



UNIVERSIDAD CENTRAL “MARTA ABREU” DE LAS VILLAS
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

“Algoritmo distribuido de *beaconing* basado en el ajuste dinámico de los parámetros de transmisión para Redes *Ad-hoc* Vehiculares”

Tesis presentada en opción al Título Académico de Máster en Telemática

Maestría de Telemática

Autor: Ing. Sandy Bolufé Aguila
FIE, UCLV, sandyb@uclv.edu.cu

Tutor: Dr. C. Samuel Montejo Sánchez
FIE, UCLV, montejo@uclv.edu.cu

Cotutor: Dr. C. Anelise Munaretto
UTFPR, anelise@utfpr.edu.br

Consultante: Dr. C. Richard Demo de Souza
UTFPR, richard@utfpr.edu.br

Santa Clara, Cuba, 2016

RESUMEN

En las VANETs, el correcto funcionamiento de múltiples casos de usos pertenecientes a las categorías de seguridad vial y gestión del tráfico, depende del conocimiento cooperativo que se obtiene a través del intercambio periódico de mensajes de un salto llamados “*beacons*”, los cuales incluyen datos como la posición, velocidad, aceleración y dirección del vehículo. Este proceso conocido como *beaconing* garantiza que los sistemas implementados en los vehículos adquieran información precisa del entorno circundante, permitiéndoles detectar situaciones potencialmente peligrosas, incluso antes de que se produzcan. En este trabajo se presenta un algoritmo distribuido de *beaconing* (AdB-ADFP_{TX}) que se basa en el ajuste dinámico de la frecuencia y potencia de transmisión, para elevar el conocimiento del entorno vehicular. La frecuencia de transmisión se ajusta según la velocidad y aceleración del vehículo para que los autos circundantes perciban un error de posición límite definido, mientras que la potencia de transmisión se adapta en función de la carga relativa del canal de comunicaciones y la frecuencia de transmisión, para disminuir el número de colisiones y la razón de pérdida de paquetes. Los resultados de los experimentos muestran que en los distintos escenarios, AdB-ADFP_{TX} provee un mayor nivel de conocimiento cooperativo que los algoritmos de *Beaconing* Fijos.

Palabras Clave: VANETs, *beaconing*, conocimiento cooperativo, seguridad vial, gestión del tráfico, error de posición, número de colisiones.

PRÓLOGO

Este trabajo fue desarrollado en el Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas, como parte de la culminación de estudios de la Maestría en Telemática.

AGRADECIMIENTOS

A mi tutor Samuel Montejo, por su ayuda incondicional, el tiempo dedicado, los valiosos consejos y la extraordinaria asesoría. Muchas gracias.

A mi cotutora Anelise y consultante Richard, por formar parte de la investigación y orientarme desde la distancia.

A los profesores de la maestría en Telemática, por las clases impartidas durante esta etapa.

DEDICATORIA

A mis padres por el apoyo que siempre me han brindado en mi formación personal y profesional.

A mi esposa Vanessa, por ser una motivación constante en mi vida y fiel seguidora de mis sueños.

EXORDIO

“Todo cambio es posible... Ningún desafío se hace fuera del alcance de la creatividad humana”.

Albert Einstein

ÍNDICE

RESUMEN.....	i
PRÓLOGO.....	ii
ÍNDICE.....	iii
Lista de Figuras.....	v
Lista de Tablas.....	vi
Lista de Acrónimos.....	vii
INTRODUCCIÓN.....	1
1. Redes Ad-hoc Vehiculares (VANETs).....	6
1.1 Definición.....	6
1.2 Características.....	8
1.3 Aplicaciones.....	9
1.3.1 Seguridad vial.....	12
1.3.2 Gestión de tráfico.....	13
1.3.3 Valor añadido.....	13
1.4 Beaconing.....	14
1.4.1 Error de posición.....	15
1.4.2 Carga en el canal.....	18
1.4.3 Terminal oculto.....	19
1.4.4 Métricas de desempeño.....	24
1.5 Tecnologías.....	25
1.5.1 Corto alcance.....	25
1.5.2 Ad-hoc.....	26
1.5.3 Celular.....	26
1.5.4 Difusión digital.....	27
1.6 Arquitecturas.....	28
1.6.1 WAVE.....	28
1.6.2 CALM.....	30
1.6.3 C2CNet/IPv6 GeoNetworking.....	31

1.7	Conclusiones parciales	33
2.	Algoritmo distribuido de beaconing para VANETs.....	34
2.1	Motivación	34
2.2	Modelo analítico.....	36
2.2.1	Frecuencia de transmisión (F_{Tx})	37
2.2.2	Carga relativa del canal (C_{RC})	40
2.2.3	Potencia de transmisión (P_{Tx}).....	46
2.3	AdB-ADFP _{Tx}	50
2.3.1	Fase 1 - Ajuste dinámico de la frecuencia de transmisión (ADF _{Tx}).....	52
2.3.2	Fase 2 - Ajuste dinámico de la potencia de transmisión (ADP _{Tx}).....	54
2.4	Conclusiones parciales	56
3.	Evaluación del algoritmo en entornos VANETs.....	57
3.1	Herramientas	57
3.2	Parámetros de simulación.....	58
3.3	Experimentos.....	59
3.3.1	Escenario 1 – “Ajuste dinámico de la frecuencia de transmisión”.....	59
3.3.2	Escenario 2 – “Ajuste dinámico de la potencia de transmisión”	64
3.3.3	Escenario 3 – “Ajuste dinámico de la frecuencia y potencia de transmisión”	69
3.4	Conclusiones parciales	75
	CONCLUSIONES	76
	RECOMENDACIONES	78
	BIBLIOGRAFÍA.....	79
	ANEXOS.....	86

Lista de Figuras

Figura 1.1: Entidades ITS a) Representación de VANET con entidades C2C-CC, b) Prototipo de OBU IEEE 1609/802.11p, c) Prototipo de RSU, d) Prototipos de AUs.....	7
Figura 1.2: Seguridad vial - Casos de uso a) Aviso de obras en la vía, b) Notificación de lugar peligroso.....	12
Figura 1.3: Gestión de tráfico - Casos de uso a) Pago electrónico de peaje mediante etiqueta de radiofrecuencia única, b) Platooning.....	13
Figura 1.4: Beaconing - El vehículo fuente (F) realiza la difusión periódica de beacons para actualizar datos como la posición (P), velocidad (v), aceleración (a_c) y dirección (D).....	14
Figura 1.5: Parámetros de tiempo que influyen en el error de posición [30].....	15
Figura 1.6: Error de posición promedio en metros según la velocidad y frecuencia de transmisión de beacon para una $D_{TxRx} = 0.001$ s.....	16
Figura 1.7: Error de posición promedio en metros según la velocidad y aceleración para una frecuencia de transmisión de beacon igual a 1 Hz y $D_{TxRx} = 0.001$ s.....	17
Figura 1.8: Carga total de beaconing en función de la frecuencia de transmisión de beacon y el número de vehículos en el rango de comunicación.....	19
Figura 1.9: Representación del rango de comunicación (RC), detección (RD) e interferencia (RI) del vehículo transmisor (Tx).....	20
Figura 1.10: Mecanismo de acceso priorizado al canal (EDCA) incluido en IEEE 802.11p.....	21
Figura 1.11: Problema del terminal oculto en escenario CSMA/CA– Constelación de tres estaciones: transmisor (T), receptor (R) y terminal oculto (H).....	22
Figura 1.12: Probabilidad de colisión debido a la expiración simultánea de los contadores de backoff, según el número de vehículos y la ventana de contención mínima (CW_{min}).....	23
Figura 1.13: Conformación del espectro designado para los ITS en Estados Unidos.....	29
Figura 1.14: Arquitectura de red WAVE – Relación entre los protocolos IEEE 1609 y 802.11p.....	29
Figura 1.15: Intervalos de sincronismo, guarda, CCH y SCH utilizados en la operación multicanal del protocolo IEEE 1609.4.....	30
Figura 1.16: Conjunto de protocolos de la arquitectura de red CALM [63].....	31
Figura 1.17: Conjunto de protocolos de la arquitectura C2CNet [33].....	32
Figura 1.18: Conjunto de protocolos en una OBU GeoNet [66].....	32
Figura 2.1: Ejemplos de entornos vehiculares a) Autopista: densidad de nodos alta - velocidad baja, b) Autopista: densidad de nodos media - velocidad media, c) Congestionamiento, d) Urbano.....	34
Figura 2.2: Topología del modelo considerando a la carretera como una línea recta de longitud igual a 1 Km.....	37
Figura 2.3: Parámetros que influyen en el error de posición promedio asumiendo que durante el intervalo de beacon el vehículo se desplaza con aceleración constante.....	38

Figura 2.4: Frecuencia de transmisión para generar un error de posición promedio de 1 m según la velocidad y aceleración del vehículo, calculada según (2.4) y con una $D_{TxRx} = 0.001$ s.....	39
Figura 2.5: Probabilidad de recepción exitosa de paquetes en función del rango de comunicación (RC) y la distancia del transmisor (Tx) al receptor (Rx).....	41
Figura 2.6: Demora de transmisión en función del tamaño de beacon computada a través de la ecuación 2.12 para un $D_H = 40$ μ s y $R = 6$ Mbits/s.	42
Figura 2.7: División del intervalo de beacon en slots de transmisión [80].....	42
Figura 2.8: Número de ranuras (# slots) en función del tamaño e intervalo de beacon calculado según (2.13) para un $D_H = 40$ μ s y $R = 6$ Mbits/s.	43
Figura 2.9: Problema del terminal oculto - Representación del peor caso [80].....	44
Figura 2.10: Probabilidad de que para un slot dado un nodo intente (P_a) y no intente ($1 - P_a$) una transmisión, en función del número de slots.....	44
Figura 2.11: Probabilidad de transmisión exitosa calculada según (2.18) para un tamaño de beacon de 500 bytes, $D_H = 40$ μ s y $R = 6$ Mbits/s.	46
Figura 2.12: Distancia de frenado en función de la velocidad del vehículo calculada según (2.25) para una desaceleración de -6 m/s^2 y $\phi = 0^\circ$	48
Figura 2.13: Distancia de seguridad del nodo n_i en función de la distancia de detención de n_i y n_k	49
Figura 2.14: Potencia de transmisión en función de la carga relativa del canal normalizada y la frecuencia de transmisión del nodo, calculada según (2.28), para una potencia de transmisión mínima de 5 mW y una variación de potencia de 90 mW.	50
Figura 2.15: AdB-ADFP _{Tx} – Algoritmo distribuido de beaconing para VANETs.....	51
Figura 2.16: Cálculo de la frecuencia de transmisión de n_i para que los autos circundantes n_k perciban un error de posición promedio límite - Representación en diagrama de flujo.....	53
Figura 2.17: Cálculo de la potencia de transmisión de n_i - Representación en diagrama de flujo.....	54
Figura 2.18: Cálculo de la potencia de transmisión mínima - Representación en diagrama de flujo.	55
Figura 3.1: Escenario 1- Porción de mapa real de la ciudad de Montreal visto desde: a) OpenStreetMap, b) SUMO.	60
Figura 3.2: Velocidad y aceleración desarrollada por los Nodos 0 y 1 durante el tiempo que se desplazan por el escenario.....	61
Figura 3.3: Error de posición promedio y máximo que el Nodo 0 percibe del Nodo 1 durante el tiempo de comunicación.....	62
Figura 3.4: Frecuencia de transmisión establecida por el Nodo 1 en su desplazamiento por la vía.	63
Figura 3.5: Carga de beaconing generada por el Nodo 1 en su desplazamiento por la vía.....	63
Figura 3.6: Escenario 2 - Porción de mapa real de la ciudad de Chicago visto desde: a) OpenStreetMap, b) SUMO.	65
Figura 3.7: Carga relativa del canal normalizada en función del algoritmo de beaconing y la densidad de tráfico vehicular.....	66

Figura 3.8: Rango de comunicación de los vehículos según el tipo de algoritmo de beaconing y la frecuencia de transmisión.....	66
Figura 3.9: Número de colisiones promedio en función del algoritmo de beaconing y la densidad de tráfico vehicular.....	67
Figura 3.10: Escenario 2 - Razón de entrega de paquetes en función del algoritmo de beaconing y la densidad de tráfico vehicular.....	68
Figura 3.11: Escenario 3 - Porción de mapa real de la ciudad de Chicago visto desde: a) OpenStreetMap, b) SUMO.....	69
Figura 3.12: Frecuencia de transmisión establecida por uno de los vehículos del escenario (Nodo 1) según el algoritmo de beaconing.....	70
Figura 3.13: Potencia de transmisión establecida por uno de los vehículos del escenario (Nodo 1) según el algoritmo de beaconing.....	71
Figura 3.14: Escenario 3 - Razón de entrega de paquetes en función del algoritmo de beaconing y la densidad de tráfico vehicular.....	72
Figura 3.15: Error de posición promedio real que uno de los vehículos del escenario (Nodo 7) percibe de los autos circundantes según el algoritmo de beaconing.....	73
Figura 3.16: Tamaño de la base de datos LDM del Nodo 7 según el algoritmo de beaconing.....	74
Figura 3.17: Rango de comunicación de los vehículos en función de la densidad de nodos y el tipo de algoritmo de beaconing.....	74

Lista de Tablas

Tabla 1.1 Aplicaciones y casos de uso propuestos por ETSI [26]	11
Tabla 1.2 Variantes de transmisión definidas por IEEE 802.11 en canales de 10 MHz [45]	20
Tabla 1.3 Parámetros de contención para las categorías de acceso [21].....	21
Tabla 1.4 Métricas y su impacto en el nivel de conocimiento cooperativo	25
Tabla 1.5 Características de las tecnologías de comunicación consideradas para VANETs [58]	28
Tabla 2.1 Métodos de cálculo de la distancia de seguridad del nodo n_i	49
Tabla 2.2 Estados de movimiento del nodo n_i	52
Tabla 3.1 Parámetros usados en las simulaciones	59
Tabla 3.2 Experimento 1: Parámetros de la variante AdB-ADFP _{TX} y Beaconing Fijo	60
Tabla 3.3 Parámetros del entorno de autopista Montreal – Escenario 1	60
Tabla 3.4 Experimento 2: Parámetros de la variante AdB-ADFP _{TX} y Beaconing Fijo	64
Tabla 3.5 Parámetros del entorno urbano Chicago – Escenario 2	65
Tabla 3.6 Experimento 3: Parámetros de AdB-ADFP _{TX} , su variante y Beaconing Fijo	69
Tabla 3.7 Parámetros del entorno urbano Chicago - Escenario 3	70
Tabla 3.8 Número de colisiones promedio según el algoritmo de beaconing – Escenario 3	71

Lista de Acrónimos

AASHTO, American Association of State Highway and Transportation Officials
ACC, Adaptive Cruise Control
ACs, Access Categories
AIFS, Arbitration Interframe Space
AP, Access Point
AU, Application Unit
BSs, Base Stations
C2C-CC/GeoNet, Car 2 Car Communication Consortium/GeoNetworking
CALM, Continuous Air-interface for Long and Medium range
CAMs, Cooperative Awareness Messages
CCH, Control Channel
CSMA/CA, Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
CW, Contention Window
DAB, Digital Audio Broadcasting
DCF, Distributed Coordination Function
DENMs, Decentralized Environmental Notification Messages
DIFS, Distributed Interframe Spaces
DSRC, Dedicated Short Range Communications
DVB-H, Digital Video Broadcasting - Handheld
DVB-T, Digital Video Broadcasting – Terrestrial
EBU, European Broadcasting Union
EDCA, Enhanced Distributed Channel Access
ETSI TC on ITS, ETSI Technical Committee on ITS
ETSI, European Telecommunications Standards Institute
FCC, Federal Communications Commission
GPRS, General Packet Radio Service
GPS, Global Positioning System
GSM, Global System for Mobile Communications
HCF, Hybrid Coordination Function
HSDPA, High Speed Downlink Packet Access
I2V, Infrastructure-to-Vehicle
IEEE, Institute of Electrical and Electronics Engineers
IFS, Interframe Spaces
IPAS, Intelligent Parking Assist System
ISO TC204 WG16, International Organization for Standardization Technical Committee 204 Working Group 16
ISO, International Organization for Standardization
ITS, Intelligent Transportation Systems
LDM, Local Dynamic Map
LIDAR, Light Detection and Ranging
MAC, Medium Access Control
MANETs, Mobile Ad-hoc Networks
MM Wave, Millimeter-Wave
MOVE, MObility model generator for VEhicular networks
NEMO, NEtwork MObility
OBU, On-Board Unit
OFDM, Orthogonal Frequency – Division Multiplexing
OMNeT++, Objective Modular Network Testbed in C++
PDA, Personal Digital Assistant
PHY, Physical Layer

PLCP, Physical Layer Convergence Procedure
QoS, Quality of Service
RSU, Road-Side Unit
SCHs, Service Channels
SNIR, Signal to Noise + Interference Ratio
SUMO, Simulation of Urban MObility
TDMA, Time Division Multiple Access
U.S. DoT, United States Department of Transportation
UMTS, Universal Mobile Telecommunications System
UTC, Coordinated Universal Time
V2I, Vehicle-to-Infrastructure
V2V, Vehicle-to-Vehicle
VANETs, Vehicular Ad-hoc Networks
Veins, Vehicles in Network Simulation
VSC, Vehicle Safety Communications
WAVE, Wireless Access in Vehicular Environments
WiMAX, Worldwide Interoperability for Microwave Access
WLAN, Wireless Local Area Networks
WSMP, Wave Short Messages Protocol

INTRODUCCIÓN

El aumento de vehículos y conductores alrededor del mundo ha provocado un incremento considerable en el número de muertes humanas debido a accidentes automovilísticos. Las consecuentes investigaciones realizadas en esta área se han concentrado principalmente en la protección ante impactos inminentes con la creación y mejora de diferentes sistemas como: bolsas de aire (*airbag*), cinturones de seguridad (*security belt*) y sistemas antibloqueo de frenos (*anti-lock braking systems*). El conjunto de soluciones propuestas ha resultado ser muy eficiente en reducir las consecuencias de un accidente, lográndose en la Unión Europea¹ una disminución de muertes debido a accidentes automovilísticos cercana al 64 % entre los años 1990 (77 337 muertes) y 2012 (28 126 muertes) [1]. A pesar de los logros obtenidos, los accidentes siguen siendo una de las principales causas de muerte para las personas cada año, registrándose en la Unión Europea un total de 1 502 080 accidentes en 1990 y 1 078 370 en 2012 [1].

El problema principal de las soluciones propuestas, como señala Stanica et al. en [2], es que constituyen métodos reactivos, los cuales tratan con los efectos en vez de concentrarse en la causa: el accidente en sí. La principal solución para la prevención de accidentes a través de un enfoque proactivo consiste en ampliar el conocimiento del conductor sobre el entorno vehicular. El primer paso para lograr este objetivo consistió en la adición de un elevado número de sensores a los vehículos e infraestructuras viales. Radars, cámaras y/o LIDARs (*Light Detection and Ranging*) están cada vez más presentes en los vehículos, haciendo posible sistemas como: asistentes de estacionamiento inteligentes (*IPAS, Intelligent Parking Assist System*) [3] o control de velocidad adaptativo (*ACC, Adaptive Cruise Control*) [4]. El limitado rango de acción de estos sensores empotrados se puede ampliar equipando a los vehículos con dispositivos de comunicación inalámbrica que posibiliten el intercambio de información, extendiendo así el conocimiento del conductor sobre el entorno circundante. El concepto de la comunicación inalámbrica entre vehículos ha estado presente en la comunidad de los sistemas de transporte inteligente (*ITS, Intelligent Transportation Systems*) desde la década del 90 [5].

En el año 1999, la Comisión Federal de Comunicaciones (*FCC, Federal Communications Commission*) de los Estados Unidos designó 75 MHz del espectro en la banda de 5.9 GHz, para las comunicaciones dedicadas de corto alcance (*DSRC, Dedicated Short Range Communications*), con el objetivo de proveer soporte a los ITS [6]. En el año 2008, el Instituto

¹ Actualmente la Unión Europea está formada por 28 países (EU-28), entre los que están: Luxemburgo, Bélgica, Alemania, Francia, Italia y Países Bajos, cuyas membresías se remontan a 1958 y Croacia incorporado en 2013.

de Estándares de Telecomunicaciones Europeo (*ETSI, European Telecommunications Standards Institute*) reservó 30 MHz del espectro en la banda de 5.9 GHz con el mismo propósito [7]. La disponibilidad de los receptores de sistema de posicionamiento global (*GPS, Global Positioning System*) y los transceptores de redes de área local inalámbricas (*WLAN, Wireless Local Area Networks*) revitalizó la investigación en las comunicaciones vehiculares, estableciéndose a partir del año 2004 los grupos de trabajo IEEE 802.11p e IEEE 1609 con el propósito de especificar un conjunto de protocolos para el acceso inalámbrico en entornos vehiculares (*WAVE, Wireless Access in Vehicular Environments*) [8]. Una serie de proyectos y consorcios fueron creados en Europa, Estados Unidos y Japón con el objetivo de investigar en este campo [9]-[11]. Actualmente entidades como: el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (*IEEE, Institute of Electrical and Electronics Engineers*), la Organización Internacional para la Estandarización (*ISO, International Organization for Standardization*), y el Consorcio para la Comunicación Vehículo-Vehículo así como su proyecto derivado GeoNet (*C2C-CC/GeoNet, Car 2 Car Communication Consortium/GeoNetworking*), han propuesto distintos protocolos de comunicación y soluciones de arquitectura de red [12] tanto para las comunicaciones vehículo-vehículo (*V2V, Vehicle-to-Vehicle*) como para las vehículo-infraestructura (*V2I, Vehicle-to-Infrastructure*) e infraestructura-vehículo (*I2V, Infrastructure-to-Vehicle*).

En las redes *ad-hoc* vehiculares (*VANETs, Vehicular Ad-hoc Networks*) la información que se intercambia entre los distintos nodos de la red puede repercutir en la habilidad del sistema para preservar vidas humanas. Esto hace que cualquier solución tecnológica deba ser probada exhaustivamente antes de su integración en un sistema real. Las pruebas de campo requieren la aplicación de la solución en hardware real, infraestructuras viales dedicadas y vehículos equipados. Los altos costos que esto implica hacen que la simulación sea la elección más factible para la evaluación de protocolos de comunicación y aplicaciones. Actualmente, esta alternativa constituye un primer paso ampliamente adoptado en el desarrollo de tecnologías aplicables a entornos reales, ante la limitada capacidad de los escenarios de prueba a gran escala implementados [13]-[15] para validar las propuestas formuladas por la comunidad científica.

Los entornos vehiculares son altamente complejos y los modelos analíticos necesitan tener en cuenta no sólo la red, sino también las propiedades de los vehículos y el comportamiento de los conductores. Un aspecto crítico en un estudio de simulación de VANETs es la necesidad de un modelo de movilidad que refleje el comportamiento real del tráfico de los vehículos [16]. A su vez, los modelos de movilidad deben ser dinámicamente reconfigurables con el objetivo de mostrar el efecto de la información intercambiada por los protocolos de comunicación sobre el tráfico vehicular. Hoy en día, se encuentran disponibles una gran variedad de modelos que han evolucionado en aplicabilidad para ajustarse cada vez más a las situaciones reales, los mismos han sido implementados en simuladores cada vez más complejos que integran incluso la realimentación intrínseca entre la movilidad vehicular y la comunicación inalámbrica.

Las aplicaciones orientadas a la seguridad vial constituyen las más importantes y críticas en el ámbito de las VANETs, debido a que tienen como objetivo disminuir los accidentes de tráfico. La habilitación de las aplicaciones de seguridad vial depende de dos tipos de mensajes: 1) conducidos por eventos y 2) periódicos. Los mensajes conducidos por eventos, también conocidos como mensajes descentralizados de notificación de entorno (*DENMs, Decentralized Environmental Notification Messages*) [17], son aquellos que se generan y diseminan cuando se detecta y/o produce algún tipo de situación excepcional o peligrosa, como puede ser un accidente, explosión de una bolsa de aire, proximidad de vehículo que se desplaza en sentido contrario, obras en la vía, frenado brusco y/o situación anómala de la carretera. Los mensajes periódicos son difundidos con cierta frecuencia por cada vehículo de la red para proveer información de estado (posición, velocidad, aceleración, dirección, etc.) a los vehículos que están dentro de su rango de comunicación (*single-hop*). Estos se conocen como mensajes de conocimiento cooperativo (*CAMs, Cooperative Awareness Messages*) o “*beacons*” [18] y son esenciales para la habilitación de las aplicaciones de conocimiento cooperativo (*Cooperative Awareness Applications*). El mecanismo de la difusión periódica de *beacons* se conoce en la comunidad científica de las VANETs como “*beaconing*”, y es fundamental para que las aplicaciones de conocimiento cooperativo adquieran información precisa sobre el entorno circundante, permitiéndoles detectar situaciones potencialmente peligrosas para los tripulantes del vehículo antes de que ocurran, así como gestionar o coordinar el tráfico en determinados puntos de una carretera.

El espectro de frecuencias propuesto para los ITS tanto en Europa como Estados Unidos se divide en un canal de control (*CCH, Control Channel*) y varios canales de servicios (*SCHs, Service Channels*) [19]-[20]. En ambos casos, el canal de control está reservado para el intercambio periódico de *beacons* y el tráfico de los mensajes conducidos por eventos. Por tanto, los nodos de la red necesitan monitorear el canal de control con cierta frecuencia para recibir la información de estado de los nodos circundantes y los datos correspondientes a las distintas aplicaciones de seguridad vial. La frecuencia de transmisión de *beacons* influye directamente en la carga del canal de comunicaciones y en la exactitud de posición percibida por los nodos vecinos. Mientras mayor es la frecuencia de transmisión de *beacons*, menor es el error de posición en la red porque se reduce el error que existe entre la posición real de un vehículo y la última posición recibida, pero se incrementa la carga en el canal de radio. Disminuir la frecuencia de transmisión de *beacons* directamente reduce la calidad de la información de posición del sistema. Como resultado, la inexactitud de posición puede provocar el incorrecto funcionamiento de las aplicaciones de seguridad vial que dependen del intercambio periódico de *beacons*.

IEEE 802.11p [21] es el estándar definido para el control de acceso al medio (*MAC, Medium Access Control*) y la capa física (*PHY, Physical Layer*) en el conjunto de protocolos WAVE. IEEE 802.11p es una alternativa a los estándares 802.11 actuales, estando su desarrollo dirigido a proveer comunicaciones robustas y de baja latencia en escenarios vehiculares de alta movilidad y elevado dinamismo en la topología de red. La capa MAC de IEEE 802.11p usa

acceso múltiple con detección de portadora y evasión de colisión (*CSMA/CA, Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*) para proveer acceso justo al canal y disminuir las colisiones. El desempeño de la capa MAC de IEEE 802.11p ha sido investigado extensamente en la literatura, tanto de forma analítica como a través de simulaciones. Los estudios basados en simulación muestran que, un aumento en la densidad de vehículos y/o carga de *beaconing*, eleva la probabilidad de colisión y disminuye la razón de entrega de paquetes [22]-[23]. La principal causa para esto es el problema del terminal oculto (*hidden terminal problem*), el cual tiene un gran impacto en escenarios donde no se desarrolla ningún proceso de reservación del canal de comunicaciones. En consecuencia, los *beacons* no serán decodificados correctamente implicando un incremento en el error de posición percibido por los vehículos circundantes, lo que impacta negativamente en el desempeño de las aplicaciones de conocimiento cooperativo.

La potencia de transmisión influye en la cantidad de vehículos circundantes que reciben los *beacons* y en los que sufren interferencia. El uso de una mayor potencia de transmisión eleva la probabilidad de recepción de una sola transmisión, pero al mismo tiempo incrementa la probabilidad de colisión para todas las transmisiones [24], lo que aumenta el error de posición. Los requerimientos preliminares para las aplicaciones de conocimiento cooperativo han sido definidos por el consorcio Comunicaciones para la Seguridad del Vehículo (*VSC, Vehicle Safety Communications*) [25] y ETSI [26], en función de parámetros como: frecuencia de transmisión mínima, latencia y rango de comunicación. Estudios recientes [27]- [29] evalúan el nivel de conocimiento cooperativo en función de métricas como: razón de conocimiento de vecinos (*Neighborhood Awareness Ratio*) y razón de interferencia de vecinos (*Neighborhood Interference Ratio*) o razón de vecinos fuera del rango (*Ratio of Neighbors above Range*). Estas métricas cuantifican el nivel de conocimiento cooperativo en función de la potencia de transmisión de los vehículos, sin tener en cuenta la exactitud de posición. No obstante, en [30] se observa que un incremento en la velocidad de los vehículos conduce a un mayor error de posición, sobre todo para bajas frecuencias de transmisión, mientras que un incremento en el tamaño de *beacon* y frecuencia de transmisión, conduce a un mayor consumo de ancho de banda para una menor cantidad de vehículos en el rango de comunicación. Aunque los *beacons* se generan según un grupo de reglas [18], todavía no se han definido claramente los requerimientos de las aplicaciones de conocimiento cooperativo en cuanto a exactitud de posición. Si se tiene en cuenta que, los *beacons* recibidos son utilizados para dar soporte a distintas aplicaciones, como por ejemplo, detectar riesgos de accidente comparando el estado del vehículo transmisor y receptor, la información de posición de los vehículos circundantes debe ser lo más precisa y actualizada posible. Bajo esta premisa, el error de posición resulta clave para medir el nivel de conocimiento cooperativo, siempre que el vehículo utilice una potencia de transmisión mínima que le permita a los autos vecinos recibir *beacons* cuando estén a cierta distancia. En este contexto, es clave que los vehículos ajusten la frecuencia de transmisión de *beacon* para que los autos circundantes perciban un error de posición que posibilite evitar accidentes, mientras establecen un valor de potencia de transmisión que

disminuya el número de colisiones y la razón de pérdida de paquetes. Por tanto, se plantea el problema científico siguiente:

¿Cómo proveer el nivel de conocimiento cooperativo que requieren las aplicaciones de seguridad vial para un desempeño efectivo?

El objetivo general del trabajo es:

Desarrollar un algoritmo distribuido de *beaconing* basado en el ajuste dinámico de los parámetros de transmisión, que contribuya al desempeño efectivo de las aplicaciones de seguridad vial.

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

- ❖ Determinar las métricas que definen el nivel de conocimiento cooperativo provisto por el *beaconing* en redes vehiculares.
- ❖ Proponer un mecanismo de ajuste dinámico de los parámetros de transmisión de *beacons*.
- ❖ Diseñar un algoritmo que implemente las soluciones propuestas para el ajuste dinámico de los parámetros de transmisión.
- ❖ Seleccionar las herramientas de simulación que más se ajusten a escenarios vehiculares reales, teniendo en cuenta la generación de movilidad vehicular y la comunicación inalámbrica.
- ❖ Evaluar a través de simulación el desempeño del algoritmo, con la consecuente discusión y análisis de los resultados obtenidos.

El trabajo presenta esta estructura: introducción, capitulares, conclusiones, recomendaciones, bibliografía y anexos. En el capítulo 1, se abordan aspectos generales de las redes *ad-hoc* vehiculares, incluyendo la relación que existe entre la frecuencia de transmisión de *beacons*, carga de *beaconing* y error de posición promedio. En el capítulo 2, se presenta un algoritmo distribuido de *beaconing* que ajusta dinámicamente la frecuencia y potencia de transmisión para proporcionar un mayor nivel de conocimiento del entorno vehicular. En el capítulo 3, se estudia mediante simulación el desempeño del algoritmo en distintos escenarios VANET, con la consecuente discusión y análisis de los resultados obtenidos. Finalmente en las conclusiones son enunciados aquellos elementos de mayor interés y generalización, obtenidos a partir de los objetivos, mientras que las recomendaciones refieren los tópicos que aún quedan abiertos a líneas futuras de investigación.

1. Redes Ad-hoc Vehiculares (VANETs)

1.1 Definición

Las VANETs constituyen un caso particular de las redes *ad-hoc* móviles (*MANETs*, *Mobile Ad-hoc Networks*) orientadas a entornos vehiculares. Una VANET está compuesta por un conjunto de vehículos que se comunican entre sí mediante dispositivos de comunicación inalámbrica, con ayuda de un sistema de navegación y sin la necesidad de una infraestructura de red fija [31]. Los vehículos, pueden conformar la red detenidos o mientras se desplazan a diferentes velocidades por zonas urbanas, autopistas o carreteras rurales, intercambiando información entre ellos (V2V) o con dispositivos fijos próximos a las vías que formen parte de la red y que proveerán una conexión hacia o desde redes basadas en infraestructura (V2I e I2V), lo cual puede incluir conexión con Internet. El objetivo principal de una VANET es proveer seguridad vial y gestión del tráfico, aunque también puede usarse para otros fines de valor añadido.

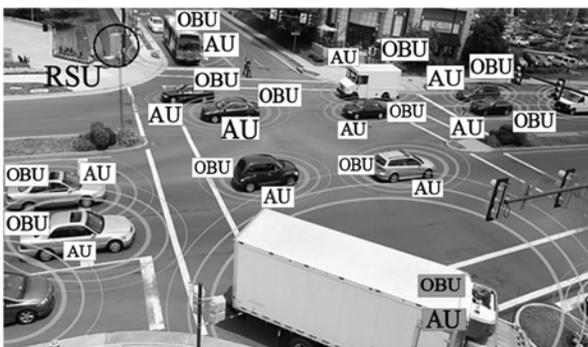
En 2008, el proyecto COMeSafety [32] publicó un reporte técnico que describe los elementos básicos de la arquitectura de comunicación europea para la implementación de los sistemas vehiculares cooperativos. Esta arquitectura incluye: entidades de red, tecnologías de acceso y protocolos de comunicación a nivel de red y transporte. La Figura 1.1 muestra las entidades principales usadas en la arquitectura COMeSafety, especificadas inicialmente por el C2C-CC en [33].

Unidad de aplicación (AU, Application Unit): es una entidad situada dentro del vehículo que permite ejecutar múltiples aplicaciones las cuales pueden usar la capacidad de comunicación de la OBU. Ejemplos de AUs son: a) un dispositivo dedicado para aplicaciones de seguridad vial como avisos de peligro, b) un sistema de navegación con capacidad de comunicación, c) un dispositivo móvil como puede ser un asistente personal digital (*PDA, Personal Digital Assistant*) que ejecute aplicaciones de Internet. Una AU se puede encontrar empotrada en el vehículo conectada de forma permanente a una OBU. Esto posibilita que un conjunto mínimo de aplicaciones siempre se estén ejecutando en el vehículo. Otros tipos de unidades de aplicación, como por ejemplo el Smartphone, Tablet o PDA de un pasajero, pueden conectarse de forma dinámica a la red interna del vehículo. Múltiples AUs pueden estar conectadas simultáneamente a una OBU, compartiendo el procesamiento y los recursos inalámbricos de la misma.

Unidad a bordo (OBU, On-Board Unit): es un dispositivo que permite la comunicación V2V, V2I e I2V. La misma proporciona servicios de comunicación a las AUs y son capaces de reencaminar datos provenientes de otras OBUs, que están en el dominio *ad-hoc*. Una OBU está equipada con un dispositivo de red para la comunicación inalámbrica de corto alcance

basada en la tecnología de radio IEEE 802.11p. Este dispositivo de red se utiliza para enviar, recibir y reencaminar datos pertenecientes a las aplicaciones de seguridad vial. La OBU también se puede equipar con otras interfaces de red basadas en otras tecnologías de radio como: IEEE 802.11a/b/g/n y redes celulares (GSM, GPRS, UMTS, HSDPA, WiMAX, 4G), en particular para aplicaciones no relacionadas a la seguridad vial. El funcionamiento de una OBU debe proveer comunicación inalámbrica, control de la congestión de red, seguridad de datos, transferencia confiable de mensajes, encaminamiento *ad-hoc* geográfico y soporte para movilidad IP.

Unidad al borde de la vía (RSU, Road-Side Unit): es un dispositivo ubicado en posiciones fijas a lo largo de carreteras y autopistas, y/o en puntos importantes como aparcamientos, hoteles, gasolineras y restaurantes. La RSU está equipada con un dispositivo de red para la comunicación inalámbrica de corto alcance basada en la tecnología de radio IEEE 802.11p. Además, puede estar equipada con otros dispositivos de red inalámbricos para permitir la comunicación con una red basada en infraestructura. Las funciones principales de una RSU son: a) proveer aplicaciones de seguridad vial que usan la comunicación I2V, b) proveer a las OBUs conectividad a Internet así como enlace con las redes basadas en infraestructura, c) extender el rango de comunicación de la red *ad-hoc* mediante la redistribución de información hacia las OBUs, y d) cooperar con otras RSUs en la distribución de información asociada a la seguridad vial.



a)



b)



c)



d)

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

1.2 Características

Aunque las VANETs comparten similitudes con las MANETs, existen características que las identifican como un caso particular. A continuación se describen las más relevantes [34]:

Patrones de movimiento de los nodos: el desplazamiento de los vehículos está limitado por la topología de la carretera. Los vehículos no se mueven de forma arbitraria, sino que utilizan caminos predefinidos comúnmente en dos direcciones. Los cambios impredecibles en las direcciones de los vehículos ocurren en las intersecciones de las carreteras. Existen tres tipos principales de vías que influyen directamente en el grado de previsibilidad de los movimientos de los vehículos:

- a) Autopistas: están formadas por una carretera de varios carriles, que cuenta con segmentos muy grandes y salidas bien definidas. Los movimientos de los vehículos son prácticamente unidimensionales y los carriles, por lo general, se orientan hacia otra ciudad.
- b) Carreteras rurales: suelen tener segmentos más grandes, siendo las intersecciones menos frecuentes que en las ciudades. La intensidad de tráfico en ocasiones no permite formar una red, ya que los vehículos pueden ser muy pocos en un trayecto de la vía. La dirección de los vehículos en las carreteras rurales cambia con más frecuencia que en las autopistas.
- c) Carreteras internas de la ciudad: en el interior de las ciudades, la densidad de vías es relativamente alta. Existen numerosas carreteras pequeñas y otras de mayor tamaño conocidas como vías principales, las cuales son frecuentemente interrumpidas por intersecciones conformando segmentos de menor longitud. Las edificaciones que se encuentran al lado de las carreteras, impactan de forma negativa en la comunicación inalámbrica.

