Análisis del comportamiento de los mecanismos de *Beaconing* adaptativos en *Platooning*

Mónica Ruiz Macías

Máster Universitario en Ingeniería de Telecomunicación

Telemática

José López Vicario

08/01/2018

Copyright © 2018 Mónica Ruiz Macias
Permission is granted to copy, distribute and/or modify this document under the terms of the GNU Free Documentation License, Version 1.3 or any later version published by the Free Software Foundation; with no Invariant Sections, no Front-Cover Texts, and no Back-Cover Texts.

A copy of the license is included in the section entitled "GNU Free Documentation License".

FICHA DEL TRABAJO FINAL

Título del trabajo:	*Análisis del comportamiento de los mecanismos de Beaconing adaptativos en Platooning*
Nombre del autor:	*Mónica Ruiz Macías*
Nombre del consultor/a:	*José López Vicario*
Nombre del PRA:	*José López Vicario*
Fecha de entrega (01/2018):	01/2018
Titulación:	*Máster Universitario en Ingeniería de Telecomunicación*
Área del Trabajo Final:	*Telemática*
Idioma del trabajo:	*Castellano*
Palabras clave	*V2X, Beaconing, Platooning.*

Resumen del Trabajo:

Las aplicaciones vehiculares cooperativas tienen unos requisitos de confiabilidad y latencia que son difíciles de cumplir con el actual estándar 802.11p y la utilización de mecanismos de *Beaconing* estáticos. Esto es debido principalmente, a que, en determinadas situaciones de tráfico, se produce congestión en el canal de comunicación provocando colisiones y retrasos en la recepción de los paquetes transmitidos.

Para poder cumplir con las altas exigencias dadas por las aplicaciones vehiculares, recientemente se han propuesto mecanismos de *Beaconing* adaptativos, cuyo objetivo es modificar ciertos parámetros de transmisión de forma dinámica atendiendo a diferentes criterios, como puede ser la situación del tráfico.

Una aplicación que utiliza comunicaciones V2X es *Platooning*. Esta aplicación consiste en formar agrupaciones de vehículos que intercambian *beacons* a una alta frecuencia y tiene como principal objetivo mejorar la seguridad y la eficiencia del tráfico. En situaciones de alta densidad de tráfico es posible que esta aplicación no cumpla con los requisitos de rendimiento debido a la congestión del canal de comunicación y, por lo tanto, es un claro ejemplo en el que se necesita el uso de mecanismos de *Beaconing* adaptativos.

Por ello, en este trabajo se realiza un estudio de los mecanismos de *Beaconing*, al igual que un análisis de diferentes escenarios en los que se incluye la propia aplicación de *Platooning* y a partir de simulaciones, se estudia el impacto que tienen algunos de los parámetros de la comunicación en el rendimiento del sistema. Como conclusión, se demuestran las carencias que existen actualmente en los protocolos de *Beaconing* estáticos y que podrían ser solventadas utilizando este tipo de mecanismos adaptativos.

Abstract:

Cooperative vehicular applications have reliability and latency requirements which are difficult to achieve using the current 802.11p standard and fixed Beaconing approaches. This is mainly since, in certain traffic situations, congestion occurs in the communication channel causing collisions and delays in the reception of the transmitted packets.

In order to meet the high requirements of vehicle applications, adaptive Beaconing approaches have recently been proposed, their aim is to modify certain transmission parameters dynamically, considering different criteria, such as the traffic situation.

An application that uses V2X communications is Platooning. This application consists of forming groups of vehicles that exchange beacons at a high frequency and its main target is to improve traffic safety and efficiency. In situations of high traffic density, it is possible that this application does not meet the performance requirements due to the congestion of the communication channel and, therefore, this is a clear example in which the use of adaptive Beaconing approaches is needed.

Therefore, in this work a study of the Beaconing approaches is carried out, as well as an analysis of different scenarios in which the Platooning application itself is included and based on simulations, the impact of some communication parameters in the performance of the system. In conclusion, the shortcomings that currently exist in the fixed Beaconing approaches are demonstrated and could be solved using this type of adaptive approaches.

Índice

1. Introducción ... 1
1.1 Contexto y justificación del Trabajo ... 1
1.2 Elementos de las VANETs ... 1
1.3 Tipos de Comunicación ... 2
1.4 Aplicaciones en sistemas vehiculares cooperativos ... 3
1.5 Mecanismos de *Beaconing* y sus limitaciones ... 5
1.6 Objetivos del Trabajo ... 6
1.7 Enfoque y método seguido ... 7
1.8 Planificación del Trabajo ... 7
1.8.1 Recursos ... 7
1.8.2 Hitos ... 8
1.8.3 Evolución del proyecto ... 9
1.9 Breve sumario de productos obtenidos ... 10
1.10 Breve descripción de los otros capítulos de la memoria ... 10
2. Marco teórico ... 11
2.1 Estándares ... 11
2.2 802.11p ... 11
2.3 Geonetworking ... 14
2.4 IEEE 1609.4 DSRC ... 14
2.5 Basic Transport Protocol (BTP) ... 15
2.6 IEEE 802.2 ... 15
2.7 Cooperative Awareness Messages (CAM) ... 15
2.8 Decentralized Environmental Notification Messages (DENM) ... 15
2.9 Service Announcement Message (SAM) ... 16
2.10 DSRC WSMP IEEE 1609.3 ... 17
3. Estado del arte ... 19
3.1 Proyectos ITS relacionados con las VANETs ... 19
3.2 Mecanismos de *Beaconing* ... 21
Mecanismos de *Beaconing* estáticos ... 24
Mecanismos de *Beaconing* adaptativos ... 25
3.3 *Platooning* ... 32
3.4 Herramientas de simulación ... 36
4. Descripción del escenario ... 41
4.1 Entorno de simulación ... 41

4.2 Métricas de rendimiento 42
5. Simulación de redes vehiculares 44
5.1 Escenario de tráfico aleatorio en un entorno urbano 44
Escenario 1 45
Escenario 2 47
Escenario 3 50
Escenario 4 52
5.2 Escenario de tráfico para *Platooning* en una autopista 56
Escenario 1 57
Escenario 2 59
Escenario 3 61
Escenario 4 64
Escenario 5 66
6. Conclusiones 70
7. Glosario de siglas 72
8. Bibliografía 73

Lista de figuras

Figura 1. Ejemplo de comunicaciones ITS-V2X [23]..... 3
Figura 2. Diseminación de *beacons*. [51]..... 5
Figura 3. Concepto de *Platooning* [6] 6
Figura 4. Diagrama de hitos 8
Figura 5. Diagrama de Gantt de la planificación de este proyecto. 9
Figura 6. Estándares ITS G5 (dcha.) y WAVE (izq.) [71]..... 12
Figura 7 Espectro USA y Europa y división de los canales [13]..... 12
Figura 8. ETSI ITS G5 Especificación de canal y mensaje [22] 17
Figura 9. Lugares en los que se realizaron las pruebas [23]. 20
Figura 10. *European Corridor* [24] 21
Figura 11. Estructura esquematizada de la pila de protocolos V2X [28]..... 21
Figura 12. Flujo de envío/recepción de beacons [28]. 22
Figura 13. Protocolos de *Beaconing*..... 23
Figura 14. Comparación de áreas con distinta densidad de vehículos [33]. 24
Figura 15. Rango de conocimiento en función de la distancia [33]. 24
Figura 16. Escenario de mecanismo de reenvío con nodos bloqueados dinámicamente [33]. 25
Figura 17. Relación del tipo de información con el impacto que causa en el sistema. 27
Figura 18. Ejemplo del concepto de *Platooning* junto con conducción individual [43]. 33
Figura 19. Controlador de dos niveles para la estrategia de control *predecessor-leader* [57]..... 34
Figura 20. Simuladores existentes en la actualidad [65]..... 39
Figura 21. Comparación de los simuladores de VANETs [65]..... 40
Figura 22. Estructura del simulador extendido con PLEXE [61]..... 41
Figura 23. Esquema de PLEXE integrado con el resto de las herramientas de simulación [67]. 42
Figura 24. Escenario de tráfico del ejemplo de VEINS..... 44
Figura 25. Escenario 1: Tiempo de ocupación respecto al tiempo de simulación. 46
Figura 26. Escenario 1: Colisiones que se producen en la capa física para todos los nodos. 46
Figura 27. Escenario 1: *Broadcasts* recibidos y paquetes perdidos..... 47
Figura 28. Escenario 1: *E2E Delay* promedio a lo largo del tiempo de simulación. 47
Figura 29. Escenario 2: Tiempo de ocupación respecto al tiempo total de simulación. 48
Figura 30. Escenario 2: Colisiones que se producen en la capa física de cada nodo. 49
Figura 31. Escenario 2: Broadcasts recibidos y paquetes perdidos..... 49

Figura 32. Escenario 2: *E2E Delay* promedio a lo largo del tiempo de simulación. 50
Figura 33. Escenario 3: Tiempo de ocupación respecto al tiempo total de simulación. 51
Figura 34. Escenario 3: Colisiones que se producen en la capa física. 51
Figura 35. Escenario 3: *E2E Delay* promedio a lo largo del tiempo de simulación. 52
Figura 36. Escenario 3: *Broadcasts* recibidos y paquetes perdidos..... 52
Figura 37. Escenario 4: Tiempo de ocupación respecto al tiempo total de simulación. 53
Figura 38. Escenario 4: Colisiones que se producen en la capa física. 54
Figura 39. Escenario 4: *Broadcasts* recibidos y paquetes perdidos..... 54
Figura 40. Escenario 4: *E2E Delay* promedio a lo largo del tiempo de simulación. 55
Figura 41. Simulación con SUMO de un *platoon* en una autopista..... 56
Figura 42. Escenario 1: Tiempo de ocupación respecto al tiempo total de simulación. 58
Figura 43. Escenario 1: *Broadcasts* recibidos y paquetes perdidos..... 58
Figura 44. Distancia entre los vehículos del platoon. 59
Figura 45. Escenario 1: *E2E Delay* a lo largo del tiempo. 59
Figura 46. Escenario 2: Tiempo de ocupación respecto al tiempo total de simulación. 60
Figura 47. Escenario 2: *E2E Delay* promedio a lo largo del tiempo..... 60
Figura 48. Escenario 2: Distancia entre vehículos del *platoon*. 61
Figura 49. Escenario 3: *E2E Delay* a lo largo del tiempo de simulación..... 62
Figura 50. Escenario 3: Tiempo de ocupación respecto al tiempo total de simulación. 62
Figura 51. Escenario 3: Distancia entre vehículos del *platoon*. 63
Figura 52. Simulación del entorno con SUMO. 64
Figura 53. Escenario 4: Tiempo de ocupación respecto al tiempo total de simulación. 65
Figura 54. Escenario 4: Paquetes perdidos respecto a los *broadcasts* recibidos. 65
Figura 55. Escenario 4: *E2E Delay* a lo largo del tiempo de simulación..... 66
Figura 56. Distancia entre los vehículos del *platoon*..... 66
Figura 57. Escenario 5: Tiempo de ocupación respecto al tiempo total de simulación. 67
Figura 58. Escenario 5: *Broadcasts* recibidos y paquetes perdidos..... 67
Figura 59. Escenario 5: *E2E Delay* a lo largo del tiempo de simulación..... 68
Figura 60. Escenario 5: Distancia entre vehículos del *platoon*. 68

Lista de tablas

Tabla 1: Definición del Set Básico de Aplicaciones [1] 4
Tabla 2. Parámetros del primer escenario de simulación. 45
Tabla 3. Modificaciones en los valores para obtener el escenario 2. 48
Tabla 4. Modificaciones en los valores para obtener el escenario 3. 50
Tabla 5. Modificaciones en los valores para obtener el escenario 4. 53
Tabla 6. Resumen de las métricas obtenidas. 55
Tabla 7. Parámetros de simulación del escenario 1 57
Tabla 8. Modificación respecto a los parámetros del escenario 1. 60
Tabla 9. Resumen de las métricas obtenidas. 63
Tabla 10. Parámetros de la simulación del escenario 4. 65
Tabla 11. Modificación de parámetros para el escenario 5. 67
Tabla 12. Resumen de las métricas obtenidas para los escenarios 4 y 5. 69

1. Introducción

1.1 Contexto y justificación del Trabajo

Una red ad-hoc vehicular, habitualmente referida por su acrónimo en inglés VANET, es un tipo de red de comunicación que utiliza a los vehículos como nodos de la red. Dado el reducido alcance del canal de comunicación, hasta 1 km aproximadamente (en entornos ideales), y que los vehículos se encuentran en constante movimiento, la conectividad se establece de forma esporádica (ad-hoc). Por este motivo, estas redes se consideran un tipo específico de red móvil de comunicación (MANET).

En este entorno se sitúan dos entidades diferentes, los vehículos y las infraestructuras, ambos equipados con sistemas de comunicaciones. Entre estas entidades se pueden producir diferentes paradigmas de comunicación, tanto entre vehículos, como de vehículos con la infraestructura. Habitualmente para referirse a todas estas comunicaciones se utiliza el concepto de V2X.

Las VANETs se utilizan para proveer servicios de ITS como podrían ser aplicaciones vehiculares cooperativas. Las aplicaciones vehiculares cooperativas se utilizan principalmente para mejorar la seguridad y la eficiencia del tráfico, previniendo y evitando accidentes además de mejorar la calidad medioambiental (ahorro de energía y reducción de la contaminación) y aumentar la capacidad de las carreteras. Para ello, las comunicaciones V2X requieren el cumplimiento de determinados objetivos, principalmente en términos de confiabilidad y de baja latencia, para ser capaces de satisfacer los requisitos de las aplicaciones. Normalmente los requisitos que tienen que cumplir las comunicaciones para satisfacer este tipo de aplicaciones V2X son los siguientes:

- Ancho de banda dedicado y con licencia.
- Adquisición rápida de la red.
- Baja latencia.
- Alta confiabilidad.
- Prioridad para aplicaciones de seguridad.
- Interoperabilidad.
- Seguridad y privacidad.

1.2 Elementos de las VANETs

Los actores principales de las comunicaciones V2X se denominan estaciones y se clasifican según su localización y propósito:

- RSU (*Roadside Unit*): Estación de carretera, como pueden ser semáforos inteligentes, balizas colocadas en señales, en postes, etc. Permiten comunicaciones I2V en tramos específicos de la carretera o comunicaciones con estaciones centrales.

- OBU (*On Board Unit*): Estación a bordo de los vehículos, permite la comunicación directa con otros vehículos o con la infraestructura, V2V o V2I, y está conectada a los buses internos del vehículo para obtener la información de este.

