887>
- [86] F. F. Hassanzadeh and S. Valaee, "Reliable broadcast of safety messages in vehicular ad hoc networks," in *IEEE INFOCOM 2009*, April 2009, pp. 226–234.
- [87] C. Lochert, B. Scheuermann, C. Wewetzer, A. Luebke, and M. Mauve, "Data aggregation and roadside unit placement for a vanet traffic information system," in *Proceedings of the Fifth ACM International Workshop on Vehicular Inter-NETworking*, ser. VANET '08. New York, NY, USA: ACM, 2008, pp. 58–65. [Online]. Available: <http://doi.acm.org/10.1145/1410043.1410054>
- [88] H. Summala, "Brake reaction times and driver behavior analysis," *Transportation Human Factors*, vol. 2, pp. 217–226, 09 2000.
- [89] T. V. Programa de apoyo a proyectos para la innovación y mejoramiento de la enseñanza (papime) - 2017. [Online]. Available: <http://dgapa.unam.mx/index.php/fortalecimiento-a-la-docencia/papime>
- [90] E. R. R. Jones and R. L. Childers. Contemporary college physics, addison-wesley, 1990. 2nd ed 1993. [Online]. Available: <http://dgapa.unam.mx/index.php/fortalecimiento-a-la-docencia/papime>
- [91] H. Fernandez, V. M. Rodrigo-Penarrocha, L. Rubio, and J. Reig, "Path loss characterization in vehicular environments under LOS and NLOS conditions at 5.9 GHz," *8th European Conference on Antennas and Propagation, EuCAP 2014*, vol. 13, pp. 3044–3048, 2014.
- [92] D. Dhoutaut, A. Régis, and F. Spies, "Impact of radio propagation models in vehicular ad hoc networks simulations," in *Proceedings of the 3rd International Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks*, ser. VANET '06. New York, NY, USA: ACM, 2006, pp. 40–49. [Online]. Available: <http://doi.acm.org/10.1145/1161064.1161072>

- [93] H. Nguyen, M. Noor-A-Rahim, Z. Liu, D. Jamaludin, and Y. Guan, "A semi-empirical performance study of two-hop dsrc message relaying at road intersections," *Information*, vol. 9, p. 147, 06 2018.
- [94] H. Schumacher, H. Tchouankem, J. Nuckelt, T. Kürner, T. Zinchenko, A. Leschke, and L. Wolf, "Vehicle-to-vehicle ieee 802.11p performance measurements at urban intersections," in *2012 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, June 2012, pp. 7131–7135.
- [95] R. K. Schmidt, B. Kloiber, F. Schüttler, and T. Strang, "Degradation of communication range in vanets caused by interference 2.0 - real-world experiment," in *Communication Technologies for Vehicles*, T. Strang, A. Festag, A. Vinel, R. Mehmood, C. Rico Garcia, and M. Röckl, Eds. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011, pp. 176–188.
- [96] I. T. S. Dsrc, "Telecommunications Standards Advisory Committee (TSAC) Technical Specification Dedicated Short- Range Communications in Intelligent Transport Systems," 2017.
- [97] L. Yang, J. Guo, and Y. Wu, "Channel adaptive one hop broadcasting for vanets," in *2008 11th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, Oct 2008, pp. 369–374.
- [98] M. van Eenennaam, W. K. Wolterink, G. Karagiannis, and G. Heijenk, "Exploring the solution space of beaconing in vanets," in *2009 IEEE Vehicular Networking Conference (VNC)*, Oct 2009, pp. 1–8.
- [99] B. Hassanabadi and S. Valaee, "Reliable periodic safety message broadcasting in VANETs using network coding," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 13, no. 3, pp. 1284–1297, 2014.