Densidad y heterogeneidad de nodos: el número de vehículos presentes en una zona en cierto intervalo de tiempo puede variar considerablemente. En una situación de atasco de tráfico, la red vehicular se puede clasificar como muy densa mientras que en un entorno suburbano la densidad de nodos podría ser escasa. En una VANET, los nodos se pueden agrupar en distintas clases y tipos. Una distinción básica se puede hacer entre los vehículos y las unidades de infraestructura. Los vehículos pueden clasificarse como: vehículos de emergencia, vehículos de autoridad, vehículos de mantenimiento y construcción de vías, vehículos de transporte público o vehículos particulares. Es posible, que determinadas aplicaciones solo requieran ser instaladas en ciertos vehículos, por ejemplo, en un vehículo de emergencia es fundamental emitir avisos sobre su acercamiento. Lo mismo ocurre para las unidades de infraestructura, según sus capacidades, pueden solo difundir información o tener una completa funcionalidad *ad-hoc* que les permita reencaminar datos.

Alta movilidad y cambios frecuentes en la topología de red: los vehículos pueden desplazarse con una alta velocidad a lo largo de carreteras y autopistas. En ciertas situaciones, el intervalo de tiempo útil para el intercambio de datos entre vehículos es muy pequeño. Los nodos intermedios que permiten una comunicación inalámbrica multisalto se pueden mover rápidamente propiciando que el enlace establecido entre dos vehículos se interrumpa con frecuencia. Aún, cuando en las VANETs los vehículos suelen seguir ciertos patrones de movimiento, lo común es que la alta movilidad de los nodos conduzca a cambios frecuentes en la topología de red.

Capacidad variable de los enlaces de comunicación: la topología altamente dinámica de las VANETs provoca desconexiones frecuentes de los enlaces de comunicación que se establecen entre los vehículos. Esto ocurre con mayor frecuencia en escenarios con una alta velocidad y baja densidad de nodos. En una comunicación multisalto, los datos para llegar a su destino deben atravesar varios enlaces inalámbricos. La capacidad variable de estos enlaces impacta de manera significativa en la calidad de la comunicación.

Altos requerimientos de las aplicaciones de seguridad vial: las aplicaciones vehiculares más importantes tienen como objetivo contribuir a la seguridad vial evitando accidentes de tráfico. Estas tienen altos requerimientos en cuanto a confiabilidad, demora, etc. Demoras de extremo a extremo en el orden de unidades de segundos pueden ocasionar que la información de seguridad vial sea ineficaz en ciertas situaciones. La pérdida de mensajes, debido a colisiones o fluctuaciones de los enlaces de comunicación, puede repercutir en la habilidad del sistema vehicular para preservar vidas humanas.

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

Privacidad: La comunicación entre los vehículos puede revelar información acerca del conductor/usuario, tales como identificador, posición y los patrones de movimiento. A pesar de la necesidad de autenticación de mensajes y el no repudio de los mensajes de seguridad, la privacidad de los usuarios y los conductores se deben respetar, en particular la privacidad de localización y el anonimato.

1.3 Aplicaciones

En una VANET, las comunicaciones V2V, V2I e I2V permiten el despliegue de un grupo de aplicaciones dirigidas tanto al conductor como al resto de las personas que están dentro del vehículo. Estas aplicaciones tienen como objetivo principal ayudar en temas tan críticos como

la seguridad vial y la gestión del tráfico. Las aplicaciones vehiculares pueden contribuir considerablemente a la reducción de los accidentes de tráfico. Según [35], el 60 % de los accidentes se podrían evitar si los conductores contaran con un aviso segundos antes del momento de la colisión. Existen tres escenarios donde las aplicaciones de seguridad vial pueden ser muy útiles:

Vías de alta velocidad: los vehículos se mueven a altas velocidades en autopistas o carreteras principales. Esto proporciona a los conductores muy poco tiempo para reaccionar ante una situación peligrosa. Una aplicación de seguridad vial puede proveer a los conductores avisos tempranos que eviten accidentes [36]. Por otro lado, si ocurre un accidente, los vehículos cercanos a menudo colisionan antes de que puedan detenerse. Las aplicaciones de seguridad vial, también pueden diseminar información relacionada a un accidente impidiendo así que se efectúe un choque en cadena [37].

Intersecciones: conducir cerca y a través de las intersecciones es uno de los desafíos más complejos que los conductores afrontan porque dos o más flujos de tráfico se interceptan y la posibilidad de colisión es alta. En 2007, el Departamento de Transportación de los Estados Unidos (*U.S. DoT, Department of Transportation*), registró alrededor de 2.4 millones de accidentes en intersecciones, representando el 40 % de todos los accidentes reportados e implicando la muerte de 8703 personas, lo que significó el 21 % del número de fallecidos. Entre 1998 y 2007, el número mínimo y máximo de muertes en intersecciones fue de 8689 y 9362, ocurriendo como promedio 9032 muertes en intersecciones cada año [38]. Una aplicación de seguridad vial puede gestionar el tráfico en las intersecciones, mitigando riesgos de colisión y aumentando la eficiencia [39].

Congestión en carreteras: las aplicaciones de seguridad vial pueden proveer a los conductores las mejores trayectorias hacia sus destinos [40]. Esto disminuye la congestión en las carreteras y mantiene un flujo distribuido de tráfico que aumenta la capacidad de las vías y la prevención de atascos. Disminuir el tiempo perdido en atascos reduce la contaminación medioambiental causada por el funcionamiento de los vehículos, contribuye al ahorro de combustible, implica una menor destrucción del paisaje debido a la necesidad de construir más carreteras y reduce la probabilidad de accidentes.

Las aplicaciones presentan un rol fundamental en el desarrollo de los sistemas vehiculares cooperativos, requiriendo una definición detallada y comprensión. Importantes esfuerzos se están realizando para identificar, caracterizar y definir las aplicaciones y casos de uso para las VANETs. En este contexto, el Comité Técnico de ETSI sobre los ITS (*ETSI TC on ITS, ETSI Technical Committee on ITS*) ha identificado un grupo de aplicaciones y casos de uso a considerar como referencia en la estandarización y despliegue de los sistemas vehiculares [26]. Estas aplicaciones y casos de uso se han seleccionado teniendo en cuenta aspectos legales, administrativos, económicos, estratégicos, de desempeño y las necesidades de los usuarios. En la Tabla 1.1 se muestran las principales aplicaciones y casos de uso identificados por ETSI, los cuales se clasifican en tres categorías: seguridad vial, gestión de tráfico y valor

añadido. A continuación se describen algunos de los casos de usos más significativos en cada una de las categorías.

Tabla 1.1 Aplicaciones y casos de uso propuestos por ETSI [26]

Categoría	Aplicación	Caso de uso [F _{Tx} mínima, Latencia crítica, Error de posición crítico]	
Seguridad vial	Aviso de peligro en la carretera	*Aviso de frenado de emergencia [10 Hz, 100 ms, -]	
		*Aviso de condición anómala de función de seguridad [1 Hz, 100 ms, -]	
		*Aviso de vehículo en sentido contrario [10 Hz, 100 ms, -]	
Conocimiento cooperativo		*Aviso de vehículo estacionario [10 Hz, 100 ms, -]	
		*Aviso de condición de tráfico [1 Hz, - , -]	
		*Aviso de violación de señal [10 Hz, 100 ms, -]	
		*Aviso de obras en la vía [2 Hz, 100 ms, -]	
		*Diseminación de datos asociados a situación excepcional [1-10 Hz, - , -]	
		*Notificación de lugar peligroso [10 Hz, - , -]	
		*Aviso de riesgo de colisión (proveniente de RSU) [10 Hz, 100 ms, -]	
		**Aviso de vehículo de emergencia [10 Hz, 100 ms, -]	
		**Aviso de vehículo lento [2 Hz, 100 ms, -]	
		**Aviso de motocicleta [2 Hz, 100 ms, -]	
Mitigación o evasión de colisión cooperativa		**Aviso de vehículo en adelantamiento [10 Hz, 100 ms, -]	
		**Asistencia en cambio de carril [10 Hz, 100 ms, ≤ 2 m]	
		**Reducción de emisión de luz cooperativa [2 Hz, 100 ms, ≤ 20 m]	
		**Asistencia en incorporación cooperativa [10 Hz, 100 ms, ≤ 2 m]	
		**Aviso de colisión en intersección [10 Hz, 100 ms, -]	
Gestión de tráfico	Gestión de tráfico cooperativo	**Aviso de peatón en la vía [1 Hz, 100 ms, -]	
		**Aviso de precolisión [10 Hz, 50 ms, -]	
		**Aviso de riesgo de colisión en giro de cruce de tráfico [10 Hz, 100 ms, -]	
		**Aviso de riesgo de colisión en giro de fusión de tráfico [10 Hz, 100 ms, -]	
		**Aviso de colisión frontal cooperativa [10 Hz, 100 ms, ≤ 1 m]	
		Aviso de límite de velocidad contextual/regulatoria [1-10 Hz, - , -]	
Valor añadido	Entretenimiento y comodidad	Aviso de velocidad óptima en semáforos [2 Hz, 100 ms, ≤ 5 m]	
		Información de tráfico e itinerario recomendado [1-10 Hz, 500 ms, -]	
		Navegación y guía de ruta mejorada [1 Hz, 500 ms, -]	
		**Gestión de intersección [1 Hz, 500 ms, ≤ 5 m]	
		Cambio de carril flexible cooperativo [1 Hz, 500 ms, -]	
		Aviso de acceso limitado, notificación de desvío [1-10 Hz, 500 ms, -]	
		Señalización en el vehículo [1 Hz, 500 ms, -]	
	Pago electrónico de peaje [1 Hz, 200 ms, -]		
	**Control de velocidad adaptativo (ACC) [2 Hz, 100 ms, -]		
	**Formación de platoon (Platooning) [2 Hz, 100 ms, ≤ 2 m]		
	Gestión de eficiencia ecológica/económica		Notificación de punto de interés [1 Hz, 500 ms, -]
			Control de acceso automático/acceso a estacionamiento [1 Hz, 500 ms, -]
			Comercio electrónico local [1 Hz, 500 ms, -]
			Descarga de multimedia [1 Hz, 500 ms, -]
Mensajería instantánea [1 Hz, 500 ms, -]			
Sincronización de datos personales [1 Hz, 500 ms, -]			
Servicio SOS [1 Hz, 500 ms, -]			
Gestión del ciclo de vida del vehículo/servicio		Renta de vehículo asignación/reporte [1 Hz, 500 ms, -]	
		Conducción económica/ecológica [1 Hz, 500 ms, -]	
		Alerta de vehículo robado [1 Hz, 500 ms, -]	
		Diagnóstico remoto y notificación de reparación en tiempo [1 Hz, 500 ms, -]	
		Servicios financieros y de aseguramiento [1 Hz, 500 ms, -]	
Soporte de gestión de tráfico y eficiencia económica		Gestión de grupos de vehículos [1 Hz, 500 ms, -]	
		Descarga y actualización de mapas [1 Hz, 500 ms, -]	
		Gestión de relación del vehículo [1 Hz, 500 ms, -]	
		Recolección de datos del vehículo [1 Hz, 500 ms, -]	
		Suministro y actualización de software [1 Hz, 500 ms, -]	
		Gestión de zona de carga [1 Hz, 500 ms, -]	
		Calibración de datos [1 Hz, 500 ms, -]	

Su funcionamiento se basa en: * la emisión de mensajes descentralizados de notificación de entorno (DENMs), ** la difusión de mensajes de conocimiento cooperativo (CAMs).

1.3.1 Seguridad vial

Los casos de uso de esta categoría están orientados a mejorar la seguridad vial, disminuyendo el número de accidentes de tráfico y por ende el de fallecidos. Estos se pueden dividir en dos grupos: los que detectan un evento o situación peligrosa en la vía y notifican a los vehículos circundantes (DENM), y los que utilizan la difusión periódica de *beacons* (CAM) para evitar colisiones.

Aviso de obras en la vía: se coloca una RSU en las zonas de trabajo para notificar a los autos entrantes sobre el probable peligro advirtiéndoles que deben disminuir la velocidad y cambiar el carril de conducción.

Notificación de lugar peligroso: un vehículo detecta una zona peligrosa en la vía como puede ser una sección en mal estado o un derrame de líquido en el pavimento y notifica a los autos vecinos sobre la localización para evitar accidentes.

Aviso de vehículo de emergencia: un vehículo de emergencia como puede ser una ambulancia, auto de bomberos o policía informa a los autos circundantes sobre su presencia para evitar colisiones y desbloquear el paso en la vía. La presencia de un vehículo de emergencia impone la obligación a los vehículos que están en la carretera de disminuir la velocidad, estacionarse y ceder el paso.

Aviso de vehículo en adelantamiento: un vehículo en adelantamiento informa sobre su acción a los autos vecinos para evitar accidentes. Estas situaciones elevan la probabilidad de colisión y son un riesgo para la preservación de vidas humanas.

Aviso de riesgo de colisión en giro de cruce de tráfico: informa a los autos vecinos que un vehículo pretende girar a la izquierda a través de un flujo de tráfico. Una falla en la indicación de giro puede resultar en una colisión lateral, conduciendo a la pérdida de vidas humanas.

Aviso de riesgo de colisión en giro de fusión de tráfico: informa a los vehículos que pretenden girar a la derecha sobre la presencia de vehículos que se aproximan por el lado izquierdo para evitar una colisión lateral.



Figura 1.2: Seguridad vial - Casos de uso a) Aviso de obras en la vía, b) Notificación de lugar peligroso.

1.3.2 Gestión de tráfico

Los casos de uso de esta categoría tienen como objetivo principal gestionar o coordinar el tráfico en ciertos puntos de interés, así como reducir los atascos que se producen en zonas urbanas o secciones de una carretera mediante la monitorización y redistribución del tráfico por rutas menos pobladas. Mejorar el flujo de tráfico reduce la congestión, el tiempo de viaje y la cantidad de accidentes.

Aviso de límite de velocidad contextual/regulatoria: una RSU envía al conductor del vehículo el límite de velocidad legal y/o según el contexto: mala visibilidad, condiciones del tiempo, accidente, entre otros.

Pago electrónico de peaje: permite el pago de peaje utilizando sistemas automatizados que incrementan la eficiencia operacional, eliminando problemas de retenciones y ahorrando tiempo a los conductores.

Control de velocidad adaptativo cooperativo (ACC): el sistema controla la velocidad de desplazamiento del vehículo sin requerir la intervención del conductor. El propósito es que los vehículos cooperen entre sí para definir la velocidad adaptablemente. Este caso de uso solo tiene en cuenta la velocidad, el conductor tiene que encargarse de controlar la dirección del vehículo.

Formación de platoon (Platooning): permite que los vehículos viajen muy cerca unos de los otros de forma segura y eficiente manteniendo controlada la velocidad y distancia, lo que reduce el espacio ocupado por los vehículos en una autopista o carretera. Como resultado más vehículos pueden utilizar la vía sin causar congestiones de tráfico.

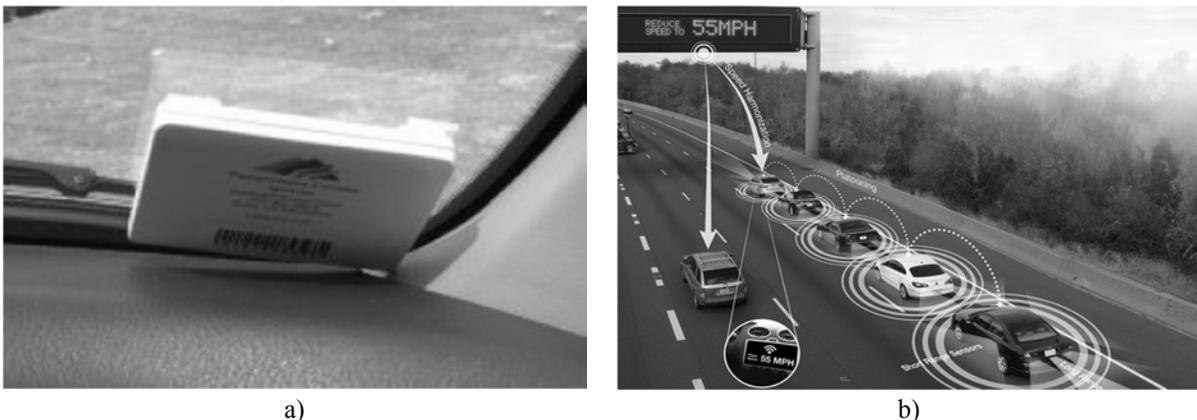


Figura 1.3: Gestión de tráfico - Casos de uso a) Pago electrónico de peaje mediante etiqueta de radiofrecuencia única, b) Platooning.

1.3.3 Valor añadido

Varios casos de uso se agrupan bajo el término de valor añadido. Aquí el centro de atención está en proveer a los ocupantes del vehículo servicios relacionados con la notificación de

puntos de interés, comercio electrónico, descarga de multimedia, servicios financieros y de aseguramiento, descarga y actualización de mapas, suministro y actualización de software, gestión de zona de carga, calibración de datos, entre otros. Estos casos de uso son menos importantes que los asociados a la seguridad vial o la gestión del tráfico, pero también aportan ventajas al sector del automóvil.

Descarga y actualización de mapas: a través de una RSU se le provee a los vehículos acceso a un servidor que puede estar o no en Internet para descargar un mapa nuevo o actualizar uno existente.

Suministro y actualización de software: una RSU con conexión a Internet proporciona a los vehículos circundantes la posibilidad de descargar o actualizar software de los centros de aprovisionamiento.

1.4 Beaconsing

El conocimiento cooperativo es la base de múltiples casos de usos correspondientes a las categorías de seguridad vial y gestión del tráfico [26]. Específicamente, casos de uso como gestión de intersección [41] y control de velocidad adaptativo (ACC) [42], se sustentan en el conocimiento del entorno vehicular. La premisa fundamental es que, conociendo el estado de los autos vecinos, los sistemas implementados en los vehículos podrán detectar situaciones potencialmente peligrosas y gestionar o coordinar el tráfico en determinados puntos de una carretera. Para habilitar el conocimiento cooperativo, cada vehículo de la red debe difundir periódicamente mensajes llamados CAMs o “*beacons*” [18], que incluyen datos como la posición, velocidad, aceleración, dirección, etc. (ver Figura 1.4). Con los datos existentes en estos mensajes, los vehículos receptores crean una base de datos del entorno circundante conocida como mapa dinámico local (*LDM, Local Dynamic Map*), la cual constituye la base del funcionamiento de diferentes casos de uso. Según [18], el intervalo de transmisión de *beacon* mínimo es 100 ms, resultando en una frecuencia de transmisión de *beacon* máxima de 10 Hz, y el intervalo de transmisión de *beacon* máximo es 1s, resultando en una frecuencia de transmisión de *beacon* mínima de 1 Hz. Dentro de estos límites, los vehículos establecen el intervalo de transmisión de *beacon* de acuerdo a un conjunto de reglas relacionadas con sus dinámicas y la carga existente en el canal de comunicaciones, obteniéndose frecuencias de transmisión de *beacons* que oscilan entre 1 y 10 Hz.

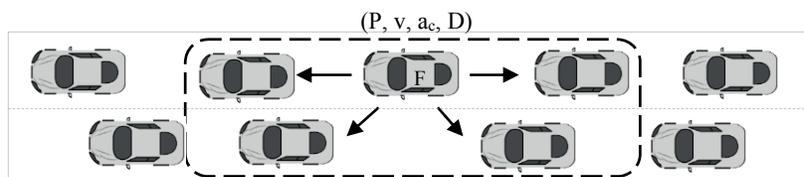


Figura 1.4: Beaconsing - El vehículo fuente (F) realiza la difusión periódica de beacons para actualizar datos como la posición (P), velocidad (v), aceleración (a_c) y dirección (D).

1.4.1 Error de posición

En las VANETs, los *beacons* necesitan ser transmitidos frecuentemente para mantener un conocimiento preciso del entorno vehicular. El correcto funcionamiento de varios casos de uso relacionados con la seguridad vial y gestión del tráfico, depende de la información registrada en la base de datos LDM que se actualiza en tiempo real. Existe una relación intrínseca entre el nivel de conocimiento cooperativo y la calidad de la información de posición. En [30], se define una métrica que cuantifica la exactitud de posición obtenida con cierta frecuencia de transmisión de *beacons*. La misma refleja tres criterios: el error mínimo, error máximo y error promedio de la última información de posición recibida en relación con la posición física actual del vehículo. Los parámetros de entrada de la métrica son: velocidad del vehículo (v), frecuencia de transmisión de *beacons* (F_{Tx}) y demora de transmisión - recepción de *beacon* (D_{TxRx}).

Error de posición mínimo ($E_{Mín}$): representa el error de posición que se produce debido al desplazamiento del vehículo durante el tiempo que dura la transmisión - recepción del *beacon*. Este es usualmente pequeño debido a que la demora de transmisión - recepción por lo general es inferior a los 0.001 s, valor que se estima asumiendo un tamaño de *beacon* máximo de 1000 bytes, una razón de datos en el canal de comunicaciones de 6 Mbit/s y despreciando la demora de propagación.

Error de posición máximo ($E_{Máx}$): constituye el error de posición que se produce cuando la posición de un vehículo se busca en la tabla de vecinos un instante de tiempo antes de recibir el próximo *beacon* de ese vehículo. 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 uniformemente distribuido en el intervalo de tiempo relativo a la recepción de los *beacons*. En la Figura 1.5 se muestran los parámetros de tiempo que influyen en el error de posición promedio. La ecuación correspondiente se puede escribir como:

$$E_{Prom} = \frac{E_{Mín} + E_{Máx}}{2} = \frac{v(D_{TxRx} + F_{Tx}^{-1})}{2} \quad (1.1)$$

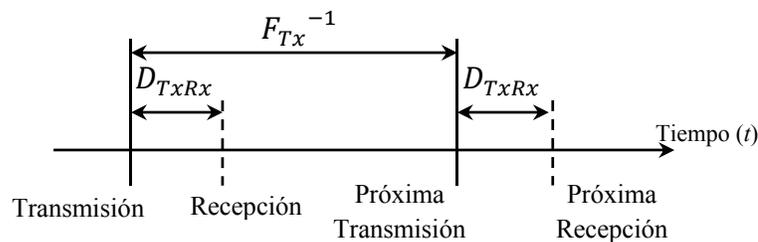


Figura 1.5: Parámetros de tiempo que influyen en el error de posición [30].

En la Figura 1.6 se visualiza la influencia de distintas velocidades y frecuencias de transmisión en el error de posición promedio, calculado mediante la ecuación 1.1. La velocidad de un vehículo generalmente varía de 0 a 250 Km/h, en dependencia de diversos factores. Por esto, en la figura se incluyen las velocidades máximas típicamente observadas en cuatro escenarios de tráfico distintos: áreas residenciales (30 Km/h \approx 8.3 m/s), áreas metropolitanas (50 Km/h \approx 13.9 m/s), carreteras rurales (100 Km/h \approx 27.8 m/s) y autopistas (200 Km/h \approx 55.6 m/s). Por simplicidad se considera que entre dos *beacons* sucesivos el vehículo se desplaza con una velocidad constante, o sea, sin aceleración o desaceleración y no incurre en cambios de dirección.

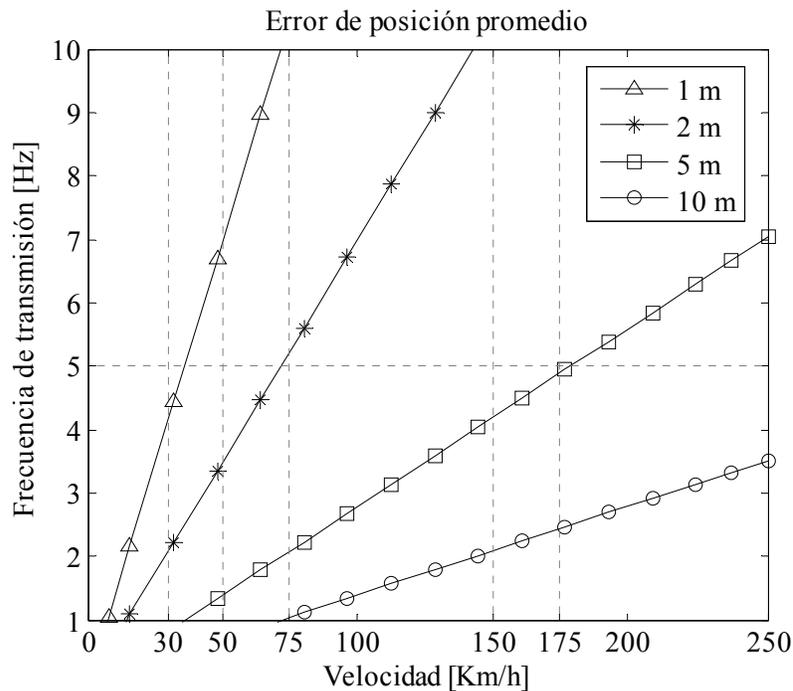


Figura 1.6: Error de posición promedio en metros según la velocidad y frecuencia de transmisión de beacon para una $D_{TxRx} = 0.001$ s.

El análisis siguiente se concentra en el error de posición promedio y máximo, debido a que el error mínimo solo depende de la demora de transmisión - recepción. Cada línea de la Figura 1.6 representa un nivel de error en particular, variando el error de posición promedio desde 1 m hasta 10 m, correspondiéndose una menor pendiente con un mayor error de posición. Con una frecuencia de 10 Hz, se mantiene una exactitud de 1 m solo hasta velocidades próximas a los 75 Km/h. El error de posición promedio excede los 10 m para velocidades mayores a los 75 Km/h cuando se utiliza una frecuencia de 1 Hz. Una exactitud de 5 m se logra con una frecuencia de 5 Hz solo para velocidades inferiores a los 175 Km/h. Con una frecuencia de transmisión de 1 Hz se obtiene un error superior a los 2 m cuando la velocidad sobrepasa los 15 Km/h, mientras que una exactitud de 5 m solo se logra hasta velocidades cercanas a los 35

Km/h. Una exactitud de 2 m solo se obtiene con una frecuencia de 10 Hz para velocidades inferiores a los 140 Km/h. El análisis del error de posición máximo es similar, pues como se observa en la ecuación 1.1 este es aproximadamente el doble del error de posición promedio. Por tanto, la línea de un error de posición promedio de 1 m representa un error máximo de 2 m, mientras que la línea de un error de posición promedio de 5 m se corresponde con un error máximo de 10 m.

La ecuación 1.2 estima el error de posición promedio considerando además el impacto de la aceleración (a_c) del vehículo. Para esto se asume que entre dos *beacons* sucesivos el vehículo se desplaza con aceleración constante. De la ecuación se deduce que para un mismo valor de aceleración, la frecuencia de transmisión de *beacon* de 10 Hz produce el menor incremento en el error de posición promedio. Por esto, en la Figura 1.7 se visualiza la influencia de diferentes valores de velocidad y aceleración en el error de posición promedio, calculado mediante la ecuación 1.2, para la frecuencia de 1 Hz que representa el caso de mayor incremento. En la figura se incluye el rango de aceleración tanto de un vehículo estándar (- 6 m/s² a 4,5 m/s²) [43], como de los vehículos de gama alta (- 6 m/s² a 12,5 m/s²) que pueden acelerar de 0 a 100 Km/h en 2.2 s [44].

$$E_{Prom} = \frac{E_{Mín} + E_{Máx}}{2} = \frac{v(D_{TxRx} + F_{Tx}^{-1})}{2} + \frac{a_c \times F_{Tx}^{-2}}{4} \quad (1.2)$$

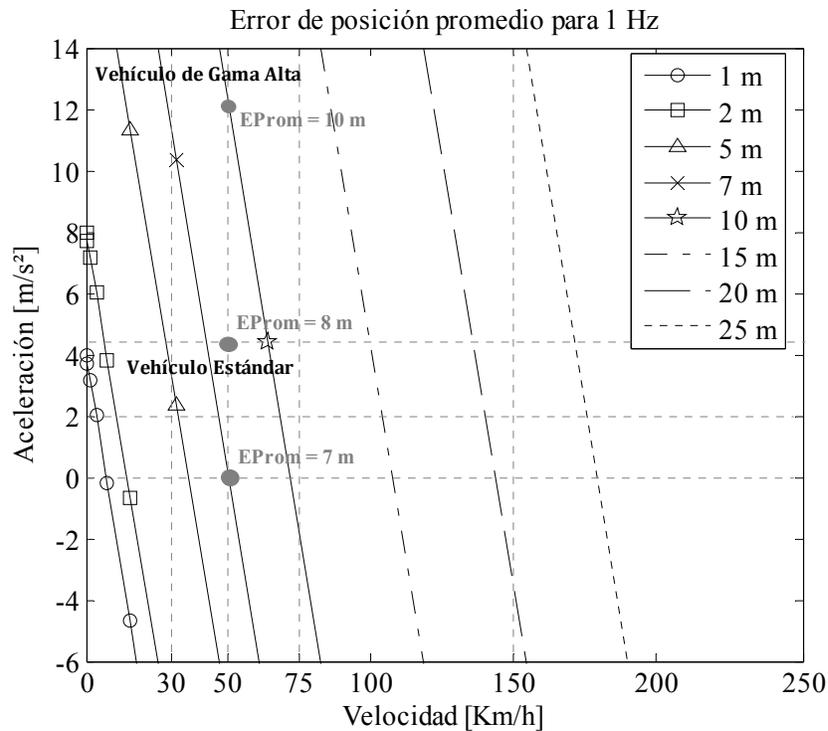


Figura 1.7: Error de posición promedio en metros según la velocidad y aceleración para una frecuencia de transmisión de beacon igual a 1 Hz y $D_{TxRx} = 0.001$ s.

Al igual que en el caso anterior, cada línea de la Figura 1.7 se corresponde con un nivel de exactitud de posición. La orientación de las líneas muestra que un incremento en la velocidad y aceleración del vehículo produce un mayor error de posición promedio. Cuando el vehículo se desplaza con una velocidad constante de 50 Km/h, el error de posición promedio es de 7 m. Si para esta velocidad, la aceleración es el máximo valor alcanzable por un vehículo estándar, o sea $4,5 \text{ m/s}^2$, el error de posición promedio asciende hasta los 8 m. Una diferencia en la aceleración de $4,5 \text{ m/s}^2$ significa un incremento en el error de posición promedio de 1 m. Si en la condición de velocidad anterior, la aceleración es de 12 m/s^2 (valor máximo alcanzable por un vehículo de gama alta), el error de posición promedio crece hasta los 10 m, aumentando en aproximadamente 3 m.

1.4.2 Carga en el canal

Mejorar el nivel de conocimiento cooperativo en términos de error de posición requiere el uso de una mayor frecuencia de transmisión de *beacons*. Sin embargo, esto puede conducir a un consumo significativo de ancho de banda y consecuentemente a un incremento en el número de colisiones. Según [45], el ancho de banda limitado que presenta el canal de radio impacta negativamente en la eficiencia de la comunicación. Esto significa que para una frecuencia de transmisión de *beacon* fija, la carga debe aumentar considerablemente en escenarios con una elevada densidad de nodos. Una mayor utilización del canal de comunicaciones se traduce en un incremento del número de colisiones, lo que reduce la probabilidad de recepción exitosa de paquetes.

La ecuación 1.3 estima la carga total de *beaconing* (C_{TB}), cuando en el rango de comunicación existen N vehículos que utilizan el mismo tamaño de *beacon* (T_b), frecuencia (F_{Tx}) y potencia de transmisión (P_{Tx}). En la Figura 1.8 se muestran dos niveles de carga total de *beaconing* en función del número de vehículos en el rango de comunicación y la frecuencia de transmisión de *beacon*. Los niveles se computan para 6 Mbit/s, que es la razón de transmisión de datos definida por defecto en Europa para la comunicación en el canal de control (CCH) [46]. En el cálculo de los niveles se considera solo la carga útil (*payload*) en relación con la razón de datos total, obviando cualquier variación en los encabezados agregados por la capa MAC y PHY. Los dos niveles de carga total de *beaconing* se escogen según [47], donde se argumenta que para un uso eficiente del canal de comunicaciones la carga total de *beaconing* debe estar entre un 40 y 60 % de la capacidad del canal. No obstante, según este estudio, una carga total de *beaconing* de un 60 % más los encabezados agregados por la capa MAC/PHY puede utilizar completamente el canal. El tamaño de los *beacons* se escoge teniendo en cuenta que estos deben estar entre 250 y 800 bytes, debido a la presencia de información asociada a la seguridad de red [25].

$$C_{TB} \text{ en } \left(\frac{\text{Mbit}}{\text{s}} \right) = \frac{N \times F_{Tx} \left(\frac{\text{beacon}}{\text{s}} \right) \times T_b \left(\frac{\text{bit}}{\text{beacon}} \right)}{10^6} \quad (1.3)$$

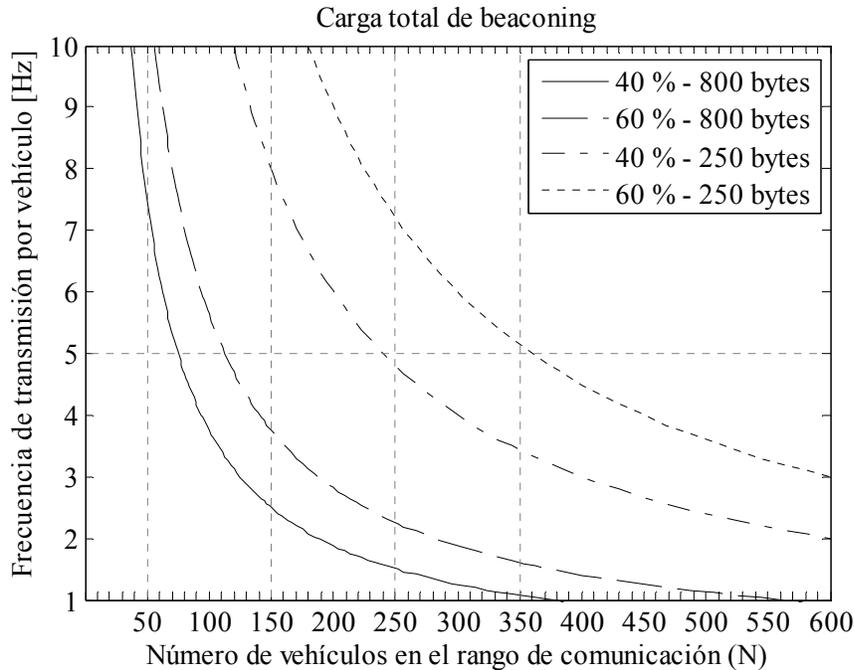


Figura 1.8: Carga total de beaoning en función de la frecuencia de transmisión de beacon y el número de vehículos en el rango de comunicación.

En la Figura 1.8 se observa que para un tamaño de *beacon* de 800 bytes y una frecuencia de transmisión de 1 Hz, la carga total de *beaoning* está entre el 40 y 60 % cuando en el rango de comunicación convergen entre 370 y 560 vehículos. Sin embargo, para este mismo tamaño de *beacon* y una frecuencia de 10 Hz, la carga total de *beaoning* está entre los límites definidos cuando en el rango de comunicación hay solamente entre 35 y 55 vehículos. Para un tamaño de *beacon* de 250 bytes la situación es más favorable. En este caso, los niveles de carga total de *beaoning* se alcanzan para una frecuencia de 10 Hz, cuando el número de vehículos en el rango de comunicación oscila entre 120 y 180 vehículos. Para una frecuencia de 5 Hz, la carga total de *beaoning* está entre el 40 y 60 % cuando en el rango de comunicación hay entre 240 y 360 vehículos, mientras que para una frecuencia de transmisión de 1 Hz los límites de carga total de *beaoning* no se alcanzan ni cuando en el rango de comunicación coinciden 600 vehículos.