- Dispositivos ITS: Como teléfonos móviles, tabletas, dispositivos de navegación, muy necesarios para localizar el vehículo y ofrecer servicios de asistencia a la conducción o geolocalización, u otros dispositivos no conectados al bus de información del vehículo como podrían ser sensores que reciben información útil del vehículo o del entorno, por ejemplo, sistemas de asistencia al aparcamiento, además algunos de estos dispositivos también podrían ser utilizados por los peatones. Pueden habilitar comunicaciones V2I en tramos de la carretera y en un futuro se prevé que se puedan utilizar también para comunicaciones V2V.

- Unidad central: Se necesita una unidad central para gestionar el resto de los dispositivos, puede formar parte de un sistema de gestión de tráfico centralizado como por ejemplo un operador de carreteras, también puede actuar como proveedor de servicios o de contenidos y se encarga de conectar la infraestructura V2X con la red externa.

1.3 Tipos de Comunicación

Como ya se ha mencionado en el primer apartado, entre las entidades o elementos que forman una VANET se pueden producir varios tipos de comunicación:

- Vehículo-a-Vehículo, V2V: Comunicaciones realizadas entre los vehículos de forma espontánea. En este tipo de comunicación se puede intercambiar información valiosa con otros vehículos como por ejemplo estado del tráfico o aviso de accidentes u obras.

- Vehículo-a-Infraestructura, V2I: Esta comunicación se realiza entre los vehículos y las estaciones situadas en la carretera, RSUs. Además de para intercambiar información de interés sobre las vías y el entorno de la red se utilizan para intercambio de datos con redes externas como Internet.

- Infraestructura-a-Vehículo, I2V: Como la anterior, pero en dirección opuesta. Mediante esta comunicación una RSU puede transmitir información recopilada previamente hacia los vehículos que pasen cerca de ella.

- Vehículo-a-Peatón: Comunicación entre los vehículos y los peatones sobre todo para avisar de posibles peligros y notificación de alertas a peatones, ciclistas…

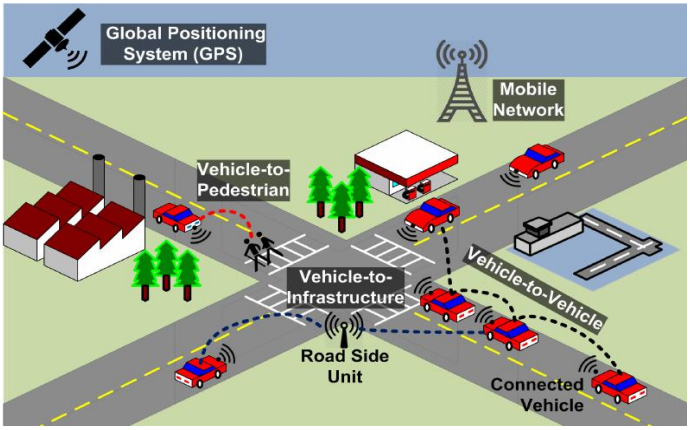

Figura 1. Ejemplo de comunicaciones ITS-V2X [23]

En la Figura 1 se puede ver un ejemplo de un entorno de ITS cooperativo en el que se representan los tipos de comunicaciones V2X y los elementos y sistemas que forman parte e interaccionan entre ellos.

1.4 Aplicaciones en sistemas vehiculares cooperativos

En este contexto, el ETSI TC de ITS ha identificado un conjunto de aplicaciones y casos de uso que deben considerarse como una referencia para el despliegue y la estandarización de sistemas vehiculares cooperativos. Estas aplicaciones se han clasificado según las necesidades de los usuarios y de los interesados además de basarse en otros criterios como requisitos estratégicos, económicos, de capacidades del sistema, de rendimiento del sistema, legales, de estandarización y certificación, etc. [1]. En la Tabla 1 se puede ver esta clasificación con algunos casos de uso asociados.

Tipo de Aplicación	Aplicación	Caso de Uso
Seguridad vial activa	Asistencia a la conducción – Conciencia colaborativa	Advertencia de presencia de un vehículo de emergencia
		Indicación de vehículo lento
		Advertencia de colisión en el cruce
		Indicación de acercamiento de una motocicleta
	Asistencia a la conducción – Advertencia de peligro vial	Advertencia de vehículo en dirección contraria
		Luces de freno electrónicas de emergencia
		Aviso de riesgo de accidente

Eficiencia del tráfico colaborativa	Gestión de la velocidad	Notificación de límites de velocidad regulatorios / contextuales
		Aviso de velocidad óptima con luz de semáforo
	Navegación colaborativa	Información del tráfico y de itinerario recomendado
		Guía de ruta mejorada
		Advertencia de acceso limitado y notificación de desvío
		Señalización a bordo del vehículo
		Sistema de automatización vehículo-carretera (*Platooning*)
Servicios locales colaborativos	Servicios basados en localización	Notificación de Punto de Interés (POI)
		Control automático de acceso y gestión de aparcamiento
		Comercio electrónico local ITS
		Asignación e informes en un servicio de compartir/alquilar vehículos
Servicios Globales de internet	Servicios comunitarios	Seguros y servicios financieros
		Gestión de flotas
		Gestión de zonas de carga
	Gestión del ciclo de vida de una estación ITS	Software del vehículo / Suministro de datos y actualización
		Calibración de datos del vehículo y de las RSU.

Tabla 1: Definición del Set Básico de Aplicaciones [1]

1.5 Mecanismos de *Beaconing* y sus limitaciones

Los sistemas vehiculares cooperativos basan su operación en el intercambio de mensajes entre vehículos y entre vehículos con las RSU. La diseminación de estos mensajes cortos prioritarios en las VANETs se denomina *Beaconing*. Estos mensajes llamados *beacons* son la base de todas las aplicaciones V2X, tanto las que son de seguridad como las que no y los vehículos los envían a una alta frecuencia dentro del rango de transmisión de un salto para que todos los nodos mantengan un conocimiento preciso de la situación del tráfico. En el estándar europeo ITS-G5, los mensajes que se intercambian son de dos tipos: mensajes broadcast periódicos, conocidos como CAM (*Cooperative Awareness Messages*), que se utilizan para recibir y enviar información de presencia, localización y estado básico de la comunicación a los nodos vecinos que se encuentran a un salto dentro de la red. Y mensajes basados en eventos, conocidos como DENMs (*Decentralized Environmental Notification Messages*) que avisan de situaciones imprevistas y potencialmente peligrosas como accidentes de tráfico. En el estándar americano WAVE, también se envían mensajes broadcast periódicos conocidos como BSM (*Basic Security Messages*) y tienen el mismo objetivo que los mensajes CAM en ITS-G5. En la Figura 2 se muestra el concepto de mecanismo de *Beaconing*.

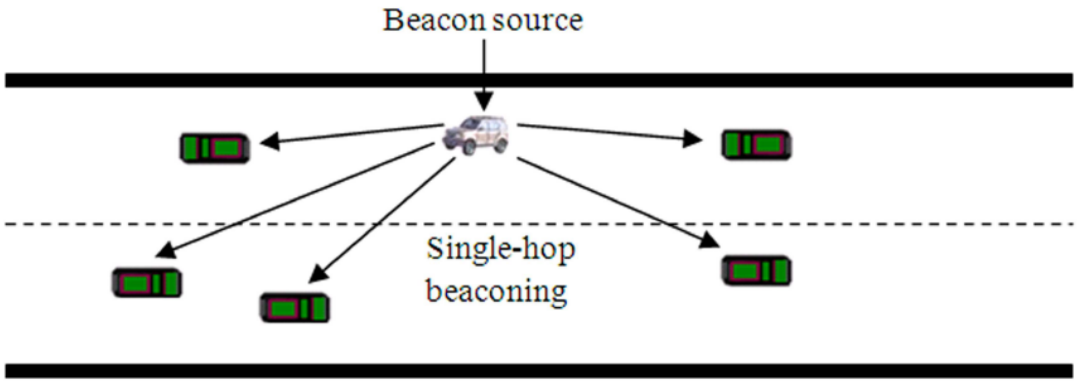

Figura 2. Diseminación de *beacons.* [51]

Las comunicaciones vehiculares necesitan que los vehículos sean capaces de organizarse por sí mismos en el intercambio de *beacons* periódicos. Hasta ahora los protocolos de *Beaconing* propuestos no han conseguido cumplir en su totalidad los requisitos de las aplicaciones y servicios que existen en los sistemas vehiculares cooperativos restringiendo así el desempeño de las aplicaciones vehiculares. Esto se debe principalmente a varios factores:

- Los vehículos se mueven a altas velocidades por lo que la topología de la red cambia constantemente.
- El cambio constante del tráfico provoca que la densidad de la red sea muy variable y que el tiempo de vida de los enlaces cortos sea pequeño.
- La calidad del medio de transmisión disponible hace que haya perdidas y colisiones de paquetes.

Estos factores hacen que mantener la información actualizada con el mínimo intercambio posible sea un gran reto dentro de una VANET.

Por ello, las organizaciones dedicadas a la estandarización y muchos investigadores han propuesto diferentes protocolos adaptativos de *Beaconing* que modifican la frecuencia y la

transmisión de potencia de los mensajes dependiendo de criterios como la carga del canal, la densidad del tráfico y los requisitos de la aplicación en concreto [2]. El estándar ITS-G5 utiliza DCC, un mecanismo de control descentralizado de la congestión que está definido en [3] y su funcionamiento detallado se puede encontrar en [4]. El estándar WAVE utiliza un estándar definido en [5].

1.6 Objetivos del Trabajo

En este trabajo se va a estudiar el funcionamiento de estos mecanismos de *Beaconing* para una aplicación genérica en la que se produzca una situación de accidente y después para una aplicación en concreto, un sistema de automatización de vehículo-carretera conocido como *Platooning,* y que consiste en que varios vehículos viajen de forma consecutiva formando agrupaciones cercanas durante sus trayectos, las agrupaciones de vehículos se denominan *platoons*. Esta aplicación tiene el potencial de incrementar la seguridad y la capacidad de la carretera además de reducir el consumo de combustible. Cada vehículo en un *platoon* adapta su aceleración y su velocidad gracias a la ayuda de un control cooperativo adaptativo de crucero (CACC) que está basado en la información recibida de los otros miembros del *platoon* [6]. En la Figura 3 se puede ver en lo que se resume este concepto.

Figura 3. Concepto de *Platooning* [6]

El objetivo principal del trabajo es analizar si utilizando protocolos de *Beaconing* adaptativos se pueden satisfacer los severos requisitos de esta aplicación y para ello se realizarán distintas simulaciones en un entorno de tráfico realista.

Más específicamente los objetivos son los siguientes:

- Estudiar los mecanismos existentes para distribuir la información (*Beaconing*) en V2X.

- Analizar la utilización de VANETs para aplicaciones de seguridad vial y eficiencia del tráfico.

- Comprender el funcionamiento de la herramienta de simulación de *Platooning,* PLEXE que utiliza VEINS [7] junto con la herramienta SUMO [8] para la simulación de tráfico y OMNeT++ [9] para la simulación de eventos y trasmisiones de mensajes.

- Realizar simulaciones de los diferentes protocolos de *Beaconing* en V2X y obtener las prestaciones de estos para la aplicación de *Platooning* en concreto.

- Analizar la adaptación de los mecanismos en diferentes casos de estudio, partiendo de un caso sencillo hasta llegar a alcanzar una situación realista compleja.

- Proponer mejoras en la utilización de estos basándonos en los resultados obtenidos.

1.7 Enfoque y método seguido

La estrategia para llevar a cabo este TFM se podría dividir en los siguientes puntos:

1- Analizar los estándares y protocolos existentes para comunicaciones V2X.

2- Centrarse en la parte de mecanismos de *Beaconing* y estudiar los diferentes enfoques utilizados actualmente para poder realizar una comparativa entre ellos.

3- Elección de una aplicación vehicular cooperativa para poder aplicar los conocimientos adquiridos en un entorno real de estudio, en este caso *Platooning*.

4- Estudio las herramientas de simulación disponibles y valoración de las ventajas y desventajas de estas basándonos en las necesidades de este TFM en concreto. En este punto se obtuvo como conclusión que la mejor opción era utilizar las herramientas de simulación propuestas (VEINS en conjunto con SUMO y OMNeT++) y además una capa superior para la aplicación de *Platooning* en concreto llamada PLEXE.

5- Aprendizaje del funcionamiento de las herramientas de simulación y estrategia de partir del ejemplo de VEINS para analizar los resultados y obtener gráficas y tablas para después pasar a un entorno de tráfico y aplicación de *Platooning* obteniendo los mismos resultados, gráficas y tablas.

6- Análisis de los datos ya procesados para obtener conclusiones y proponer posibles mejoras a los mecanismos de *Beaconing* actuales.

Se ha seguido este método de investigación y estudio exhaustiva en primer lugar por el desconocimiento en la materia y en segundo lugar por la necesidad de conocer lo que existe actualmente para poder proponer mejoras y soluciones.

Por otra parte, hay que destacar la necesidad de utilizar herramientas de simulación ya que el despliegue de una VANET por términos de coste, riesgo de seguridad vial y tiempo sería imposible. Por lo tanto, se hace imprescindible la simulación para poder obtener resultados y proponer soluciones en sistemas que utilizan este tipo de redes.

1.8 Planificación del Trabajo

1.8.1 Recursos

El software utilizado durante este proyecto es gratuito y los recursos hardware utilizados ya estaban en posesión del alumno con anterioridad por lo que la realización de este trabajo no tiene ningún coste económico. Estos son los recursos utilizados:

- Portátil LENOVO con sistema operativo Ubuntu 14.04 / Windows 10.
- Software de simulación de tráfico: SUMO.
- Software de simulación de paquetes: OMNET++.
- Software de simulación de redes vehiculares: VEINS.
- Software de simulación de aplicación de *Platooning*: PLEXE.
- Paquete de Microsoft Office.

1.8.2 Hitos

En la planificación del trabajo es importante tener presente los hitos que hay que cumplir durante la realización de este y que se presentan a continuación en la Figura 4.