1.4.3 Terminal oculto

Las comunicaciones en VANETs se basan en el estándar IEEE 802.11p [21], que utiliza una variante de la capa física (PHY) de IEEE 802.11a adaptada a canales de 10 MHz de ancho de banda. La subcapa de IEEE 802.11, conocida como procedimiento de convergencia de capa física (*PLCP, Physical Layer Convergence Procedure*), define la forma en que los datos son convertidos en señales que se transmiten por el aire. En la Tabla 1.2 se muestran las variantes de transmisión, basadas en la multiplexación por división ortogonal de frecuencia (*OFDM*,

Orthogonal Frequency – Division Multiplexing), especificadas por IEEE 802.11 para canales de 10 MHz. Una razón de datos de 3 Mbit/s, con el esquema de modulación más robusto que es BPSK y una razón de codificación igual a 1/2, demanda una potencia de señal recibida como mínimo de - 85 dBm. Un incremento en la razón de datos requiere una mayor fuerza en la señal recibida. Para una razón de 27 Mbit/s, con el esquema de modulación 64-QAM y una razón de codificación igual a 3/4, la potencia de señal recibida debe ser como mínimo de - 64 dBm.

Tabla 1.2 Variantes de transmisión definidas por IEEE 802.11 en canales de 10 MHz [45]

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

Los distintos valores de potencia de señal recibida permiten dividir el rango de transmisión de un vehículo en tres regiones que varían según la distancia, como se observa en la Figura 1.9. El rango de comunicación es el área donde los valores computados de relación señal a ruido más interferencia (*SNIR, Signal to Noise + Interference Ratio*) y potencia de señal recibida, permiten la correcta decodificación del paquete. El rango de detección de portadora representa el área donde los vehículos pueden detectar una transmisión en curso, pero no necesariamente decodificar exitosamente el paquete. Esto se debe a que en una trama, el preámbulo y PLCP se codifican con la razón de datos más robusta (3 Mbit/s), mientras que la carga útil (*payload*) se puede codificar con cualquiera de las razones de datos incluidas en la Tabla 1.2. El rango de interferencia es el área donde los valores de potencia de señal recibidos y SNIR, no permiten la correcta decodificación del paquete. En esta zona, la transmisión del vehículo actúa como ruido para las transmisiones en curso.

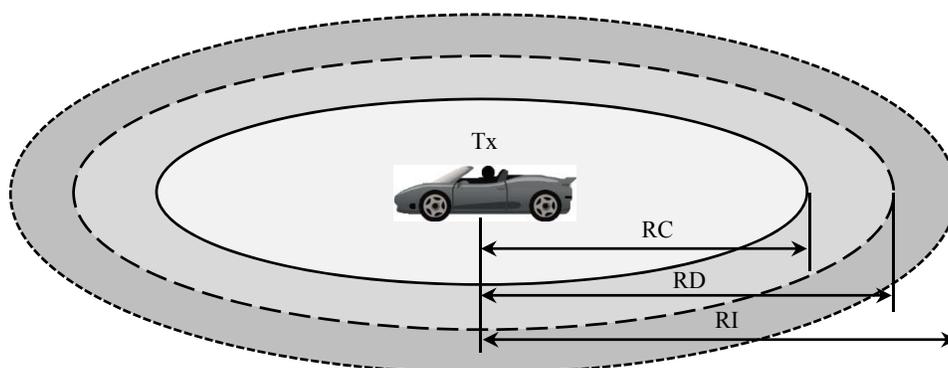


Figura 1.9: Representación del rango de comunicación (RC), detección (RD) e interferencia (RI) del vehículo transmisor (Tx).

En la capa MAC, IEEE 802.11p utiliza CSMA/CA en su variante función de coordinación distribuida (*DCF, Distributed Coordination Function*) para controlar el acceso al canal de comunicaciones reduciendo el riesgo de colisiones de paquetes. El mecanismo DCF opera de manera distribuida, haciendo que las estaciones accedan al medio aleatoriamente. Para esto define dos tipos de tiempo de espera: espacio entre tramas (*IFS, Interframe Spaces*) y ventana de contención (*CW, Contention Window*), la cual se divide en ranuras de tiempo equidistantes (*slots backoff*). Una vez que el medio está desocupado, la estación espera un tiempo que es la suma del espacio distribuido entre tramas (*DIFS, Distributed Interframe Spaces*) y un número aleatorio de ranuras de *backoff*. Durante la espera, la estación censa la ocupación del canal. Si el canal es ocupado antes que expire el tiempo de contención, se guarda el valor de *backoff* y se reanuda después que finalice la transmisión de la estación que ganó el proceso de acceso al canal.

La capa MAC de IEEE 802.11p también provee diferenciación de calidad de servicio (*QoS, Quality of Service*) utilizando la función de acceso al canal distribuido mejorado (*EDCA, Enhanced Distributed Channel Access*) del estándar IEEE 802.11e. Este mecanismo conocido como función de coordinación híbrida (*HCF, Hybrid Coordination Function*) hace que DIFS varíe en función de la prioridad del paquete (ver Figura 1.10). El resultado es el espacio arbitrario entre tramas (*AIFS, Arbitration Interframe Space*), que es menor para prioridades más altas. Las cuatro categorías de acceso (*ACs, Access Categories*) definidas por EDCA para cada canal CCH o SCH son: voz (VO), video (VI), mejor esfuerzo (BE) y background (BK). En la Tabla 1.3 se muestran los parámetros de contención correspondientes a las categorías de acceso para cada canal CCH o SCH.

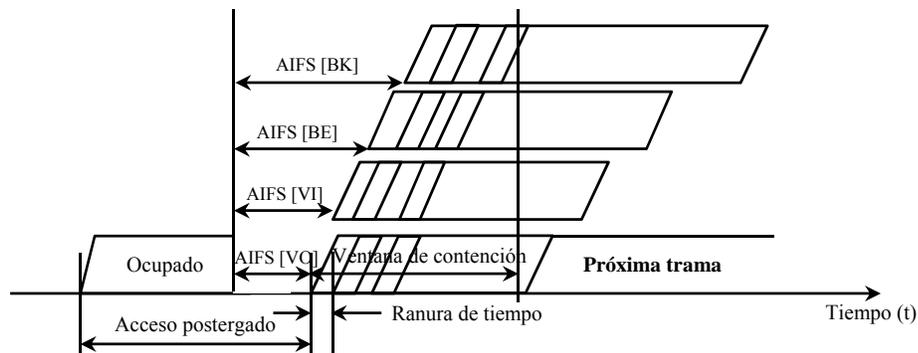


Figura 1.10: Mecanismo de acceso priorizado al canal (EDCA) incluido en IEEE 802.11p.

Tabla 1.3 Parámetros de contención para las categorías de acceso [21]

AC	Tipo de tráfico	CW _{mín}	CW _{máx}	AIFSN
BK	Background	$aCW_{mín} = 15$	$aCW_{máx} = 1023$	9
BE	Mejor esfuerzo	$aCW_{mín} = 15$	$aCW_{máx} = 1023$	6
VI	Video	$(aCW_{mín}+1)/2-1 = 7$	$aCW_{mín} = 15$	3
VO	Voz	$(aCW_{mín}+1)/4-1 = 3$	$(aCW_{mín}+1)/2-1 = 7$	2

En la Tabla 1.3 se observa que el tamaño de la ventana de contención inicial está limitado por el parámetro CW_{\min} . Cuando no se recibe un mensaje de acuse de recibo (*Acknowledgments*) este valor es duplicado en cada estado hasta alcanzar CW_{\max} , reduciendo los problemas en el acceso al medio. En una comunicación *broadcast*, la ausencia de acuses de recibo hace que no exista crecimiento exponencial de la ventana de contención, siendo CW_{\min} quien define el límite máximo para el contador de *backoff*. Por tanto, las colisiones de paquetes no son completamente evitadas por DCF, siendo posible que dos o más estaciones seleccionen el mismo contador de *backoff* e inicien una transmisión simultáneamente. En la VANETs, las situaciones donde dos o más transmisiones concurren, están relacionadas con el problema del terminal oculto. En la Figura 1.11 se presenta el escenario más simple, formado por una constelación de tres estaciones: transmisor (T), receptor (R) y terminal oculto (H - *hidden terminal*). La estación T inicia una comunicación con R, que no es detectada por H debido a que T no está dentro del rango de detección (RD) de H. La estación H que está oculta para T porque no está dentro de su RD, inicia una comunicación con R en el mismo instante de tiempo en que lo hizo T. El resultado es una colisión que le impide a la estación R la correcta recepción del paquete.

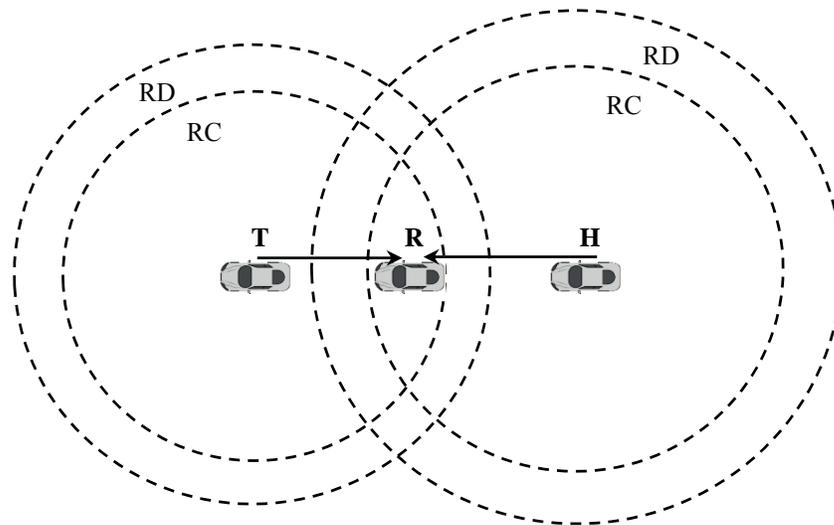


Figura 1.11: Problema del terminal oculto en escenario CSMA/CA– Constelación de tres estaciones: transmisor (T), receptor (R) y terminal oculto (H).

El tamaño de la ventana de contención mínima (CW_{\min}) para las distintas clases de tráfico varía entre 3 y 15, como se muestra en la Tabla 1.3. Pueden existir situaciones donde el número de vehículos supere la cantidad de ranuras de *backoff* disponibles, surgiendo una probabilidad de pérdida de paquetes significativa debido a la sincronización de los procesos de contención. Una evaluación de este problema se encuentra en [48], donde se construye un modelo analítico utilizando cadenas de Markov para computar la probabilidad de colisión de paquetes. Cuando se aplica este modelo a los escenarios vehiculares que transmiten en modo

broadcast, la probabilidad de colisión (P_c) debido a la expiración simultánea de los contadores de *backoff*, es:

$$P_c = 1 - (1 - \tau)^{n-1} \quad (1.4)$$

Donde n es el número de vehículos y τ denota la probabilidad de que una estación transmita en una ranura escogida aleatoriamente dentro de una ventana de contención (CW) con *backoff* no exponencial:

$$\tau = \frac{2}{CW + 1} \quad (1.5)$$

En la Figura 1.12 se observa la probabilidad de colisión en función del número de vehículos que intentan acceder al medio y el tamaño de la ventana de contención mínima definida para las cuatro clases de tráfico. Las curvas muestran que la probabilidad de colisión crece con un aumento del número de vehículos y/o una disminución de la ventana de contención mínima. La clase de tráfico VO, que presenta una ventana de contención mínima igual a 3, provee la mayor probabilidad de colisión, mientras que las clases de tráfico BE y BK, que tienen una ventana de contención mínima de 15, proveen la menor probabilidad de colisión. Se debe notar que, las clases de tráfico con mayor prioridad proporcionan más rapidez en el acceso al canal de comunicaciones debido a los valores de sus parámetros de contención. No obstante, tienen una mayor probabilidad de colisión debido a la expiración simultánea de los contadores de *backoff*.

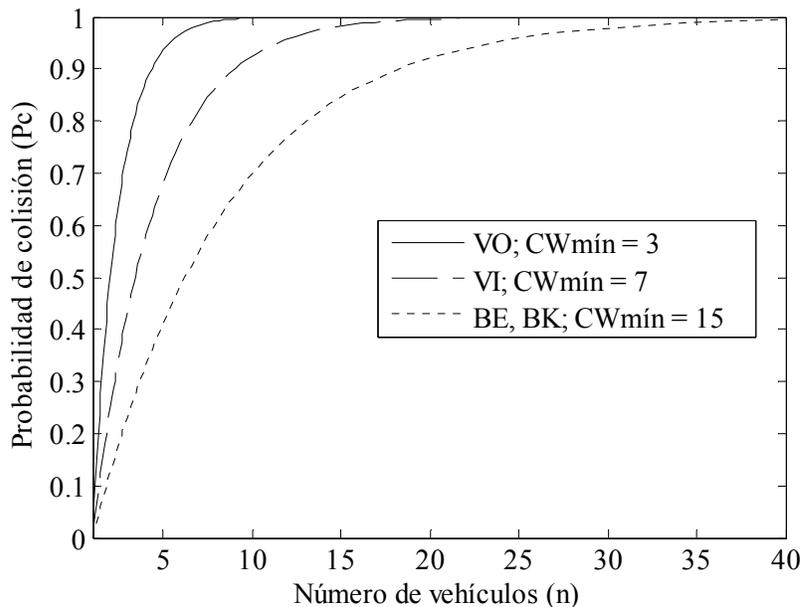


Figura 1.12: Probabilidad de colisión debido a la expiración simultánea de los contadores de *backoff*, según el número de vehículos y la ventana de contención mínima ($CW_{mín}$).

1.4.4 Métricas de desempeño

Existen diferentes métricas que definen el nivel de conocimiento cooperativo provisto por el *beaconing* en redes vehiculares. A continuación se describen las más importantes [25]- [30]:

Razón de entrega de paquetes (RE): se define como la razón que existe entre el número total de paquetes que se reciben en el escenario y el número total de paquetes que se debían recibir en el escenario.

Número de colisiones (NC): 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.

Intervalo de beacon (Ib): 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.

Error de posición promedio real percibido (EPReal): 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*.

Carga total de beaconing (CTB): 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.

Rango de comunicación (RC): 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.

Tamaño de la base de datos LDM (TLDM): 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 (NTO): es la cantidad de nodos circundantes fuera del rango de comunicación los cuales pueden causar interferencia.

Demora de extremo a extremo (DEE): se define como el tiempo que consume un paquete en viajar desde el transmisor hasta el receptor.

En la Tabla 1.4 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 crecimiento en su valor, coincide con un aumento en el conocimiento del entorno circundante. Un mayor número de colisiones incrementa el error de posición, disminuyendo el nivel de conocimiento cooperativo. El intervalo de *beacon* influye en la relevancia contextual de la información de posición. Un

decrecimiento en su valor reduce el error de posición, pero conduce a un aumento en el número de colisiones. Mientras mayor es el error de posición promedio real percibido por los vehículos circundantes, menor es 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. Un mayor rango de comunicación incrementa el número de vehículos que reciben los *beacons*, pero eleva la probabilidad de colisión para todas las transmisiones. Un crecimiento en el tamaño de la base de datos LDM, coincide con un aumento en el conocimiento del entorno vehicular. Un mayor número de terminales ocultos, incrementa la probabilidad de interferencia y disminuye la razón de entrega de paquetes. Un crecimiento en la demora, directamente aumenta el error de posición.

Tabla 1.4 Métricas y su impacto en el nivel de conocimiento cooperativo

Métrica	Valor	Nivel de conocimiento cooperativo
Razón de entrega de paquetes (RE)	Crece	Aumenta
	Decrece	Disminuye
Número de colisiones (NC)	Crece	Disminuye
	Decrece	Aumenta
Intervalo de beacon (Ib)	Crece	Disminuye
	Decrece	Aumenta
Error de posición promedio real percibido (EPReal)	Crece	Disminuye
	Decrece	Aumenta
Carga total de beaconing (CTB)	Crece	Disminuye
	Decrece	Aumenta
Rango de comunicación (RC)	Crece	Aumenta
	Decrece	Disminuye
Tamaño de la base de datos LDM (TLDM)	Crece	Aumenta
	Decrece	Disminuye
Número de terminales ocultos (NTO)	Crece	Disminuye
	Decrece	Aumenta
Demora de extremo a extremo (DEE)	Crece	Disminuye
	Decrece	Aumenta

1.5 Tecnologías

Las tecnologías inalámbricas consideradas para las comunicaciones vehiculares se pueden clasificar en cuatro categorías: corto alcance, *ad-hoc*, celular y difusión digital. A continuación se describen los principales aspectos de los sistemas de radio más relevantes en cada una de las categorías.

1.5.1 Corto alcance

Infrarrojo (IR) [49]: es un sistema de radio que permite el intercambio de datos por rayos infrarrojos (820 - 1010 nm). La capa PHY infrarroja soporta razones de datos de: 1 y 2 Mbps. Este sistema está considerado para comunicaciones de muy corto alcance V2V (especialmente entre los vehículos que están en un mismo carril) y V2I. El esquema punto a punto necesita una antena para cada dirección de comunicación debido a que se requiere una línea de visión entre las dos estaciones a comunicarse. Esta tecnología considera acceso múltiple por división

en el tiempo (*TDMA, Time Division Multiple Access*) para comunicaciones sincronizadas entre múltiples puntos, donde uno de esos puntos será temporalmente un maestro dedicado y organizará las ranuras TDMA.

Bluetooth [50]: es un sistema de radio de corto alcance que posibilita la transmisión de voz y datos entre diferentes dispositivos. El estándar permite la creación de “*piconet*”, la cual es una red conformada por dos o más equipos que comparten un canal, o sea, funcionan de forma sincrónica y siguen el mismo salto de frecuencia (*frequency hopping*). Cada piconet solo puede tener un maestro y un máximo de siete esclavos activos, aunque más esclavos pueden estar conectados al dispositivo maestro en un estado inactivo o latente. Las piconet se pueden conectar de forma distribuida (*ad-hoc*) generando una red de dispersión (*scatternet*). Este sistema presenta una limitación de cobertura cercana a los 10 metros, siendo posible crear pequeñas redes utilizándolo. En la actualidad, algunos fabricantes ya lo incluyen en sus paquetes estándares, principalmente orientado a conectar teléfonos celulares con el sistema de altavoz del vehículo.

Onda milimétrica (*MM Wave, Millimeter-Wave*) [51]: es un sistema de radio diseñado para comunicaciones de corto alcance (≈ 10 m) a razón de 1 Gbit/s. Opera en la banda de 60–64 GHz, haciendo que las antenas sean pequeñas y fácilmente integrables a los vehículos. Comparado con infrarrojo (IR) presenta las ventajas siguientes: mayor razón de datos, menor afectación por las condiciones del tiempo y menor vulnerabilidad a la interferencia generada por la luz solar. Constituye una buena opción para los casos de uso que requieren altas razones de datos a distancias muy cortas, especialmente los que están en la categoría de valor añadido.

1.5.2 Ad-hoc

IEEE 802.11p [21]: es el estándar definido para la capa PHY y MAC en el conjunto de protocolos WAVE. Este sistema constituye una evolución del popular estándar IEEE 802.11a diseñado especialmente para las comunicaciones de datos de baja latencia entre vehículos (V2V), y entre vehículos y RSU (V2I). IEEE 802.11p utiliza CSMA en la capa MAC y OFDM en la capa PHY, define un rango de transmisión nominal de 300 metros aunque puede llegar hasta 1 Km, canales de 10 o 20 MHz de ancho de banda, tasas de transmisión de 3, 4.5, 6, 9, 12, 18, 24 y 27 Mbit/s en canales de 10 MHz y de 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, y 54 Mbit/s en canales de 20 MHz. En Europa la banda de operación propuesta va desde 5.875 a 5.905 GHz, mientras que en Estados Unidos el espectro designado se extiende desde 5.850 a 5.925 GHz.

1.5.3 Celular

GSM/GPRS-UMTS: las redes de telefonía móvil pueden ser una buena solución para sistemas de comunicaciones vehiculares en ciudades y autopistas. El principal argumento para usar un estándar de telefonía móvil en VANETs es que la infraestructura ya se encuentra desplegada, y en el futuro próximo la mayor parte de los vehículos en Europa y Estados Unidos podrían tener acceso a estas redes. El sistema global para las comunicaciones móviles (*GSM, Global*

System for Mobile Communications) se fundamenta en la conmutación de circuitos y fue diseñado especialmente para aplicaciones de voz, mientras que el servicio general de paquetes por radio (*GPRS, General Packet Radio Service*) se basa en la conmutación de paquetes y considera la transmisión de datos. No obstante, en la redes GSM las comunicaciones de voz son la prioridad, siendo más importante experimentar bajas demoras que altas razones de pérdidas de paquetes. El estándar de tercera generación sistema de telecomunicaciones móvil universal (*UMTS, Universal Mobile Telecommunications System*) [52] define conexiones de datos de hasta 384 Kbit/s, y su amplio despliegue y ventajas de movilidad son características importantes para las comunicaciones vehiculares. Sin embargo, este sistema no fue diseñado para el uso simultáneo por un gran número de usuarios durante períodos largos de tiempo en volúmenes altos de tráfico.

WiMAX: el estándar IEEE 802.16 conocido como interoperabilidad mundial para el acceso por microondas (*WiMAX, Worldwide Interoperability for Microwave Access*) permite la implementación de redes inalámbricas de banda ancha en grandes áreas, las cuales soportan múltiples servicios debido a su gran capacidad para transportar datos. El estándar 802.16e [53] fue diseñado para proveer funciones de transferencia de comunicación entre celdas mientras el usuario se mueve en el área de servicio entre estaciones base (*BSs, Base Stations*). Las BSs proporcionan funcionalidad sobre el enlace controlando la admisión y gestión de los recursos de radio en los enlaces de subida y bajada, posibilitando tener estaciones suscriptoras que se desplacen a altas velocidades. Sus decenas de Mbit/s, movilidad de hasta 100 Km/h y 15 Km de cobertura desde la estación base, lo convierten en un sistema atractivo para algunos casos de usos VANETs.

IEEE 802.11 [54] es un estándar de comunicación inalámbrica que puede funcionar de dos formas: una centralizada, donde los terminales móviles se comunican con (y a través de) uno o más puntos de acceso (*AP, Access Point*) y otra en un modo *ad-hoc*, donde los nodos móviles se les permite comunicarse e interactuar directamente, sin necesidad de utilizar ninguna infraestructura. Las especificaciones 802.11 a/b/g/n ofrecen razones de datos que alcanzan los 600 Mbps sobre distancias alrededor de los 250 metros utilizándose con frecuencia para las pruebas VANETs, gracias a la gran disponibilidad y bajo costo que tienen estos dispositivos en el mercado.

1.5.4 Difusión digital

DVB-T, H/DAB: el sistema de difusión de video digital terrestre (*DVB-T, Digital Video Broadcasting - Terrestrial*) [55] constituye un estándar europeo que especifica los procesos de codificación de canal y modulación para un adecuado funcionamiento de la televisión digital en el entorno terrestre. El sistema de difusión de video digital para dispositivos personales (*DVB-H, Digital Video Broadcasting - Handheld*) [56] es un estándar que permite la recepción de la televisión digital terrestre en receptores portátiles alimentados con baterías. El sistema de difusión de audio digital (*DAB, Digital Audio Broadcasting*) [57] permite la transmisión de

señales digitales de audio con alta calidad incluso para receptores en movimiento. El sistema fue creado por la Unión Europea de Radiodifusión (*EBU, European Broadcasting Union*) a través del proyecto Eureka 147. Estos sistemas se crearon para difundir audio, TV o video, siendo muy útiles para los casos de uso que se basan en brindar información a los vehículos que están en determinada área, pero la desventaja principal es que no proveen comunicaciones bidireccionales.

Tabla 1.5 Características de las tecnologías de comunicación consideradas para VANETs [58]

Parámetro	Corto alcance			Ad-hoc	Celular			Difusión digital
	IR	Bluetooth	MM Wave	IEEE 802.11p	GSM/GPRS, UMTS	WiMAX	IEEE 802.11	DVB-T, H/DAB
Modo de comunicación	V2V/ V2I/I2V	V2I/I2V	V2V/ V2I/I2V	V2V/ V2I/I2V	V2I/I2V	V2I/I2V	V2I/I2V	I2V
Direccionalidad	2	2	2	2	2	2	2	1
Latencia	Muy Baja	~ 100 ms	~ 150 μ s	200 μ s	1.5 – 3.5 s	~ 110 ms	~ 46 ms	15 – 30 s
Razón de datos (básica)	1 y 2 Mbit/s	1 – 3 Mbit/s	~ 1 Gbit/s	~ 6 Mbit/s	80 – 384 Kbit/s	1 – 32 Mbit/s	54 – 600 Mbit/s	~ 1.73 Mbit/s
Rango	~ 10 m	~ 10 m	~ 10 m	\leq 1 Km	10 Km	15 Km	250 m	40 Km
Modo de transmisión	Unicast	Unicast	Unicast	Unicast, Broadcast	Unicast, Geocast	Unicast, Geocast	Unicast, Broadcast	Broadcast
Movilidad	No	Limitada	Limitada	Sí	Sí	Sí	Limitada	Sí
Banda de frecuencia	2.6 GHz	2.4 GHz	60 – 64 GHz	5.8 – 5.9 GHz	0.8 – 1.9 GHz	5.x GHz	2.4 – 5.2 GHz	170 – 1492 MHz

1.6 Arquitecturas

En esta sección se presentan las características fundamentales de las arquitecturas de red propuestas para VANETs: WAVE de IEEE, CALM de ISO y C2CNet/IPv6 GeoNetworking de C2C-CC/GeoNet.

1.6.1 WAVE

En la Figura 1.13 se muestran los 75 MHz del espectro, en la banda de 5,9 GHz, designados por la FCC para las DSRC. Estos se extienden desde 5.850 GHz hasta 5.925 GHz y se dividen en 5 MHz de banda de guarda más siete canales de 10 MHz cada uno. El canal de control (CH 178) está reservado para aplicaciones relacionadas a la seguridad vial y para el intercambio periódico de *beacons*, los dos canales en los extremos de la banda (CH 172, CH 184) están reservados para usos especiales y los cuatro canales de servicio restantes (CH 174, CH 176, CH 180, CH 182) pueden ser usados por aplicaciones relacionadas o no a la seguridad vial. Existe la posibilidad de combinar canales de servicio adyacentes para formar dos canales de 20 MHz; CH 175 (combinación de CH 174 y CH 176) y CH 181 (combinación de CH 180 y CH 182), lo cual permite obtener razones de datos superiores a las alcanzadas con canales de 10 MHz.

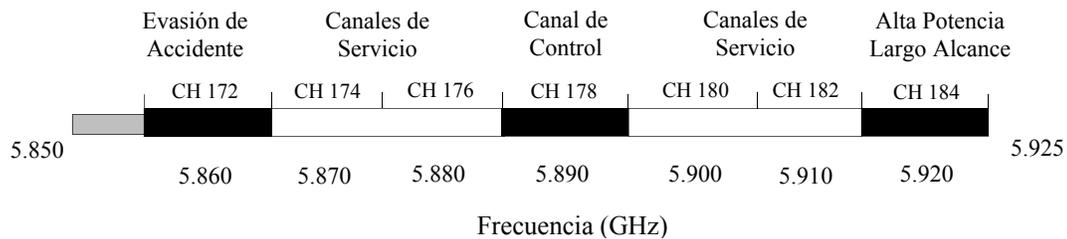


Figura 1.13: Conformación del espectro designado para los ITS en Estados Unidos.

Los grupos de trabajo IEEE 1609 e IEEE 802.11p especificaron un conjunto de protocolos denominados WAVE [8] para el acceso inalámbrico en entornos vehiculares. Existen cuatro sub-estándares en la familia 1609 conocidos como IEEE 1609.1, 2, 3, 4, los cuales definen un conjunto de aspectos que son esenciales para el funcionamiento de las distintas capas de la arquitectura de red (ver Figura 1.14). IEEE 1609.1 [59] describe las actividades de gestión necesarias para una correcta operación de las aplicaciones vehiculares. IEEE 1609.2 [60] provee los elementos a tener en cuenta para establecer una comunicación segura. IEEE 1609.3 [61] especifica un protocolo de mensajes cortos (*WSMP, Wave Short Messages Protocol*) que maneja el tráfico de las aplicaciones de seguridad vial en las capas de red y transporte. IEEE 1609.4 define la coordinación entre los múltiples canales del espectro, mientras que IEEE 802.11p describe la operación de la capa MAC y PHY.

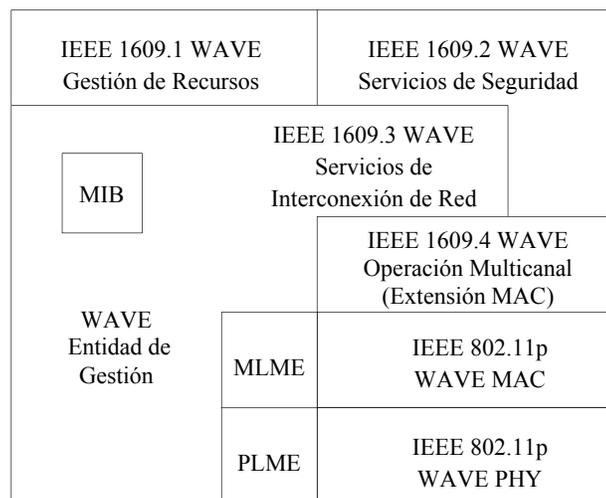


Figura 1.14: Arquitectura de red WAVE – Relación entre los protocolos IEEE 1609 y 802.11p.

IEEE 1609.4 [62] complementa el funcionamiento de la capa MAC IEEE 802.11p para proveer coordinación entre los múltiples canales del espectro. IEEE 1609.4 define que los dispositivos de radiocomunicación WAVE deben sintonizar el canal de control por un

intervalo de tiempo CCH, y después conmutar a alguno de los canales de servicio donde pueden transmitir y recibir datos durante el intervalo de tiempo SCH, como se muestra en la Figura 1.15. El monitoreo del canal de control se repite cada un tiempo conocido como intervalo de sincronismo y al inicio de cada ranura CCH o SCH se añade un intervalo de guarda para eliminar las inexactitudes que se presentan debido a las diferentes velocidades de conmutación de los dispositivos de radiocomunicación. La conmutación sincrónica de canal entre todos los nodos de la red se logra mediante una base de tiempo universal coordinada (*UTC, Coordinated Universal Time*) como puede ser los datos proveídos por el GPS.

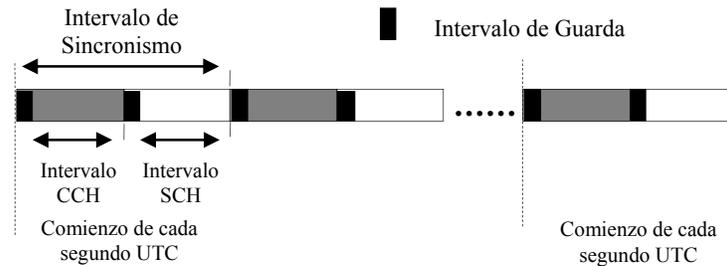


Figura 1.15: Intervalos de sincronismo, guarda, CCH y SCH utilizados en la operación multicanal del protocolo IEEE 1609.4.

1.6.2 CALM

La arquitectura de red denominada interfaz de aire continua para rango medio y largo (*CALM, Continuous Air-interface for Long and Medium range*) [63] es una iniciativa del Grupo de Trabajo 16 del Comité Técnico 204 de la Organización Internacional para la Estandarización (*ISO TC204 WG16, International Organization for Standardization Technical Committee 204 Working Group 16*) para definir un conjunto de protocolos de comunicación inalámbrica y las interfaces aire para una variedad de escenarios que proporcionen soporte a las aplicaciones de los ITS. CALM proporciona un conjunto estandarizado de protocolos de interfaz aire con el objetivo de mejorar el uso de los recursos disponibles para las comunicaciones de corto, medio y largo alcance.

CALM provee diferentes interfaces que definen cómo pueden ser usadas varias tecnologías inalámbricas existentes por las capas superiores, como se observa en la Figura 1.16. Algunas de estas interfaces son: 2G/2.5G/GPRS, 3G, Infrarrojo (IR), IEEE 802.11 (5 GHz), IEEE 802.11p, MM Wave en la banda de frecuencia 60-64 GHz, IEEE 802.16/WiMAX y Satélite. Los objetivos de CALM son: 1) proveer soporte a la nueva generación de aplicaciones ITS: sistemas de comunicaciones para la seguridad vial y nuevas aplicaciones comerciales basadas en su capacidad de gran ancho de banda, y 2) brindar soporte a los servicios de Internet en entornos móviles.

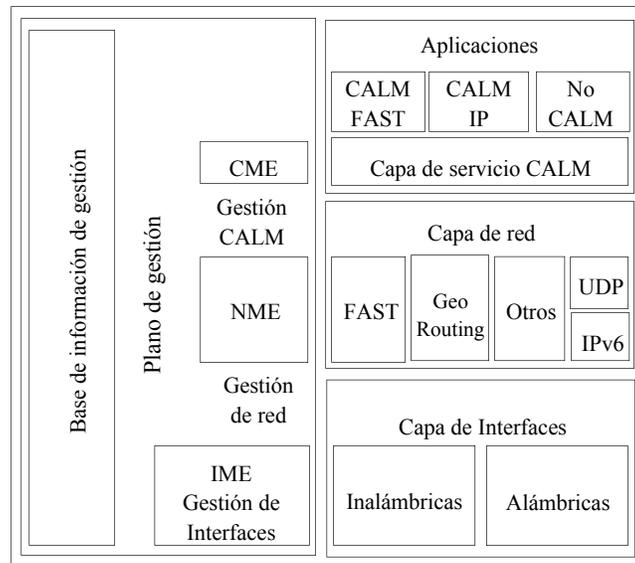


Figura 1.16: Conjunto de protocolos de la arquitectura de red CALM [63].

1.6.3 C2CNet/IPv6 GeoNetworking

C2C-CC [64] es una organización iniciada por los fabricantes europeos de vehículos: Audi, BMW, DaimlerChrysler, Fiat, Renault y Volkswagen para desarrollar un estándar industrial abierto que permita la comunicación V2V y V2I, usando la tecnología WLAN IEEE 802.11. Este tiene como objetivo incrementar la seguridad vial reduciendo el número de accidentes en las carreteras, proporcionar eficiencia en el transporte mejorando la movilidad y los flujos de tráfico, y estandarizar interfaces y protocolos para la comunicación vehicular en Europa y el resto del mundo.

La arquitectura C2CNet [33] propuesta por el C2C-CC tiene como objetivo proveer soporte a las aplicaciones de los ITS (ver Figura 1.17). El C2C-CC distingue tres tipos básicos de tecnologías inalámbricas: IEEE 802.11p (variante europea), WLAN convencionales como IEEE 802.11 a/b/g y otras complementarias como GPRS o UMTS. Sobre las capas MAC y PHY está la capa de red C2CNet que provee comunicación inalámbrica multisalto basada en encaminamiento y direccionamiento geográfico, y el *beaconing* que es esencial para el funcionamiento de las aplicaciones de seguridad vial y gestión de tráfico. En la arquitectura C2C-CC todas las aplicaciones pueden utilizar los protocolos TCP/UDP sobre IPv6, aunque para las aplicaciones de seguridad vial y gestión de tráfico se recomienda la comunicación a través de las capas de red y transporte C2CNet.

El proyecto europeo GeoNet [65] fue el primero en investigar el uso del protocolo IPv6 en las comunicaciones vehiculares. GeoNet estuvo activo del año 2008 a 2010 y fue establecido para estudiar, implementar y demostrar la combinación del GeoNetworking provisto por el C2C-CC con IPv6 y de esta forma lograr un conjunto de protocolos único para los ITS. GeoNet se refiere a esta combinación como IPv6 GeoNetworking. La arquitectura de red GeoNet [66] usa

en la capa de transporte TCP/UDP/Otros. En la capa de red define IPv6 (*NEMO*, *Network Mobility*) sobre C2CNet y IEEE 802.11p en las capas MAC y PHY, como se observa en la Figura 1.18.

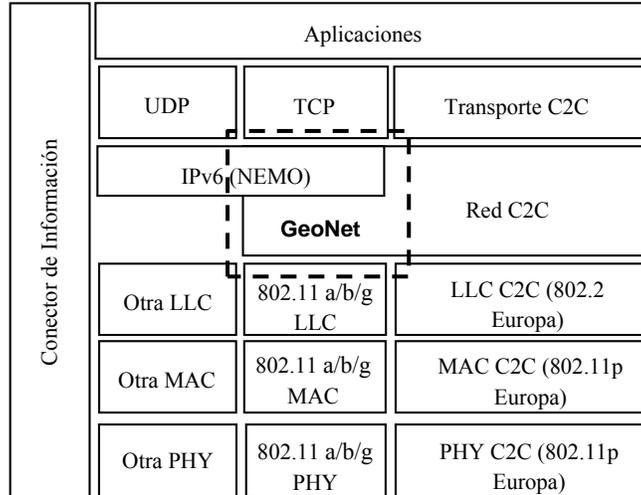


Figura 1.17: Conjunto de protocolos de la arquitectura C2CNet [33].

La arquitectura GeoNet considera tres tipos distintos de nodos: OBU GeoNet instaladas en los vehículos, RSU GeoNet colocadas en las vías y dispositivos ejecutando aplicaciones GeoAware. GeoNet soporta aplicaciones de seguridad vial, gestión del tráfico y valor añadido, y considera varios tipos de comunicación: 1) V2V que se produce solamente entre vehículos en movimiento o detenidos y, 2) basada en infraestructura que ocurre entre vehículos y RSUs o puntos de acceso a Internet. El modo de comunicación puede ser punto a punto (*unicast o anycast*), o punto a multipunto (*multicast*). Para ambos modos, GeoNet define un rango geográfico de comunicación: GeoUnicast, GeoAnycast y GeoBroadcast. Las características de GeoNetworking están solo implementadas en los nodos móviles y dispositivos de acceso que son las OBU GeoNet y RSU GeoNet. Desde un punto de vista IP, estos componentes de sistema son enlaces independientes de redes IPv6 sobre Internet. Las OBU GeoNet y RSU GeoNet forman una VANET donde el encaminamiento de información se realiza utilizando GeoNetworking.

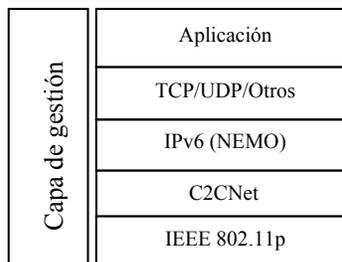


Figura 1.18: Conjunto de protocolos en una OBU GeoNet [66].

1.7 Conclusiones parciales

Las VANETs constituyen una de las tecnologías más importantes para el establecimiento de los futuros ITS. Las características particulares de los entornos vehiculares imponen retos en la comunicación, y por tanto en el correcto funcionamiento de diversos casos de uso relacionados con la seguridad vial y gestión del tráfico. El *beaconing* constituye la base del funcionamiento de las aplicaciones descentralizadas de conocimiento cooperativo. La información registrada en la base de datos LDM posibilita que los sistemas instalados en los vehículos conozcan el entorno vehicular y detecten situaciones potencialmente peligrosas antes de que se produzcan los accidentes. El estándar IEEE 802.11p es la alternativa con mayor número de seguidores para ser usado en redes VANETs, ya que fue diseñado para proveer comunicaciones robustas y de baja latencia en entornos móviles. En escenarios donde se transmite en modo *broadcast*, el terminal oculto tiene un fuerte impacto sobre el número de colisiones y la razón de pérdida de paquetes, por lo que diseñar mecanismos que atenúen su efecto es esencial para el adecuado desempeño de las aplicaciones ITS.

2. Algoritmo distribuido de beaconing para VANETs

2.1 Motivación

Cuando las VANETs se despliegan completamente, pueden existir situaciones donde las limitaciones tecnológicas se conviertan en un desafío. Es fácil encontrar escenarios donde para un correcto funcionamiento de las aplicaciones de seguridad vial, los nodos necesitan transmitir al medio una cantidad significativa de datos. Ejemplo de estos son: autopistas que se encuentran a la entrada de grandes ciudades las cuales pueden presentar un número elevado de vehículos que se desplazan a diferentes velocidades incurriendo en cambios de carril, los congestionamientos de tráfico que contienen un número alto de vehículos que se mueven a muy baja velocidad, cercanos los unos a los otros por prolongados períodos de tiempo, y los desplazamientos de vehículos en entornos urbanos que se caracterizan por velocidades bajas o medias, cambios frecuentes de dirección, cambios de carril, adelantamientos y frenados bruscos.



a)



b)



c)



d)

Figura 2.1: Ejemplos de entornos vehiculares a) Autopista: densidad de nodos alta - velocidad baja, b) Autopista: densidad de nodos media - velocidad media, c) Congestionamiento, d) Urbano.

Uno de los desafíos más importantes que presenta el *beaconing* es ajustar dinámicamente los parámetros de transmisión, para proveer un nivel de conocimiento cooperativo que permita el desempeño efectivo de los distintos casos de uso de seguridad vial y gestión del tráfico. Este planteamiento se sustenta en los elementos siguientes: 1) tanto en Estados Unidos como en Europa se considera la existencia de un solo canal de 10 MHz, denominado canal de control (CCH), para el intercambio periódico de *beacons* y el tráfico de mensajes conducidos por eventos [19]-[20], 2) las razones de datos proporcionadas por el estándar IEEE 802.11p en canales de 10 MHz de ancho de banda varían de 3 a 27 Mbit/s, donde las más pequeñas se prefieren para las aplicaciones de seguridad vial por su robustez frente a la interferencia y el ruido [67], 3) debido a asuntos de costos la mayoría de los dispositivos de comunicación VANETs solo podrán sintonizar un canal de radio a la vez [68], 4) el mecanismo de acceso al canal de los sistemas IEEE 802.11 en su variante DCF es un procedimiento asincrónico que no gestiona con gran eficiencia los recursos del medio inalámbrico, especialmente en los casos donde se transmite en modo *broadcast* [69]-[70], 5) la mayoría de las aplicaciones de seguridad vial que dependen del intercambio de *beacons* necesitan una frecuencia de transmisión mínima de 1 Hz [71], 6) de acuerdo con [72]-[73] y el reporte final del proyecto VSC [25] se prevé que cada nodo necesitará transmitir al medio varios *beacons* por segundos para cumplir con los requerimientos de exactitud de posición de las aplicaciones vehiculares, y 7) según [25] los mensajes relacionados con la seguridad vial deben presentar un tamaño relativamente grande, entre 250 y 800 bytes, debido a la presencia de información asociada a la seguridad de red.

En este contexto, una decisión de diseño fundamental es elegir un mecanismo para el ajuste dinámico de los parámetros de transmisión de *beacons*, que garantice un desempeño efectivo de las aplicaciones de seguridad vial. En [30], se estudia la relación que existe entre el ancho de banda requerido por la difusión periódica de *beacons* y la exactitud de posición lograda en un sistema vehicular. Los autores proponen controlar la carga de *beaconing* ajustando la frecuencia de transmisión según la situación de tráfico actual, mientras se mantiene una exactitud de posición apropiada para el correcto funcionamiento de las aplicaciones de seguridad vial. En [74], se evalúa la razón de recepción del proceso de difusión periódica de *beacons* para distintas configuraciones de potencia y frecuencia de transmisión. Los resultados muestran que un incremento en la frecuencia de transmisión disminuye la probabilidad de recepción de *beacons*, y que, aunque un incremento en la potencia de transmisión extiende el rango de comunicación del vehículo aumentando así su nivel de seguridad, también puede conducir a un canal inalámbrico congestionado que eleva la probabilidad de colisión para todas las transmisiones.

De acuerdo con esto, mientras mayor es la frecuencia de transmisión de *beacons*, menor debe ser el error de posición percibido en el entorno vehicular. Sin embargo, un incremento en la frecuencia de transmisión de *beacons* conduce a una mayor utilización del canal de comunicaciones, lo que implica un aumento en la probabilidad de pérdida de información y consecuentemente en el error de posición que perciben los nodos vecinos. Disminuir la

frecuencia de transmisión de *beacons* directamente reduce la calidad de la información de posición, porque el error entre la posición real de un vehículo y la última posición conocida atribuida a la llegada de un *beacon* se incrementa a medida que la frecuencia de transmisión de *beacon* decrece. Como resultado, la inexactitud de posición puede provocar la operación incorrecta de las aplicaciones de seguridad vial que dependen del intercambio periódico de *beacons*. Una mayor potencia de transmisión aumenta el nivel de seguridad del vehículo porque extiende su rango de comunicación, pero incrementa la probabilidad de colisión para todas las transmisiones, elevando el error de posición percibido por los vehículos vecinos.

2.2 Modelo analítico

El modelo analítico que se desarrolla en las próximas subsecciones se basa en las suposiciones siguientes:

a) Topología: se asume una red *ad-hoc* vehicular conformada por varios grupos de nodos $N_1 = \{n_1, \dots, n_n\}$, $N_2 = \{n_1, \dots, n_n\}$, ..., $N_n = \{n_1, \dots, n_n\}$, los cuales recorren un escenario que tiene un kilómetro cuadrado de área ($A = 1 \text{ Km}^2$). Cada grupo de nodos $N_x = \{n_1, \dots, n_n\}$ se desplaza en una de las carreteras del escenario, la cual se modela como una línea recta de un kilómetro de longitud $C_x = [0, 1 \text{ Km}]$, mientras que los nodos se representan como puntos en $C_x = [0, 1 \text{ Km}]$. Todos los nodos son iguales y están uniformemente distribuidos para obtener cierta densidad (ρ). Dado un nodo $n_i \in N_x$, $x(i, t)$ denota la posición n_i en C_x en el tiempo t . Cada nodo $n_i \in N_x$ difunde *beacons* al canal de comunicaciones utilizando cierta frecuencia (F_{Tx}) y potencia de transmisión (P_{Tx}), como se visualiza en la Figura 2.2. El modelo se abstrae del impacto de la movilidad bajo la premisa de que la comunicación ocurre en una escala de tiempo muy pequeña.

b) Comunicación: los vehículos se comunican utilizando el estándar IEEE 802.11p a nivel MAC y PHY. Los nodos siempre escuchan el medio, obviando la conmutación sincrónica de canal descrita por el estándar IEEE 1609.4. El análisis se limita a las razones de datos más bajas definidas por el estándar IEEE 802.11p, debido a que presentan una mayor robustez frente a la interferencia y el ruido. El patrón de radiación de las antenas instaladas en los vehículos es omnidireccional y no existen pérdidas en el sistema siendo ($G_T = G_R = L = 1$). Los rangos de comunicación (RC), detección (RD) e interferencia (RI) se consideran constantes. No existen aplicaciones generando tráfico e interferencia, o sea, los nodos solo se comunican mediante la difusión periódica de *beacons* de un salto (*one-hop*). Dada una potencia de transmisión de *beacon* (P_{Tx}) para cada nodo $n_i \in N_x = \{n_1, \dots, n_n\}$, el rango de comunicación (RC), detección (RD) e interferencia (RI) de n_i bajo P_{Tx} , denotado como $RC(n_i, P_{Tx})$, $RD(n_i, P_{Tx})$ y $RI(n_i, P_{Tx})$ respectivamente, es la intersección entre el rango de comunicación, detección e interferencia del nodo n_i a la potencia de transmisión P_{Tx} y la región de despliegue (R), mientras que un vehículo circundante n_k se comunica, detecta e interfiere a n_i cuando la posición de n_i está dentro del rango de comunicación (RC), detección (RD) e interferencia (RI) del vehículo circundante n_k , o sea, $x(i, t) \in RC, RD, RI(n_k, P_{Tx})$.

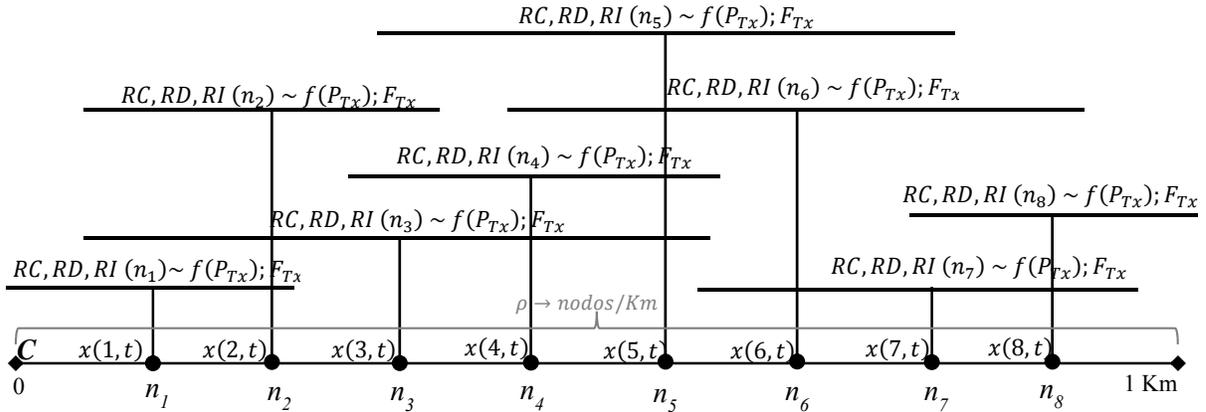


Figura 2.2: Topología del modelo considerando a la carretera como una línea recta de longitud igual a 1 Km.

2.2.1 Frecuencia de transmisión (F_{Tx})

La frecuencia de transmisión (F_{Tx}) determina el número de *beacons* por segundo generado por un nodo. Como los *beacons* se utilizan para crear conocimiento cooperativo, la F_{Tx} debe tener un valor tal que provea información precisa sobre los nodos circundantes. Los esquemas de *beaconing* que usan frecuencia y potencia de transmisión fijas tienen varios inconvenientes, por ejemplo, utilizar una alta F_{Tx} resulta en un menor error de posición, pero se incrementa la probabilidad de colisión sobre todo en escenarios con elevada densidad de nodos. Reducir la F_{Tx} en estos escenarios disminuye la probabilidad de colisión, pero el incremento del error de posición puede degradar de manera significativa el nivel de conocimiento cooperativo. Una forma de resolver este problema es desarrollar un algoritmo de *beaconing* adaptativo que controle la F_{Tx} y P_{Tx} . Una variante puede ser que cada nodo ajuste dinámicamente la F_{Tx} en función de su velocidad y aceleración para generar un error de posición límite definido que provea un nivel aceptable de conocimiento cooperativo, mientras controla la P_{Tx} en función de la carga relativa del canal de comunicaciones para reducir la probabilidad de colisión y la razón de pérdida de paquetes.

En la Figura 2.3 se muestran los parámetros que influyen en el error de posición promedio percibido por un auto circundante n_k cuando un vehículo n_i se desplaza con cierta velocidad y aceleración. Al comienzo del intervalo de *beacon* (I_b) el vehículo se mueve con una velocidad inicial mayor que cero ($v_i > 0$), mientras que al final del intervalo de *beacon* la velocidad del vehículo puede ser mayor, igual o menor que el valor de velocidad inicial ($v_F \geq v_i, v_F < v_i$). Si durante el intervalo de *beacon* el vehículo se mueve con aceleración (a_c) constante, el error de posición promedio que perciben los vehículos circundantes se puede estimar a través de la ecuación 2.1.

$$E_{Prom} = \frac{E_{Mín} + E_{Máx}}{2} = \frac{v_i \times D_{TxRx} + \left(\frac{v_i + v_F}{2}\right) \times I_b + v_F \times D_{TxRx}}{2} \quad (2.1)$$

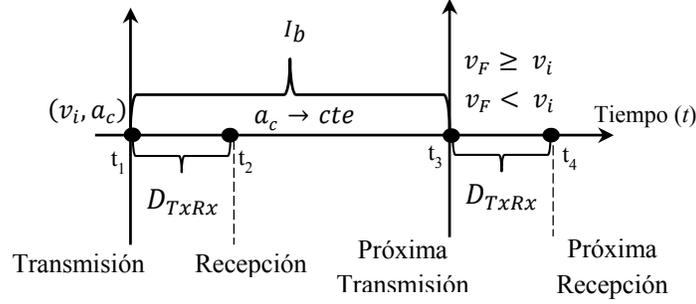


Figura 2.3: Parámetros que influyen en el error de posición promedio asumiendo que durante el intervalo de beacon el vehículo se desplaza con aceleración constante.

La aceleración del vehículo está definida por la variación de su velocidad durante el intervalo de *beacon*:

$$a_c = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v_F - v_i}{I_b} \quad (2.2)$$

Despejando v_F de (2.2) y sustituyendo en (2.1) se obtiene (2.3), donde E_{Prom} está en función de a_c , v_i e I_b :

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

Desarrollando matemáticamente (2.3) se obtiene (2.4), que es un polinomio de segundo grado con la forma siguiente: $A \times I_b^2 + B \times I_b + C$, siempre y cuando A , B y C sean constantes con $A \neq 0$:

$$0 = a_c \times I_b^2 + 2(v_i + a_c \times D_{TxRx})I_b + 4(v_i \times D_{TxRx} - E_{Prom}) \quad (2.4)$$

En (2.4), los valores de las constantes A , B y C se encuentran definidos por las expresiones siguientes:

$$A = a_c;$$

$$B = 2(v_i + a_c \times D_{TxRx});$$

$$C = 4(v_i \times D_{TxRx} - E_{Prom});$$

El discriminante (D) y las soluciones del polinomio ($I_{b_{1,2}}$) se determinan a través de (2.5) y (2.6):

$$D = B^2 - 4 \times A \times C \quad (2.5)$$

$$I_{b_{1,2}} = \frac{-B \pm \sqrt{D}}{2A} \quad (2.6)$$

Seleccionando la solución correcta $S(I_{b_{1,2}})$ es posible calcular la F_{Tx} necesaria para generar un E_{Prom} límite:

$$F_{Tx} = \frac{1}{S(I_{b_{1,2}})} \quad (2.7)$$

En la Figura 2.4 se muestra la frecuencia de transmisión de *beacon* que debe utilizar el nodo n_i en función de su velocidad y aceleración para que un auto circundante n_k perciba un error de posición promedio límite igual a un metro, calculada a través de la ecuación 2.4 y asumiendo una $D_{TxRx} = 0.001$ s. Para una velocidad de 18 Km/h y una aceleración de 0.5 m/s² (entorno residencial), el vehículo debe utilizar una frecuencia de 3 Hz para generar un error de posición promedio igual a un metro. Con una velocidad próxima a los 54 Km/h y aceleración de 2.5 m/s² (área metropolitana), se deben utilizar una frecuencia de 8 Hz. Si la velocidad se eleva hasta los 109 Km/h y la aceleración alcanza los 3.5 m/s² (carreteras rurales), se necesitan 16 Hz para mantener la misma resolución, mientras que para una velocidad de 163 Km/h y aceleración de 4.5 m/s² (autopista) se requieren 24 Hz.

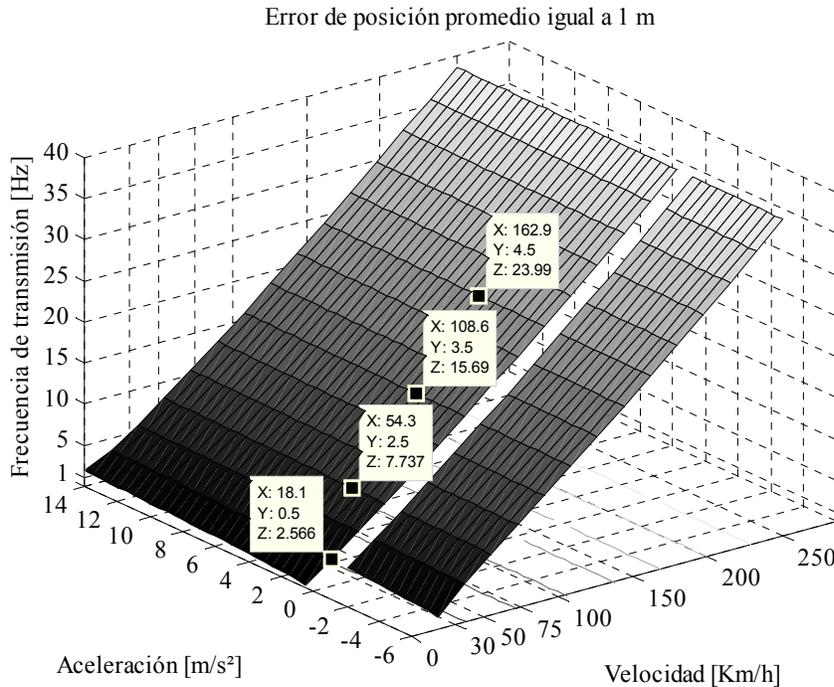


Figura 2.4: Frecuencia de transmisión para generar un error de posición promedio de 1 m según la velocidad y aceleración del vehículo, calculada según (2.4) y con una $D_{TxRx} = 0.001$ s.

2.2.2 Carga relativa del canal (C_{RC})

En los entornos vehiculares, computar la carga en el canal de comunicaciones es importante para influenciar la potencia de transmisión de los nodos de la red, y así controlar la congestión [75]. Se sabe, que un incremento en la carga del sistema eleva la probabilidad de colisión y disminuye la razón de entrega de paquetes. En este trabajo, la carga relativa del canal de comunicaciones se modela según el enfoque descrito en [76]-[77], que combina los aspectos siguientes: a) atenuación de señal en presencia de un solo par transmisor-receptor, y b) el problema del terminal oculto, que tiene un fuerte impacto en escenarios donde hay múltiples transmisores.

Experimentos en carreteras reales han demostrado que el modelo de desvanecimiento rápido de Nakagami (Nakagami fast fading model), en combinación con el modelo de pérdida de trayectoria Friis/Two-Ray-Ground (*Friis/Two-Ray- Ground path loss model*), representan adecuadamente la radiopropagación en entornos vehiculares [78]. Killat et. al. [79] utilizó un modelo sintonizado de la distribución m de Nakagami para derivar una función que computa la probabilidad de recepción exitosa de paquete (P_{Nak}^{Rx}) para un solo par transmisor – receptor, en función del rango de comunicación (RC) del vehículo transmisor y la distancia (d) existente entre el transmisor (Tx) y receptor (Rx). El modelo divide el rango de comunicación en dos partes: para distancias pequeñas se considera el modelo de pérdida de trayectoria Friis, mientras que para distancias grandes se utiliza el modelo de pérdida de trayectoria Two-Ray-Ground. La distancia a la que se realiza la división se conoce como distancia de transición (cross-over distance) (d_{Co}) y se calcula mediante la ecuación 2.8, donde (h_{Tx}) y (h_{Rx}) son las alturas en metros de las antenas transmisoras y receptoras, y λ es la longitud de onda de la señal.

$$d_{Co} = 4\pi \left(\frac{h_{Tx} h_{Rx}}{\lambda} \right) \quad (2.8)$$

La probabilidad de recepción exitosa de paquete se calcula usando las ecuaciones siguientes:

$$Pr_{Nak}^{Rx}(d, RC) = \begin{cases} e^{-3\left(\frac{d}{RC}\right)^2} \times \left(1 + 2\left(\frac{d}{RC}\right)^2 + \frac{9}{2}\left(\frac{d}{RC}\right)^4 \right), & \text{si } d \leq d_{Co}; \\ e^{-3\gamma\left(\frac{d^2}{RC}\right)^2} \times \left(1 + 2\gamma\left(\frac{d^2}{RC}\right)^2 + \frac{9}{2}\gamma^2\left(\frac{d^2}{RC}\right)^4 \right), & \text{si } d > d_{Co}; \end{cases} \quad (2.9)$$

El parámetro γ depende de la altura de la antena transmisor y receptora, y de la longitud de onda de la señal:

$$\gamma = \left(\frac{\lambda}{4\pi h_{Tx} h_{Rx}} \right)^2 = (d_{Co})^{-2} \quad (2.11)$$

En la Figura 2.5 se visualiza la probabilidad de recepción exitosa de paquetes para diferentes rangos de comunicación, según la distancia del transmisor al receptor, calculada mediante las

expresiones 2.9 y 2.10. Se consideran antenas transmisoras y receptoras de 1.5 m de altura, y una longitud de onda igual a 5.08 cm correspondiente a la frecuencia central del canal de control ($f_{CCH} = 5.89$ GHz) del espectro designado por la FCC para las DSRC en los Estados Unidos. Las curvas muestran que para los distintos rangos de comunicación, un incremento en la distancia del transmisor al receptor reduce la probabilidad de recepción, mientras que para una distancia transmisor – receptor constante, el aumento de la potencia de transmisión eleva la probabilidad de recepción. En la figura se señala la distancia de transición, que para estos parámetros es 556 m.

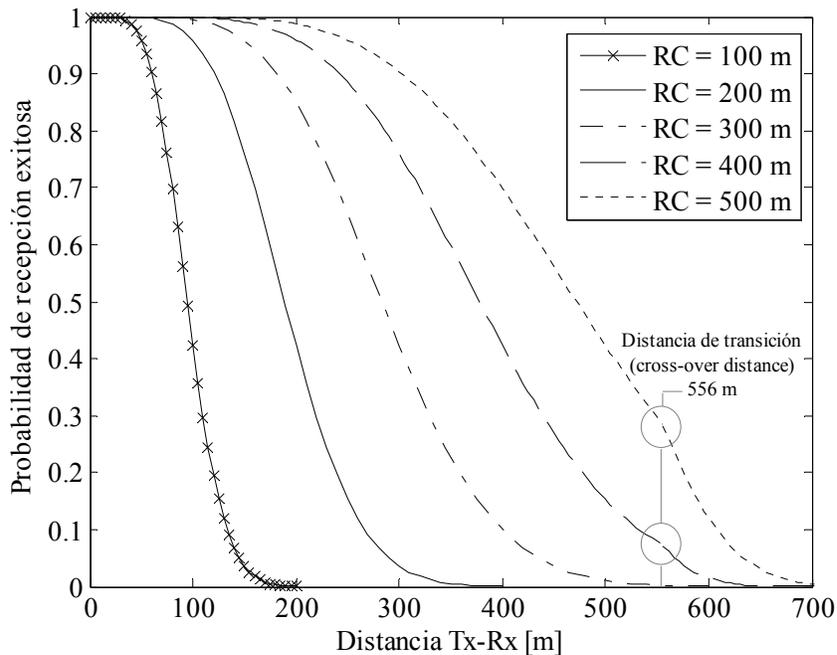


Figura 2.5: Probabilidad de recepción exitosa de paquetes en función del rango de comunicación (RC) y la distancia del transmisor (Tx) al receptor (Rx).

En escenarios con múltiples transmisores, la probabilidad de recepción exitosa de paquetes es menor que para un solo par transmisor – receptor. El problema del terminal oculto es la causa principal para las pérdidas de paquetes en escenarios CSMA/CA, donde se transmite en modo *broadcast*. Un incremento en la densidad de nodos eleva la probabilidad de que dos o más estaciones seleccionen el mismo contador de *backoff* e inicien una transmisión simultánea, resultando en colisiones de paquetes. Para modelar la probabilidad de que un nodo pueda transmitir exitosamente a otro nodo en escenarios con varios transmisores, se usa el enfoque descrito en [80].

El tiempo requerido para transmitir un *beacon* (D_{Tx}) se estima mediante la ecuación (2.12), donde (D_H) es el tiempo necesario para transmitir el preámbulo y encabezado PLCP, (T_b) es el tamaño del *beacon* en bits y (R) representa la razón de datos del canal de comunicaciones

en bits/s. En la Figura 2.6 se muestra la demora de transmisión según el tamaño de *beacon* calculada a través de (2.12), para una D_H de 40 μs [80] y R igual a 6 Mbits/s [46]. Se observa que las demoras están entre los 373 y 1107 μs para *beacons* cuyos tamaños varían entre los 250 y 800 bytes [25].

$$D_{Tx} = D_H + \frac{T_b}{R} \quad (2.12)$$

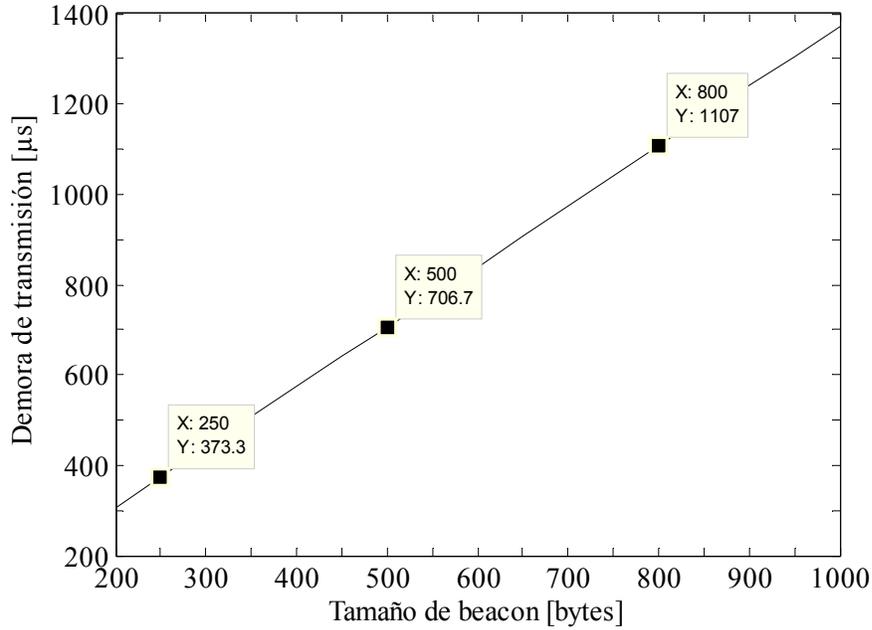


Figura 2.6: Demora de transmisión en función del tamaño de beacon computada a través de la ecuación 2.12 para un $D_H = 40 \mu\text{s}$ y $R = 6 \text{ Mbits/s}$.

El modelo descrito en [80], se basa en dividir el intervalo de *beacon* en ranuras de transmisión (*transmission slots*), como se representa en la Figura 2.7. La duración de un *slot* es igual al tiempo que requiere transmitir un *beacon* (D_{Tx}). El intervalo de *beacon* (I_b) es el tiempo de vida útil de un paquete, o sea, el tiempo dentro del cual se debe transmitir un *beacon* porque la transmisión del próximo *beacon* hace que este expire. Mediante la ecuación 2.13 se determina el número de *slots* de transmisión (n_{slot}) en función del intervalo de *beacon* y la demora de transmisión.

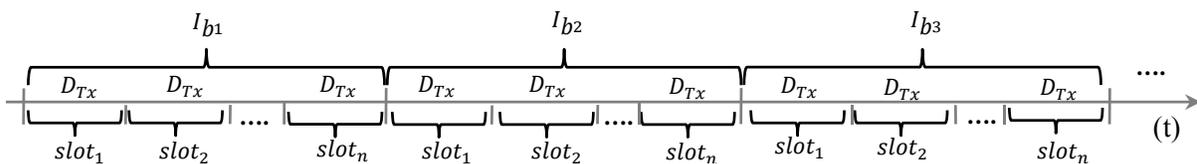


Figura 2.7: División del intervalo de beacon en slots de transmisión [80].

$$n_{slot} = \frac{I_b}{D_{Tx}} = \frac{I_b}{D_H + \frac{T_b}{R}} \quad (2.13)$$

En la Figura 2.8 se muestra el número de *slots* de transmisión para un tamaño de *beacon* que varía entre 250 y 800 bytes, y un intervalo de *beacon* comprendido entre 0 s ($F_{Tx} = +\infty$) y 1 s ($F_{Tx} = 1 \text{ Hz}$). Según las líneas, un incremento en el intervalo de *beacon* eleva el número de *slots* de transmisión, mientras que un aumento en el tamaño de *beacon* los reduce. Para una frecuencia de transmisión de 1 Hz ($I_b = 1 \text{ s}$) y un *beacon* de 250 bytes, se alcanzan los 2679 *slots* de transmisión. Sin embargo, para este tamaño de *beacon* y una frecuencia de 10 Hz ($I_b = 0.1 \text{ s}$) se obtienen aproximadamente 268 *slots*. Para *beacons* con más de 250 bytes y frecuencias de transmisión superiores a los 10 Hz ($I_b < 0.1 \text{ s}$), no se sobrepasan los 268 *slots* de transmisión.

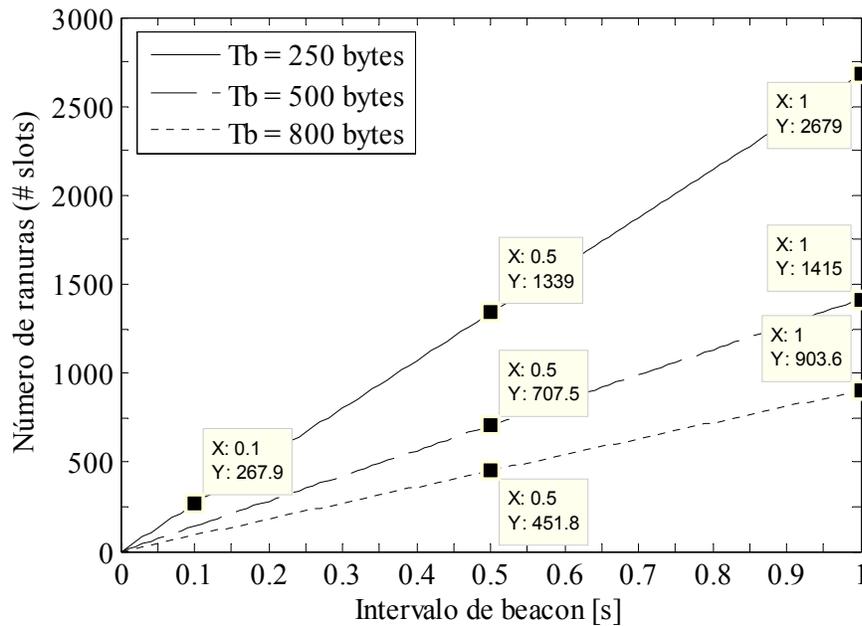


Figura 2.8: Número de ranuras (# slots) en función del tamaño e intervalo de beacon calculado según (2.13) para un $D_H = 40 \mu\text{s}$ y $R = 6 \text{ Mbits/s}$.

El modelo considera la probabilidad de que dos nodos los cuales están uno dentro del rango de comunicación del otro inicien una transmisión al mismo tiempo, y la probabilidad de que un nodo oculto interfiera con una transmisión en curso. El número de terminales ocultos se establece en el peor caso, como se observa en la Figura 2.9, donde para la transmisión de un *beacon* desde un transmisor (n_9) a un receptor (n_5) existen $n/2$ receptores compartidos y $n/2$ terminales ocultos. Los rangos de comunicación (RC), detección (RD) e interferencia (RI) de los nodos se asumen iguales y con un valor de 500 m. La carretera tiene una longitud de 1 Km y los nodos están separados a 125 m.

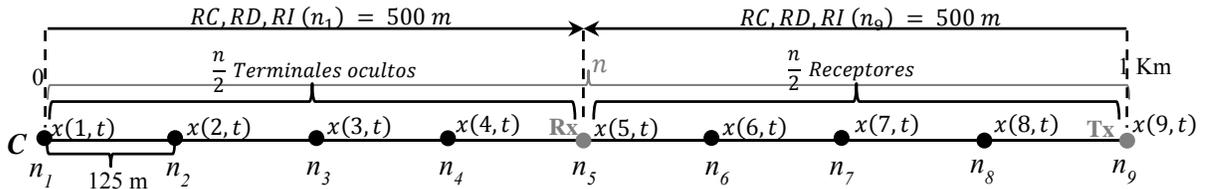


Figura 2.9: Problema del terminal oculto - Representación del peor caso [80].

La probabilidad de que para un *slot* dado un nodo intente una transmisión (si detecta el medio desocupado) se denota (P_a) y se calcula a través de la ecuación 2.14. La probabilidad de que para un *slot* dado un nodo no intente una transmisión (si detecta el medio desocupado) es $(1 - P_a)$. En la Figura 2.10 se muestra la probabilidad (P_a) y $(1 - P_a)$ en función del número de *slots* de transmisión. Para un *slot* de transmisión, P_a presenta su valor máximo (1) y $1 - P_a$ su valor mínimo (0), mientras que para dos *slots* de transmisión ambas son del 50 %. Un incremento en el número de *slots* produce una disminución en P_a y un crecimiento en $1 - P_a$. Cuando existen 20 o más *slots* de transmisión, P_a cae por debajo del 5 % mientras que $1 - P_a$ excede el 95 %.

$$P_a = \frac{1}{n_{slot}} = \frac{D_{Tx}}{I_b} = \frac{D_H + \frac{T_b}{R}}{I_b} \tag{2.14}$$

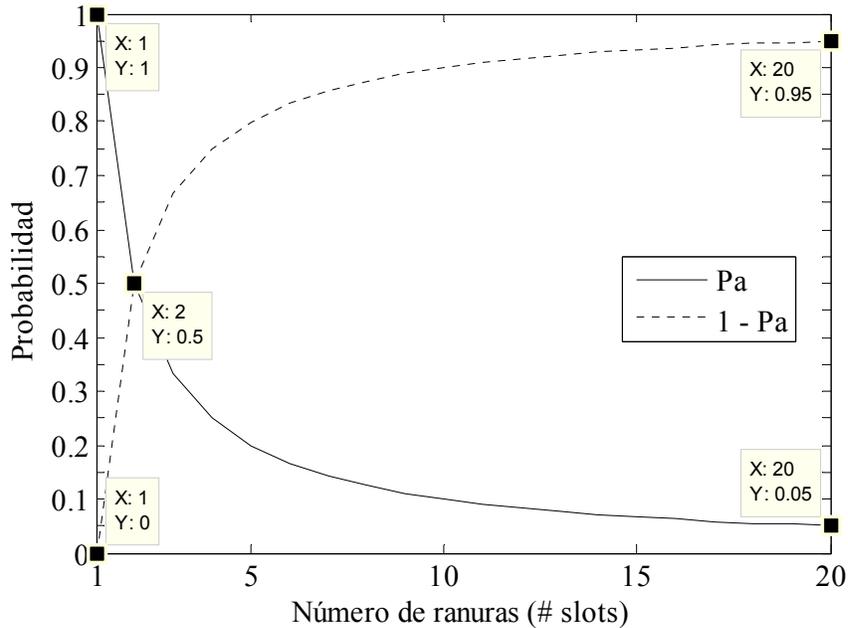


Figura 2.10: Probabilidad de que para un slot dado un nodo intente (P_a) y no intente ($1 - P_a$) una transmisión, en función del número de slots.