Id		Modo de tarea	Nombre de tarea	Comienzo
1			Decisión del proyecto	mié 26/09/18
2			Inicio del proyecto	mié 03/10/18
3			Entrega parcial del proyecto (60%)	mié 14/11/18
4			Entrega parcial del proyecto (100%)	mié 19/12/18
5			Entrega de la memoria	mar 08/01/19
6			Entrega de la presentación	dom 13/01/19
7			Finalización de la evaluación del tribu	lun 14/01/19

Figura 4. Diagrama de hitos

En la Figura 5 se presenta también el diagrama de GANTT que se planteó para la planificación de todas las tareas del presente trabajo. A partir de él se definen los objetivos por entregas de la siguiente forma:

- PEC 1: Definir un título inicial, unos objetivos adecuados, claros y concretos y establecer una planificación (temporal y de recursos) apropiada del trabajo a hacer.
- PEC 2:
    - Realizar un seguimiento periódico de la planificación.
    - Identificar los aspectos más relevantes del problema a resolver y la solución deseada.
    - Escoger y utilizar las herramientas TIC adecuadas en el desarrollo del trabajo
    - Desarrollar la solución elegida siguiendo los criterios, normativas y buenas prácticas propias del área.
    - Presentar los resultados parciales de forma clara, estructurada y correcta.
- PEC 3:
    - Realizar un seguimiento periódico de la planificación.
    - Identificar los aspectos más relevantes del problema a resolver y la solución deseada.
    - Escoger y utilizar las herramientas TIC adecuadas en el desarrollo del trabajo
    - Desarrollar la solución elegida siguiendo los criterios, normativas y buenas prácticas propias del área.
    - Presentar los resultados parciales de forma clara, estructurada y correcta.
- Entrega final:
    - El plan de proyecto tiene unos objetivos adecuados, claros y concretos y una planificación apropiada del trabajo a hacer.
    - Se identifican los aspectos relevantes del problema a resolver y de la solución deseada.
    - Se escogen y utilizan las herramientas TIC adecuadas en cada momento (planificación, desarrollo y presentación).
    - Se desarrolla la solución elegida siguiendo los criterios, normativas y buenas prácticas propias del área del TFG.

- Se introducen elementos innovadores en la solución propuesta.
- La memoria del trabajo está redactada de forma correcta, clara y sintética y sigue la estructura predeterminada. Incluye el resumen en inglés.
- Se logra un producto final de calidad, que responde a los objetivos iniciales con un grado de dificultad razonable de acuerdo con los criterios propios del área de TFG.

	Nombre de tarea	Comienzo	Duración	Fin
1	1 Decisión del proyecto	mié 26/09/18	0 días	mié 26/09/18
2	**2 Desarrollo de la planificación**	**mié 26/09/18**	**5 días**	**mié 03/10/18**
3	2.1 Toma de contacto con el tema del proyecto y decisión del alcance	mié 26/09/18	2 días	jue 27/09/18
4	2.2 Definición de objetivos y resultados	vie 28/09/18	1 día	vie 28/09/18
5	2.3 Definición de actividades	lun 01/10/18	2 días	mar 02/10/18
6	2.4 Elaboración del calendario de trabajo	mar 02/10/18	1 día	mar 02/10/18
7	3 Entrega parcial del proyecto: Título, descripción y objetivos	mié 03/10/18	0 días	mié 03/10/18
8	**4 Desarrollo del proyecto: Primera parte**	**jue 04/10/18**	**31 días**	**mié 14/11/18**
9	**4.1 Investigación**	**jue 04/10/18**	**18 días**	**dom 28/10/18**
10	4.1.1 Estudio de las tecnologías V2X	jue 04/10/18	6 días	jue 11/10/18
11	4.1.2 Estudio de la aplicación de Platooning	vie 12/10/18	6 días	vie 19/10/18
12	4.1.3 Estudio de los mecanismos adaptativos de Beaconing	vie 19/10/18	6 días	vie 26/10/18
13	4.2 Redacción del cap.1: Introducción	jue 18/10/18	6 días	jue 25/10/18
14	4.3 Redacción del cap.2: Estado del arte	jue 18/10/18	8 días	dom 28/10/18
15	**4.4 Aprendizaje de las herramientas de simulación (VEINS que interacciona SUMO y OMNeT ++)**	**jue 01/11/18**	**11 días**	**mié 14/11/18**
16	4.4.1 Aprendizaje de utilización de VEINS + SUMO +OMNeT++	jue 01/11/18	5 días	mié 07/11/18
17	4.4.2 Redacción del cap.3: Simulación de redes vehiculares	mié 07/11/18	4 días	sáb 10/11/18
18	4.4.3 Definición de los escenarios realistas para aplicar beaconing a v2x	dom 11/11/18	4 días	mié 14/11/18
19	5 Entrega parcial del proyecto (60%)	mié 14/11/18	0 días	mié 14/11/18
20	**6 Desarrollo del proyecto: Segunda parte**	**jue 15/11/18**	**25 días**	**mié 19/12/18**
21	6.1 Desarrollo de las simulaciones para los diferentes casos de estudio	vie 16/11/18	11 días	vie 30/11/18
22	6.2 Revisión de las correcciones	vie 23/11/18	2 días	sáb 24/11/18
23	6.3 Redacción del cap.4: Caso de estudio	mié 21/11/18	9 días	lun 03/12/18
24	**6.4 Observación del comportamiento de los protocolos**	**mié 12/12/18**	**6 días**	**mié 19/12/18**
25	6.4.1 Analisis de los protocolos utilizados	mié 12/12/18	6 días	mié 19/12/18
26	6.4.2 Redacción del cap.5: Propuestas de mejora	mié 12/12/18	6 días	mié 19/12/18
27	7 Entrega parcial del proyecto (100%)	mié 19/12/18	0 días	mié 19/12/18
28	8 Redacción de la primera parte del cap.6: Conclusiones	jue 20/12/18	3 días	dom 23/12/18
29	9 Redacción de la segunda parte del cap.6: trabajo futuro	mié 26/12/18	4 días	sáb 29/12/18
30	10 Adicción de la bibliografía y el glosario	dom 30/12/18	1 día	dom 30/12/18
31	11 Revisión y corrección del texto completo de la memoria	mié 02/01/19	5 días	mar 08/01/19
32	12 Entrega de la memoria	mar 08/01/19	0 días	mar 08/01/19
33	13 Realización de la presentación	mar 08/01/19	5 días	dom 13/01/19
34	14 Entrega de la presentación	dom 13/01/19	0 días	dom 13/01/19
35	15 Evaluación del tribunal	lun 14/01/19	6 días	dom 20/01/19
36	16 Finalización del proyecto	dom 20/01/19	0 días	dom 20/01/19

Figura 5. Diagrama de Gantt de la planificación de este proyecto.

1.8.3 Evolución del proyecto

Respecto a la planificación inicial ha habido desviaciones sobre todo por las siguientes razones:

1) El tiempo de aprendizaje de la utilización de los diferentes simuladores fue mayor que el que se había considerado en un primer momento. Por esta razón, hubo que dedicar mucho más tiempo a la tarea de "Aprendizaje de las herramientas de simulación" reduciendo el tiempo dedicado para la realización de simulaciones dentro de los casos de estudio.

2) Plazos de entregas muy ajustados para el tiempo disponible de realización del trabajo. Para solucionar esto, se dedicó un gran esfuerzo durante las semanas anteriores a la entrega de la memoria y se compaginó la realización de la presentación con las últimas revisiones del texto del trabajo.

3) Durante las últimas semanas, la página web del simulador PLEXE estuvo caída por lo que en vez de realizar todas las simulaciones en un entorno de tráfico de la aplicación de *Platooning*, se decidió realizar simulaciones en el entorno de tráfico propuesto por el ejemplo del simulador de VEINS.

1.9 Breve sumario de productos obtenidos

A lo largo del trabajo se ha realizado un estudio de las comunicaciones V2X, los mecanismos de *Beaconing* existentes y las aplicaciones vehiculares cooperativas. Además de este estudio se han realizado simulaciones y se han obtenido resultados que corroboran lo ya estudiado sobre los parámetros que afectan al rendimiento de los sistemas vehiculares.

1.10 Breve descripción de los otros capítulos de la memoria

Una primera aproximación del contenido del proyecto podría ser:

Cap. 1: Introducción: Descripción de lo que son los sistemas de comunicaciones V2X, porqué cada vez tienen más importancia en la sociedad actual, para que tipos de aplicaciones se utilizan, en qué tipo de tecnologías están basados y de qué elementos constan.

Cap. 2: Marco teórico: Descripción detallada de los estándares y de los protocolos de acceso al medio utilizados en 802.11p.

Cap. 3: **Estado del arte:** Estudio de los diferentes protocolos adaptativos de *Beaconing* y Explicación detallada del funcionamiento de la aplicación de *Platooning* y análisis de los diferentes estudios realizados en torno a la aplicación de *Platooning*.

Cap. 4: Descripción del escenario: Explicación de los casos de estudio con sus correspondientes entornos de movilidad, las herramientas de simulación elegidas para el trabajo y las métricas de rendimiento que se van a utilizar para evaluar los escenarios.

Cap. 5: Simulación de redes vehiculares: Realización de uno o varios casos de estudio basándonos en la información recopilada en los capítulos anteriores. Para ello se utilizan las herramientas de simulación propuestas, se modifican diferentes parámetros que afectan a las comunicaciones V2X y después se realizan diferentes simulaciones para obtener las métricas de rendimiento y analizar el impacto de los parámetros de comunicación en el sistema.

Cap. 8: Conclusiones y líneas futuras. Conclusiones del proyecto y posibles futuros trabajos en relación con el mismo.

2. Marco teórico

Durante este capítulo se explicarán los protocolos de mayor importancia o mayor presencia en el estándar europeo y en el estadounidense, siendo estos dos los de mayor interés en este proyecto. Para una mayor comprensión y entendimiento de las distintas capas definidas por ambos estándares, se irán relacionadas con el conocido modelo OSI. Siendo las más importantes en redes V2X, las capas de Acceso, Transporte y Red, Servicio / Infraestructura y Aplicación.

Por último, para facilitar la comprensión y entendimiento de cada uno de los protocolos, se expondrán pequeños ejemplos de funcionamiento al igual que de aplicaciones donde se pueda ver reflejado el impacto en entornos V2X de la aplicación de *Platooning*.

2.1 Estándares

Actualmente, existen tres estándares para entornos ITS. Estos estándares definen el entorno ITS a nivel mundial, serían US (IEEE 1609 [10]), UE (ETSI ITS-G5 [11]) and Japan (ARIB STD-T109 [12]). Sendos estándares mantienen la misma idea sobre los objetivos y requisitos que se tienen que alcanzar en entornos ITS, sim embargo. Mantienen algunas diferencias en las definiciones de la pila de protocolos, así como en la capa física. Ya que por ejemplo para 802.11p la asignación de las frecuencias varía dependiendo del ancho espectral disponible, así como el ancho de banda de los canales utilizados.

Además, durante este capítulo se explicarán aquellos protocolos de mayor relevancia dentro de ambos estándares, para que sea de mayor facilidad entender los posteriores capítulos. Al igual, que de esta forma se podrá adquirir una visión más global para entender el funcionamiento o el porqué de las aplicaciones ITS como *Platooning*.

2.2 802.11p

En la Figura 6 los dos estándares utilizan el protocolo 802.11p en su capa física y en su capa MAC, ofrece un mecanismo de acceso multicanal a las VANETs. Este protocolo distribuye su servicio en dos tipos de canales: Canal de Control, CCH y canal de servicio SCH. Tanto los mensajes periódicos mencionados anteriormente como los orientados a eventos se envían sobre el CCH y, además, los proveedores también anuncian las aplicaciones que no son de seguridad en el CCH. En respuesta a los anuncios que no son de seguridad, los usuarios pueden cambiar a un SCH para acceder a un servicio. Esto implica que los vehículos están obligados a sintonizar sus radios a un canal deseado para un servicio en particular.

Para proveer diferenciación de servicio, estos estándares permiten utilizar EDCA, un sistema de acceso al canal distribuido mejorado [2].

Figura 6. Estándares ITS G5 (dcha.) y WAVE (izq.) [71]

En 2008 el Comité de Comunicaciones Electrónicas (ECC) y la Comisión Europea tomo la decisión de asignar la banda de 5875-5925 MHz para la implementación de aplicaciones para ITS. Reservaron 3 canales de 10MHz para aplicaciones de seguridad y dos canales para el resto de las aplicaciones. Por otro lado, el estándar estadounidense reservó la banda 5850-5925 MHz dividiéndolo en 7 canales de 10MHz al igual que dio la posibilidad de combinar dos canales (20 MHz) [Figura 7]. Como se puede observar, ambos estándares no son compatibles en capa física, esto implica que a nivel hardware también sean distintos o bien se necesite de una electrónica que soporte ambos estándares.

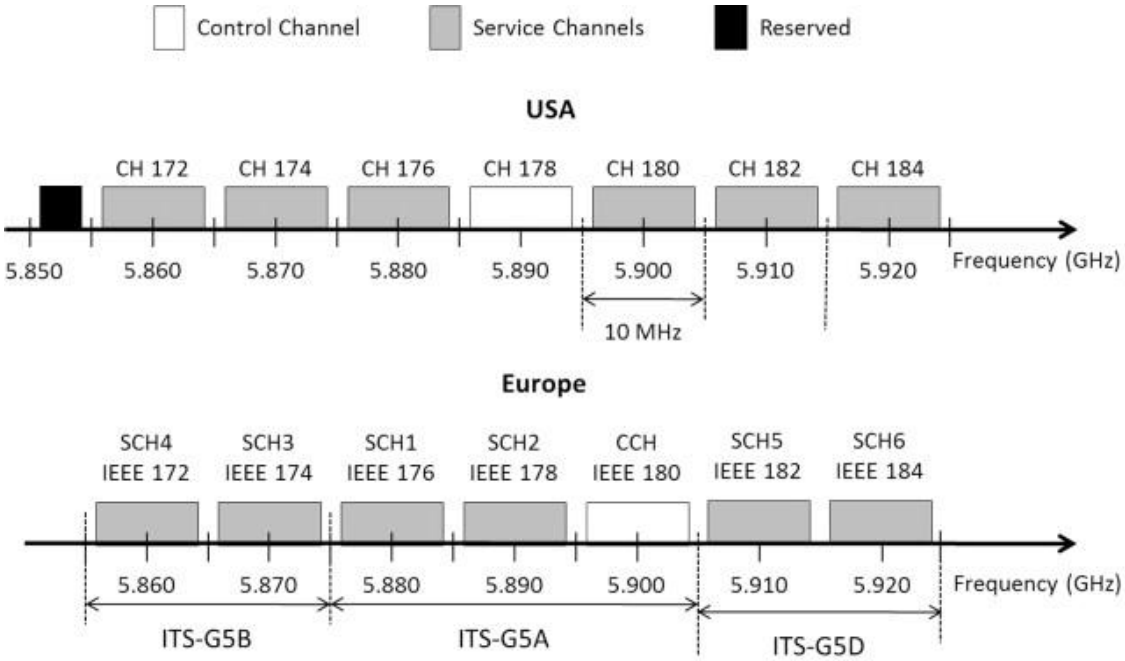

Figura 7 Espectro USA y Europa y división de los canales [13].