La probabilidad de que $n/2$ nodos no comiencen una transmisión al mismo tiempo en ese *slot* es:

$$Pr_{slot}^{\overline{Tx}}(I_b, T_b, n) = \prod_{i=1}^{\frac{n}{2}} (1 - P_{a_i}) = (1 - P_{a_1})(1 - P_{a_2}) \dots (1 - P_{a_{\frac{n}{2}}}) \quad (2.15)$$

Las transmisiones de n_9 pueden sufrir interferencia de los terminales ocultos que inician una transmisión: a) durante el tiempo de transmisión de n_9 , y b) durante el *slot* previo al *slot* de transmisión de n_9 . Por tanto, el periodo de vulnerabilidad de *beacon* o periodo de interferencia es el doble de la demora de transmisión de *beacon* ($2D_{Tx}$). Mediante la ecuación 2.16 se determina la probabilidad de que $n/2$ terminales ocultos no interfieran con una transmisión de n_9 hacia n_5 .

$$Pr_{Toocult}^{\overline{Interf}}(I_b, T_b, n) = \prod_{i=1}^{\frac{n}{2}} (1 - 2P_{a_i}) = (1 - 2P_{a_1})(1 - 2P_{a_2}) \dots (1 - 2P_{a_{\frac{n}{2}}}) \quad (2.16)$$

La probabilidad de que n_9 transmita exitosamente a n_5 se modela como la probabilidad de que (dado el medio libre y $n/2$ receptores compartidos) solo n_9 inicie una nueva transmisión, o sea, que $n/2$ nodos no inicien una transmisión al mismo tiempo en el *slot* de transmisión de n_9 , multiplicada por la probabilidad de que $n/2$ terminales ocultos no interfieran con la transmisión de n_9 hacia n_5 . Esta probabilidad se denota como Pr_{Ext}^{Tx} y se calcula mediante 2.17.

$$Pr_{Ext}^{Tx}(I_b, T_b, n) = Pr_{slot}^{\overline{Tx}} \times Pr_{Toocult}^{\overline{Interf}} \quad (2.17)$$

Si todos los nodos del escenario usan el mismo tamaño de *beacon* y frecuencia de transmisión, la probabilidad de transmisión exitosa se puede calcular a través de la ecuación 2.18. En la Figura 2.11 se muestra la probabilidad de transmisión exitosa en función del número de nodos y frecuencia de transmisión computada a través de (2.18), para un tamaño de *beacon* de 500 bytes, D_H de 40 μ s y R igual a 6 Mbits/s. Se observa que un incremento en el número de nodos y frecuencia de transmisión de *beacon* conduce a una menor probabilidad de transmisión exitosa.

$$Pr_{Ext}^{Tx}(I_b, T_b, n) = [(1 - P_a)(1 - 2P_a)]^{\frac{n}{2}} \quad (2.18)$$

La frecuencia a la que n_5 recibe *beacons* de n_9 (F_{Rx}) se estima multiplicando la frecuencia de transmisión de n_9 (F_{Tx}) por la probabilidad de recepción exitosa de n_5 (P_{Ext}^{Rx}).

$$F_{Rx_{n_5}} = F_{Tx_{n_9}} \times P_{Ext_{n_5}}^{Rx} \quad (2.19)$$

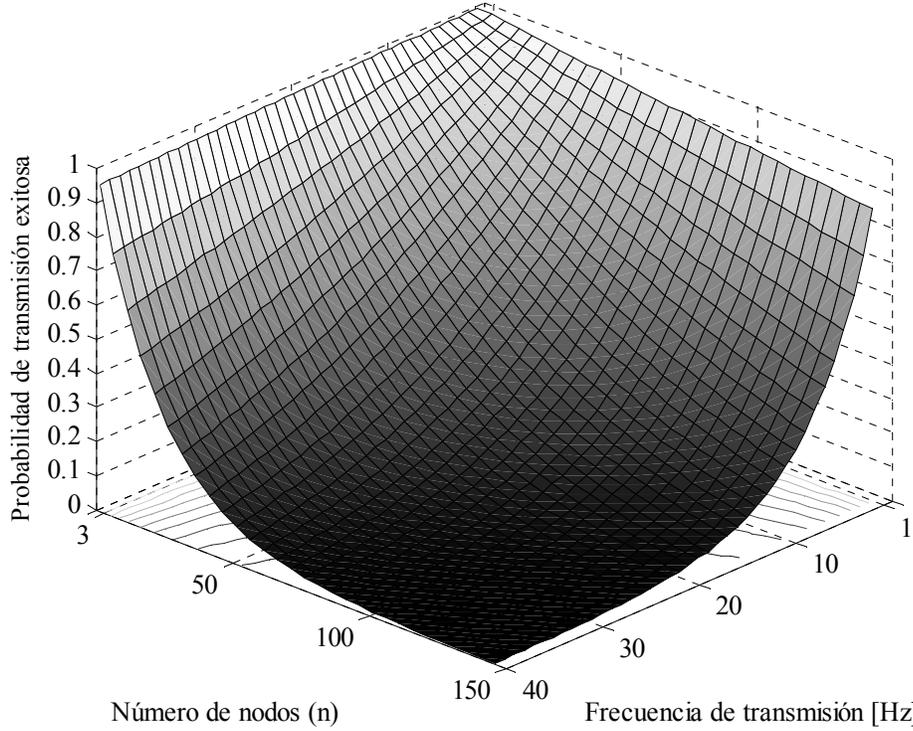


Figura 2.11: Probabilidad de transmisión exitosa calculada según (2.18) para un tamaño de beacon de 500 bytes, $D_H = 40 \mu s$ y $R = 6$ Mbits/s.

La probabilidad de recepción exitosa de n_5 (P_{Ext}^{Rx}) es la probabilidad de recepción exitosa de n_5 según Nakagami (P_{Nak}^{Rx}), multiplicada por la probabilidad de transmisión exitosa de n_9 (P_{Ext}^{Tx}).

$$Pr_{Ext n_5}^{Rx}(d, RC, I_b, T_b, n) = Pr_{Nak n_5}^{Rx} \times Pr_{Ext n_9}^{Tx} \quad (2.20)$$

La carga relativa del canal normalizada de un nodo n_i con respecto a los nodos circundantes n_k se calcula como sigue:

$$C_{RC N n_i} = \frac{\sum_{k=1}^n F_{Tx n_k} [Hz] \times T_{b n_k} [bits] \times P_{Ext n_i \rightarrow n_k}^{Rx}}{R [bits/s]} \quad \text{donde } x(i, t) \in RC, RD, RI(n_k, P_{Tx}) \quad (2.21)$$

Donde, la carga de *beaconing* (C_B) generada por un nodo n_k es:

$$C_{B n_k} = F_{Tx n_k} [Hz] \times T_{b n_k} [bits] \quad (2.22)$$

2.2.3 Potencia de transmisión (P_{Tx})

El ajuste dinámico de la frecuencia de transmisión en función de la velocidad y aceleración del vehículo para generar un error de posición límite definido, eleva la relevancia contextual de la

información contenida en el *beacon* y el nivel de conocimiento cooperativo de la red *ad-hoc* vehicular. No obstante, en escenarios con altas densidades de vehículos el uso de una mayor frecuencia de transmisión puede congestionar el canal de comunicaciones, conduciendo a un incremento significativo en el número de colisiones y en la razón de pérdida de paquetes. Los mecanismos de control de la potencia de transmisión impactan en el número de vehículos circundantes que reciben los *beacons* transmitidos y en los que sufren interferencia. Una mayor potencia de transmisión extiende el rango de comunicación del vehículo, elevando la probabilidad de recepción de una sola transmisión, pero al mismo tiempo incrementa la probabilidad de colisión para todas las transmisiones, lo que conduce a un aumento en la razón de pérdida de paquetes y error de posición. El ajuste de la potencia de transmisión del vehículo en función de parámetros como: carga relativa del canal, densidad de nodos, frecuencia de transmisión, velocidad del vehículo, etc., es una estrategia que en redes vehiculares mejora el nivel de conocimiento cooperativo y contribuye al desempeño efectivo de las aplicaciones de seguridad vial.

Según el código de tráfico y seguridad vial de España [81], todo conductor de un vehículo que circule detrás de otro deberá dejar entre ambos un espacio libre que le permita detenerse, en caso de frenado brusco, sin colisionar con él, teniendo en cuenta especialmente la velocidad, condiciones de adherencia y frenado. La distancia de detención (d_D), es la distancia recorrida por un vehículo obligado a detenerse tan rápidamente como sea posible, medida desde el momento en que aparece el objeto que motiva la detención. En la ecuación 2.23 se observa que la (d_D) es la suma de la distancia recorrida durante el tiempo de percepción - reacción (d_{PR}) y el de frenado (d_F).

$$d_D = d_{PR} + d_F \quad (2.23)$$

El tiempo de percepción - reacción (t_{PR}), es el tiempo transcurrido desde el momento en que el conductor observa un objeto en la vía hasta que reacciona aplicando los frenos. El (t_{PR}) varía en función de las características del conductor, condiciones meteorológicas, tipo de objeto, etc. La asociación americana de autopista estatal y funcionarios de transportación (*AASHTO, American Association of State Highway and Transportation Officials*) define un t_{PR} igual a 1.5 s. La distancia de percepción - reacción (d_{PR}) es la distancia recorrida por el vehículo durante el t_{PR} .

$$d_{PR} = v \times t_{PR} + \frac{a_c \times t_{PR}^2}{2} \quad (2.24)$$

La distancia de frenado (d_F) es la distancia recorrida por el vehículo desde el instante en que el conductor presiona el freno hasta que el vehículo se detiene completamente. El cálculo de la d_F se realiza a través del teorema de la energía cinética, el cual aplicado a este caso consiste en que el trabajo de la fuerza resultante implicada en el frenado es igual a la variación de la energía cinética del vehículo. En la ecuación 2.25, (v) es la velocidad del

vehículo antes de accionar el freno, (μ) es el coeficiente de rozamiento longitudinal, (g) es la aceleración de la gravedad (9.8 m/s^2), (a_c) es la máxima desaceleración que los frenos pueden brindar y (φ) es el ángulo de inclinación de la vía. Si el frenado se produce en una rampa con inclinación tal que tiende a desacelerar el vehículo, el término ($\pm g \text{ Sen} \varphi$) se utiliza en (2.25) con signo positivo, pues se reduce la distancia de frenado, mientras que si el frenado se realiza en una rampa con inclinación tal que tiende a favorecer el movimiento del vehículo, el término ($\pm g \text{ Sen} \varphi$) se utiliza en (2.25) con signo negativo, pues se incrementa la distancia de frenado. En la Figura 2.12 se muestra la distancia de frenado según la velocidad del vehículo para distintos coeficientes de rozamiento, considerando una desaceleración de -6 m/s^2 y una vía sin inclinación ($\varphi = 0^\circ$).

$$d_F = \frac{v^2}{2(\mu g \text{Cos} \varphi + a_c \pm g \text{ Sen} \varphi)} \quad (2.25)$$

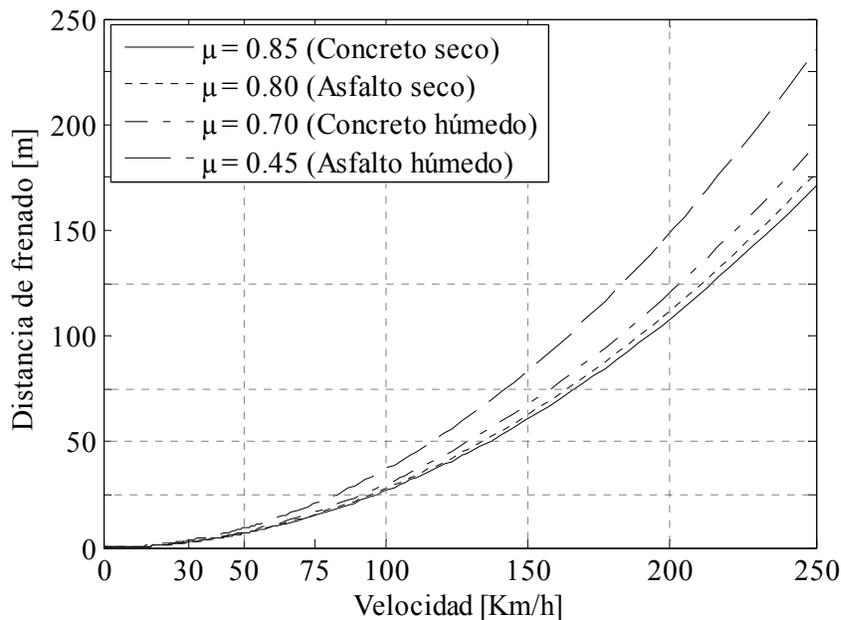
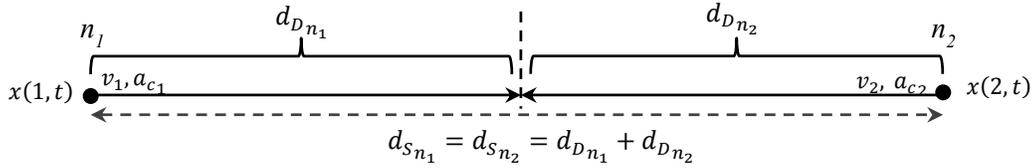


Figura 2.12: Distancia de frenado en función de la velocidad del vehículo calculada según (2.25) para una desaceleración de -6 m/s^2 y $\varphi = 0^\circ$.

La distancia de seguridad (d_s) es la distancia mínima necesaria para que dos vehículos que se desplazan en la misma dirección pero en sentido contrario (uno al encuentro del otro), en caso de detectar un evento peligroso puedan detenerse sin causar a una colisión. Esta situación se representa en la Figura 2.13, donde n_1 y n_2 tienen cierta velocidad y aceleración, siendo la distancia de seguridad de ambos nodos la suma de sus distancias de detención, como se refleja en la ecuación 2.26.

$$d_{s_{n_i}} = d_{D_{n_i}} + d_{D_{n_k}} \quad (2.26)$$


 Figura 2.13: Distancia de seguridad del nodo n_i en función de la distancia de detención de n_i y n_k .

El nodo n_i puede estar en movimiento o detenido, y rodeado o no por n_k nodos circundantes, por lo que es necesario establecer su distancia de seguridad en función de los distintos estados. La Tabla 2.1 muestra los posibles métodos de cálculo de la distancia de seguridad del nodo n_i según el contexto.

 Tabla 2.1 Métodos de cálculo de la distancia de seguridad del nodo n_i

Contexto	Método de cálculo	Descripción
Nodo en movimiento y rodeado	$d_{Sn_i} = d_{Dn_i} + d_{Dmáxn_k}$	El nodo n_i se desplaza con cierta velocidad y presenta uno o varios nodos circundantes n_k registrados en su base de datos LDM
Nodo en movimiento y aislado	$d_{Sn_i} = 2 \times d_{Dn_i}$	El nodo n_i se desplaza con cierta velocidad y no tiene nodos circundantes n_k registrados en su base de datos LDM
Nodo detenido y rodeado	$d_{Sn_i} = d_{Dmáxn_k}$	El nodo n_i está detenido y tiene uno o varios nodos circundantes n_k registrados en su base de datos LDM
Nodo detenido y aislado	$d_{Sn_i} = d_{Smin}$	El nodo n_i está detenido y no tiene nodos circundantes n_k registrados en su base de datos LDM

$d_{Dmáxn_k}$: Distancia de detención máxima registrada en la base de datos LDM, d_{Smin} : Distancia de seguridad mínima del nodo n_i

Una vez calculada la distancia de seguridad de n_i , la potencia de transmisión mínima (P_{Txmin}) se determina a través de la ecuación 2.27, donde P_{Rx} es la potencia recibida, G_{Tx} y G_{Rx} son las ganancias de las antenas transmisora y receptora, mientras α es el exponente de pérdidas de trayectoria.

$$P_{Txmin} = \frac{P_{Rx}(4\pi)^2(d_s)^\alpha L}{G_{Tx}G_{Rx}\lambda^2} \quad (2.27)$$

La potencia de transmisión (P_{Tx}) del nodo n_i se computa a través de la ecuación 2.28, donde ΔP_{Tx} es el rango de variación de potencia, C_{RCN} la carga relativa del canal normalizada y F_{Tx} su frecuencia de transmisión. De la inspección de (2.28) se deduce que la condición primaria de n_i es definir una potencia de transmisión mínima para satisfacer su distancia de seguridad, la cual se incrementa en cierto valor de ΔP_{Tx} según la carga del canal de comunicaciones y su frecuencia de transmisión. Según [47], existe una alta carga de *beaconing* en la red cuando esta excede el 40 % de la capacidad del canal. De modo que cuando la carga relativa del canal normalizada alcanza el valor de 0.4, ΔP_{Tx} es cero y n_i transmite con la potencia mínima. Para valores de carga relativa del canal normalizada inferiores a 0.4, ΔP_{Tx} decrece con un aumento de la frecuencia de transmisión. En la Figura 2.14 se grafica la potencia de transmisión en

función de la carga relativa del canal normalizada y la frecuencia de transmisión, según (2.28), para una $P_{Tx_{min}}$ de 5 mW y un ΔP_{Tx} de 90 mW. Nótese, que para frecuencias de transmisión características de entornos de alta velocidad (superiores a los 5 Hz), el nodo n_i usa niveles de potencia cercanos al mínimo.

$$P_{Tx} = P_{Tx_{min}} + \frac{\Delta P_{Tx} \times (0.4 - C_{RCN}) \times 2.5}{F_{Tx}^2} \quad \text{donde } 0 \leq C_{RCN} \leq 0.4 \quad (2.28)$$

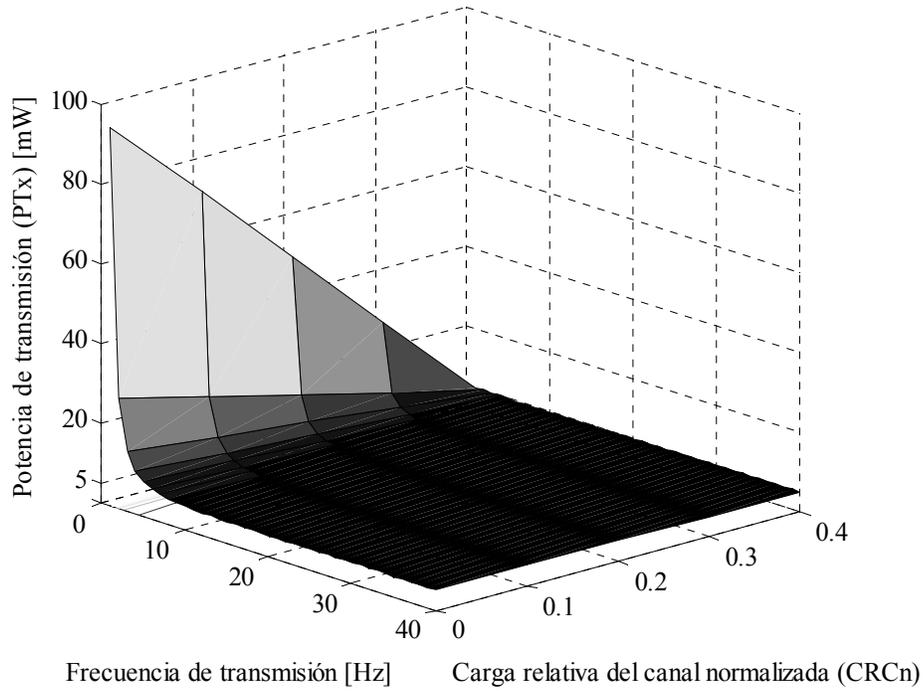


Figura 2.14: Potencia de transmisión en función de la carga relativa del canal normalizada y la frecuencia de transmisión del nodo, calculada según (2.28), para una potencia de transmisión mínima de 5 mW y una variación de potencia de 90 mW.

2.3 AdB-ADFP_{Tx}

En esta sección se presenta un algoritmo distribuido de *beaconing* que se basa en el ajuste dinámico de la frecuencia y potencia de transmisión (AdB-ADFP_{Tx}), para proveer un nivel de conocimiento cooperativo que permita el correcto desempeño de los casos de uso de seguridad vial y gestión del tráfico, que dependen del intercambio periódico de *beacons*. AdB-ADFP_{Tx} se ejecuta en cada nodo n_i un instante antes de la transmisión de un *beacon* para computar la frecuencia y potencia de transmisión. En la Figura 2.15 se observa que el funcionamiento de AdB-ADFP_{Tx} se puede dividir en dos fases: 1) cálculo de la frecuencia de transmisión de *beacon* y 2) cálculo de la carga relativa del canal normalizada, potencia de transmisión mínima y potencia de transmisión.

En la fase uno, AdB-ADFP_{Tx} calcula: 1) la frecuencia de transmisión de *beacon* en función de la velocidad y aceleración del nodo n_i para que los autos circundantes n_k perciban cierto error de posición promedio límite.

En la fase dos, AdB-ADFP_{Tx} calcula: 2) la probabilidad de recepción exitosa según Nakagami para cada nodo circundante n_k donde $x(i, t) \in RC(n_k, P_{Tx})$ (n_i usa los datos existentes en el *beacon* para calcular la distancia hasta n_k y el rango de comunicación de n_k), y probabilidad de transmisión exitosa para cada nodo n_k donde $x(i, t) \in RC(n_k, P_{Tx})$ (n_i obtiene del *beacon* la frecuencia de transmisión de cada nodo n_k , el número de nodos circundantes n_k de los que recibe *beacons* coincide con la cantidad de nodos registrados en la base de datos LDM y halla el número de terminales ocultos para cada nodo n_k), 3) probabilidad de recepción exitosa para cada nodo circundante n_k y la carga relativa del canal normalizada (n_i calcula la carga relativa de *beaconing* para cada nodo circundante n_k donde $x(i, t) \in RC(n_k, P_{Tx})$), 4) la distancia de percepción-reacción, distancia de frenado, distancia de detención, distancia de seguridad y potencia de transmisión mínima (n_i obtiene de los *beacons* la velocidad y aceleración de cada nodo circundante n_k donde $x(i, t) \in RC(n_k, P_{Tx})$, define el tiempo de percepción-reacción y la distancia de seguridad mínima), y 5) la potencia de transmisión (n_i especifica el intervalo de variación de potencia y utiliza una función no lineal decreciente para computar la potencia de transmisión).

ADB-ADFP_{Tx} PARA CADA NODO (n_i):

ENTRADA:

- 1) Posición ($P_{x,y}$), velocidad (v_i), aceleración (a_c) del nodo n_i y error de posición promedio límite definido (E_{prom}).
- 2) Posición ($P_{x,y'}$), velocidad (v_i'), aceleración (a_c'), potencia de transmisión ($P_{Tx'}$) y frecuencia de transmisión ($F_{Tx'}$) de cada nodo circundante n_k que tiene la posición del nodo n_i en su rango de comunicación $x(i, t) \in RC(n_k, P_{Tx})$.
- 3) Tamaño de beacon (T_b), tiempo de percepción - reacción (t_{PR}), inclinación de la vía (φ), coeficiente de rozamiento longitudinal (μ), variación del intervalo de potencia (ΔP_{Tx}), razón de datos del canal de comunicaciones (R), y distancia de seguridad mínima ($d_{s_{min}}$).

SALIDA: Frecuencia de transmisión (F_{Tx}) y potencia de transmisión (P_{Tx}) del nodo n_i .

FASE 1

1. Calcular la frecuencia de transmisión para generar un error de posición promedio límite;

FASE 2

2. Calcular la probabilidad de recepción exitosa según Nakagami y probabilidad de transmisión exitosa para cada nodo n_k ;
3. Calcular la probabilidad de recepción exitosa con respecto a cada nodo n_k y la carga relativa del canal normalizada;
4. Calcular la distancia de percepción-reacción, distancia de frenado, distancia de detención, distancia de seguridad y rango de comunicación mínimo;
5. Definir variación del rango de comunicación, y calcular el rango de comunicación y potencia de transmisión;

Figura 2.15: AdB-ADFP_{Tx} – Algoritmo distribuido de beaconing para VANETS.

2.3.1 Fase 1 - Ajuste dinámico de la frecuencia de transmisión (ADF_{Tx})

Cuando n_i difunde un *beacon* puede estar en los contextos que se muestran en la Tabla 2.2. La frecuencia de transmisión de *beacons* a utilizar por n_i para que los autos circundantes n_k perciban cierto error de posición promedio límite, se calcula según el diagrama de flujo de la Figura 2.16.

Tabla 2.2 Estados de movimiento del nodo n_i

Contexto	Valor de la velocidad y aceleración
Detenido	$v_i = 0$ y $a_c = 0$
Empezando a moverse	$v_i = 0$ y $a_c > 0$
En movimiento con velocidad constante	$v_i > 0$ y $a_c = 0$
En movimiento aumentando velocidad	$v_i > 0$ y $a_c > 0$
En movimiento disminuyendo velocidad	$v_i > 0$ y $a_c < 0$

El primer paso consiste en obtener la velocidad y aceleración del nodo n_i para determinar su estado de movimiento y definir el error de posición promedio límite que deben percibir los nodos n_k .

Si: $v_i = 0$ y $a_c = 0$, el nodo n_i está detenido. De (2.4) se observa que no existe polinomio, ya que $A = 0$, $B = 0$ y $C = -4E_{Prom}$. Como n_i no está en movimiento se adopta un I_b igual a un segundo.

Si: $v_i = 0$ y $a_c > 0$, el nodo n_i está empezando a moverse. De (2.4) se observa que existe polinomio, ya que $A = a_c$, $B = 2a_c D_{TxRx}$ y $C = -4E_{Prom}$. Como la aceleración de n_i es positiva el discriminante es mayor que cero ($D > 0$). El intervalo de *beacon* se determina ejecutando $I_{b_{1,2}}$ y un proceso de selección de soluciones $S(I_{b_{1,2}})$.

Si: $v_i > 0$ y $a_c = 0$, el nodo n_i está en movimiento con velocidad constante. De (2.4) se deduce que no existe polinomio, ya que $A = 0$, $B = 2v_i$ y $C = 4(v_i D_{TxRx} - E_{Prom})$. El I_b se calcula a través de la ecuación 2.29. Si I_b excede el valor máximo permitido, entonces se adopta un I_b de un segundo.

$$I_b = \frac{2(E_{Prom} - v_i D_{TxRx})}{v_i} \quad (2.29)$$

Si: $v_i > 0$ y $a_c > 0$, n_i está en movimiento aumentando velocidad. De (2.4) se observa que existe polinomio, pues $A = a_c$, $B = 2(v_i + a_c D_{TxRx})$ y $C = 4(v_i D_{TxRx} - E_{Prom})$. Debido a que la aceleración es positiva y la D_{TxRx} es muy pequeña, el discriminante es mayor que cero ($D > 0$). El intervalo de *beacon* se determina ejecutando $I_{b_{1,2}}$ y un proceso de selección de soluciones $S(I_{b_{1,2}})$.

Si: $v_i > 0$ y $a_c < 0$: n_i está en movimiento disminuyendo velocidad. De (2.4) se observa que existe polinomio, pues $A = a_c$, $B = 2(v_i + a_c D_{TxRx})$ y $C = 4(v_i D_{TxRx} - E_{Prom})$. Como la aceleración es negativa y la D_{TxRx} es muy pequeña, el discriminante puede ser mayor, igual o

menor cero ($D > 0, D \leq 0$). Cuando D es cero o negativo, se adopta un I_b de 0.2 segundos debido a que las situaciones donde un vehículo cambia su movimiento como por ejemplo el frenado brusco, tienen un alto potencial para eventos peligrosos [30], mientras que si D es positivo, el intervalo de *beacon* se determina ejecutando $I_{b_{1,2}}$ y un proceso de selección de soluciones $S(I_{b_{1,2}})$.

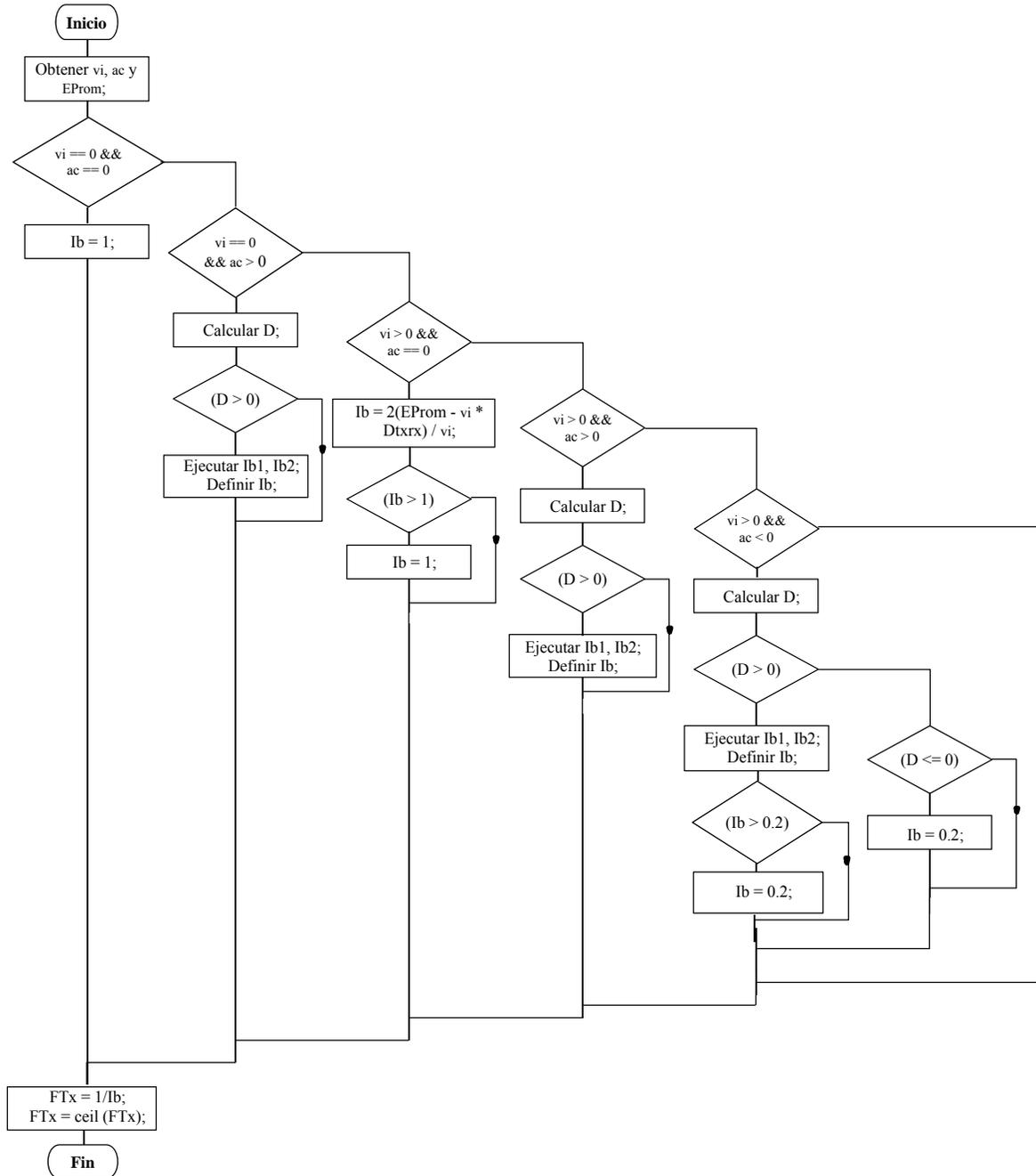


Figura 2.16: Cálculo de la frecuencia de transmisión de n_i para que los autos circundantes n_k perciban un error de posición promedio límite - Representación en diagrama de flujo.

2.3.2 Fase 2 - Ajuste dinámico de la potencia de transmisión (ADP_{Tx})

Una vez definida la frecuencia de transmisión de *beacon*, el nodo n_i computa la carga relativa del canal normalizada y la potencia de transmisión mínima. Si la carga relativa del canal normalizada no excede el 40 % de la capacidad del canal, la potencia de transmisión se halla según (2.28). En los casos donde la carga relativa del canal normalizada supera el 40 % de la capacidad del canal, n_i usa la potencia de transmisión mínima. En la Figura 2.17 se representa en diagrama de flujo el cálculo de la potencia de transmisión de n_i . Para definir la potencia de transmisión mínima, n_i computa la distancia de percepción-reacción, distancia de frenado y distancia de detención. La distancia de seguridad, n_i la determina según el contexto, o sea, en función de su velocidad y de si existen o no nodos circundantes n_k registrados en la base de datos LDM (ver Tabla 2.1) y la potencia de transmisión mínima a través de (2.27). En la Figura 2.18 se representa en diagrama de flujo el cálculo de la potencia de transmisión mínima.

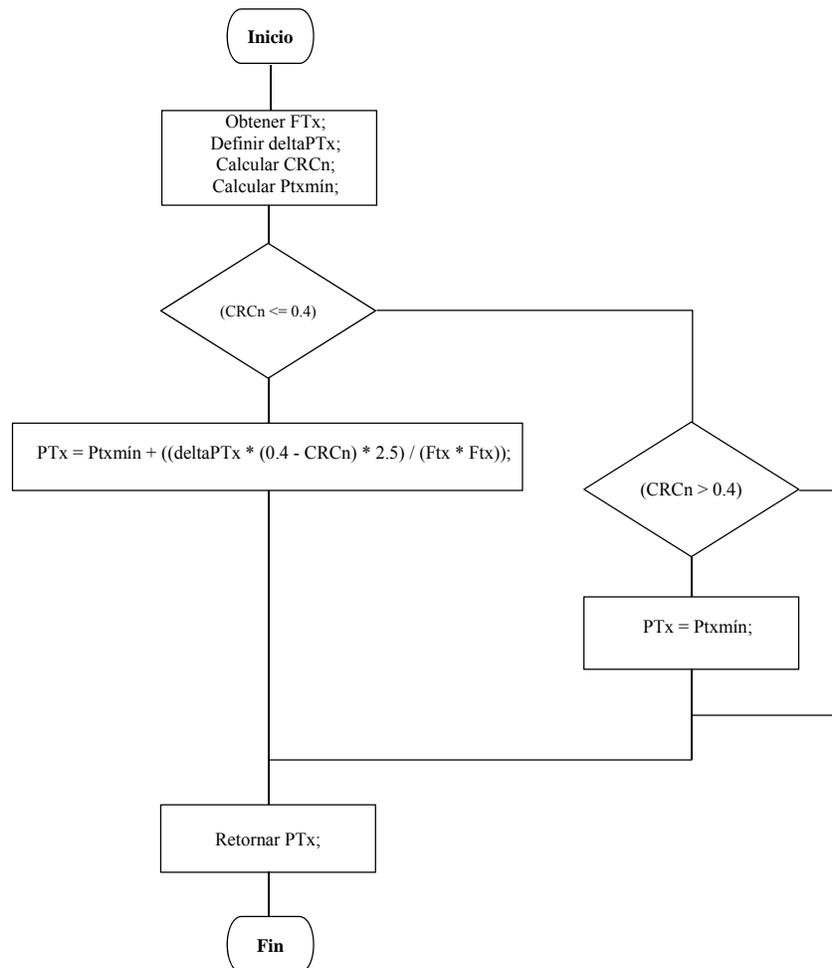


Figura 2.17: Cálculo de la potencia de transmisión de n_i - Representación en diagrama de flujo.

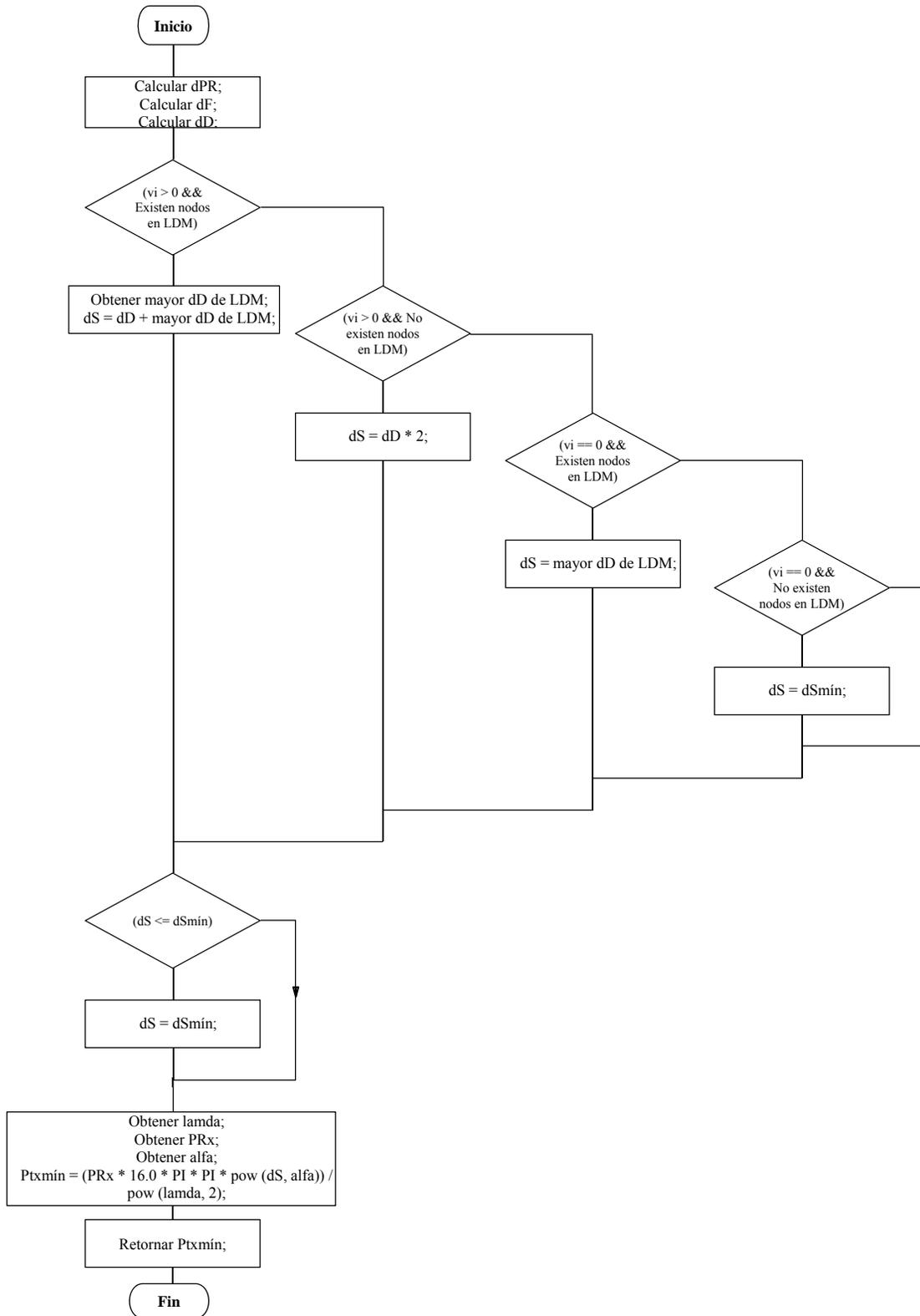


Figura 2.18: Cálculo de la potencia de transmisión mínima - Representación en diagrama de flujo.