Al igual que es definida la asignación de canales por ambos estándares, también se especifica su potencia máxima y velocidad de transmisión. Esto tiene gran importancia, porque dependiendo del estado de la red y el entorno donde se esté utilizando, el sistema podrá

cambiar adecuándose a las necesidades del canal. De la gestión de estos parámetros será responsable el Control de Congestión Descentralizado (DCC). El cual se encargará de optimizar las comunicaciones priorizando aquellas relacionadas con aplicaciones de seguridad.

Para entender mejor el funcionamiento a nivel físico del estándar 802.11p es de interés analizar su funcionamiento a nivel de señal. WLAN es capaz de trabajar a tasas de transmisión de 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48 y 54 Mbit/s Para ser capaz de proporcionar estas tasas de transición y a la vez ser capaz de gestionar las dificultades que acarrea una transmisión inalámbrica, WLAN hace uso de OFDM. El fundamento de esta técnica es dividir las frecuencias disponibles en el espectro en múltiples sub-canales, de forma que puedan ser mitigadas las interferencias.

El estándar WLAN utiliza 52 subportadoras con un ancho de banda de 20MHz donde 48 son usadas para transmisión de datos y las otras 4 portadoras piloto. Pero también admite un segundo y tercer modo de operación, el primero, también llamado "half-clocked", utiliza anchos de banda de canal de 10Mhz, y el último, también llamado "quarter-clocked", que utiliza espacios de canal de 5Mhz.

Estos modos de operación tienen importancia dentro del estándar 802.11p ya que hace uso de los dos últimos modos de operación. Lo que tiene una implicación en la disminución de las tasas de transmisión, ya que teniendo en cuenta que el número de subportadoras siempre es el mismo, el periodo de símbolo se duplica o cuadriplica, teniendo un efecto semejante en la tasa de transmisión, dividiéndose a la mitad o a la cuarta parte.

El uso de la técnica OFDM para entornos inalámbricas tiene muchas ventajas, pero una gran desventaja, y que afecta particularmente a entornos vehiculares, es que el receptor de la transmisión tiene que invertir parte de su tiempo en calibrar el medio de transmisión. Teniendo en cuenta que las redes vehiculares no se caracterizan por el envío masivo de datos entre un emisor y un receptor. Sino que están pensadas para mensajes únicos con información relevante, será un efecto a tener en cuenta durante el análisis, ya que las penalizaciones en las transmisiones pueden llegar a ser críticas por no ser lo suficientemente rápidas o efectivas.

Por otro lado, para entender mejor la motivación de este trabajo y conocer un poco mejor las limitaciones de las redes vehiculares. Tiene gran importancia el mecanismo que se utiliza de acceso al medio en la capa MAC para 802.11p.

La capa MAC de IEEE 802.11p utiliza CSMA / CA, donde un nodo solo intenta transmitir si el canal se considera como libre durante un corto periodo de tiempo llamado AIFS, (*Arbitration Inter Frame Spacing*). Si el canal está ocupado o si se ocupa durante el AIFS, el nodo se retira durante un tiempo aleatorio, que solo se cuenta cuando se considera que el canal está libre. Cuando el valor de la cuenta atrás es cero, el nodo transmite directamente sin ningún otro retardo. Como los mensajes se envían en modo difusión, no se confirman y por lo tanto no se puede detectar si ha ocurrido una colisión. Por consiguiente, la ventana de contención nunca se extiende como en el tradicional IEEE 802.11 y se invoca un tiempo de retroceso máximo.

IEEE 802.11p define cuatro niveles de prioridad caracterizados por la longitud del AIFS y los parámetros de la ventana de retroceso. De esta forma, DENMs pueden tener acceso prioritario al canal sobre los CAMs. Debido a la naturaleza aleatoria de la capa MAC del protocolo 802.11p, un nivel de utilización del canal, *Channel Busy Time*, CBT, del 25 % o menos es lo recomendado por la actual estandarización de la ETSI [14].

Por lo tanto, como conclusión se puede extraer que, en este protocolo, el vehículo intenta trasmitir solo si el canal está libre durante un periodo de tiempo denominado espacio inter-trama arbitrario, AIFS. Sin embargo, si se detecta que el canal está ocupado o si se ocupa durante el AIFS, se establece un tiempo de espera para enviar y que comienza la cuenta atrás cuando que se detecta que el canal está libre. Cuando este tiempo se agota, el vehículo directamente envía su mensaje.

Este tipo de protocolo tiene una gran limitación ya que, si el canal es compartido por multitud de vehículos, la probabilidad de que esté libre cuando se intenta enviar es muy baja y provoca que existan colisiones en los envíos.

2.3 Geonetworking

Este protocolo es definido en TS 102 636-4-1 [15] y TS 102 636-3 [16] he incluido en el estándar europeo. Este protocolo proporciona el mecanismo de transporte de paquetes en una red Ad-Hoc (Distribuida y auto gestionada). Teniendo en cuenta que las redes ITS están basadas en direcciones de red geográficas y en el enrutado entre estaciones ITS, este protocolo proporciona características para redes de alta movilidad y frecuencia de cambios en la topología de la red. Además, proporciona la capacidad de enviar mensajes a uno o varios vehículos dependiendo de la aplicación final. Atendiendo al enrutamiento geográfico, este proporciona mecanismos de direccionamiento y transmisión.

Cada vez que una estación recibe un paquete, la estación evalúa la dirección de destino. En el caso de que este nodo no sea el destino, este transmitirá el mensaje de acuerdo con su conocimiento de la topología de la red. Para este proceso de transmisión, un servicio de localización es usado para identificar los GeoAdhoc routers, así como la localización del nodo destino. Finalmente, Geonetworking soporta el enrutamiento de mensajes a una zona geográfica, es decir, ante el caso de que todos los nodos de una zona geográfica reciban el mismo mensaje, por ejemplo, ante un accidente de tráfico.

2.4 IEEE 1609.4 DSRC

Tal y como se ha explicado previamente, el FCC asignó un espectro de 75Mhz en la banda de 5.9Ghz para las comunicaciones vehículo a vehículo (similar al europeo). La idea fundamental de este espectro es servir para aplicaciones de seguridad para reducir el número de accidentes en carretera, aunque también se da permiso explicito para aplicaciones que no sean de seguridad. Por lo que se ve hasta el momento, ambos estándares comparten el mismo objetivo.

En particular IEEE 1609.4 [17] describe el concepto de intervalos canales en los cuales es divididos en intervalos del Canal de Control y de Servicio. Cada intervalo de tiempo tiene una duración máxima de 50 ms.

Para el caso de las OBU, la idea es que estas estén sintonizadas continuamente en el Canal de Control para así poder recibir alertas de seguridad, pero si es reclamado en alguna otra aplicación no relacionada con este propósito, podrá conmutar a un Canal de Servicio durante el tiempo de la sesión. Por lo tanto, aquí se refleja, que una estación puede estar conmutando entre el CCH y SCH en intervalos de tiempo, por lo que es de esperar cuando empiezan y finalizan esos intervalos.

El estándar también define un tiempo de guarda al comienzo del intervalo de tiempo, para ambos tipos de canales. Esto es utilizado para ajustar las imprecisiones ente dispositivos, es

decir intolerancias entre los distintos relojes de cada estación. Cabe también señalar, que durante este tiempo de guarda toda actividad de MAC queda suspendida.

Como se puede observar, el mecanismo es distinto al explicado para el estándar europeo, donde siempre se está atiendo el CCH de control y será otra tarjeta de red la que conmute entre Canales de Servicio.

2.5 Basic Transport Protocol (BTP)

Este protocolo es definido en el estándar EN 102 636-5-1 [18] para el estándar europeo ITS-G5. Este protocolo proporciona un servicio punto a punto sin tener una conexión en una red ITS Ad-Hoc. Tiene un funcionamiento muy similar a UDP, ofreciendo un servicio mínimo de transporte. Además, proporciona la capa de Servicio/Infraestructura dentro de la pila de protocolos definida por ITS-G5, dando la posibilidad de acceder directamente a los servicios proporcionados por GeoNetworking. Esto se traduce en que este protocolo habilita la comunicación ente las capas intermedias y más altas.

2.6 IEEE 802.2

El estándar 802.2 comúnmente conocido ya que muchos de las pilas de protocolos que siguen el modelo OSI hacen uso de él. Como es de esperar no es un protocolo definido en exclusiva para entornos vehiculares. Básicamente define el control del enlace lógico (parte superior de la capa de enlace), presentando una interfaz uniforme al usuario del servicio, normalmente a través de la capa de red. Bajo esta capa operaría comúnmente la capa MAC, pero en redes vehiculares sería el protocolo definido en el apartado 2.4.

2.7 Cooperative Awareness Messages (CAM)

Este protocolo es definido en el estándar EN 302 637-2 [19] dentro de la pila de protocolos para ITS-G5. Su principal función es el intercambio de mensajes entre estaciones de redes ITS para crear y mantener los avisos de advertencias pertenecientes a otras estaciones, para así de esta forma respaldar el rendimiento de las redes cooperativas vehiculares utilizando la red. Dependiendo del tipo de estación, un mensaje CAM puede contener diferente información, por ejemplo, una OBU puede incluir el estado del vehículo en un mensaje CAM. Además de incluir información del propio vehículo, como puede ser su tipo, dimensiones, etc.

Toda esta información es utilizada por las estaciones receptoras, por ejemplo, para estimar riesgos de colisión y en el caso de que sea necesario advertir a los conductores a través de la interfaz con el conductor (HMI).

2.8 Decentralized Environmental Notification Messages (DENM)

Este protocolo está definido en el estándar EN 302 637-3 [20] y forma parte de la pila de protocolos definidos para ITS-G5. DENM define los diferentes eventos o situaciones que pueden ser identificados por una estación. Por lo tanto, es utilizado por las aplicaciones ITS para alertar a los usuarios de un evento identificado. La transmisión de este tipo de mensajes ha de ser persistente mientras que el evento siga activo y la estación receptora será la que decida si este evento es de interés o no. Para que se entienda un poco mejor su finalidad se

van a explicar a continuación una serie de mensajes definidos en el estándar al igual que su función en un entorno ITS:

- Nuevo DENM: Un nuevo mensaje es generado por el servicio. Será proporcionado un nuevo identificador, al igual que será incluida información sobre la posición, tipo de evento, tiempo de detección, etc.

- Actualización DENM: Es un mensaje transmitido por la misma estación que lo originó, es decir, con el mismo identificador. Sin embargo, identificará una actualización en el evento previamente señalado.

- Cancelación DENM: También será un mensaje con el mismo identificador y cuyo propósito será informar sobre la finalización de un determinado evento.

- Negación DENM: Este tipo de mensaje es utilizado para la terminación de un evento siempre y cuando la estación que lo originó tenga la capacidad de detectar la terminación del evento que ha sido previamente anunciado por otra estación.

2.9 Service Announcement Message (SAM)

Durante los subapartados anteriores se han explicado varios protocolos pertenecientes a la capa de Servicio/Infraestructura del estándar ITS-G5, al igual que otros pertenecientes a la capa de Transporte y Red. Una de las principales ideas del estándar europeo es que la capa de Infraestructura pueda ser implementada por un amplio abanico de protocolos. Cada protocolo tiene una funcionalidad muy bien definida, al igual que siempre exista un servicio por protocolo. De esta forma, combinando todos los servicios, proporcionará una mayor flexibilidad y escalabilidad para futuras aplicaciones. Durante este subapartado se explicará el protocolo responsable de la conocida conmutación múltiple de canales, pero esta vez a nivel de capa de Infraestructura.

De esta forma la principal funcionalidad del servicio encargado de los mensajes SAM es proporcionar un mecanismo de anuncio de disponibilidad de un enlace de comunicación con otro servicio ITS que se encuentre a un solo salto de distancia. Estos mensajes pueden contener información que permite al usuario decidir si conectarse o no. Lo que se ha pretendido con este funcionamiento, es asemejarse al funcionamiento que tienen los mensajes "WAVE Service Advertisement".

El protocolo especifica que el SAM sólo utilizará los canales de servicio, es decir, no podrá utilizar el Canal de Control. Ya que como es definido en el estándar TTS 102 724 [21], el canal de control es el canal de referencia para todas las estaciones ITS para contextos de seguridad, en el que CAM, DENM, TOPO (Topología de la Carretera) y MAP (Mapa) transmiten.

El funcionamiento de SAM es lo que está representado en la siguiente figura. Donde se muestran diferentes transmisores, A y B. En el ejemplo dado, el transmisor A está trabajando en el Canal de Control. Dependiendo de la carga del canal, este podrá tener la posibilidad de cambiar a un canal de servicio siempre y cuando el canal de control hay excedido el límite de carga de canal. Este podrá seguir transmitiendo por un canal de servicio, típicamente el 1 o el 3, dependiendo de su configuración previa. Para saber si un transmisor debe de conmutar de canal, todas las estaciones implementan un mecanismo que les permite saber cuándo

pueden saltar de canal por sí mismas. En esta situación, no habrá un mensaje de aviso al resto de estaciones notificando este cambio de canal.

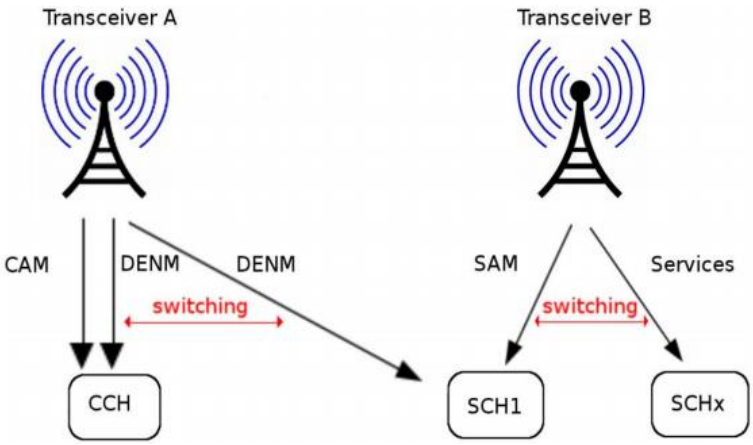

Figura 8. ETSI ITS G5 Especificación de canal y mensaje [22]

Por otro lado, el resto de los protocolos, pueden sólo usar los Canales de Servicio ante situaciones de congestión y previo aviso hecho por SAM. En estas situaciones se pueden identificar dos tipos de estaciones, el Proveedor de Servicios (SP), que es la estación responsable de mandar el aviso de SAM en el SCH1 y ofrecer el servicio en el SCHx y por otro lado el Consumidor de Servicios (SC), el cual previa recepción del aviso en el SCH1, conmuta a SCHx para poder seguir informado de los avisos. Es importante destacar, que cualquier tipo de estación puede jugar ambos roles.

2.10 DSRC WSMP IEEE 1609.3

IEEE 1609.3 a diferencia del estándar 1609.4 explicado en el apartado 2.4, este pertenece a la capa de servicios de red o lo que sería equivalente en el modelo OSI, a las capas de Red y Transporte. Los servicios de red soportados por este protocolo serán aquellos que están basados en comunicaciones IP utilizando UDP o TCP en la capa de transporte. También, cabe destacar que sólo utilizará los canales de SCH para trasmisión. Y, por otro lado, los que no están basados en IP, y se basarán en WSMP (Protocolo de Mensajes Cortos WAVE). Para este tipo de comunicaciones si está permitido el uso de ambos tipos de canales, SCH y CCH.

WSMP está específicamente diseñado para comunicaciones V2X y cuenta como principal característica soportar alta prioridad y alta respuesta de comunicaciones. Además, durante el intervalo en un canal de Servicio de baja prioridad estos mensajes pueden ser transmitidos en el Canal de control al resto de estaciones para que estas no tengan que conmutar al SCH. Por otro lado, cuando se requiere una alta prioridad podrá utilizar directamente el CCH.

Desde que se recibe un mensaje WSMP de las capas superiores, se genera la cabecera correspondiente a incluir en el paquete, acto seguido se realiza una petición de trasmisión a LLC, esta capa encapsularía el mensaje en uno de tipo ethernet y lo pasaría a capas inferiores. Cuando el LLC receptor recibe el paquete, este comprobará el valor de la encapsulación ethernet, para pasarlo a la capa WSMP o a IPv6, dependiendo del tipo de comunicación realizada, no IP o IP.

Durante este capítulo se ha podido analizar brevemente las diferencias entre ambos estándares, así como los diferentes mecanismos que tiene cada estándar para dar solución a cada una de las dificultades o requisitos que le plantea una red V2X

De esta forma también se ha podido comprobar como el estándar europeo, se centra en la definición de múltiples protocolos con tareas u objetivos muy bien definidos. Dando la posibilidad a una pila de protocolos escalable y polivalente. Por otro lado, estas ventajas, acarrean una implementación más costosa o difícil, principalmente cayendo estas tareas a desarrollos software, donde será necesario la implementación de modelo bastante amplio y minucioso.

Por otro lado, el estándar estadounidense, a priori puede parecer más simple, utilizando estándares ya definidos para otros modelos que siguen el modelo OSI, ya que los únicos definidos en exclusiva para este tipo de entornos son el IEEE 1609.3 y 1609.4. Además, otro aspecto que llama la atención, este caso a nivel hardware o físico, es como el estándar U.S, sólo trabaja con un canal, y en el caso de que sea necesario conmutará a un canal de Servicio. Aproximación muy distinta que, al europeo, donde siempre se tiene un medio físico escuchando del CCH y será otro el conmute entre canales. De esta forma, también se pueden ver cómo afecta a uno y a otro esa perdida y colisiones de paquetes tan poco deseadas en aplicaciones como Platooning

3. Estado del arte

3.1 Proyectos ITS relacionados con las VANETs

Como se describe en [23] estos son algunos de los proyectos e infraestructuras dentro del marco de la Comisión Europea, que se han desarrollado y desplegado para comunicaciones vehiculares en entornos C-ITS para poder evaluar y probar esta tecnología:

- AdaptIVe [24]: El proyecto AdaptIVe (Automated Driving Aplications & Technologies for Intelligent Vehicles), es un trabajo de investigación cofinanciado por la Comisión Europea que comenzó en enero de 2014. los 29 socios del proyecto tienen como objetivo desarrollar y probar nuevas funcionalidades tanto para siete automóviles y un camión, capaces de simular un comportamiento semi-autónomo o autónomo en situaciones de tráfico urbano, de autopista o incluso de aparcamiento. Otro de los pilares fundamentales del proyecto es la interacción cooperativa entre el conductor y los sistemas automatizados que están disponibles a través de sonorización y aplicaciones vehiculares cooperativas.

- DRIVE C2X [25]: Este proyecto reúne los resultados obtenidos en otros proyectos europeos como PRE-DRIVE C2X, CVIS o COOPERS para crear un sistema de referencia como base para crear pruebas operacionales en Europa. El objetivo es el de permitir la evaluación de tecnologías de conducción cooperativas probando la operatividad de sistemas nacionales para el soporte de despliegues de comunicaciones C2X. Se realizó en siete lugares de prueba, Finlandia, Francia (SCORE@F), Alemania (simTD), Italia, Países Bajos, España (SISCOGA) y Suecia. Y se realizaron ocho funcionalidades cooperativas diferentes que fueron probadas de forma exitosa con 750 conductores, en más de 200 vehículos, recorriendo más de 1,5 millones de km, el rendimiento impecable que se obtuvo demostró que es un sistema maduro ya que fue probado bajo todo tipo de situaciones de tráfico y condiciones climáticas. Los impactos de seguridad de las funcionalidades probadas en DRIVE C2X son claramente positivos. Los conductores reaccionan a la información y señales de advertencia.

- PRESERVE [26]: El objetivo de este proyecto está basado en la seguridad de las posibles comunicaciones dentro de un entorno vehicular. Se basa en la realización de comunicaciones V2X seguras y protegidas proporcionando y probando un subsistema de seguridad y privacidad. Está basado en trabajos de investigación anteriores, de forma que se reduzcan los gastos y se aumente la escalabilidad. El objetivo principal, por tanto, será el de ofrecer una completa protección que abarque desde los sensores del vehículo, a través de la red de a bordo y comunicaciones V2V y V2I, hasta la estación receptora de la información transmitida. Como resultado del proyecto, PRESERVE presentó un subsistema de seguridad V2X completo, escalable y rentable cercano al mercado del automóvil.

- Actualmente la Unión Europea está trabajando en proyectos centrados en aplicaciones ITS dentro de un programa de trabajo llamado Mobility for Growth que pertenece al proyecto Horizon 2020 [27]. Este programa de trabajo tiene como objetivo integrar los medios de transporte y la infraestructura en un sistema de transporte europeo conectado de forma inteligente y fácil de usar y para ello se plantean algunos retos en el sector transporte como los siguientes:

- Hacer que los equipos y sistemas para vehículos, aviones y embarcaciones sean más inteligentes, más automatizados, más limpios y silenciosos, al tiempo que reduce el uso de combustibles fósiles.
- Encontrar soluciones de infraestructura inteligente para implementar sistemas innovadores de gestión de tráfico e información, servicios avanzados para el viajero, logística eficiente, tecnologías de construcción y mantenimiento.

Otros proyectos financiados por la Unión Europea que se mencionan en [4] son los siguientes:

- Proyecto SCOOP [28]: Involucra a Austria, España, Francia y Portugal. Es un proyecto para el despliegue de un piloto ITS cooperativo que pretende conectar aproximadamente 3000 vehículos con 2000 km de carreteras. Consiste en cinco lugares específicos con diferentes tipos de carreteras, Ile-de-France, "East Corridor" entre París y Estrasburgo, Bretaña, Burdeos e Isère.

  Este proyecto está compuesto por la parte uno desde 2014 a 2015 y la parte dos desde 2016 a 2018. su principal objetivo es mejorar la seguridad del transporte por carretera y del personal de operación vial durante las obras y mantenimiento de las vías. La segunda parte del proyecto incluye la validación de los servicios C-ITS en carreteras abiertas, pruebas fronterizas con otros Estados miembros de la UE (España, Portugal y Austria) y el desarrollo de una solución de comunicación híbrida (3G-4G / ITS G5).

  También cooperará con otros proyectos piloto europeos en curso y la plataforma C-ITS de la UE. El objetivo del proyecto es alcanzar un número masivo de vehículos, carreteras y servicios probados con el fin de proporcionar una evaluación representativa de C-ITS.

  También estimula la colaboración entre los fabricantes de automóviles y los operadores de carreteras, el intercambio de mejores prácticas y la innovación para resolver problemas comunes. En la Figura 9 se puede ver los lugares en los que se ha desplegado parte del proyecto.

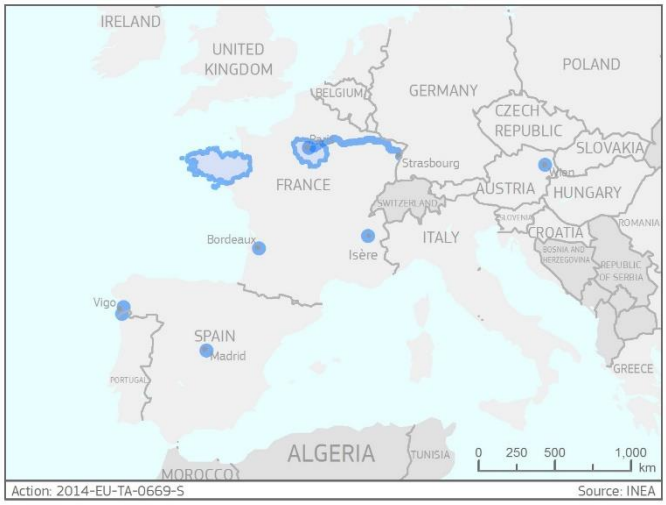

Figura 9. Lugares en los que se realizaron las pruebas [23].

- Eco-AT [29]: ECo-AT - European Corridor – Austrian Testbed for Cooperative Systems) es el proyecto Austriaco para crear aplicaciones cooperativas ITS junto con sus colaboradores en Alemania y Paises Bajos. En los próximos años el proyecto se centra en desarrollar el "camino Rotterdam-Frankfurt-Viena" como se puede ver en la Figura 10.

  El proyecto ECo-AT consta de dos fases: en la primera fase se especificarán los servicios y sistemas cooperativos y las soluciones serán probadas por la industria, las ciudades y los operadores de carreteras en el marco de un *"Living-Lab"*. En la segunda fase de ECo-AT, los servicios y sistemas cooperativos se realizan desplegándolos en el marco de una operación en vivo.

Figura 10. *European Corridor* [24]

Anteriores a los mencionados se realizaron proyectos clave para el desarrollo de esta tecnología como podrían ser CVIS [30] , COMeSafety [31] o EVITA [32].

3.2 Mecanismos de *Beaconing*

En la Figura 11 se puede ver una ilustración esquematizada de la arquitectura utilizada en una comunicación V2X en la que se destacan los aspectos importantes del mecanismo de *Beaconing*.

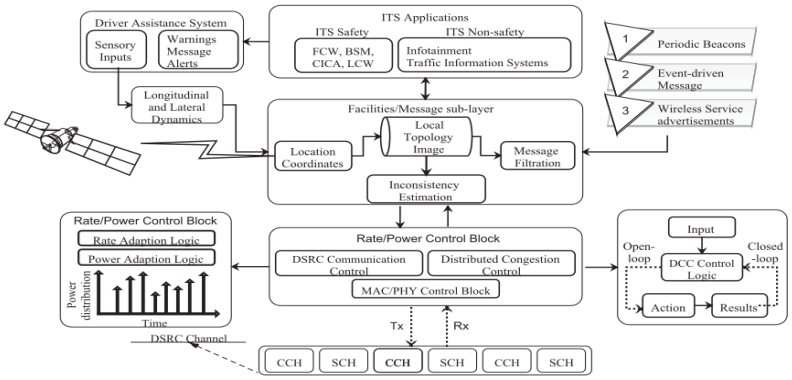

Figura 11. Estructura esquematizada de la pila de protocolos V2X [28].

Se puede ver el flujo del envío y la recepción de *beacons* desde que se crea el mensaje en la capa de aplicación hasta que se envía por el canal físico tanto desde el punto de vista del transmisor como del receptor en la imagen de la Figura 12. Se destaca la especificación y configuración de parámetros de transmisión en el envío de los paquetes.

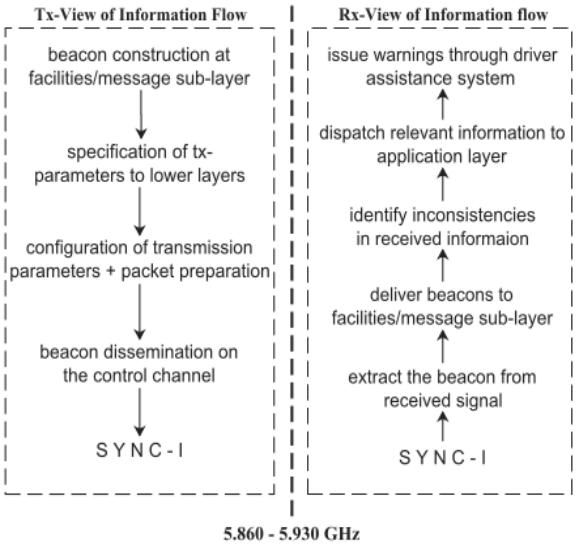

Figura 12. Flujo de envío/recepción de beacons [28].

La información que contienen los *beacons* contiene habitualmente información de sensores, velocidad del vehículo, dinámica longitudinal y lateral, etc. Esta información es tratada en una capa denominada subcapa de mensajes o capa de instalaciones como se puede ver en la Figura 11.

El papel de esta capa es mantener una topología local que abarque a los vehículos vecinos y también comunicarse con la capa de aplicación que a su vez informa al sistema de asistencia al conductor para generar avisos y alertas de mensajes. Dos tipos de mensajes son utilizados para este propósito:

- *Beacons* periódicos para la localización de vecinos.
- Mensajes dirigidos por eventos para informar a los vecinos sobre un peligro potencial.

Hay que destacar que la transmisión de *beacons* es de tipo *broadcast* por lo que puede que a los vehículos les lleguen mensajes que no están destinados para ese nodo en concreto, por esta razón está capa también es responsable de rechazar mensajes irrelevantes a través del filtrado de estos.

Independientemente del tipo de mensaje, la difusión de *beacons* periódicos de una forma eficiente se rige por la elección de ciertos parámetros, como la frecuencia de mensajes y la potencia de transmisión, junto con varios parámetros de capa MAC / física.

De hecho, la elección de adaptar estos parámetros puede basarse en el contexto de tráfico y el contexto específico de la aplicación. Como tal, el bloque de control de comunicación DSRC especifica cómo se adaptan las frecuencias de los mensajes y las potencias de

transmisión, mientras que el bloque de control MAC / física permite la adaptación de las ventanas de contención y las tasas de datos, por nombrar algunas.

Además, para evitar la saturación de canales en el medio inalámbrico, el bloque de control de congestión distribuido especifica estrategias de control de congestión basadas en los enfoques de teoría de control de bucle abierto y bucle cerrado. Después de ajustar los parámetros de transmisión en el bloque de control DSRC, los *beacons* se difunden en el medio inalámbrico compartido.

Existen dos categorías principales: Los protocolos de frecuencia fija y los protocolos adaptativos. En la se muestra un esquema que resume este concepto.