2.4 Conclusiones parciales

Uno de los retos principales que presenta el *beaconing* en redes *ad-hoc* vehiculares es ajustar de forma dinámica los parámetros de transmisión, para elevar el conocimiento del entorno circundante y así, contribuir a un desempeño efectivo de los distintos casos de uso de gestión del tráfico y seguridad vial. El algoritmo distribuido de *beaconing* (AdB-ADFP_{Tx}) descrito en este capítulo, establece dinámicamente la frecuencia de transmisión en función de la velocidad y aceleración del vehículo para que los autos circundantes perciban un error de posición límite definido, mientras controla la potencia de transmisión en función de la carga relativa del canal y la frecuencia de transmisión para disminuir el número de colisiones y la razón de pérdida de paquetes. El nivel mínimo de potencia de transmisión se computa para que dos vehículos que viajan en la misma dirección pero en sentido contrario, se comuniquen cuando estén a una distancia que permita la toma de decisiones y capacidad de reacción de los conductores. El nivel máximo de potencia de transmisión se define teniendo en cuenta que un mayor alcance de comunicación, aumenta el número de colisiones y consecuentemente degrada el desempeño del sistema.

3. Evaluación del algoritmo en entornos VANETs

3.1 Herramientas

En este trabajo, las simulaciones se realizan con el proyecto de comunicaciones vehiculares Veins que acopla de forma bidireccional el simulador de red OMNeT++ y el simulador de tráfico SUMO, además se usa el simulador de tráfico realista MOVE para generar el modelo de movilidad vehicular.

Vehículos en Simulación de Red (*Veins, Vehicles in Network Simulation*) [82]: es un software de código abierto para la simulación de comunicaciones vehiculares que integra el simulador de red OMNeT++ y el simulador de tráfico SUMO. Incluye varias características que permiten a los usuarios realizar simulaciones VANETs con un alto grado de realismo, entre ellas están: comunicación bidireccional entre el simulador de tráfico y el simulador de red permitiendo el re-encaminamiento y re-configuración on-line de vehículos en reacción al intercambio de paquetes de red, uso de modelos de movilidad vehicular generados por la herramienta MOVE, implementación de los protocolos IEEE 1609.4/802.11p [83], efectos de interferencia y ruido, así como el uso de mapas de simulación reales provenientes del sitio OpenStreetMap [84] considerando las edificaciones. Esta herramienta está disponible para sistemas operativos Windows y Linux.

Banco de prueba de Red Modular Objetivo en C++ (*OMNeT++, Objective Modular Network Testbed in C++*) [85]: es un simulador de red de eventos discretos de código abierto basado en C++, altamente modular, escalable y bien estructurado. Provee la infraestructura necesaria para la utilización de diferentes proyectos de simulación los cuales tienen sus propios ciclos de lanzamiento. Se emplea principalmente para el modelado de redes alámbricas e inalámbricas, protocolos de comunicación, evaluación de aspectos de desempeño de sistemas de software complejos y validación de arquitecturas de hardware. Es usado comúnmente por instituciones de investigación académicas, se ejecuta tanto en plataformas Linux como Windows, y ofrece una ventana de líneas de comando así como una potente interfaz gráfica de usuario (IGU).

Simulación de Movilidad Urbana (*SUMO, Simulation of Urban MObility*) [86]: constituye una herramienta de código abierto para la simulación de tráfico vehicular. Está disponible para la mayoría de los sistemas operativos permitiendo desplegar casi todos los elementos que componen un escenario VANET realista. Incluye diferentes tipos de vehículos y modelos de movilidad, calles con límites de velocidad, carreteras multicarril, señales de tráfico e interfaz gráfica de usuario. Además puede gestionar escenarios con un elevado número de nodos e importar diferentes formatos de archivos de red, entre los que se encuentran: Visum, Vissim,

ArcView o descripciones XML. A través de la combinación de SUMO y mapas descargados del sitio OpenStreetMap, es posible simular tráfico vehicular en diferentes zonas del planeta.

Generador de modelos de Movilidad para redes *ad-hoc* Vehiculares (MOVE, MObility model generator for VEhicular networks) [87]: es un simulador de tráfico que permite generar modelos de movilidad realistas para simulaciones vehiculares. Está construido sobre SUMO facilitando su utilización por medio de una amigable y completa interfaz gráfica, además brinda la posibilidad de usar mapas generados por el usuario y también propone algunas topologías predefinidas como: las basadas en cuadrículas (*grid*), aleatorias (*random*) y con forma de telaraña (*spider*). Es compatible con los mapas TIGER y permite generar el patrón de movilidad vehicular de forma automática, o manualmente a través de un editor de movimiento del vehículo.

3.2 Parámetros de simulación

Todos los vehículos implicados en las simulaciones están equipados con tecnología VANET, presentando en el nivel MAC y PHY la implementación de los protocolos IEEE 1609.4 /802.11p descrita en [83]. Esto proporciona una razón de penetración del mercado igual a 100%. Los dispositivos de comunicación inalámbrica utilizados en los vehículos operan en el canal de control (CCH) cuya frecuencia central y ancho de banda son: 5.89 GHz y 10 MHz respectivamente. No se utiliza la conmutación sincrónica de canal propuesta por el estándar IEEE 1609.4, de modo que los vehículos se comunican en el canal de control todo el tiempo, obviando el intercambio de datos en alguno de los canales de servicio (SCH). La arquitectura de red implementada en cada vehículo considera que no están presentes las capas de red y transporte, de modo que a los *beacons* generados solo se les agregan los encabezados de la capa MAC y PHY. Los *beacons* presentan un tamaño de 250 bytes y se transmiten con una prioridad correspondiente a la clase EDCA 0, o sea, la categoría de acceso AC_BK. La categoría de acceso del tráfico background (BK) tiene el mayor valor de ventana de contención mínima ($CW_{\min} = 15$), ver Tabla 1.3. Esto provee a los *beacons* generados la menor probabilidad de colisión debido a expiraciones simultáneas de los contadores de *backoff*. Los nodos transmiten los datos a una razón de 6 Mbit/s y presentan una sensibilidad de -82 dBm. Esta es la razón de datos definida por defecto en Europa para la comunicación en el canal de control (CCH) y la sensibilidad especificada por el estándar IEEE 802.11 para la variante de transmisión de 6 Mbit/s, modulación QPSK, razón de codificación 1/2, en canales de 10 MHz, ver Tabla 1.2. Cada vehículo presenta 5 m de longitud, 2 m de espesor, 1.5 m de altura, 50 m/s como límite de velocidad, 4.5 m/s² de aceleración y 6.5 m/s² de desaceleración, mientras que la movilidad vehicular se simula con el modelo de seguimiento de automóvil de Krauss (*CarFollowing-Krauss*). La propagación de la señal de radioeléctrica se simula con el modelo de pérdida de trayectoria simple (*SimplePathlossModel*), utilizando un exponente de pérdida (α) igual a 2. Las antenas son omnidireccionales y se ubican en la parte superior frontal de los vehículos. La Tabla 3.1 muestra los parámetros utilizados en las simulaciones.

Tabla 3.1 Parámetros usados en las simulaciones

Parámetro	Valor
Canal de comunicación	Canal de control CCH (CH178)
Frecuencia central del canal CCH	5.890 GHz
Operación multicanal	No
Ancho de banda del canal	10 MHz
Razón de transmisión de datos	6 Mbits/s
Sensibilidad del receptor	- 82 dBm
Ruido térmico	- 110 dBm
MAC - PHY	IEEE 802.11p
Mecanismo de elección de trama (Veins)	Decider80211p
aCW _{mín} – aCW _{máx}	15 - 1023
Tiempo de una ranura	13 μ s
SIFS	32 μ s
Tamaño de beacon	250 Bytes
Prioridad de beacon	AC_BK
Tipo de antena	Omnidireccional
Posición de la antena	Parte superior frontal del vehículo
Altura del vehículo	1.5 m
Largo del vehículo	5 m
Ancho del vehículo	2 m
Velocidad máxima del vehículo	50 m/s (180 Km/h)
Aceleración máxima del vehículo	4.5 m/s ²
Desaceleración máxima del vehículo	6.5 m/s ²
Modelo de movilidad vehicular	CarFollowing-Krauss
Espacio vacío después del líder	2.5 m
Imperfección del conductor (σ)	0.5
Índice de penetración	1 (100 %)
Modelo de radio propagación	Modelo de pérdida de trayectoria simple (SimplePathlossModel) $\alpha = 2$

3.3 Experimentos

Como se comentó en el capítulo anterior, el funcionamiento de AdB-ADFP_{Tx} está compuesto por dos fases, en la primera se calcula la frecuencia de transmisión para que los autos vecinos perciban cierto error de posición, y en la segunda se adapta la potencia de transmisión en función de la carga del canal y la frecuencia de transmisión para disminuir el número de colisiones y la razón de pérdida de paquetes. En correspondencia con el diseño del algoritmo, se definen tres experimentos donde los dos primeros tienen como objetivo principal evaluar el desempeño de cada una de las fases, mientras que el tercero se centra en el ajuste simultáneo de la frecuencia y potencia de transmisión.

3.3.1 Escenario 1 – “Ajuste dinámico de la frecuencia de transmisión”

Este experimento se enfoca en evaluar el desempeño del mecanismo de ajuste dinámico de la frecuencia de transmisión de AdB-ADFP_{Tx}, a través de la comparación con un algoritmo de *beaconing* que utiliza parámetros de transmisión fijos, el cual se referencia en lo adelante como *Beaconing* Fijo (B. Fijo). Para comparar en igualdad de condiciones, se suprime el mecanismo de ajuste dinámico de potencia de transmisión de AdB-ADFP_{Tx}, quedando su frecuencia adaptativa y la potencia constante. En la Tabla 3.2 se muestran los parámetros de

los algoritmos, ambos usan una potencia de 95 mW (RC \approx 500 m), el *beaconing* fijo se realiza con una frecuencia de: 1, 2, 5 y 10 Hz, mientras que en AdB-ADFP_{Tx} la frecuencia se ajusta para generar un error de 1 y 0.5 m.

Tabla 3.2 Experimento 1: Parámetros de la variante AdB-ADFP_{Tx} y Beaconing Fijo

Parámetro	Variante AdB-ADFP _{Tx}	Beaconing Fijo
Potencia de transmisión	95 mW (RC \approx 500 m)	95 mW (RC \approx 500 m)
Frecuencia de transmisión	Variable	1 Hz, 2 Hz, 5 Hz, 10 Hz
Error de posición promedio límite	1 m, 0.5 m	Variable

Como infraestructura vial se utiliza un entorno de autopista, definido por una porción de mapa real de la ciudad de Montreal cuya área es aproximadamente 5.1 Km². En la Figura 3.1 a) se observa el escenario visto desde el sitio OpenStreetMap, mientras que en la Figura 3.1 b) se muestra el entorno de simulación obtenido con SUMO. La zona presenta dos vías principales, en dirección contraria, de una longitud próxima a los 3.4 Km, con dos carriles en el mismo sentido y un límite de velocidad máxima de 100 Km/h. A través de MOVE se definen en el escenario dos flujos de vehículos, cuyos puntos de inicio y final se representan en la Figura 3.1 a). Cada flujo contiene un solo vehículo, de modo que la situación de tráfico consiste en dos nodos (Nodo 0 y 1) que circulan por vías paralelas uno al encuentro del otro, se cruzan y se alejan nuevamente. Los nodos ejecutan el mismo algoritmo de *beaconing* en cada simulación, y estas tienen una duración de 200 s. En la Tabla 3.3 se muestran los principales parámetros del escenario.

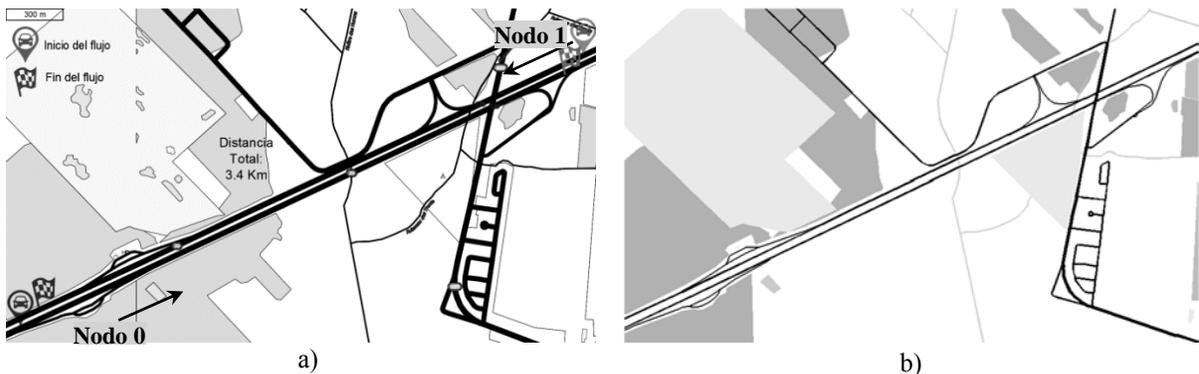


Figura 3.1: Escenario 1- Porción de mapa real de la ciudad de Montreal visto desde: a) OpenStreetMap, b) SUMO.

Tabla 3.3 Parámetros del entorno de autopista Montreal – Escenario 1

Parámetro	Valor
Escenario	Mapa real de la ciudad de Montreal
Dimensiones del área	\approx 3 Km x 1.7 Km
Longitud de las vías principales	\approx 3.4 Km
Velocidad máxima de las vías principales	100 Km/h (27.8 m/s)
Número de flujos	2 (En sentido opuesto)
Número de vehículos/flujo	1
Tiempo de simulación	200 s

En la Figura 3.2 se observa la velocidad y aceleración desarrollada por los Nodos 0 y 1 en su recorrido por el escenario. En ambos casos, se establece una aceleración de 2 m/s^2 , hasta alcanzar los 100 Km/h (27.8 m/s), que es la velocidad máxima permitida en cada vía principal. El resto del trayecto, los dos nodos lo completan con velocidad constante. Las variaciones que sufre la aceleración se debe a que el modelo de seguimiento de automóvil de Krauss considera, que la fuerza transmitida por el conductor al pedal de aceleración no es perfecta, oscilando en el tiempo.

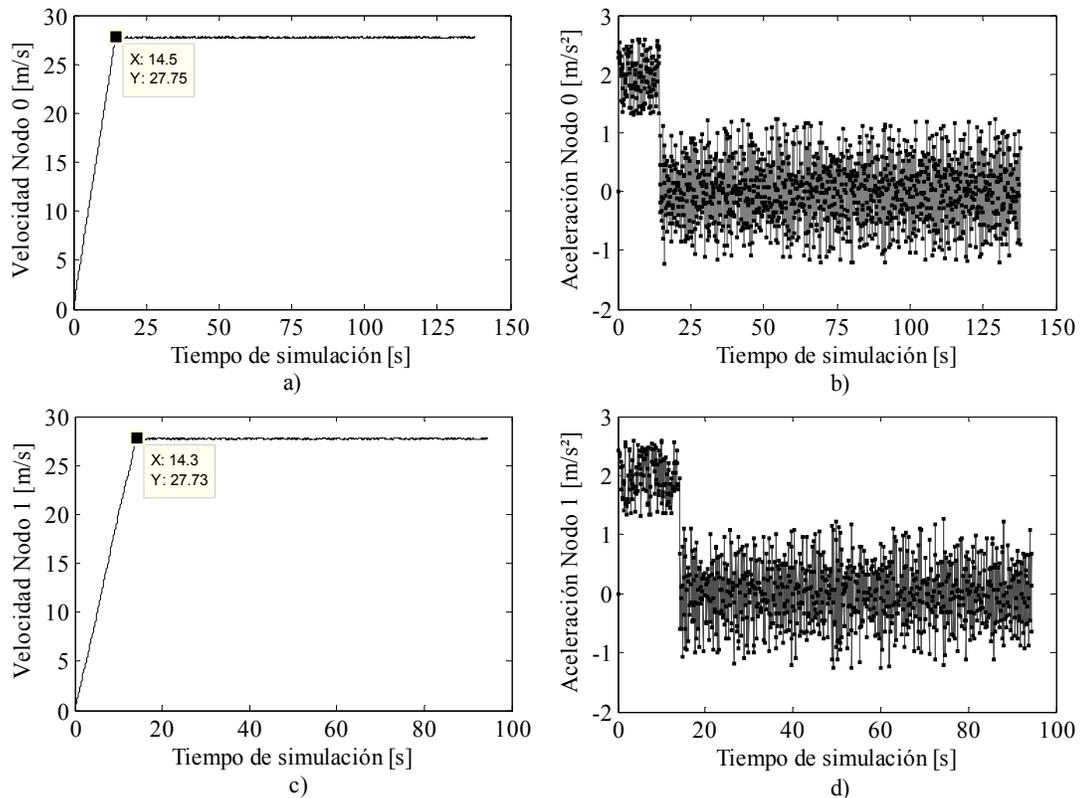


Figura 3.2: Velocidad y aceleración desarrollada por los Nodos 0 y 1 durante el tiempo que se desplazan por el escenario.

En la Figura 3.3 se muestra el error de posición promedio y máximo que el Nodo 0 percibe del Nodo 1 durante el tiempo de comunicación, para cada uno de los algoritmos de *beaconing* que se evalúan. Cada barra se corresponde con un nivel de exactitud de posición, variando el error de posición promedio entre 0.5 y 14 m, y el error de posición máximo entre 1 y 28 m. De los algoritmos de *Beaconing* Fijo, el que utiliza una frecuencia de transmisión de 1 Hz, provee la menor exactitud de posición, alcanzando el error promedio los 14 m y el máximo los 28 m, mientras que con 10 Hz se obtiene la mayor exactitud de posición, estando el error de posición promedio y máximo, por debajo de los 1.4 m y 2.8 m respectivamente. Con AdB-ADFP_{TX}, el Nodo 0 no percibe un error de posición promedio superior a 1 m (en el caso de 1 m) y 0.5 m (en el caso de 0.5 m). Como el error de posición máximo es el doble del promedio, este no

excede los 2 y 1 m. En este contexto, AdB-ADFP_{Tx} provee el mayor nivel de conocimiento cooperativo.

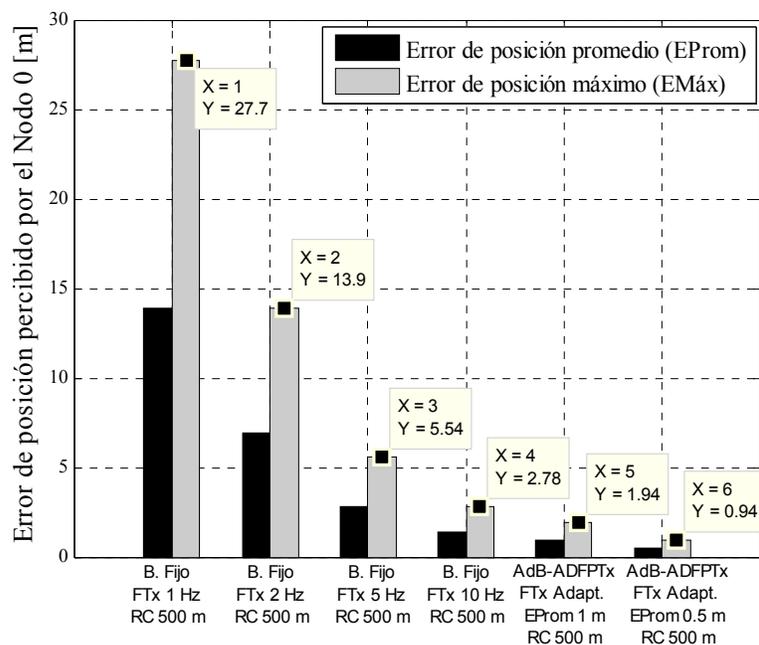


Figura 3.3: Error de posición promedio y máximo que el Nodo 0 percibe del Nodo 1 durante el tiempo de comunicación.

En la Figura 3.4 se observan los valores de frecuencia de transmisión establecidos por el Nodo 1 durante su desplazamiento por la vía, cuando ejecuta AdB-ADFP_{Tx} para generar un error de posición promedio límite de 1 m. A diferencia de los algoritmos de *Beaconing* Fijos, cuyas frecuencias permanecen constantes en todo el recorrido, AdB-ADFP_{Tx} ajusta dinámicamente la frecuencia de transmisión en función de la velocidad y aceleración, garantizando un mayor nivel de conocimiento cooperativo. Se debe notar que, durante los primeros 14 segundos de simulación, la frecuencia se eleva coincidiendo con un incremento en la velocidad del nodo, lo que limita el error de posición. El intervalo de tiempo en que el Nodo 1 se desplaza con una velocidad media de 100 Km/h, el algoritmo mantiene la resolución adoptando una frecuencia que oscila entre 14 y 15 Hz.

El inconveniente de aumentar el conocimiento del entorno vehicular reduciendo el error de posición, consiste en que se necesita transmitir una mayor cantidad de datos al canal de radio. Esto se evidencia en la Figura 3.5, donde la carga de *beaconing* generada por el Nodo 1 crece con un incremento de la frecuencia de transmisión. Para un tamaño de *beacon* de 250 bytes y a velocidad máxima, AdB-ADFP_{Tx} genera una carga que varía entre 0.028 y 0.03 Mbit/s, para limitar el error de posición promedio a 1 m. Esto representa un incremento de carga de 0.008 a 0.01 Mbit/s, en comparación con el algoritmo de *Beaconing* Fijo que utiliza una frecuencia de 10 Hz.

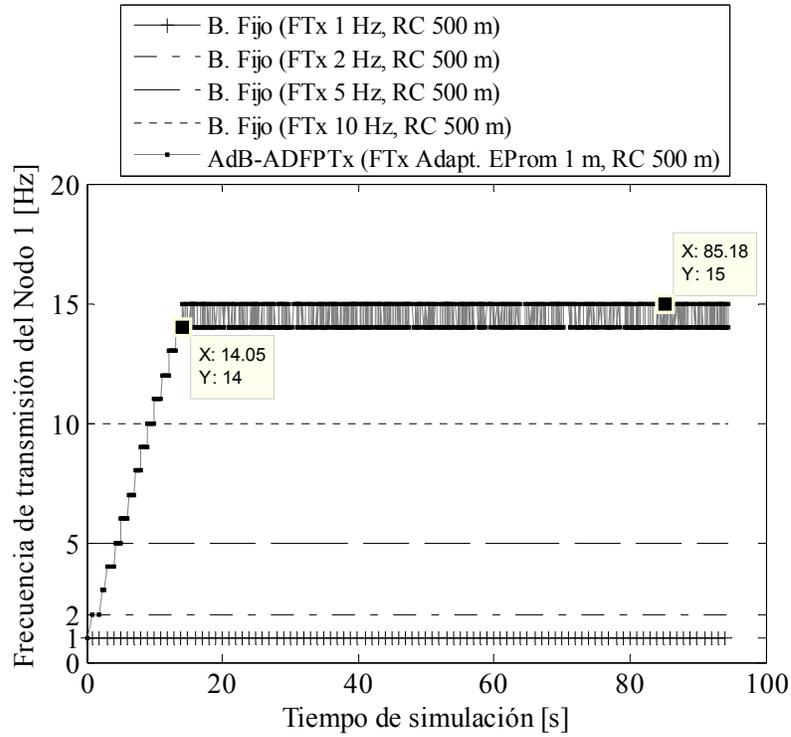


Figura 3.4: Frecuencia de transmisión establecida por el Nodo 1 en su desplazamiento por la vía.

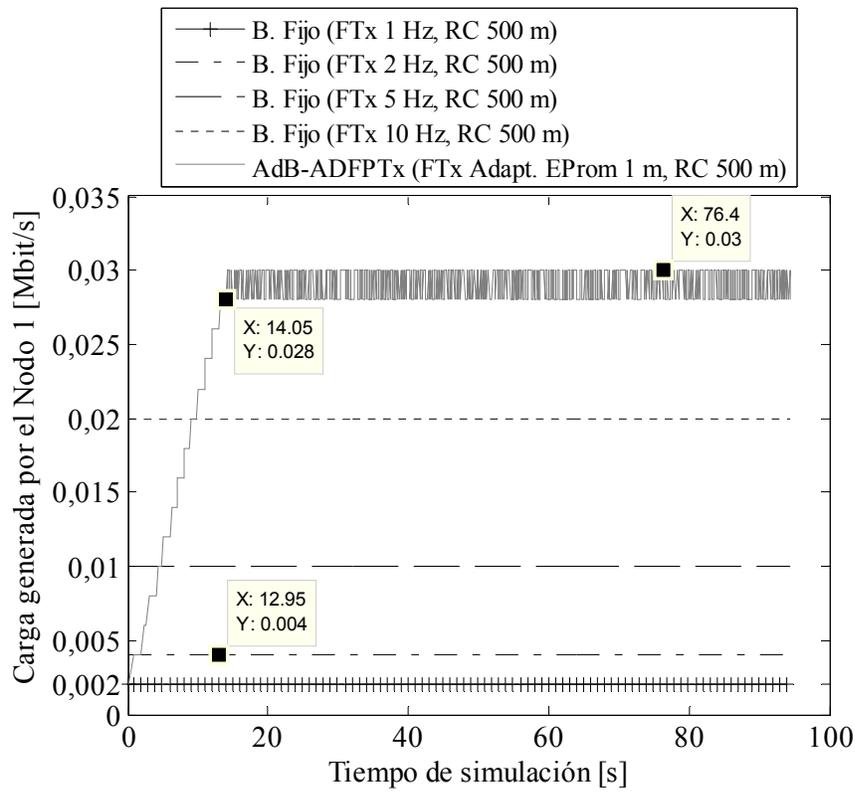


Figura 3.5: Carga de beaconing generada por el Nodo 1 en su desplazamiento por la vía.

3.3.2 Escenario 2 – “Ajuste dinámico de la potencia de transmisión”

Este experimento tiene como objetivo primario evaluar el desempeño del mecanismo de ajuste dinámico de la potencia de transmisión de AdB-ADFP_{TX}, a través de la comparación con un algoritmo de *Beaconing* Fijo. En este caso, se suprime el mecanismo de ajuste dinámico de frecuencia de transmisión de AdB-ADFP_{TX}, quedando su potencia adaptativa y la frecuencia constante. En la Tabla 3.4 se muestran los parámetros de los algoritmos, en el *Beaconing* Fijo se utiliza una potencia de 95 mW ($RC \approx 500$ m), mientras que AdB-ADFP_{TX} ajusta la potencia de transmisión según la ecuación 2.28 (ver sección 2.2.3). En el cálculo de la potencia mínima se usa un tiempo de percepción-reacción igual a 1.5 s, un coeficiente de rozamiento con valor 0.85 y se asume una vía sin inclinación. Ambos algoritmos se ejecutan con las frecuencias siguientes: 1, 2, 5 y 10 Hz.

En los casos donde la distancia de seguridad del vehículo no excede los 100 m, AdB-ADFP_{TX} define una potencia mínima igual a 3.8 mW, lo cual sumado al rango de variación de potencia provee un rango de comunicación próximo a los 500 m. Si la distancia de seguridad rebasa los 100 m, entonces la potencia de transmisión computada por AdB-ADFP_{TX} puede exceder los 95 mW usados en el *Beaconing* Fijo. Esto garantiza que ambos algoritmos se evalúen en igualdad de condiciones.

Tabla 3.4 Experimento 2: Parámetros de la variante AdB-ADFP_{TX} y Beaconing Fijo

Parámetro	Variante AdB-ADFP _{TX}	Beaconing Fijo
Tiempo de percepción-reacción (t_{PR})	1.5 s	-
Inclinación de la vía (ϕ)	0°	-
Coefficiente de rozamiento (μ)	0.85	-
Distancia de seguridad mínima (d_{Smin})	100 m (≈ 3.8 mW)	-
Variación de potencia (ΔP_{TX})	90 mW	-
Potencia de transmisión	Variable	95 mW ($RC \approx 500$ m)
Frecuencia de transmisión	1 Hz, 2 Hz, 5 Hz, 10 Hz	1 Hz, 2 Hz, 5 Hz, 10 Hz

Como infraestructura vial se utiliza un entorno urbano, definido por una porción de mapa real de la ciudad de Chicago cuya área es aproximadamente 0.64 Km². En la Figura 3.6 a) se observa el escenario visto desde el sitio OpenStreetMap, mientras que en la Figura 3.6 b) se muestra el entorno de simulación obtenido con SUMO. La región presenta un alto número de intersecciones, múltiples semáforos, cuadras con forma rectangular y carreteras con límites de velocidad de 50 y 100 Km/h. Usando MOVE se definen en el escenario, 8 flujos primarios de tráfico y 4 secundarios, cuyos puntos de inicio y final se observan en la Figura 3.6 a). Los vehículos que pertenecen al mismo flujo, se desplazan del origen al destino siguiendo igual trayectoria. Cada flujo primario (secundario) de tráfico vehicular está compuesto por 30 (15), 40 (20) y 50 (25) vehículos, generando para un tiempo de simulación de 1000 s las densidades de nodos siguientes: 45, 63 y 78 veh/Km². En las simulaciones, los nodos ejecutan el mismo algoritmo de *beaconing* para las distintas situaciones de tráfico. En la Tabla 3.5 se muestran los parámetros del escenario.

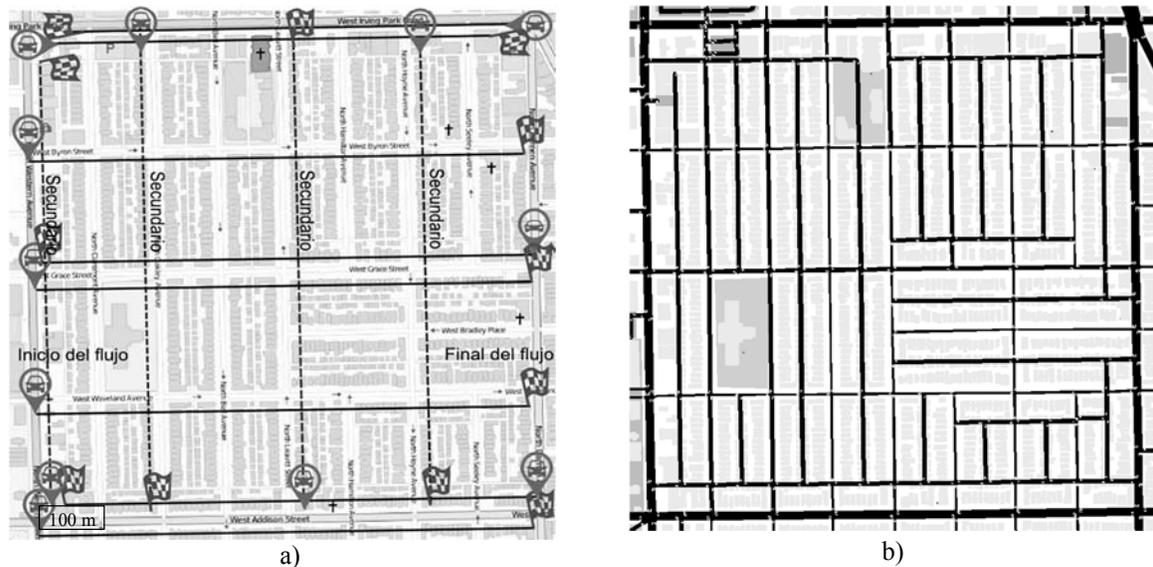


Figura 3.6: Escenario 2 - Porción de mapa real de la ciudad de Chicago visto desde: a) OpenStreetMap, b) SUMO.

Tabla 3.5 Parámetros del entorno urbano Chicago – Escenario 2

Parámetro	Valor
Escenario	Mapa real de la ciudad de Chicago
Dimensiones del área	≈ 0.8 Km x 0.8 Km
Forma de la cuadra	Rectangular
Velocidad máxima de las vías	50 Km/h, 100 Km/h
Número de intersecciones	≈ 283
Número de semáforos	≈ 18
Número de flujos primarios	8
Número de flujos secundarios	4
Número de vehículos/flujo primario	30, 40, 50
Número de vehículos/flujo secundario	15, 20, 25
Número de vehículos en circulación	300, 400, 500
Tiempo de simulación	1000 s
Densidad de nodos	≈ 45, 63, 78 veh/Km ²

En la Figura 3.7 se muestra la carga relativa del canal normalizada que genera cada algoritmo de *beaconing* según la situación de tráfico vehicular. La primera barra se corresponde con el algoritmo de *Beaconing* Fijo de frecuencia igual a 1 Hz y rango de comunicación de 500 m, después se ubica la barra de AdB-ADFP_{Tx} que usa la frecuencia de 1 Hz y potencia adaptativa, y así sucesivamente hasta llegar a la frecuencia de transmisión de 10 Hz. Nótese, que en este escenario los niveles de carga están muy por debajo del 40 % de la capacidad del canal. Sin embargo, es posible apreciar que en todos los casos el algoritmo de *Beaconing* Fijo genera una mayor carga que su variante AdB-ADFP_{Tx} adaptativa. La reducción en la carga del canal se logra con AdB-ADFP_{Tx} debido a que adopta un menor rango de comunicación con un incremento de la frecuencia. Esto se visualiza en la Figura 3.8, donde el algoritmo AdB-ADFP_{Tx} establece un rango de comunicación de 490, 260, 140 y 110 m, para 1, 2, 5 y 10 Hz, respectivamente.

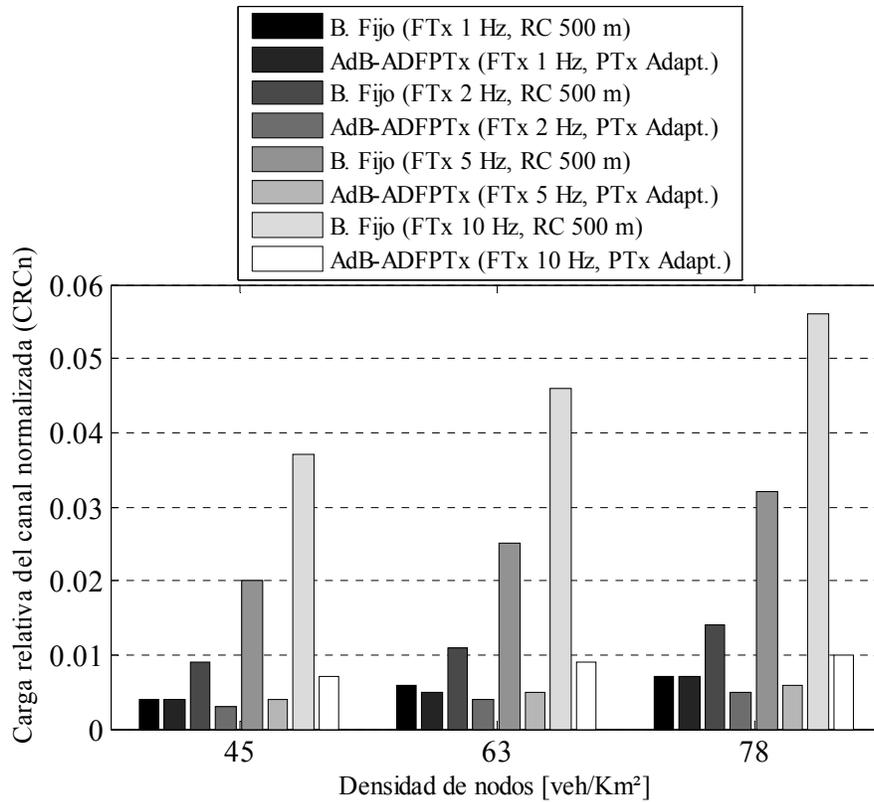


Figura 3.7: Carga relativa del canal normalizada en función del algoritmo de beaconing y la densidad de tráfico vehicular.