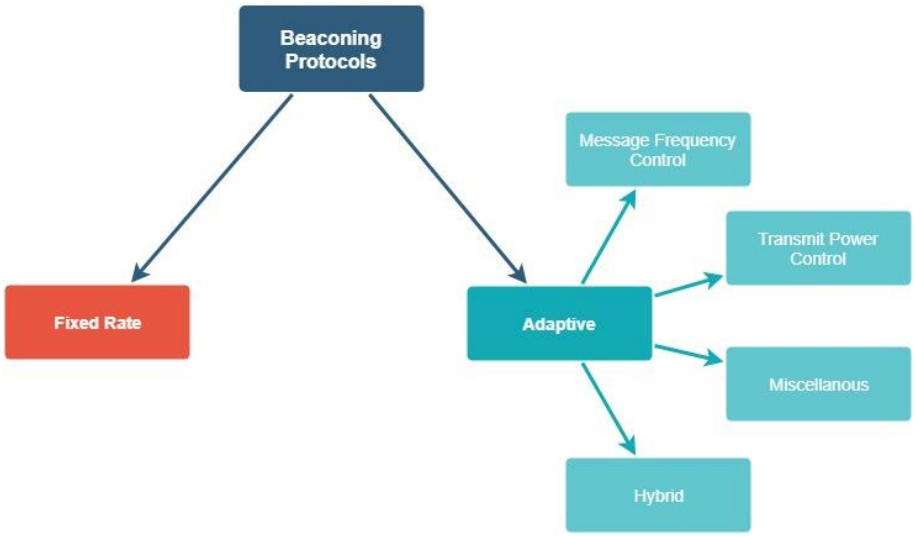

Figura 13. Protocolos de *Beaconing*

Las razones por las que los protocolos de *Beaconing* actuales son restrictivos en cuanto a cumplir los requisitos de las aplicaciones son la frecuencia de envío de mensajes periódicos y el ancho de banda inalámbrico, ya que provocan que los *beacons* se pierdan o se reciban incorrectamente en situaciones de alta densidad de tráfico. En aplicaciones de seguridad es necesaria una frecuencia de transmisión de mensajes muy alta y debido a la criticidad de este tipo de aplicaciones la pérdida de mensajes y la saturación del canal son situaciones que no se pueden tolerar. Aquí es donde aparece la necesidad de utilizar enfoques de *Beaconing* adaptativos en los que se use eficientemente el canal inalámbrico y de esta forma se provea de comunicaciones V2X confiables.

En la Figura 14 se muestra un ejemplo de una situación de accidente con diferentes densidades de vehículos en la que habría que aplicar un mecanismo diferente de *Beaconing* dependiendo de la situación de tráfico, porque como ya se habrá deducido, las VANETs son redes dinámicas en las que se producen situaciones densas en horas punta y situaciones de condiciones dispersas, por ejemplo, de tráfico nocturno.

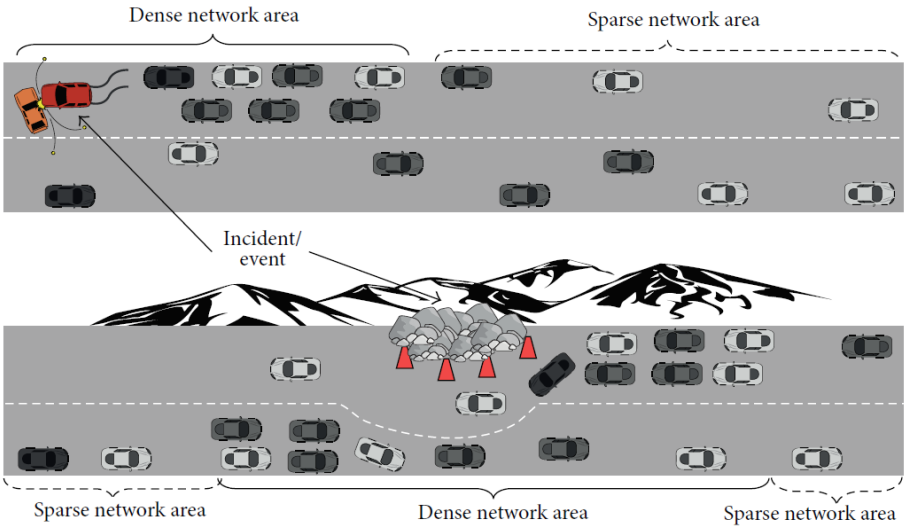

Figura 14. Comparación de áreas con distinta densidad de vehículos [33].

Otro parámetro que afecta en gran medida a las VANETs es la potencia de transmisión ya que cuanto mayor sea la potencia mayor es la distancia que se alcanza, pero también se ha demostrado que incrementar la distancia dirige hacia una pérdida de conocimiento cooperativo como se puede ver la Figura 15.

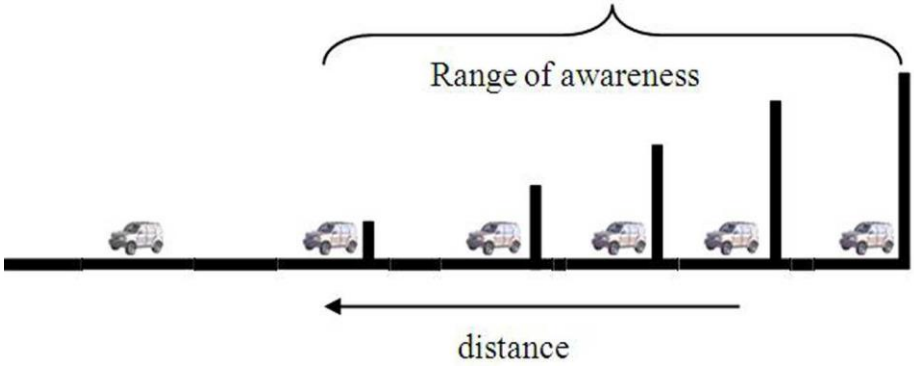

Figura 15. Rango de conocimiento en función de la distancia [33].

Mecanismos de *Beaconing* estáticos

En el estudio llevado a cabo en [34] se propone un modelo analítico para calcular la probabilidad de recepción de un mensaje por el receptor del paquete y el retardo medio en las redes vehiculares basadas en 802.11p. El modelo analítico propuesto considera una moda determinista de los *beacons* en vez del patrón de llegada de Poisson.

En su simulación, se observa que el retardo requerido de un mensaje de una aplicación de seguridad puede llegar a alcanzar el umbral. Sin embargo, la probabilidad de recepción de *beacons* no pudo cumplir con el valor requerido para aplicaciones críticas. Por ejemplo, la probabilidad de recepción de un *beacon* es de 0.7 a 0.5 cuando la tasa de error de bits es 0.0001.

Siguiendo las tendencias, en [35] se propuso un mecanismo de *Beaconing* de múltiple salto que controla de forma adaptativa el número de mensajes redundantes durante el proceso de difusión de los paquetes. El algoritmo divide el área que se encuentra dentro del rango de comunicación de la fuente en sectores dinámicos bloqueados. Cada sector depende de la densidad de los nodos cercanos a la fuente del paquete. Este comportamiento adaptativo de cada sector suprime la difusión de mensajes redundantes. La Figura 16 muestra el mecanismo de reenvío propuesto. El nodo S transmite su paquete a los nodos cercanos, A y B, y cuando estos lo reciben establecen un tiempo de espera inversamente proporcional a la distancia de la fuente para realizar el reenvío. En este escenario, el nodo A, como se encuentra más alejado y su temporizador caducará antes, difunde el paquete. Cuando el nodo B recibe de A el mismo paquete que recibió de S, filtra el paquete y no lo difunde, y, por lo tanto, el nodo A bloquea al nodo B en el mecanismo de reenvío.

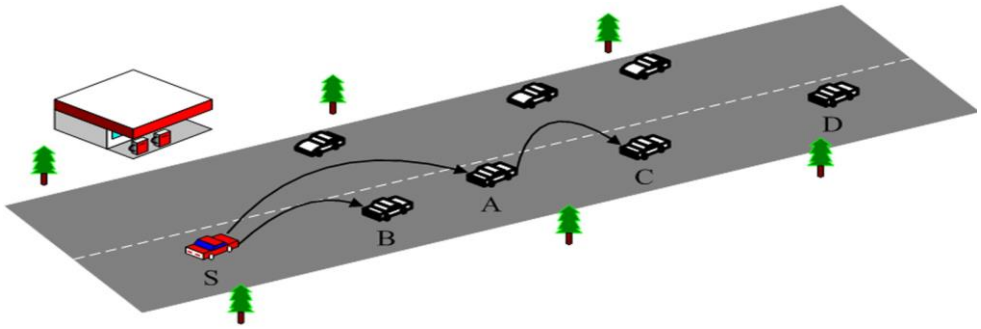

Figura 16. Escenario de mecanismo de reenvío con nodos bloqueados dinámicamente [33].

La evaluación del rendimiento muestra que el mecanismo de áreas bloqueadas dinámicamente ofrece mejores resultados en comparación con los mecanismos de reenvío de paquetes constante en términos de ratio de entrega de mensajes [36].

Mecanismos de *Beaconing* adaptativos

En el estudio realizado en [37], se describen todos los factores en los que se basa el diseño de los mecanismos de *Beaconing* adaptativos y su clasificación atendiendo a diferentes criterios. A continuación, se detalla lo que se ha considerado importante para el entendimiento del diseño y funcionamiento de estos protocolos.

Los requisitos de rendimiento que son deseables en cualquier mecanismo de *Beaconing* adaptativo son los siguientes:

- Carga reducida de *Beaconing*: la carga en el Canal de Control indica el estado de ocupación del canal. Si el estado es de alta ocupación, también conocido como congestión, las aplicaciones V2X son pobremente escalables. Por ejemplo, la carga de *Beaconing* en redes densas puede afectar al rendimiento de la aplicación debido a la alta latencia que se produce en el intercambio de mensajes y por lo tanto en conocer el estado de los nodos vecinos. Para gestionar la ocupación del canal, los mecanismos de *Beaconing* deben adaptarse a parámetros como la densidad de vehículos, los estados de los canales, la tasa de error de bit (BER), etc. Algunos mecanismos para reducir la carga del canal:

    - Utilizar algoritmos de predicción de la posición: Esto permitiría evitar el intercambio de mensajes innecesarios ya que se predice las

posiciones de los vehículos vecinos a partir de las recibidas anteriormente.

- Reducción de la potencia de transmisión: Se restringe el rango de transmisión para minimizar la carga de *Beaconing*.

Cabe señalar que no es deseable utilizar retroalimentaciones para *beacons* que tienen una validez temporal marginal.

- Diversidad de aplicación: Las VANETs pueden albergar tanto aplicaciones de seguridad como aplicaciones no destinadas a la seguridad vial. Por ello, las aplicaciones tienen requisitos muy diversos para la diseminación de los *beacons* como para los niveles de conocimiento sobre el tráfico y la red y el mecanismo de *Beaconing* tiene que ir acorde a los requisitos de la aplicación en concreto.

- Transmisión de *beacons* imparcial: La consistencia en la movilidad y los patrones de comunicación son pertinentes a las redes vehiculares. En consecuencia, los vehículos tienen diferentes puntos de vista sobre sus respectivas topologías y el estado de ocupación del canal.

  En estas condiciones, para que un enfoque de *Beaconing* sea justo, debe percibir las opiniones de los vecinos antes de adaptar un comportamiento de transmisión. En otras palabras, las transmisiones adaptativas de un vehículo no deben afectar las transmisiones de sus vecinos. Por ejemplo, un vehículo que detecta baja ocupación del canal decide aumentar su frecuencia de mensajes, basándose en el criterio de imparcialidad esto solo podría hacer si el aumento de frecuencia no causa un estado de congestión en sus nodos vecinos haciendo que ellos tengan que utilizar una frecuencia de envío de mensajes más baja.

  De manera similar, se sabe que un aumento en la potencia de transmisión disminuye la probabilidad de recepción de mensajes de los vecinos cercanos, Por lo tanto, la adaptación de potencia debe ser justa para todos los vehículos dentro de un rango de transmisión. La implementación de la imparcialidad requiere el intercambio de información entre los vehículos sobre sus puntos de vista de la topología y los estados de la red.

- Entrega confiable de *beacons*: Un objetivo crítico de los protocolos de *Beaconing* adaptativos para aplicaciones de seguridad es la confiabilidad de entrega de mensajes a su debido tiempo. Teniendo en cuenta que no hay confirmación de mensajes en los mecanismos de *Beaconing* la confiabilidad se debe proporcionar a través de diferentes estrategias adaptables como pueden ser priorización de mensajes, aumento de la frecuencia, cambio en la potencia de transmisión, etc. La entrega confiable de datos críticos para la seguridad puede violar el criterio de imparcialidad en algunos vehículos, por lo tanto, una opción adecuada para medir la confiabilidad es usar métricas centradas en la aplicación, como por ejemplo la confiabilidad de la ventana de tiempo (T-WR) o el tiempo de reacción de los conductores.

El diseño de mecanismos de *Beaconing* adaptativos se basa en la información utilizada como entrada para el enfoque adaptativo. Dependiendo del tipo de información el impacto en los requisitos de rendimiento del sistema es diferente como se puede ver en la Figura 17.

Information category	Beaconing load	Application diversity	Fairness	Reliability
App. requirement	–	–	Direct	Direct
Network state	Direct	–	Direct	Indirect
Traffic scenario	Direct	–	–	–
Mixed	Combination of above			

Figura 17. Relación del tipo de información con el impacto que causa en el sistema.

- Requisitos de la aplicación: Los requisitos de la aplicación indican los requisitos de transmisión de los *beacons* para el correcto funcionamiento de las aplicaciones vehiculares. Basándose en estos requisitos, la capa MAC puede adaptar la transmisión de los *beacons* consecuentemente.

  Por ejemplo, en ETSI, la capa de instalaciones puede especificar un requisito temporal estricto para que el control de acceso a los medios (MAC) transmita *beacons* con acceso prioritario utilizando 802.11e. El requisito de la aplicación tiene un impacto directo en la imparcialidad y la confiabilidad. La confiabilidad resulta en un tiempo de reacción mejorado para los conductores en una condición peligrosa en la carretera, por ejemplo, a través de una entrega priorizada de un mensaje de prevención de colisión.

- Estado de la red: El estado de la red especifica las métricas de rendimiento localmente computadas de los canales inalámbricos. Esto incluye ratios de ocupación del canal (CBR), tasa de error de bit (BER) y niveles de interferencia, por mencionar algunos de ellos. La mayoría de los enfoques dependen de esas métricas para enfrentarse con los escasos recursos del canal. De ello se deduce que el estado de la red tiene un impacto directo en la carga de *Beaconing* y en la imparcialidad. Con la capacidad de compartir los estados de la red con los nodos vecinos, el impacto secundario se puede especificar en términos de confiabilidad mejorada.