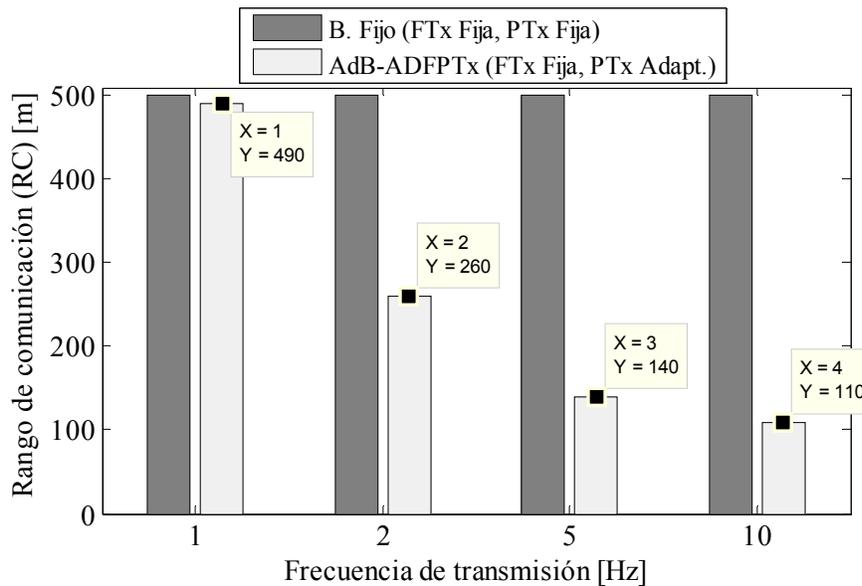


Figura 3.8: Rango de comunicación de los vehículos según el tipo de algoritmo de beaconing y la frecuencia de transmisión.

En la Figura 3.9 se representa el número de colisiones que como promedio se producen en cada nodo del escenario según el algoritmo de *beaconing* y la situación de tráfico vehicular. El análisis se centra en los algoritmos de *beaconing* que utilizan las frecuencias de 2, 5 y 10 Hz, ya que para 1 Hz, no existe una variación significativa de desempeño debido al uso de un rango de comunicación similar (500 y 490 m). En la figura se observa que un incremento tanto en la frecuencia de transmisión como en la densidad de vehículos del escenario, conduce a un mayor número de colisiones. Estos parámetros afectan en mayor medida a los algoritmos de *Beaconing* Fijos, pues presentan un mayor rango de variación. En todos los casos, la variante adaptativa de AdB-ADFP_{Tx} proporciona un menor número de colisiones que su homólogo fijo, llegando a ser esta diferencia bastante significativa, sobre todo para las frecuencias de 5 y 10 Hz.

Cuando la densidad de nodos es de 45 veh/Km², usando *Beaconing* Fijo de 5 Hz se obtienen 448 colisiones como promedio, mientras que la variante adaptativa de AdB-ADFP_{Tx} produce solo 27. En esta situación de tráfico, el uso de una frecuencia igual a 10 Hz hace que como promedio ocurran 1750 colisiones más con *Beaconing* Fijo que con la variante adaptativa de AdB-ADFP_{Tx}. Si la densidad de nodos se eleva hasta los 78 veh/Km², esta diferencia se hace aún mayor. En este contexto, con *Beaconing* Fijo de 5 Hz se producen como promedio 1120 colisiones, mientras que con su homólogo adaptativo solamente 80. Para una frecuencia de 10 Hz, con *Beaconing* Fijo como promedio ocurren 4449 colisiones más que con la variante adaptativa de AdB-ADFP_{Tx}.

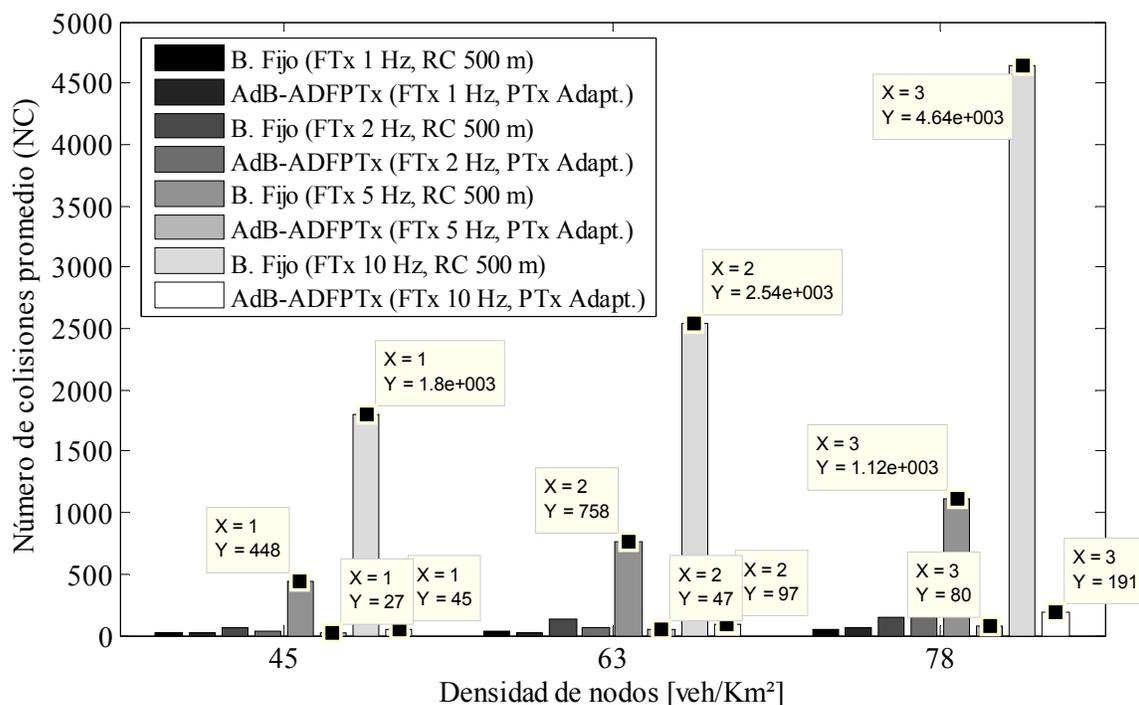


Figura 3.9: Número de colisiones promedio en función del algoritmo de beaconing y la densidad de tráfico vehicular.

En la Figura 3.10 se observa la razón de entrega de paquetes que provee cada algoritmo de *beaconing* en función de la situación de tráfico vehicular. Nótese, que para la frecuencia de 1 Hz no existe una diferencia significativa entre el desempeño del algoritmo de *Beaconing* Fijo y su variante adaptativa AdB-ADFP_{Tx}, obteniéndose valores de razón de entrega de paquetes que no se diferencian en más del 1 %. A pesar, de que para la frecuencia de 2 Hz la variante adaptativa de AdB-ADFP_{Tx} proporciona un menor número de colisiones promedio que su equivalente fijo, se obtiene una mejor relación entre los paquetes perdidos y los que se debían recibir con el *Beaconing* Fijo, para las distintas situaciones tráfico vehicular. No obstante, cuando existe una densidad de nodos de 45 veh/Km² y se transmite con una frecuencia de 5 Hz, la variante adaptativa AdB-ADFP_{Tx} provee un valor de razón de entrega de paquetes que excede en un 4 % al obtenido con el algoritmo de *Beaconing* Fijo. Para una frecuencia de 10 Hz, con la variante adaptativa AdB-ADFP_{Tx} se logra una razón de entrega de paquetes del 97 %, mientras que con el *Beaconing* Fijo no se excede el 85 %, existiendo una diferencia que alcanza el 12 %. Cuando la densidad de nodos se eleva hasta los 78 veh/Km² y se utilizan 5 Hz de frecuencia, existe una diferencia del 5 % en la razón de entrega de paquetes provista por ambos algoritmos, llegando a ser de un 95 % con la variante adaptativa de AdB-ADFP_{Tx}. Para una frecuencia de 10 Hz, la razón de entrega de paquetes no excede el 80 % con el algoritmo de *Beaconing* Fijo, mientras con la variante adaptativa de AdB-ADFP_{Tx} se alcanza un 93 %.

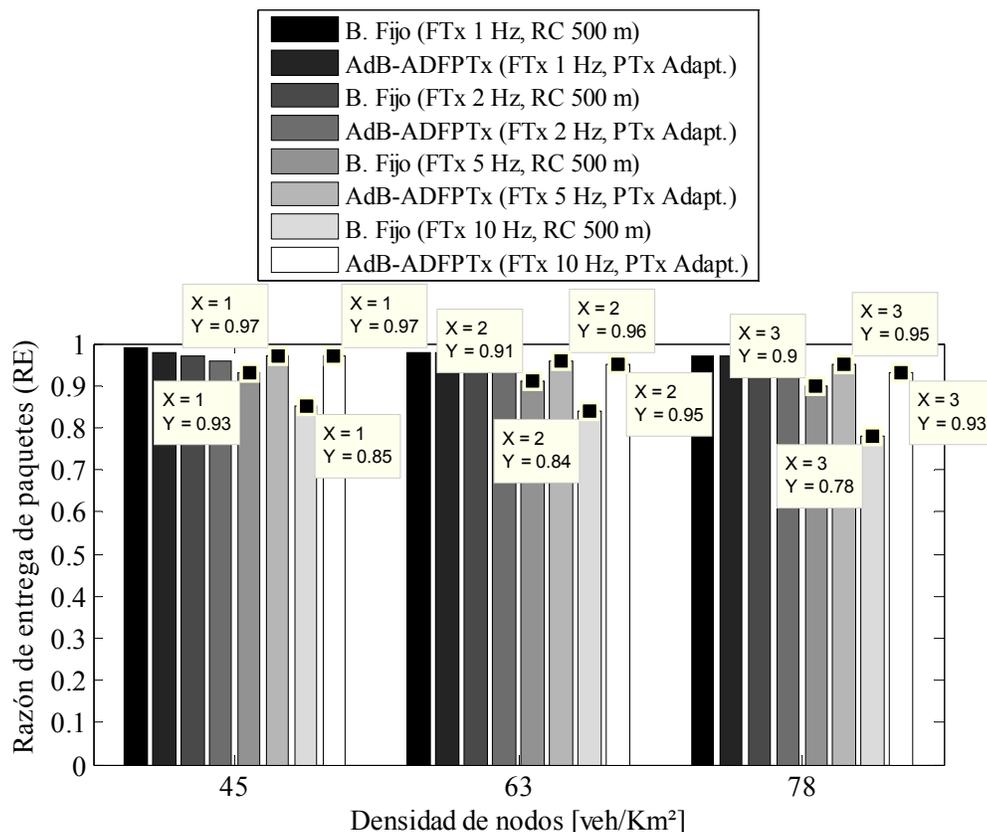


Figura 3.10: Escenario 2 - Razón de entrega de paquetes en función del algoritmo de beaconing y la densidad de tráfico vehicular.

3.3.3 Escenario 3 – “Ajuste dinámico de la frecuencia y potencia de transmisión”

Este experimento se centra en evaluar el desempeño de AdB-ADFP_{Tx}, considerando el ajuste simultáneo de la frecuencia y potencia de transmisión. Para esto, se compara con un algoritmo de *Beaconing* Fijo y con una variación de AdB-ADFP_{Tx} que ajusta la frecuencia mientras mantiene fija la potencia de transmisión. En la Tabla 3.6 se muestran los parámetros de los algoritmos.

Tabla 3.6 Experimento 3: Parámetros de AdB-ADFP_{Tx}, su variante y Beaconing Fijo

Parámetro	AdB-ADFP _{Tx}	Beaconing Fijo	Variante AdB-ADFP _{Tx}
Tiempo de percepción-reacción (t _{PR})	1.5 s	-	-
Inclinación de la vía (ϕ)	0°	-	-
Coefficiente de rozamiento (μ)	0.85	-	-
Distancia de seguridad mínima (d _{Smin})	100 m (\approx 3.8 mW)	-	-
Variación de potencia (ΔP_{Tx})	90 mW	-	-
Potencia de transmisión	Variable	95 mW (RC \approx 500 m)	95 mW (RC \approx 500 m)
Frecuencia de transmisión	Variable	1 Hz, 2 Hz, 5 Hz, 10 Hz	Variable
Error de posición promedio límite	1 m	Variable	1 m

La infraestructura vial consiste en un entorno urbano, definido por una porción de mapa real de la ciudad de Chicago, distinto al utilizado en el experimento dos y con un área cercana a 1 Km². En la Figura 3.11 a) se observa el escenario visto desde OpenStreetMap, mientras que en la Figura 3.11 b) se muestra el entorno de simulación obtenido con SUMO. La zona presenta cuadras con forma rectangular, varios semáforos, un elevado número de intersecciones y calles con límites de velocidad de 50 y 100 Km/h.

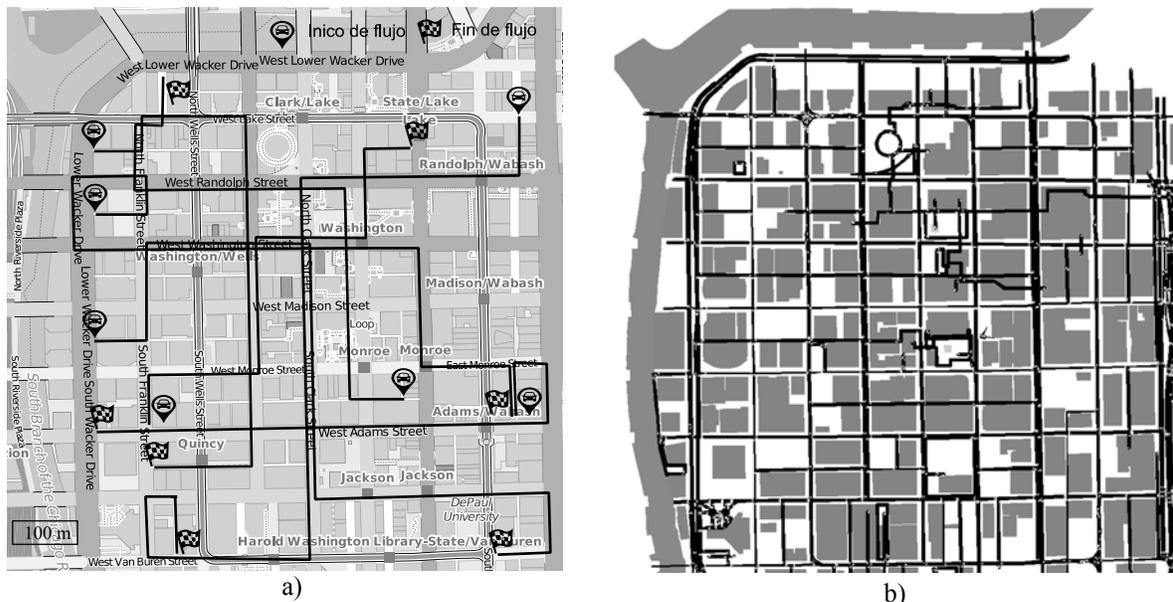


Figura 3.11: Escenario 3 - Porción de mapa real de la ciudad de Chicago visto desde: a) OpenStreetMap, b) SUMO.

A través de MOVE se definen en el escenario 7 flujos de tráfico vehicular, cuyos puntos de inicio y final se observan en la Figura 3.11 a). Los vehículos que pertenecen a un mismo flujo, se desplazan del origen al destino siguiendo igual ruta. Cada flujo de tráfico vehicular está compuesto por 25, 50 y 75 vehículos, generando para un tiempo de simulación igual a 1000 s las densidades de nodos siguientes: 49, 108 y 170 veh/Km². En las simulaciones, los nodos ejecutan el mismo algoritmo de *beaconing* para las distintas densidades de tráfico. En la Tabla 3.7 se muestran los parámetros del escenario.

Tabla 3.7 Parámetros del entorno urbano Chicago - Escenario 3

Parámetro	Valor
Escenario	Mapa real de la ciudad de Chicago
Dimensiones del área	≈ 1 Km x 1 Km
Forma de la cuadra	Rectangular
Velocidad máxima de las vías	50 Km/h, 100 Km/h
Número de intersecciones	≈ 469
Número de semáforos	≈ 37
Número de flujos	7
Número de vehículos/flujo	25, 50, 75
Número de vehículos en circulación	175, 350, 525
Tiempo de simulación	1000 s
Densidad de nodos	≈ 49, 108, 170 veh/Km ²

En la Figura 3.12 se visualizan los valores de frecuencia de transmisión establecidos por uno de los vehículos del escenario, nombrado Nodo 1, según el algoritmo de *beaconing*. Nótese, que a diferencia de los algoritmos de *beaconing* con parámetros fijos, AdB-ADFPT_x es capaz de ajustar dinámicamente la frecuencia de transmisión en función del estado del vehículo para proveer un error promedio límite.

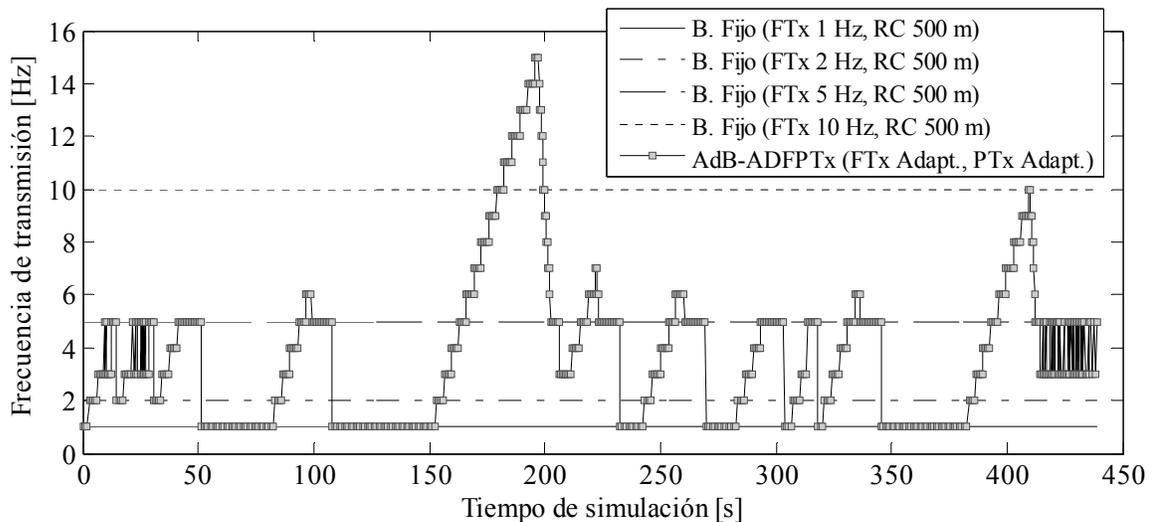


Figura 3.12: Frecuencia de transmisión establecida por uno de los vehículos del escenario (Nodo 1) según el algoritmo de *beaconing*.

En la Figura 3.13 se observa que con AdB-ADFP_{Tx}, el Nodo 1 establece de forma dinámica la potencia de transmisión. Del análisis de esta figura y la anterior, se deduce que un aumento en la frecuencia de transmisión del Nodo 1 produce una reducción en su potencia de transmisión, demostrando la relación inversamente proporcional que la ecuación 2.28 establece entre estos parámetros.

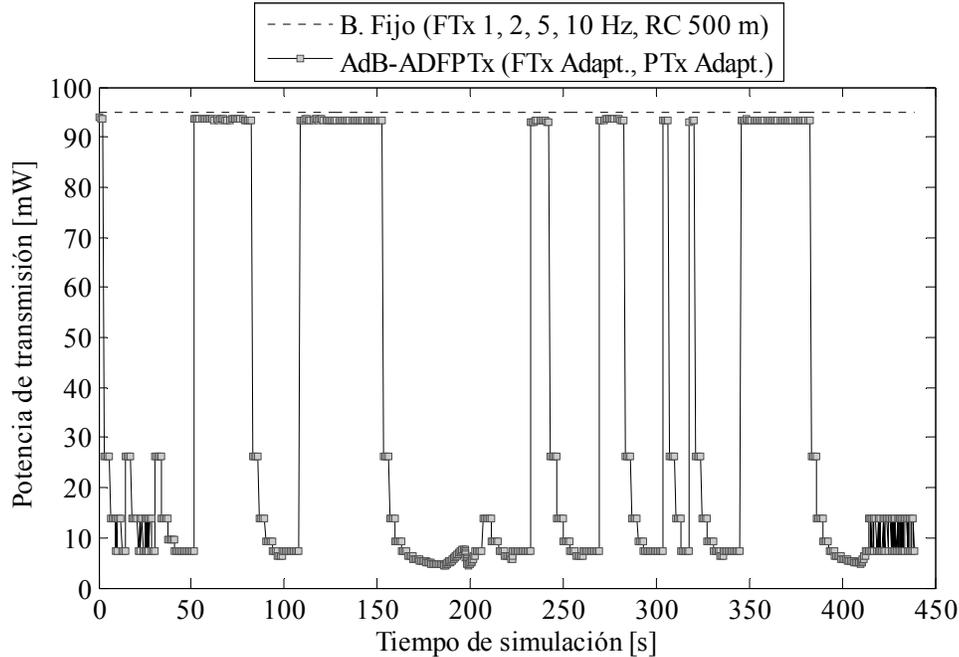


Figura 3.13: Potencia de transmisión establecida por uno de los vehículos del escenario (Nodo 1) según el algoritmo de beaoning.

En la Tabla 3.8 se muestran el número de colisiones que como promedio ocurren en cada nodo del escenario según el algoritmo de *beaoning* y la situación de tráfico vehicular. Los valores más bajos para las tres densidades de vehículos se obtienen con el *Beaoning* Fijo de 1 Hz y AdB-ADFP_{Tx}. A pesar, de que con AdB-ADFP_{Tx} algunos nodos del escenario establecen una frecuencia de 15 Hz, como se observa en la Figura 3.12, el mecanismo de ajuste dinámico de potencia reduce la cantidad de colisiones.

Tabla 3.8 Número de colisiones promedio según el algoritmo de beaoning – Escenario 3

Algoritmo	Número de colisiones promedio		
	49 veh/Km ²	108 veh/Km ²	170 veh/Km ²
B. Fijo (FTx 1 Hz, RC 500 m)	102	528	1643
B. Fijo (FTx 2 Hz, RC 500 m)	403	2079	6424
B. Fijo (FTx 5 Hz, RC 500 m)	2132	11441	36755
B. Fijo (FTx 10 Hz, RC 500 m)	9434	45620	119641
AdB-ADFP _{Tx} (FTx Adapt., PTx Adapt.)	98	566	1763
AdB-ADFP _{Tx} (FTx Adapt., RC 500 m)	553	2507	6523

En la Figura 3.14 se muestra la razón de entrega de paquetes que provee cada algoritmo de *beaconing* en función de la densidad de tráfico vehicular. En todos los casos, un incremento en el número de vehículos que circulan por el escenario produce una disminución en la razón de entrega de paquetes. Los mejores resultados, para las distintas densidades de nodos, se logran con el *Beaconing* Fijo de 1 Hz y AdB-ADFP_{Tx}, mientras que los valores más bajos de razón de entrega de paquetes se obtienen con el *Beaconing* Fijo de 10 y 5 Hz. Para una densidad de nodos igual a 45 veh/Km², con AdB-ADFP_{Tx} se logra una razón de entrega de paquetes del 98 %. Este valor excede en un 7 % y 19 % al obtenido con el *Beaconing* Fijo de 5 Hz y 10 Hz, respectivamente. Cuando la densidad de nodos se incrementa hasta los 170 veh/Km², con AdB-ADFP_{Tx} la razón de entrega de paquetes se mantiene por encima del 90 %. Sin embargo, usando un *Beaconing* Fijo con frecuencia de 5 y 10 Hz, la razón de entrega no excede el 67 %. El desempeño de AdB-ADFP_{Tx} es relativamente superior al de su equivalente con potencia fija para las distintas situaciones de tráfico. Esto se debe a que la variante con potencia fija utiliza un mayor rango de comunicación, lo que incrementa el número de colisiones y la razón de pérdida de paquetes.

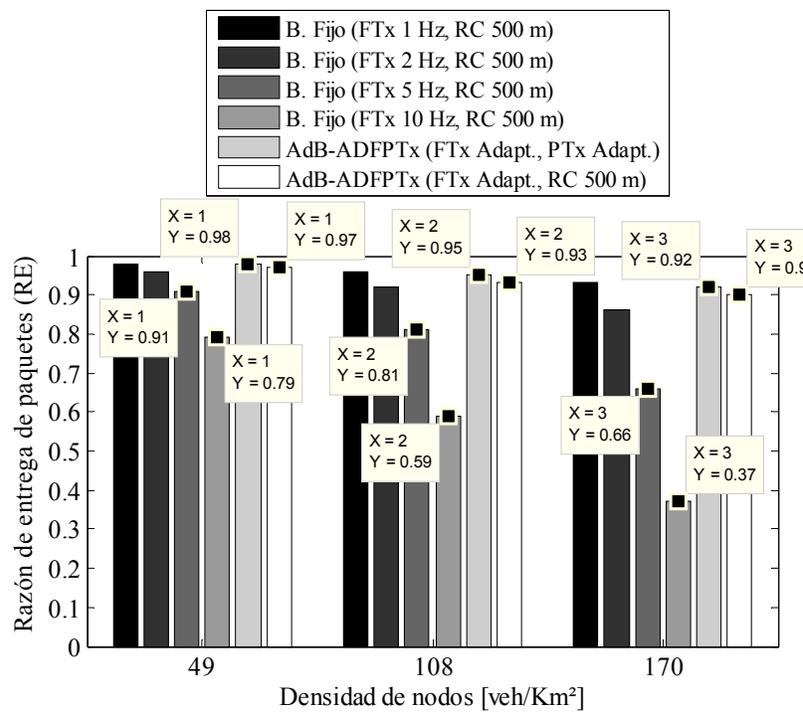


Figura 3.14: Escenario 3 - Razón de entrega de paquetes en función del algoritmo de beaconing y la densidad de tráfico vehicular.

En la Figura 3.15 se muestra el error de posición promedio real que otro nodo del escenario, en este caso llamado Nodo 7, percibe de los vehículos circundantes para cada algoritmo de *beaconing* cuando existe una densidad de 49 veh/Km². En las gráficas solo se incluyen el error de posición promedio real computado por AdB-ADFP_{Tx} y uno de los otros algoritmos de

beaconing. En la Figura 3.15 a) se observa que el error de posición promedio real que el Nodo 7 percibe de los autos vecinos, con AdB-ADFP_{Tx}, se encuentra por debajo de 1 m la mayor parte del tiempo, mientras que para un *Beaconing* Fijo de 1 Hz el error excede los 5 m. En la Figura 3.15 b) y c) se aprecia que el desempeño de AdB-ADFP_{Tx} en términos de exactitud de posición, también es superior a los algoritmos de *Beaconing* Fijo que utilizan una frecuencia de 2 Hz y 5 Hz. En la Figura 3.15 c), d) y e) se manifiesta el efecto de las colisiones de paquetes sobre el error de posición promedio. Nótese, que aunque el *Beaconing* Fijo de 10 Hz y la variante de AdB-ADFP_{Tx} que utiliza potencia fija, proveen una exactitud cercana a la obtenida con AdB-ADFP_{Tx}, este último presenta menor número de incrementos debidos a colisiones.

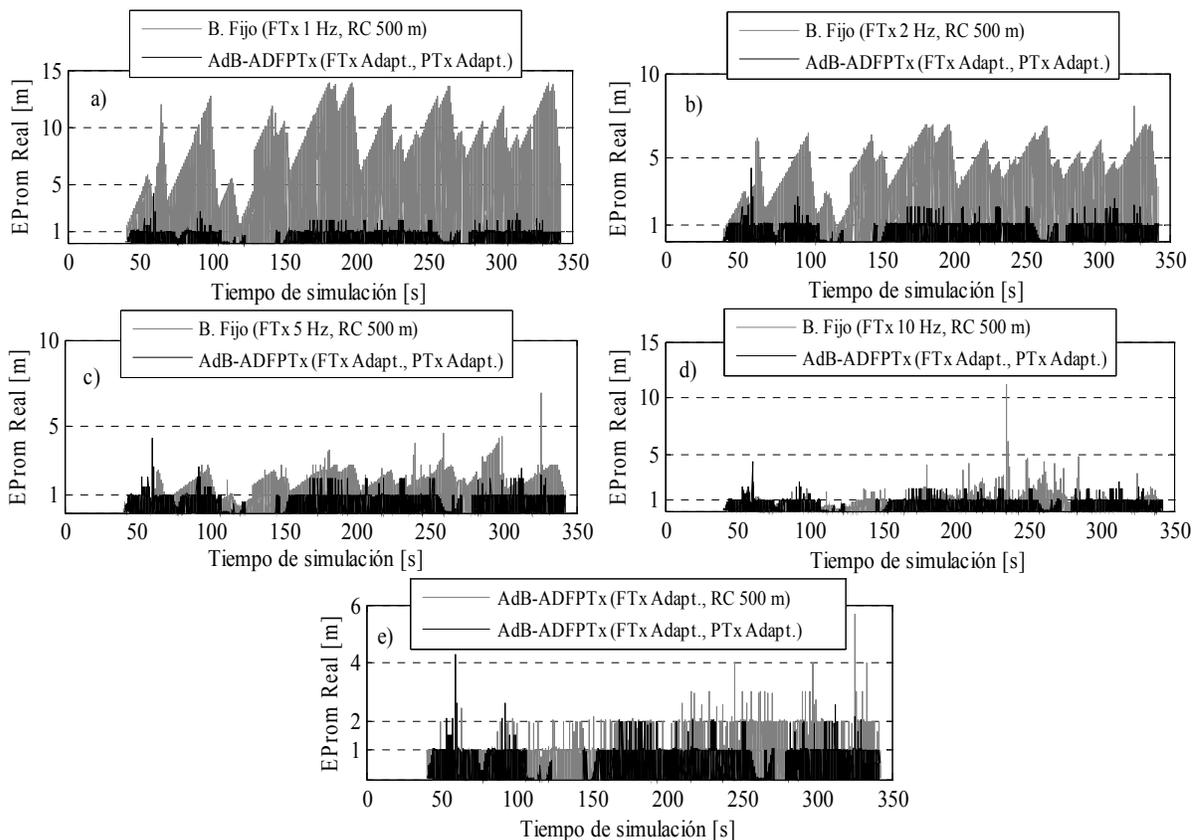


Figura 3.15: Error de posición promedio real que uno de los vehículos del escenario (Nodo 7) percibe de los autos circundantes según el algoritmo de beaconing.

En la Figura 3.16 se muestra el número de vehículos registrados en la base de datos LDM del Nodo 7 en su recorrido por el escenario, para AdB-ADFP_{Tx} y su equivalente con potencia fija. El uso de una mayor potencia de transmisión conduce a una reducción en la razón de entrega de paquetes. Sin embargo, garantiza el descubrimiento de un mayor número de vecinos. Esto se observa en la figura, donde la variante de AdB-ADFP_{Tx} con potencia fija registra en la base de datos LDM, un mayor número de nodos que su homólogo durante el tiempo de simulación.

En la Figura 3.17 se muestra el rango de comunicación que como promedio utilizan los nodos cuando ejecutan AdB-ADFP_{Tx}, en función de la situación de tráfico vehicular. En este entorno un incremento en la densidad de nodos conduce al uso de un mayor rango de comunicación. Esto se debe, a que un aumento en la densidad de tráfico vehicular disminuye la velocidad promedio de los nodos, lo que a su vez reduce la frecuencia y eleva la potencia de transmisión.

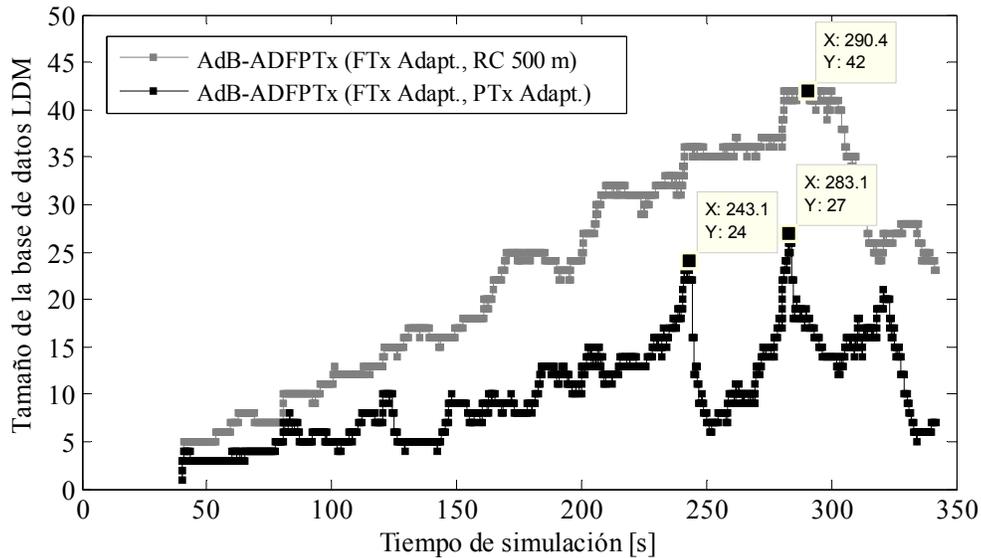


Figura 3.16: Tamaño de la base de datos LDM del Nodo 7 según el algoritmo de beaconing.

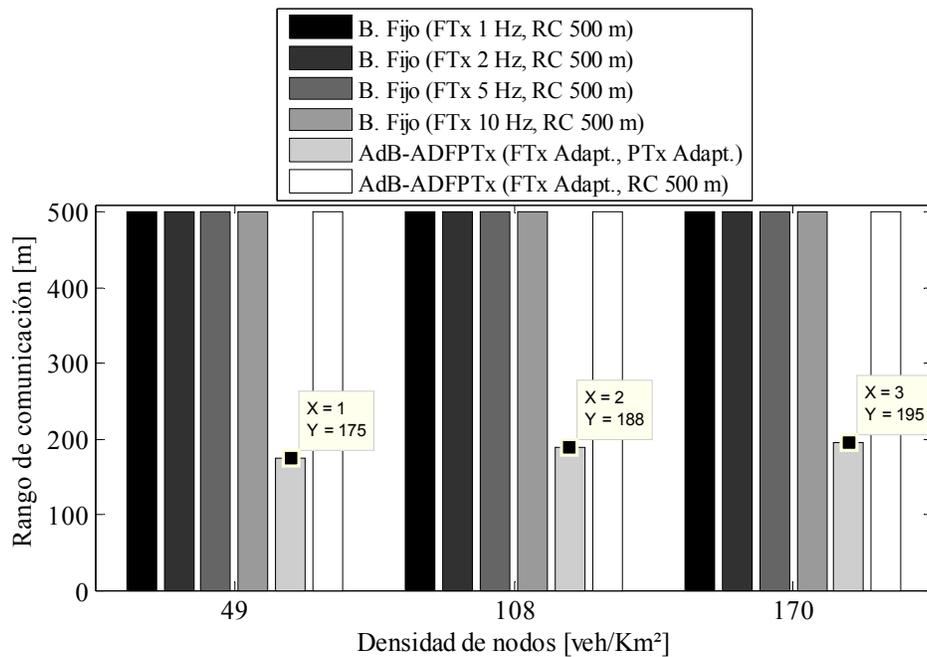


Figura 3.17: Rango de comunicación de los vehículos en función de la densidad de nodos y el tipo de algoritmo de beaconing.

3.4 Conclusiones parciales

Los resultados de los experimentos demuestran la efectividad de los mecanismos de ajuste dinámico de los parámetros de transmisión. Con el control de la frecuencia de transmisión se limita el error de posición, mientras que con la adaptación de potencia se reduce el número de colisiones y la razón de pérdida de paquetes. La falta de flexibilidad de los algoritmos de *Beaconing* Fijo hace que no se desempeñen favorablemente en los entornos vehiculares. El *Beaconing* Fijo de 1 Hz logra un bajo número de colisiones, sin embargo, genera un elevado error de posición, mientras que el *Beaconing* Fijo de 10 Hz aumenta la exactitud de posición, pero a expensas de un incremento el número de colisiones. De modo general, AdB-ADFP_{Tx} se desempeña mejor que los algoritmos de *Beaconing* Fijos en los distintos escenarios. El costo de limitar el error de posición mientras mantiene altos valores de razón de entrega de paquetes, radica en el uso de un menor rango de comunicación. No obstante, su dinámica define un valor de potencia de transmisión que genera en todo momento un rango de comunicación superior a la distancia de seguridad del vehículo.