- Escenario del tráfico: Los vehículos están recibiendo constantemente información sobre el estado del tráfico y de las carreteras por parte de los nodos vecinos. Específicamente, las tasas de desvío del vehículo, los cruces de intersección, las maniobras de adelantamiento, las carreteras con lugares de fusión, etc. Las variaciones en la situación del tráfico tienen un impacto directo en la carga de *Beaconing* necesaria para un cierto nivel de conocimiento de la situación, por ejemplo, un vehículo que circula a una alta velocidad y se aproxima a una intersección necesita una frecuencia de mensajes mayor y por lo tanto una carga de *Beaconing* alta.

  Mixta: Las categorías anteriores se pueden usar de forma combinada para un enfoque de *Beaconing* multiobjetivo. Como ejemplo, una reducida carga de *Beaconing* y

confiabilidad requieren información sobre el estado de la red y además información de la aplicación para mantener la saturación del canal CCH y proveer una entrega puntual de los *beacons*.

Los protocolos adaptativos de *Beaconing* se pueden dividir dependiendo de su enfoque en control de frecuencia de mensajes, MFC, control de transmisión de potencia, TPC, variados y enfoque híbrido:

- Con el enfoque MFC los vehículos adaptan la frecuencia de la transmisión de *beacons*, si esta frecuencia disminuye se ayudará a reducir la carga del CCH y si esta frecuencia aumenta habrá mayor probabilidad de que se reciban los *beacons* correctamente.

- Si se utiliza TPC se podría por ejemplo aumentar la potencia de transmisión y lograr cubrir áreas más amplias además de aumentar la probabilidad de recepción para determinadas regiones.

- Cuando se habla de enfoques variados se refieren a explotar la posibilidad de 802.11p de conmutación de canales como adaptar la ventana de contención, desincronización de intervalos de trasmisión o modificar la tasa física de datos.

- Y por último el control hibrido combina los tres enfoques anteriores para explotar las ventajas de cada uno de ellos, Por ejemplo, para superar los límites de las redes inalámbricas se podría adaptar la velocidad de transmisión y la potencia para utilizar eficientemente los canales compartidos. En [30] se hace un estudio detallado de los protocolos híbridos de *Beaconing* existentes.

También se pueden clasificar por funciones objetivas. Los objetivos de estos protocolos pueden ser específicos del sistema o de la aplicación:

- Si se habla de objetivos del sistema, esto se refiere a mejorar el rendimiento del sistema por ejemplo reduciendo la carga del canal CCH o controlando las colisiones durante la trasmisión.

- Los objetivos de la aplicación podrían ser mejorar la detección de determinados eventos, un alto grado de conocimiento por parte de los nodos o asegurar la entrega de mensajes.

Otra clasificación que se realiza de estos protocolos es basada en la información que necesita dicho protocolo para tomar una decisión. Esta información podría ser la situación actual de tráfico, características de la transmisión o una combinación de las anteriores.

A partir de la clasificación anterior y basándonos en la información recogida en [37] y [2], se describen algunos mecanismos de *Beaconing* que se consideran el estado de arte en la materia:

- MFC en función de la carga del canal: la moda más relevante que se está siguiendo es adaptar la frecuencia de los *beacons* como una función de la carga del canal consiguiendo así que no se exceda el límite considerado como óptimo respecto a la capacidad del canal, y que a su vez deja capacidad para recibir mensajes que informen rápidamente de eventos específicos como DENM [17] cuyo funcionamiento ya se ha explicado en la sección anterior.

Además, la mayoría de ellos son designados basándose en el postulado de que todos los vehículos deben lograr el mismo rendimiento y las mismas oportunidades dentro de la red. Algunos ejemplos de protocolos importantes son:

- Uno de estos ejemplos es LIMERIC [38] que utiliza un algoritmo que saca ventaja de las entradas de control de gran precisión que están disponibles en el canal inalámbrico.
- Otro ejemplo que se puede mencionar es PULSAR [39], que también adapta la tasa de transmisión del vehículo estableciendo tasas de transmisión máxima y mínima.

- MFC basado en la situación del tráfico: Además de la carga del canal es importante tener en cuenta la situación del tráfico por lo que se han estudiado diferentes soluciones como pueden ser:
  - Una extensión del protocolo LIMERIC es el algoritmo de control de congestión llamado EMBARC [40], *Error Model Based Adaptive Rate Control*, que además de adaptar la tasa de transmisión como una función de la carga del canal también tiene en cuenta la dinámica del vehículo.
  - En el enfoque descrito en [41] se adapta la frecuencia de mensajes basándose en el propio movimiento del vehículo o en la situación de tráfico que exista alrededor. Estas condiciones podrían ser la velocidad o el giro del vehículo o la necesidad de que vehículos especiales tengan un acceso prioritario al carril en la carretera. Cualquiera de estas requiere una mayor frecuencia de mensajes.

    Teniendo en cuenta que la congestión se considera más importante que el conocimiento en redes de alta densidad debido a la probabilidad de que se produzcan muchas colisiones entre *beacons*, el estudio propuso reducir la frecuencia en función de la densidad vehicular para reducir la congestión y mantener un nivel aceptable de conocimiento por parte de los vehículos.

- MFC basado en predicción de la posición: Aquí se mencionan dos propuestas en las que se utiliza un modelo de predicción de posición para adaptar la frecuencia de los mensajes. La motivación básica es reducir la congestión minimizando transmisiones de *beacons* innecesarias.
  - En [42], a partir de la información recibida por un nodo vecino, se calcula la posición de este para un determinado instante. La posición se actualiza cuando se recibe un nuevo *beacon* del mismo nodo vecino.
  - En [43] la posición se predice basándose en el filtro de Kalman para la lógica de estimación de posición distribuida. Después de recibir un *beacon* de advertencia, el vehículo calcula su propia posición en un instante cercano de forma que se replique el cálculo de posición en los vehículos vecinos. Utilizando el error que se obtiene entre las posiciones, se ajusta la frecuencia de los mensajes.

- MFC basado en la imparcialidad: Para conseguir imparcialidad en las VANETs se necesita la cooperación entre vehículos. Los siguientes enfoques proporcionan imparcialidad con respecto a los *beacons* periódicos y los mensajes dirigidos por eventos:

- El protocolo propuesto en [44] utiliza como indicador de alta congestión la alta ocupación del canal de comunicación. Por lo tanto, durante un periodo de congestión el vehículo informa a sus nodos vecinos sobre este estado. Cuando reciben este mensaje, los demás vehículos cooperan bloqueando la transmisión de sus mensajes periódicos para permitir la potencial transmisión de mensajes generados por algún evento. Además, en respuesta a este mensaje, los vehículos adaptan su frecuencia de mensajes utilizando el concepto de aumento aditivo y disminución multiplicativa. Este concepto significa que si la frecuencia inicialmente se ha incrementado en un mensaje por segundo se reduce por la mitad si existe congestión.
- De forma similar, en [45] el control de la congestión basado en adaptación de la tasa de transmisión adapta su frecuencia de mensajes considerando los vehículos que causan congestión dentro de su rango de detección de portadora. Durante un intervalo de tiempo específico, un vehículo monitoriza el CBR y escucha el CBR anunciado por sus nodos vecinos. A partir de esta información adapta la frecuencia de los mensajes manteniendo un nivel de CBR aceptable para proveer una alta probabilidad de éxito en la transmisión de los mensajes generados por eventos. Además, la retroalimentación recibida ayuda a identificar los vehículos que contribuyen más a la congestión y como consecuencia estos vehículos reducen su tasa de transmisión.

- Enfoques de Control de potencia de transmisión. Algunos de los protocolos adaptativos que siguen este criterio son los siguientes:
  - TPC basado en imparcialidad: La motivación del enfoque propuesto en [46] es la de proveer de una imparcialidad estricta mediante cooperación en la VANET. Para llevarlo a cabo se divide en dos fases. En la primera fase, un vehículo recopila información sobre los niveles de potencia de los nodos vecinos. El vehículo entonces calcula un valor de potencia, que es el máximo valor común entre los valores de potencia recibidos. En la segunda fase, se anuncia este valor calculado a los demás vehículos. Este paso asegura que el computo local del nivel de potencia no viola los requisitos de congestión del resto de nodos vecinos. Cuando los vehículos reciben este mensaje con el valor de potencia calculado, el vehículo selecciona el mínimo nivel de potencia para transmitir.
  - TPC con un nivel de potencia aleatorio: En las autovías los vehículos tienen tendencia a formar clústeres debido a las mínimas variaciones relativas de velocidad que existen. Bajo ese escenario, las colisiones de *beacons* son muy recurrentes. En el enfoque propuesto en [47] se proponen transmisiones de potencia aleatorias para reducir las colisiones y aumentar el conocimiento de los vecinos. Para asegurar imparcialidad en la selección de potencia, todos los vehículos seleccionan de forma aleatoria utilizando una media y una varianza común. La media del nivel de potencia permite que los vehículos mantengan un nivel de conciencia mayor sobre sus vecinos cercanos. Además, esto reduce la congestión general transmitiendo menos a mayores distancias.
  - TPC para reutilización espacial: La adaptación de potencia puede utilizarse para optimizar la reutilización espacial y proporcional transmisiones sobre distancias largas. En [48] se aplica este concepto. Inicialmente, un *beacon* se transmite utilizando un nivel de potencia bajo. Después le sigue la fase de

retransmisión, que consiste en que el nodo que recibe el *beacon* retransmite este mismo *beacon* recibido añadiendo información sobre sí mismo. Para mantener la información actualizada y evitar retardos en la transmisión multisalto, se programa la retransmisión en determinados repetidores.

- TPC basado en retroalimentación: los autores en [49] propusieron un control de potencia basado en la aplicación utilizando retro alimentación. La motivación fue transmitir mensajes de seguridad con un nivel de potencia suficiente para cubrir el rango deseado sin una cobertura excesiva.

  La potencia de transmisión inicial para los *beacons* se asigna con respecto a la cobertura requerida por una aplicación. Cada vehículo mantiene una lista de oradores, que contiene vecinos cuyo nivel de potencia excede la cobertura deseada. Se usa un mensaje de retroalimentación para notificar a la lista de oradores sobre sus altos niveles de potencia de transmisión. Por lo tanto, los vecinos cuyas direcciones se incluyen en la retroalimentación reducen su potencia de transmisión.

- Enfoque Variado: estos enfoques incluyen una variedad de parámetros para la adaptación de *Beaconing*, por ejemplo, los siguientes estudios están centrados en la adaptación de la ventana de contención:

  - Para un enfoque en el que se adapte la ventana de contención para evitar colisiones se propone [50]. En este protocolo se evitan las colisiones CCH síncronas y trata el rechazo de paquetes antes de la transmisión. Este enfoque aumenta el retroceso aleatorio exponencial con una estimación de la utilización de la ranura. La utilización de la ranura está basada en la utilización actual, que es el promedio de las ranuras ocupadas respecto al número de ranuras disponibles y los valores anteriores de la utilización. Una vez haya expirado el retroceso, la transmisión de un *beacon* continúa si la probabilidad de una transmisión con éxito basada en el valor de ranura disponible es suficiente. De lo contrario, se rechaza el *beacon* a transmitir. Aplazar la transmisión de un *beacon* puede comprometer los mensajes de ciertos vehículos, por lo que se calcula una probabilidad ponderada de transmisión de *beacon* que se basa en el número de *beacons* no transmitidos y el número de intentos de transmisión de un determinado *beacon*.

  - Un problema relacionado con la adaptación de la ventana de contención es la agresiva selección del retroceso bajo condiciones normales. En [51], los autores investigan el efecto de la ventana de contención bajo diferentes densidades de vehículos. En su estudio se concluye que para redes de alta densidad es más adecuada una ventana de contención grande y se propone una ventana de retroceso inverso, comienza con un valor alto para luego ir reduciéndose basándose en los mensajes que expiran.

- Enfoques de Control híbridos: los enfoques híbridos, que ya se han explicado en el apartado anterior, surgen como combinación de los anteriores. A continuación, se describen algunas propuestas que han surgido dentro de este campo.

  - En algunos trabajos como [2] se hace un análisis crítico de los protocolos DCC tanto del estándar europeo como americano para aplicaciones de seguridad de asistencia a la intersección, IAS, basadas en RSUs. Como conclusión se obtiene que los protocolos actuales de *Beaconing* no satisfacen los requisitos de este tipo de aplicación y se propone un nuevo protocolo

adaptativo que modifica la potencia y la tasa de transmisión además de utilizar priorización de los *beacons*.

- En [52] y [53] se utilizan los movimientos del vehículo para adaptar la frecuencia de mensajes y la potencia de transmisión. El objetivo es mantener el canal libre para datos de alta prioridad. La frecuencia de mensajes se regula utilizando el error en la predicción de la posición de los nodos vecinos. Para la adaptación de la potencia, los vehículos monitorizan el CBR. Para una estimación más alta del CBR un vehículo asume que los vehículos vecinos obtienen valores similares y adapta la potencia de transmisión para reducir la congestión del canal.
- Para satisfacer los requisitos de las aplicaciones de seguridad, se propone en [54] un protocolo hibrido que controla la tasa de transmisión y la potencia para regular la carga del canal CCH. Específicamente se considera un escenario en el que un vehículo se cambia de carril y se detecta otro vehículo que se aproxima para evitar una posible colisión. En esta situación el requisito de la aplicación es la entrega confiable de *beacons*. Para implementar el control adaptativo, el protocolo de *Beaconing* utiliza la distancia crítica entre los vehículos para los cuales se debe compartir un *beacon* y así evitar una colisión. Para proporcionar tiempo suficiente para que el conductor reaccione, la transmisión adaptativa enfatiza la entrega confiable de al menos un mensaje de advertencia para los vehículos que entran en la zona de distancia crítica. Los autores han propuesto utilizar una potencia de transmisión más alta con una tasa de transmisión baja. Este concepto se debe al hecho de que al aumentar la tasa de transmisión se reduce el rango de transmisión en comparación con el aumento de la potencia de transmisión.
- Un enfoque de adaptación de la potencia de transmisión y de la ventana de contención se propone en [55], en este protocolo la adaptación de potencia se hace basándose en la densidad de vehículos, donde la adaptación de la ventana de contención se utiliza en *beacons* de alta prioridad. Después de estimar la densidad de vehículos, el mecanismo de *Beaconing* selecciona un nivel de potencia que sea suficiente para cubrir el rango deseado. El número de colisiones indica el nivel de congestión del canal. Como resultado, el tamaño de ventana de contención se adapta constantemente en proporciones directas para todas las categorías de acceso.