CONCLUSIONES

Con la realización de la investigación se arribaron a las siguientes conclusiones:

- 1) Las principales métricas que definen el nivel de conocimiento cooperativo provisto por el *beaconing* en redes vehiculares son: error de posición máximo y promedio, número de colisiones y razón de entrega de paquetes. Debido al impacto que tienen sobre la relevancia contextual de la información de posición, el desempeño del sistema se evalúa sobre la base de estas métricas.
- 2) Se propuso un mecanismo de ajuste dinámico de la frecuencia de transmisión en función de la velocidad y aceleración del vehículo, orientados a elevar el nivel de conocimiento cooperativo y evitar que el error de posición promedio real percibido por los autos vecinos supere un umbral predefinido.
- 3) Con el fin de disminuir el número de colisiones y la razón de pérdida de paquetes se propuso un mecanismo capaz de ajustar dinámicamente la potencia de transmisión en función de la carga relativa del canal de comunicación y la frecuencia de transmisión del vehículo.
- 4) El algoritmo diseñado AdB-ADFP_{Tx} ajusta de forma conjunta la frecuencia y la potencia de transmisión, acorde a los mecanismos propuestos, garantizando los requerimientos de exactitud de información de posición y la distancia mínima de seguridad vial.
- 5) Para la etapa de simulación fue seleccionada la herramienta Veins, que integra el simulador de red OMNeT++ y el simulador de tráfico vehicular SUMO, debido a que es un simulador realista donde la información de red puede impactar sobre el patrón de movilidad de los nodos.
- 6) Las pruebas experimentales definidas para evaluar el algoritmo propuesto, fueron diseñadas de manera tal que permitieron determinar la incidencia de los diferentes mecanismos de ajuste dinámico de los parámetros de transmisión, concluyendo que:
 - a. El ajuste dinámico de la frecuencia de transmisión en función de parámetros como la velocidad y aceleración del vehículo, elevó el nivel de conocimiento cooperativo, limitando el error de posición promedio real percibido por los autos circundantes a un umbral predefinido.

- b. El ajuste dinámico de la potencia de transmisión en función de la carga relativa del canal y la frecuencia de transmisión del vehículo, incrementó el nivel de conocimiento cooperativo, disminuyendo el número de colisiones y la razón de pérdida de paquetes.
- c. Los esquemas de *beaconing* que utilizan parámetros de transmisión fijos son poco flexibles, presentando varios inconvenientes y no pudiendo adaptarse a las dinámicas de los entornos vehiculares.
- d. El *Beaconing* Fijo de 1 Hz generó un bajo número de colisiones y un elevado error de posición, mientras que con el *Beaconing* Fijo de 10 Hz se obtuvo un alto número de colisiones y bajo error de posición.
- e. AdB-ADFP_{Tx} se desempeñó mejor que los algoritmos de *Beaconing* Fijos en los diferentes escenarios, logrando una mayor exactitud de posición que el *Beaconing* Fijo de 10 Hz, y una razón de entrega de paquetes similar a la del *Beaconing* Fijo de 1 Hz.
- f. Con AdB-ADFP_{Tx} para disminuir el número de colisiones mientras se limita el error de posición, es necesario reducir el rango de comunicación, pero sin llegar a violar la distancia de seguridad mínima requerida por el vehículo.
- g. No obstante, se debe destacar que los algoritmos de *Beaconing* Fijo registraron un número más elevado de nodos circundantes en la base de datos LDM que AdB-ADFP_{Tx}, debido al empleo de un mayor rango de comunicación.

Lo antes expuesto permite concluir que el algoritmo AdB-ADFP_{Tx} contribuye al desempeño efectivo de las aplicaciones de seguridad vial.

RECOMENDACIONES

- 1) Analizar el desempeño del algoritmo propuesto en situaciones donde la carga de *beaconing* exceda el 40 % de la capacidad del canal de comunicaciones y con otras funciones de ajuste de potencia, por ejemplo, estableciéndola en función de parámetros como la densidad de nodos.
- 2) Comparar el desempeño de AdB-ADFP_{Tx} con algoritmos de *beaconing* adaptativos que utilicen distintos enfoques para incrementar el nivel de conocimiento cooperativo.
- 3) Usar técnicas de optimización que permitan encontrar valores óptimos de frecuencia y potencia de transmisión de *beacon*, en función de métricas que evalúen el desempeño del sistema.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] European Union, “Transport in Figures - Overview of the most recent and most pertinent annual transport related statistics in Europe”, Statistical Pocketbook, 2014.
- [2] R. Stanica, E. Chaput and A. Beylot, “Simulation of vehicular ad-hoc networks: Challenges, review of tools and recommendations”, *Computer Networks*, pp. 3179–3188, 2011.
- [3] D. Fernández, et al., “Parking Assistance System for Leaving Perpendicular Parking Lots: Experiments in Daytime/Nighttime Conditions”, *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 2014.
- [4] J. Ploeg, et al., “Design and Experimental Evaluation of Cooperative Adaptive Cruise Control”, in *Proc. of the 14th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITS)*, Washington, DC, USA, 2011.
- [5] J. M. Sussman, “Intelligent vehicle highway systems: Challenge for the future”, in *Proc. of the Microwave Symposium Digest, IEEE MTT-S International*, Atlanta, GA, USA, pp. 101-104, 1993.
- [6] Federal Communications Commission, “FCC allocates spectrum in 5.9 GHz range for intelligent transportation systems uses”, Report No. ET 99-5, 1999.
- [7] Commission of the European Communities, “Commission Decision on the harmonized use of radio spectrum in the 5.875 – 5.905 MHz frequency band for safety-related applications of Intelligent Transport Systems (ITS)”, 2008.
- [8] IEEE P1609.0/D5, “IEEE Draft Guide for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) – Architecture”, IEEE Standard P1609.0/D5, Oct 2012.
- [9] Sitio Web CVIS, “Cooperative Vehicle Infrastructure Systems (CVIS)”, visitado en Marzo de 2016, disponible en: <http://www.cvisproject.org/>.
- [10] Sitio Web PATH, “California Partners for Advanced Transit and Highways (PATH)”, visitado en Marzo de 2016, disponible en: <http://www.path.berkeley.edu/>.
- [11] Sitio Web ITS Japonés, “Official web site of the Japan Intelligent Transportation Society”, visitado en Marzo de 2016, disponible en: <http://www.its-jp.org/>.
- [12] G. Karagiannis, et al., “Vehicular Networking: A Survey and Tutorial on Requirements, Architectures, Challenges, Standards and Solutions”, *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 2011.

- [13] H. Stubing, et al., “Sim^{TD}: a car-to-X system architecture for field operational tests”, IEEE Communications Magazine, vol. 48, no. 5, pp. 148–154, 2010.
- [14] A. Festag, et al., “Field operational tests for cooperative systems: a tussle between research, standardization and deployment”, in Proc. of the 8th ACM international workshop on vehicular inter-networking, Las Vegas, USA, pp. 73–78, Sept 2011.
- [15] J. Wilbrod and G. Segarra, “Système Coopératif Routier Expérimental”, Field Operational Tests, France, 2012.
- [16] J. Härri, F. Filali and C. Bonnet, “Mobility Models for Vehicular Ad Hoc Networks: A Survey and Taxonomy”, IEEE Communications & Tutorial, vol. 11, no. 4, 2009.
- [17] European Standard, “Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Part 3: Specifications of Decentralized Environmental Notification Basic Service”, Final Draft ETSI EN 302 637-3 v1.2.1, 2014.
- [18] European Standard, “Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Part 2: Specification of Cooperative Awareness Basic Service”, ETSI EN 302 637-2 v1.3.2, 2014.
- [19] European Standard, “Intelligent Transport Systems (ITS); Radiocommunications equipment operating in the 5 855 MHz to 5 925 MHz frequency band; Harmonized EN covering the essential requirements of article 3.2 of the R&TTE Directive”, ETSI EN 302 571 (V1.2.0), 2013.
- [20] J. B. Kenney, “Dedicated short-range communications (DSRC) standards in the United States,” in Proc. of the IEEE, vol. 99, no. 7, pp. 1162-1182, July 2011.
- [21] IEEE 802.11p, “Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications; Amendment 6: Wireless Access in Vehicular Environments”, IEEE Standard 802.11p, 2010.
- [22] K. A. Hafeez, L. Zhao, B. Ma and J. W. Mark, “Performance Analysis and Enhancement of the DSRC for VANET’s Safety Applications”, IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 62, no. 7, Sept 2013.
- [23] R. Reinders, E. M. van Eenennaam, G. Karagiannis, and G. J. Heijenk, “Contention window analysis for beaconing in VANETs,” in Seventh IEEE International Wireless Communications and Mobile Computing conference, IWCMC 2011, Istanbul, Turkey, July 2011.
- [24] M. Torrent-Moreno, M. Killat and H. Hartenstein, “The challenges of robust inter-vehicle communications”, IEEE Vehicle Technology Conference (VTC), Dallas, TX, USA, vol. 1, pp. 319–323, 2005.

- [25] VSC Consortium, “Vehicle Safety Communications Project Task 3- Final Report: Identify Intelligent Vehicle Safety Applications enabled by DSRC”, US DOT HS 809 859, March 2005.
- [26] ETSI TC ITS, “Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Definitions”, Technical Report, ETSI TR 102 638 V1.1.1, June 2009.
- [27] M. Boban and P. M. d'Orey, “Exploring the Practical Limits of Cooperative Awareness in Vehicular Communications”, IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015.
- [28] P. M. d'Orey and M. Boban, “Empirical Evaluation of Cooperative Awareness in Vehicular Communications”, IEEE 79th Vehicular Technology Conference: VTC2014-Spring, 2014.
- [29] M. Boban and P. M. d'Orey, “Measurement-based Evaluation of Cooperative Awareness for V2V and V2I Communication”, 6th IEEE Vehicular Networking Conference (VNC), 2014.
- [30] R. K. Schmidt, et al., “Exploration of Adaptive Beaconing for Efficient Intervehicle Safety Communication”, IEEE Network, vol. 24, pp. 14-19, 2010.
- [31] F. D. da Cunha, et al., “Data Communication in VANETs: A Survey, Challenges and Applications”, Research Report No. 8498, INRIA Saclay, March 2014.
- [32] COMeSafety D31, “D31 European ITS Communication Architecture Overall Framework Proof of Concept Implementation”, EU FP6 COMeSafety project (FP6-027377), Tech. Rep. COMeSafety Project Deliverable D31, October 2008.
- [33] C2C-CC, “Car to Car Communication Consortium Manifesto: Overview of the C2C-CC System”, Car to Car Communication Consortium (C2C-CC), Tech. Rep. Version 1.1, 2007.
- [34] F. Li and Y. Wang, “Routing in Vehicular Ad Hoc Networks: A Survey, IEEE Vehicular Technology Magazine”, June 2007.
- [35] C. D. Wang and J. P. Thompson, “Apparatus and Method for Motion Detection and Tracking of Objects in a Region for Collision Avoidance Utilizing a Real-Time Adaptive Probabilistic Neural Network”, U.S. Patent No. 5613039, 1997.
- [36] E. Coelingh, et al., “Collision Warning with Full Auto Brake and Pedestrian Detection -a practical example of Automatic Emergency Braking”, in 13th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), Sept 2010.
- [37] S. Panichpapiboon and W. Pattara-Atikom, “A Review of Information Dissemination Protocols for Vehicular Ad Hoc Networks”, IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 14, pp. 784–98, 2012.
- [38] Sitio Web U.S. DoT- Federal Highway Administration (FHWA), “The National Intersection Safety Problem”, FHWA-SA-10-005, visitado en Marzo de 2016, disponible en: <http://safety.fhwa.dot.gov/intersection/>.

- [39] M. R. Hafner, D. Cunningham, L. Caminiti and D. Del Vecchio, “Cooperative Collision Avoidance at Intersections: Algorithms and Experiments”, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol. 14, no. 3, Sept 2013.
- [40] 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, 2014.
- [41] J. Lee and B. Park, “Development and Evaluation of Cooperative Vehicle Intersection Control Algorithm under the connected vehicles environment”, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, pp. 81-90, 2012.
- [42] J. Ploeg, et al., “Connect & Drive: design and evaluation of cooperative adaptive cruise control for congestion reduction”, Journal of Modern Transportation, vol. 19, pp. 207-213, 2011.
- [43] L. Bañón, “Los usuarios en la vía – Generalidades”, Tránsito y seguridad vial, España, 2011.
- [44] Sitio Web Autocity, “Los autos con más aceleración”, visitado en Marzo de 2016, disponible en: <http://www.autocity.com/>.
- [45] R. K. Schmidt, et al., “Degradation of Transmission Range in VANETs caused by Interference,” Praxis der Informationsverarbeitung und Kommunikation, Special Issue on Mobile Ad Hoc Networks, no. 4, 2009.
- [46] ETSI Standard, Intelligent Transport Systems (ITS); European Profile Standard on the Physical and Medium Access Layer of 5 GHz ITSs, Final Draft ETSI ES 202 663 V1.1.0. 2009.
- [47] A. Brakemeier, “White Paper on Network Design Limits and VANET Performance”, Version 0.5, Car2Car Communication Consortium (C2C-CC), Nov 2008.
- [48] M. H. Manshaei and J-P. Hubaux, “Performance Analysis of the IEEE 802.11 Distributed Coordination Function: Bianchi Model”, Mobile Networks, March 2010.
- [49] ISO 21214, “Intelligent transport systems - Communications access for land mobiles (CALM) - Infra-red systems”, ISO 21214 International Standard, Second edition, 2015.
- [50] IEEE 802.15.1, “Part 15.1: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Wireless Personal Area Networks (WPANs)”, Jun 2002.
- [51] ISO 21216, “Intelligent transport systems - Communication access for land mobiles (CALM) - Millimetre wave air interface”, Second edition, 2012.
- [52] ETSI TS 123 101, “Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); General Universal Mobile Telecommunications System (UMTS) architecture”, V12.0.0, 2014.

- [53] R. Verma and P. Garg, “Interpretation of IEEE 802.16e (Wimax)”, *Global Journal of Computer Science and Technology Network, Web & Security*, vol. 13, pp. 9-13, 2013.
- [54] IEEE 802.11, *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, 2007.
- [55] European Standard, “Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television”, ETSI EN 300 744 V1.6.1, 2009.
- [56] ETSI TC ITS, “Digital Video Broadcasting (DVB); DVB-H Implementation Guidelines”, Technical Report, ETSI TR 102 377 V1.4.1, Jun 2009.
- [57] ETSI TC ITS, “Digital Audio Broadcasting (DAB); Data Broadcasting - MPEG-2 TS streaming”, Technical Specification, ETSI TS 102 427 V1.1.1, 2005.
- [58] K. Dar, et al., “Wireless Communication Technologies for ITS Applications”, *IEEE Communications Magazine, Topics in Automotive Networking*, May 2010.
- [59] IEEE 1609.1, “IEEE Trial-Use Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) - Resource Manager”, IEEE Standard 1609.1, 2006.
- [60] IEEE 1609.2, “IEEE Trial-Use Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) - Security Services for Applications and Management Messages”, IEEE Standard 1609.2, 2006.
- [61] IEEE 1609.3, “IEEE Trial-Use Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) - Networking Services”, IEEE Standard 1609.3, 2010.
- [62] IEEE 1609.4, “IEEE Trial-Use Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) - Multi-channel Operation”, IEEE Standard 1609.4, 2011.
- [63] ISO 21217, “Intelligent transport systems - Communications access for land mobiles (CALM) - Architecture”, ISO 21217 International Standard, Second edition, 2014.
- [64] Sitio Web C2C-CC, “Car to Car Communication Consortium (C2C-CC)”, visitado en Abril de 2016, disponible en: <https://www.car-2-car.org/>.
- [65] Sitio Web GeoNet, “IPv6 GeoNetworking (GeoNet)”, visitado en Febrero de 2016, disponible en: <http://www.geonetproject.eu/>.
- [66] GeoNet, “D1.2 Final GeoNet Architecture Design”, IPv6 GeoNetworking (GeoNet): Geographic addressing and routing for vehicular communications, Deliverable D1.2 of the GeoNet project, January 2010.
- [67] M. Torrent-Moreno, “Inter-vehicle communications: Achieving safety in a distributed wireless environment: Challenges, systems and protocols,” Ph.D. dissertation, 2007.

- [68] J. Mišić, G. Badawy and V. B. Mišić, “Performance Characterization for IEEE 802.11p Network With Single Channel Devices”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 60, no. 4, pp. 1775-1787, May 2011.
- [69] M. Torrent-Moreno, et al., “Vehicle-to-vehicle communication: Fair transmit power control for safety-critical information,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 58, no. 7, pp. 3684–3703, Sept 2009.
- [70] K. Bilstrup, E. Uhlemann, E. G. Strom and U. Bilstrup, “Evaluation of the IEEE 802.11p MAC method for vehicle-to-vehicle communication,” in *Proc. of IEEE 68th Veh. Technol. Conf.*, pp. 1–5, 2008.
- [71] M. Sepulcre and J. Gozalvez, “On the Importance of Application Requirements in Cooperative Vehicular Communications”, in *Proc. of the 8th International Conference on Wireless On-Demand Network Systems and Services*, 2011.
- [72] Q. Xu, T. Mak, J. Ko and R. Sengupta, “Vehicle-to-vehicle safety messaging in DSRC,” in *Proc. 1st ACM Int. Workshop VANET*, Philadelphia, PA, pp. 19–28, Oct. 2004.
- [73] H.-J. Reumerman, M. Roggero and M. Ruffini, “The application-based clustering concept and requirements for intervehicle networks,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 43, no. 4, pp. 108–113, Apr 2005.
- [74] F. Schmidt-Eisenlohr, et al., “Simulation platform for intervehicle communications and analysis of periodic information exchange,” in *Proc. 4th IEEE/IFIP Conf. WONS*, Obergurgl, Austria, pp. 50–58, Jan 2007.
- [75] M. R. J. Sattari, R. M. Noor and H. Keshavarz, “A Taxonomy for Congestion Control Algorithms in Vehicular Ad Hoc Networks”, *2012 IEEE International Conference on Communication Networks and Satellite (ComNetSat)*, pp. 44–49, Jul. 2012.
- [76] J. Breu, A. Brakemeier and M. Menth, “Analysis of Cooperative Awareness Message Rates in VANETs”, in *Proc. of the IEEE Publishing 13th International Conference on ITS Telecommunications*, Tampere, Finland, Nov 2013.
- [77] J. Breu, A. Brakemeier and M. Menth, “A quantitative study of Cooperative Awareness Messages in production VANETs”, *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2014.
- [78] V. Taliwal, et al., “Empirical Determination of Channel Characteristics for DSRC Vehicle-to-vehicle Communication,” *Proceedings of the 1st ACM International Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks*, 2004.
- [79] M. Killat and H. Hartenstein, “An Empirical Model for Probability of Packet Reception in Vehicular Ad Hoc Networks,” *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, pp. 1–12, 2009.

- [80] E. M. Van Eenennaam, W. K. Wolterink, G. Karagiannis and G. J. Heijenk, “Exploring the solution space of beaconing in VANETs,” in Proc. of 1st IEEE Vehicular Networking Conference (VNC), Tokyo, Japan, pp. 1–8, 2009.
- [81] Ministerio de Interior - Dirección general de tráfico, “Código de Tráfico y Seguridad Vial”, Boletín Oficial del Estado, España, 2015.
- [82] C. Sommer, Z. Yao, R. German and F. Dressler, “Simulating the Influence of IVC on Road Traffic using Bidirectionally Coupled Simulators”, IEEE Workshops, pp. 1–6, 2008. Disponible en: <http://veins.car2x.org/>.
- [83] D. Eckhoff and C. Sommer, “A Multi-Channel IEEE 1609.4 and 802.11p EDCA Model for the Veins Framework”, in Proc. of 5th ACM/ICST International Conference on Simulation Tools and Techniques for Communications, Networks and Systems (SIMUTools 2012): 5th ACM/ICST International Workshop on OMNeT++, 2012.
- [84] Sitio Web OpenStreetMap. Disponible en: <http://www.openstreetmap.org/>.
- [85] OMNeT++ Simulator. Disponible en: <http://www.omnetpp.org/>.
- [86] Simulation of Urban Mobility. Disponible en: <http://sumo.sourceforge.net/>.
- [87] F. Karnadi, Z. Mo and K. Lan, “Rapid generation of realistic mobility models for VANET”, in: Proc. of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference, pp. 2506–2511, 2007.

ANEXOS

ANEXO 1 – “Definición del paquete C2CNetMessage”

```
cplusplus {{
#include "Coord.h"
}}

class noncobject Coord;

packet C2CNetMessage {
    int c2cnetVersion = 0; // Versión del beacon
    int securityType = 0; // Tipo de seguridad del beacon
    int senderAddress = 0; // Identificador del nodo transmisor
    int receiverAddress = -1; // Identificador del nodo receptor
    int channelNumber; // Número del canal de transmisión
    int hopLimit; // Número máximo de saltos
    int priority; // Prioridad del beacon
    double txPower; // Potencia del nodo transmisor
    Coord senderPos; // Posición del nodo transmisor
    double senderSpeed; // Velocidad del nodo transmisor
    double senderAngle; // Dirección del nodo transmisor
    double senderAcceleration; // Aceleración del nodo transmisor
    int payloadLength; // Tamaño de la carga útil del beacon
    int typeofPacket; // Tipo de paquete
    int beaconLengthBits; // Tamaño del beacon
    double beaconInterval; // Intervalo de beacon
    simtime_t timestamp = 0; // Estampa de tiempo del beacon
    double senderEpmín; // Error de posición mín. estimado por el nodo Tx
    double senderEpmáx; // Error de posición máx. estimado por el nodo Tx
    double senderEpprom; // Error de posición prom. estimado por el nodo Tx
}
```

ANEXO 2 – “Funciones principales de AdB-ADFPTx”

```
beacon_Interval = calcIbforEPromLimDef(); // Se calcula el interv. de beacon para cierto EProm
txPower = calcPTx(); // Se calcula La PTx según La CRCn y FTx
macc2c->SetTxPower(txPower); // Se establece La potencia de transmisión a nivel MAC
```

ANEXO 3 – “Función que ajusta el intervalo de beacon según la velocidad y aceleración del vehículo para obtener un error de posición promedio límite”

```
virtual double calcIbforEPromLimDef();

double Beaoning::calcIbforEPromLimDef() {
    vi = traci->getSpeed(); // Se obtiene La velocidad del vehículo
    ac = traci->getAcceleration(); // Se obtiene La aceleración del vehículo
    RCmaxSist = cmanager->calcInterfDist(); // Se obtiene el rango de comunicación máximo
    propagationDelay = RCmaxSist / SpeedofSignalinAir; // Se obtiene La demora de propagación
    bitrate = macc2c->getBitrate(); // Se obtiene La razón de bits
}
```

```

Dtx = DH + (beaconLengthBits / bitrate); // Se computa La demora de transmisión
Dtxrx = Dtx + propagationDelay; // Se computa La demora de transmisión-recepción
EProm = 1.0; // Se establece un error de posición promedio igual a 1 metro

double A = ac; // Variable A de La expresión del Discriminante (ver sección 2.2.1)
double B = 2 * (vi + ac * Dtxrx); // Variable B de La expresión del Discriminante (2.2.1)
double C = 4 * (vi * Dtxrx - EProm); // Variable C de La expresión del Discriminante (2.2.1)
double D; // Definición del Discriminante
double Ib1; // Se define el intervalo de beacon 1 (Solución uno del Discriminante)
double Ib2; // Se define el intervalo de beacon 2 (Solución dos del Discriminante)

if (vi == 0 && ac == 0) {
    EV << "Vehículo detenido: Ib = 1s" << "\n";
    Ib = 1; // Se define un intervalo de beacon igual a 1s
}
else if (vi == 0 && ac > 0) {
    EV << "vi == 0 && ac > 0 -> Vehículo empezando a mov: Ib se halla con el D." << "\n";
    D = (B * B) - 4 * A * C; // Se computa el valor del Discriminante
    if (D > 0) {
        Ib1 = (- B + (sqrt(D))) / (2 * A); // Se computa el intervalo de beacon 1
        Ib2 = (- B - (sqrt(D))) / (2 * A); // Se computa el intervalo de beacon 2
        if (Ib1 > 0 && Ib2 <= 0) {
            Ib = Ib1;
            if (Ib > 1) {
                Ib = 1; // Se define un intervalo de beacon igual a 1s
            }
        }
        else if (Ib2 > 0 && Ib1 <= 0) {
            Ib = Ib2;
            if (Ib > 1) {
                Ib = 1; // Se define un intervalo de beacon igual a 1s
            }
        }
        else if (Ib1 > 0 && Ib2 > 0) {
            if (Ib1 == Ib2 && Ib1 <= 1) {
                Ib = Ib1; // Se define como intervalo de beacon el Ib1
            }
            else if (Ib1 > Ib2 && Ib1 <= 1) {
                Ib = Ib1; // Se define como intervalo de beacon el Ib1
            }
            else if (Ib2 > Ib1 && Ib2 <= 1) {
                Ib = Ib2; // Se define como intervalo de beacon el Ib2
            }
            else {
                Ib = 1; // Se define un intervalo de beacon igual a 1s
            }
        }
        else if (Ib1 == 0 && Ib2 == 0) {
            Ib = 0;
        }
        else if (Ib1 < 0 && Ib2 < 0) {
            opp_error("vi == 0 && ac > 0 -> Ib1 < 0 && Ib2 < 0. Chequear algoritmo!!.");
        }
    }
    else if (D <= 0) {
        opp_error("Si vi == 0 y ac > 0 entonces D no puede ser <= 0. Chequear algoritmo!!.");
    }
}
else if (vi > 0 && ac == 0) {
    EV << "Vehículo en movimiento con velocidad const: Ib se despeja de expresión" << "\n";
    Ib = (4 * EProm - 4 * vi * Dtxrx) / (2 * vi); // Se calcula Ib según expresión 2.29
    if (Ib > 1) {
        Ib = 1; // Se define un intervalo de beacon igual a 1s
    }
}
else if (vi > 0 && ac > 0) {
    EV << "vi > 0 && ac > 0 -> Vehíc. en mov. aumentand. vel: Ib se halla con el D." << "\n";
    D = (B * B) - 4 * A * C; // Se computa el valor del Discriminante
    if (D > 0) {

```

```

Ib1 = (- B + (sqrt(D))) / (2 * A); // Se computa el intervalo de beacon 1
Ib2 = (- B - (sqrt(D))) / (2 * A); // Se computa el intervalo de beacon 2
if (Ib1 > 0 && Ib2 <= 0) {
    Ib = Ib1; // Se define como intervalo de beacon el Ib1
    if (Ib > 1) {
        Ib = 1; // Se define un intervalo de beacon igual a 1s
    }
}
else if (Ib2 > 0 && Ib1 <= 0) {
    Ib = Ib2; // Se define como intervalo de beacon el Ib2
    if (Ib > 1) {
        Ib = 1; // Se define un intervalo de beacon igual a 1s
    }
}
else if (Ib1 > 0 && Ib2 > 0) {
    if (Ib1 == Ib2 && Ib1 <= 1) {
        Ib = Ib1; // Se define como intervalo de beacon el Ib1
    }
    else if (Ib1 > Ib2 && Ib1 <= 1) {
        Ib = Ib1; // Se define como intervalo de beacon el Ib1
    }
    else if (Ib2 > Ib1 && Ib2 <= 1) {
        Ib = Ib2; // Se define como intervalo de beacon el Ib2
    }
    else {
        Ib = 1; // Se define un intervalo de beacon igual a 1s
    }
}
else if (Ib1 == 0 && Ib2 == 0) {
    Ib = 0;
}
else if (Ib1 < 0 && Ib2 < 0) {
    opp_error("vi > 0 && ac > 0 -> Ib1 < 0 && Ib2 < 0. Chequear algoritmo!!");
}
}
else if (D <= 0) {
    opp_error("Si vi > 0 && ac > 0 entonces D no puede ser <= 0. Chequear algoritmo!!");
}
}
else if (vi > 0 && ac < 0) {
    EV << "vi > 0 && ac < 0 -> Vehíc. en mov. dismi. vel: Ib se halla con el D." << "\n";
    D = (B * B) - 4 * A * C; // Se computa el valor del Discriminante
    if (D > 0) {
        Ib1 = (- B + (sqrt(D))) / (2 * A); // Se computa el intervalo de beacon 1
        Ib2 = (- B - (sqrt(D))) / (2 * A); // Se computa el intervalo de beacon 2
        if (Ib1 > 0 && Ib2 < 0) {
            Ib = Ib1; // Se define como intervalo de beacon el Ib1
            if (Ib > 0.2) {
                Ib = 0.2; // Se define un intervalo de beacon igual a 200 ms
            }
        }
        else if (Ib2 > 0 && Ib1 < 0) {
            Ib = Ib2;
            if (Ib > 0.2) {
                Ib = 0.2; // Se define un intervalo de beacon igual a 200 ms
            }
        }
        else if (Ib1 >= 0 && Ib2 >= 0) {
            if (Ib1 == Ib2 && Ib1 <= 0.2) {
                Ib = Ib1; // Se define como intervalo de beacon el Ib1
            }
            else if (Ib1 > Ib2 && Ib1 <= 0.2) {
                Ib = Ib1; // Se define como intervalo de beacon el Ib1
            }
            else if (Ib2 > Ib1 && Ib2 <= 0.2) {
                Ib = Ib2; // Se define como intervalo de beacon el Ib2
            }
            else if (Ib1 < Ib2 && Ib1 <= 0.2) {
                Ib = Ib1; // Se define como intervalo de beacon el Ib1
            }
        }
    }
}

```

```

    }
    else if (Ib2 < Ib1 && Ib2 <= 0.2) {
        Ib = Ib1; // Se define como intervalo de beacon el Ib1
    }
    else {
        Ib = 0.2; // Se define un intervalo de beacon igual a 200 ms
    }
}
else if (Ib1 == 0 && Ib2 == 0) {
    Ib = 0;
}
else if (Ib1 < 0 && Ib2 < 0) {
    opp_error("vi > 0 && ac < 0 -> Ib1 < 0 && Ib2 < 0. Chequear algoritmo!!.");
}
}
else if (D <= 0) {
    Ib = 0.2; // Se define un intervalo de beacon igual a 200 ms
}
}

return Ib; // Retorna el intervalo de beacon
}

```

ANEXO 4 – “Función que calcula la potencia de transmisión del vehículo”

```

virtual double calcPTx();

double Beaoning::calcPTx() {
    double Ptx = 0;
    Ftx = 1 / beacon_Interval; // Se calcula La frecuencia de transmisión
    Ftx = ceil(Ftx); // El valor de frecuencia de transmisión se redondea por exceso
    FtxVec.record(Ftx);

    CBni = (Ftx * beaconLengthBits) / 1000000; // Se calcula La carga de beaconing del nodo
    CBniVec.record(CBni);

    CRBnks = bprocessing->calcCRBNodesLDM(); // Se calcula La carga relativa de beaconing
    CRBnksVec.record(CRBnks); // generada por Los nodos circundantes

    CRCn = (CBni + CRBnks) / (bitrate / 1000000); // Se calcula La carga relativa del canal
    CRCnVec.record(CRCn); // de comunicaciones normalizada

    PtxMin = calcPTxMin(); // Se calcula La potencia de transmisión mínima

    if (CRCn <= 0.4) {
        Ptx = PtxMin + ((deltaPTx * (0.4 - CRCn) * 2.5) / (pow (Ftx, 2))); // Se calcula La PTx
    }
    else if (CRCn > 0.4) {
        Ptx = PtxMin; // Se asigna La PTx mínima a la potencia de transmisión
    }

    return Ptx; // Se retorna el valor de potencia de transmisión
}

```

ANEXO 5 – “Función que calcula la potencia de transmisión mínima”

```

virtual double calcPTxMin();

double Beaoning::calcPTxMin() {
    dPR = calcdPR(); // Se calcula La distancia de percepción-reacción
    dPRVec.record(dPR);
    dF = calcdF(); // Se calcula La distancia de frenado
}

```

```

dFVec.record(dF);
dD = dPR + dF; // Se calcula la distancia de detención (ver ecuación 2.23) sección 2.2.3
dDVec.record(dD);

vi = traci->getSpeed(); // Se obtiene la velocidad del vehículo
double size = bprocessing->sizeLDM(); // Se obtiene el tamaño de la tabla de vecinos
if (vi > 0 && size > 0) {
    double distDmax = bprocessing->calcdDmaxNodesLDM(); // Se obt. La mayor dD de la tabla
    dS = dD + distDmax; // Se calcula la distancia de seguridad
}
else if (vi > 0 && size == 0) {
    dS = dD * 2; // Se calcula la distancia de seguridad
}
else if (vi == 0 && size > 0) {
    dS = bprocessing->calcdDmaxNodesLDM(); // Se calcula la distancia de seguridad
}
else if (vi == 0 && size == 0) {
    dS = dSmin; // A la distancia de seguridad se le asigna el valor mínimo
}

if (dS <= dSmin) {
    dS = dSmin; // A la distancia de seguridad se le asigna el valor mínimo
}

RCmin = dS; // Al rango de comunicación mínimo se le asigna la distancia de seguridad
RCminVec.record(RCmin);

double Ptx = 0;
waveLength = cmanager->getWaveLength(); // Se obtiene el valor de longitud de onda
minReceivePower = cmanager->getMinReceivePower(); // Se obtiene la sensibilidad
alpha = cmanager->getAlpha(); // Se obtiene el exponente de pérdida de trayecto
Ptx = (minReceivePower * 16.0 * M_PI * M_PI * pow(RCmin, alpha)) / pow(waveLength, 2);
return Ptx; // Se retorna el valor de potencia de transmisión
}

```

ANEXO 6 – “Función que calcula la distancia de percepción-reacción”

```

virtual double calcdPR();

double Beaoning::calcdPR() {
    vi = traci->getSpeed(); // Se obtiene la velocidad del vehículo
    ac = traci->getAcceleration(); // Se obtiene la aceleración del vehículo
    double dpr = (ac * pow(tPR, 2)) / 2 + vi * tPR; // Se halla la dist. de percep.- reacción
    if (dpr < 0) { // Ver ecuación 2.24 (Sección 2.2.3)
        dpr = 0;
    }
    return dpr; // Se retorna el valor de la distancia de percepción- reacción
}

```

ANEXO 7 – “Función que calcula la distancia de frenado”

```

virtual double calcdF();

double Beaoning::calcdF() {
    vi = traci->getSpeed(); // Se obtiene la velocidad del vehículo
    double df = pow(vi, 2) / (2 * u * g + 2 * 6.0); // Se halla la distancia de frenado
    if (df < 0) { // Ver ecuación 2.25 (Sección 2.2.3)
        df = 0;
    }
    return df; // Se retorna el valor de la distancia de frenado
}

```

ANEXO 8 – “Código para el cómputo de la carga relativa de beaconing”

```

senderTxPower = c2cnetm->getTxPower(); // Se obtiene La potencia de Tx del nodo vecino
senderRC = calcRC(senderTxPower); // Se calcula el RC del nodo vecino
nodePos = traci->getPositionAt(simTime()); // Se obtiene La posición del nodo
Xl = nodePos.x; // Se obtiene La coordenada X de La posición del nodo
Yl = nodePos.y; // Se obtiene La coordenada Y de La posición del nodo
Xv = senderPos.x; // Se obtiene La coordenada X de La posición del nodo vecino
Yv = senderPos.y; // Se obtiene La coordenada Y de La posición del nodo vecino
dp = pow(pow((Xl - Xv),2) + pow((Yl - Yv),2),0.5); // Se calcula La diferencia de posición

waveLength = cmanager->getWaveLength(); // Se obtiene La Longitud de onda
dco = (4.0 * M_PI * pow (hantena, 2)) / waveLength; // Se calcula La dist. de transición
gamma = 1 / (dco * dco); // Se calcula el parámetro gamma

if (dp <= dco) {
    PrNak = pow (2.7183, (-3 * pow ((dp/senderRC), 2))) * (1 + (2 * pow ((dp/senderRC), 2))
+ (4.5 * pow ((dp/senderRC), 4))); // Se calcula La prob. de recepción según Nakagami
}
else if (dp > dco) {
    PrNak = pow (2.7183, -3 * gamma * pow ((dp*dp)/senderRC, 2)) * (1 + 2 * gamma * pow
((dp*dp)/senderRC, 2) + 4.5 * pow (gamma, 2) * pow ((dp*dp)/senderRC, 4));
}

propagationDelay = dp / SpeedofSignalinAir;
bitrate = macc2c->getBitrate(); // Se obtiene La razón de datos
Dtx = DH + beaconLengthBits / bitrate; // Se calcula La demora de transmisión
Dtxrx = Dtx + propagationDelay; // Se calcula La demora de transmisión-recepción

nslots = senderbeacon_Interval / Dtx; // Se calcula el número de slots del nodo vecino
Pa = 1 / nslots; // Se calcula La probabilidad de intento de transmisión
Pb = 1 - Pa; // Se calcula La probabilidad de no intento de transmisión

nslotsni = beacon_Interval / Dtx; // Se calcula el número de slots del nodo
Pani = 1 / nslotsni; // Se calcula La probabilidad de intento de transmisión
Pbni = 1 - Pani; // Se calcula La probabilidad de no intento de transmisión

PbNodes = calcPbNodes();
ProbnoTxOneSlot = Pbni * PbNodes; // Se calcula La probabilidad de no transmitir en un slot

ProbInterf = (2 * Dtx) / senderbeacon_Interval; // Se calc. La prob. de interf. con una Tx
ProbNoInterf = 1 - ProbInterf; // Se calc. La probabilidad de no interferir con una Tx

ProbnoInterfNeighbNodes = calcProbnoInterfNeighbNodes(); // Se calc. La probabilidad de
// no interferencia de los nodos vecinos
ProbSuccTx = ProbnoTxOneSlot * ProbnoInterfNeighbNodes; // Se calc. La prob. de Tx exitosa

ProbSuccRx = PrNak * ProbSuccTx; // Se calcula La probabilidad de Rx exitosa

CRBnk = ((Ftx * beaconLengthBits) / 1000000) * ProbSuccRx; // Se calcula La carga relativa
// generada por los nodos vecinos

```