3.3 *Platooning*

En este subapartado se va a explicar el funcionamiento de la aplicación de *Platooning* en detalle y el estado del arte de los sistemas en los que se ha utilizado esta aplicación.

Lo que realmente ha motivado la aparición de esta aplicación es el hecho de que un *platoon* de vehículos conduciendo a la misma velocidad, previamente acordada entre ellos, mientras se mantiene una mínima distancia entre los vehículos reduce el consumo de combustible, aumenta la eficiencia del transporte y mejora la seguridad de otros usuarios que utilicen las mismas las carreteras. El vehículo que va en cabeza se denomina el Líder de *Platoon* (PL), y es responsable de establecer el ritmo para todo el *platoon*. Los otros vehículos se llaman miembros de *platoon* (PM) y ajustan su velocidad para mantener el ritmo establecido por el PL.

La aplicación de *Platooning* utiliza sensores a bordo de los vehículos que miden la distancia y la velocidad relativa del vehículo situado justo delante de él. Los *platoons* con esta tecnología tienen el inconveniente de que las perturbaciones se amplifican en el *platoon* lo que conlleva a un comportamiento inestable en el que la fluctuación del espacio y la velocidad del vehículo que le sigue se incrementa con el tiempo.

Un área de aplicación donde la ganancia de utilizar comunicaciones entre vehículos es particularmente obvia es en esta aplicación de *Platooning*.

Una forma de solventar este problema es el intercambio dinámico de información de estado no solo entre los vehículos consecutivos si no a todos los que forman parte del *platoon* es utilizando comunicación V2V [1]. En la Figura 18 se puede ver un esquema del funcionamiento de esta aplicación.

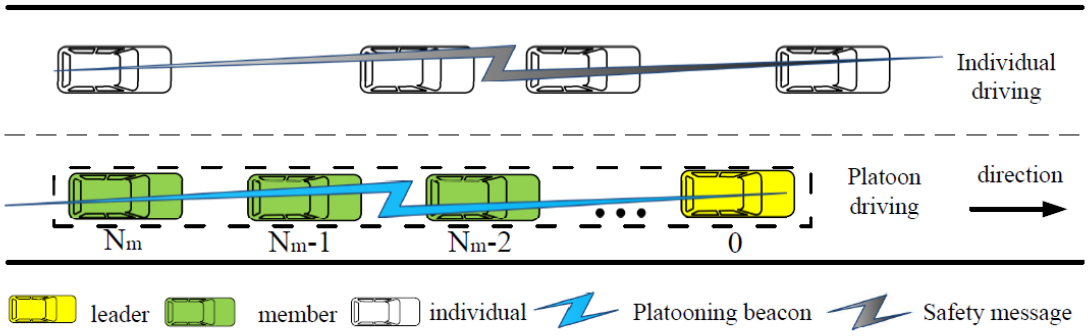

Figura 18. Ejemplo del concepto de *Platooning* junto con conducción individual [43].

Con la información del estado y los comandos de control de los vehículos predecesores y la propia información del vehículo obtenida de los sensores, (por ejemplo, cámaras, LiDAR, radares instalados en los vehículos) cada vehículo en un *platoon* contribuye a la estabilidad del *platoon* y puede adaptar su propia aceleración y velocidad con la ayuda de un CACC y mantener la distancia entre vehículos y el espacio de tiempo estable a un valor deseado.

En un sistema típico de CACC, cada vehículo incluye un controlador de dos capas. El controlador de capa superior calcula la aceleración deseada para mantener la estabilidad del *platoon*, es decir, la distancia de seguridad deseada por el vehículo anterior.

Dado que la aceleración deseada no es una entrada de control verdadera, se necesita un controlador de nivel inferior para controlar la actuación del vehículo para poder rastrear la aceleración deseada y así determinar si es necesario una aceleración o una frenada.

Se focaliza en la estrategia de control *predecessor-leader*, con el controlador de nivel superior alimentado con la información del PL y el PM precedente como se puede ver en la Figura 19. Esta estrategia evite el efecto no deseado de inestabilidad en la línea debido al error de amplificación en la cadena de vehículos, que es típico en una estrategia de *control predecesor-following*, dónde cada vehículo solo se comunica con el anterior para ajustar su posición relativa. [56]

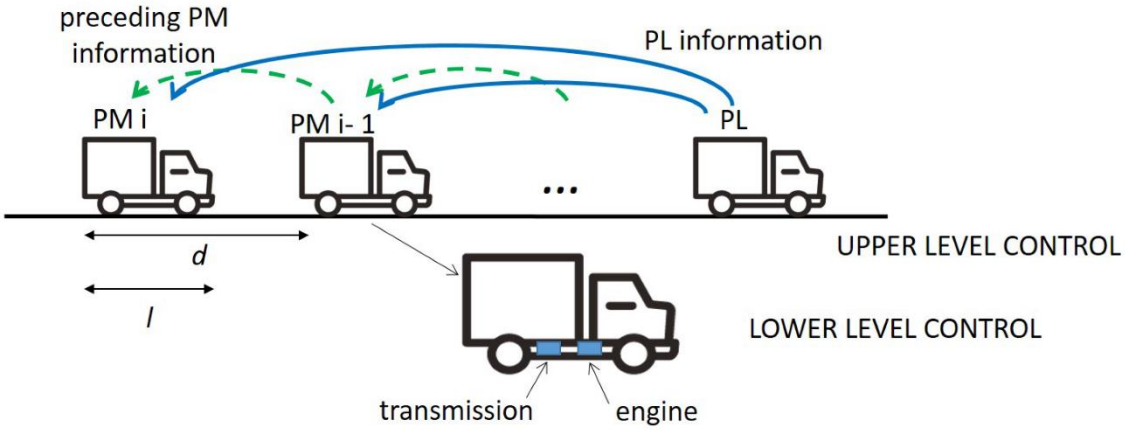

Figura 19. Controlador de dos niveles para la estrategia de control *predecessor-leader* [57].

Los comandos de control de los vehículos predecesores permiten reacciones más rápidas y espacios más pequeños entre vehículos.

De acuerdo con [56], el patrón de tráfico de una aplicación de *Platooning* implica un intercambio periódico de paquetes con un tamaño de carga útil en el rango entre 50 y 6500 bytes, y una tasa de datos entre 0.012 y 65 Mbps. Los requisitos de entrega correspondientes son la latencia de extremo a extremo (calculada desde el momento en que la fuente transmite el CAM hasta el momento en que se recibe en el destino) en el orden de 10–25 ms, y la confiabilidad entre 90% y 99.999 %.

En el estudio realizado en [57] se analizan los estrictos requisitos de tiempo y confiabilidad de la aplicación de *Platooning* y cómo podrían adaptarse los mecanismos de *Beaconing* para satisfacerlos además de solventar el problema del retardo de acceso aleatorio inherente a la capa MAC de 802.11p.

Los autores evalúan mediante simulación el efecto de la adaptación de la tasa de envío compatibles con IEEE 802.11p, la priorización de tipo de mensaje y la elección de la estrategia de difusión de los mensajes de advertencia de tipo CAM y la difusión DENM. El estudio de la simulación de un *platoon* de 10-20 vehículos en un escenario de alta densidad de tráfico muestran que la elección de contexto de la tasa de envío, la clase de prioridad y la estrategia de difusión no solo reducen los retardos en la difusión de los DENM, sino que también tienen un efecto significativo en el rendimiento de las CAM intercambiadas por los miembros del *platoon*.

Los estrictos requisitos de confiabilidad y sincronización de las aplicaciones de *Platooning* no son fáciles de cumplir. Si el Canal de Control está muy cargado con tráfico de datos, los retardos aleatorios inherentes a la capa MAC del 802.11p pueden impedir que las aplicaciones de *Platooning* funcionen adecuadamente, o, dicho de otra forma, la distancia de seguridad que se necesita entre los miembros del *platoon* puede ser demasiado grande para reducir los consumos de combustible.

Estos requisitos derivan del hecho de que es una aplicación de control distribuido que se basa en la difusión oportuna de avisos de peligro y mensajes de estado periódicos. Si se va a realizar una aplicación de *Platooning* basada en IEEE 802.11p, es importante reducir los retardos en la difusión de mensajes de advertencia y otros tipos de eventos críticos.

Al mismo tiempo, los mensajes de actualización de estado periódicos o los *beacons* serán necesarios tanto por la propia aplicación de *Platooning* como por otras aplicaciones coexistentes. Un vehículo que no puede transmitir una CAM con éxito durante dos o más períodos CAM debido a que el canal esté congestionado permanecerá invisible para sus vecinos durante ese lapso.

En lugar de integrarse en la aplicación de seguridad basada en CAM, ahora se convierte en un peligro para la seguridad. Por lo tanto, un servicio aceptable de otros tipos de mensajes debe mantenerse incluso en presencia de mensajes de advertencia activados por eventos.

Para aumentar la seguridad y la eficiencia de las aplicaciones de *Platooning,* en el estudio se investigó el efecto de los siguientes parámetros de los mecanismos de *Beaconing*, tanto en la diseminación de DENM como en el rendimiento de CAM en un escenario de *Platooning*: la elección de la configuración de prioridad IEEE 802.11p para las dos clases de tráfico de datos, la elección de la tasa de envío para los DENM y la estrategia de difusión utilizada para difundir estos mensajes de advertencia activados por eventos a todos los miembros del *platoon*.

Todos los esquemas y configuraciones de parámetros sugeridos y evaluados cumplen con el estándar IEEE 802.11p. El estudio de simulación muestra que la elección del esquema de difusión no solo tiene el potencial de reducir el retardo de la difusión de las advertencias de peligro, sino que incluso mejora considerablemente el rendimiento del tráfico CAM que se intercambia periódicamente. Además, se evaluó el efecto de diferentes combinaciones de las configuraciones de prioridad basada en IEEE 802.11p y de las tasas de transmisión de los tipos de mensajes CAM y DENM.

Los parámetros que influyen en estas elecciones son, por ejemplo, el número de miembros del *platoon*, las condiciones generales de la radio o el número de vehículos que la rodean el *platoon* y con los que comparte el canal de control.

Para un *platoon* de 20 vehículos con una separación de 30 m de antena a antena y el supuesto de una carretera transitada con una gran utilización general del canal, se demostró que pudieron alcanzar un tiempo de advertencia del *platoon* de 6 ms o menos para el 80% de las pruebas simuladas mientras que el *platoon* completo recibió un mensaje de advertencia en el 100% de las pruebas ejecutadas después de 10 ms o menos, y además se pudo mantener una frecuencia de actualización de CAM razonable.

Por primera vez en este estudio se combinó el requisito de reducir el retardo en la difusión de las advertencias de peligro y al mismo tiempo proporcionar recursos suficientes para apoyar el intercambio frecuente de mensajes de estado periódicos. Los datos que se obtuvieron del estudio se pueden aplicar tanto en aplicaciones de *Platooning* como en otras aplicaciones de seguridad de tráfico cooperativas en general.

En el caso de *Platooning*, los DENM se usarían para emitir advertencias, difundir notificaciones e información de control dentro del *platoon*, tanto en el extraño caso de una emergencia como de manera más regular para controlar, por ejemplo, la velocidad y configuración del *platoon*.

Los CAM periódicos siempre están presentes y forman la base para las aplicaciones de ITS relacionadas con el *platoon* y no relacionadas con el *platoon*.

Otro estudio que se puede destacar es el descrito en [6], en este se hace un análisis del funcionamiento de *Platooning* sobre ITS-G5 y las posibilidades que el 5G brindaría a este tipo de aplicación. A continuación, se presentan algunas conclusiones recogidas en este documento además de otros trabajos de investigación en este campo.

Como se ha comentado anteriormente, en ITS-G5 se envían los mensajes cuando el canal está libre, este requisito en las comunicaciones entre vehículos del *platoon* es mucho más estricto que en las comunicaciones entre vehículos normales. De acuerdo con algunos experimentos reales de *Platooning*, la tasa de CAM varía entre 25 Hz para un intervalo de tiempo de 0,6s, esto se obtuvo en el proyecto *Connect & Drive* [58], y 40 Hz para una distancia entre vehículos de 5~7 m a una velocidad de 90 km/h obteniendo este dato en el proyecto *SARTRE* [59], que corresponden a un intervalo de transmisión de 40 Hz y 25 ms. En este último se desplegó un *platoon* de dos camiones y tres coches con conducción autónoma en una formación cercana.

Otros estudios empíricos que se mencionan en [60], son por ejemplo el proyecto de *Energy ITS* en Japón, que desplegó tres camiones completamente automatizados conduciendo a 80 km/h con una distancia entre vehículos de 10 m. En el programa *PATH* liderado por UC Berkeley y Volvo se demostró un pelotón de tres camiones equipados con IEEE 802.11p con una distancia de 15 m en una concurrida autopista interestatal en 2017.

El impacto del deterioro en las comunicaciones en el rendimiento de *Platooning* y el desarrollo de nuevos protocolos de comunicación para la aplicación de *Platooning* se ha convertido recientemente en un área activa de investigación. Se ha concluido que la tasa de envío de CAM y la ratio de perdida de paquetes tiene una influencia significante en la estabilidad del *platoon*. El proyecto europeo METIS considera un retardo máximo de 5 ms y una confiabilidad del 99.999% en la transmisión para aplicaciones críticas de seguridad que requieran información en tiempo real como *Platooning*.

Otro documento en el que se analiza la aplicación de *Platooning* es [56], en este caso para redes de acceso móvil con la tecnología C-V2X. En este caso los resultados que se obtienen es que la latencia en el ciclo de actualización en el controlador de cada vehículo se reduce notablemente permitiendo escenarios con una gran densidad de tráfico.

3.4 Herramientas de simulación

Hoy en día desplegar VANETs en entornos reales conlleva una gran dificultad y un alto coste económico, por ello la utilización de simuladores es crucial en el desarrollo de esta tecnología, ya que nos permiten predecir su comportamiento y a la vez entender y mejorar el funcionamiento de los sistemas V2X.

Existen multitud de herramientas de simulación que combinan el tráfico y las redes, además existen otras que también facilitan la simulación de determinadas aplicaciones ITS y que tienen interfaces amigables para que el usuario sea capaz de crear cualquier tipo de escenario.

La simulación en redes vehiculares constituye una herramienta valiosa para analizar y evaluar la viabilidad, los beneficios y las bondades de la implementación de las aplicaciones en los sistemas de transporte inteligentes. El grado de realismo y confiabilidad de los resultados de la simulación dependen fundamentalmente de dos aspectos:

- La integración de un simulador de red con un simulador de movilidad.
- El uso de métricas adecuadas para la evaluación de los resultados.

El objetivo de integrar un simulador de red y uno de movilidad es crear un escenario realista, en el cual estén consideradas las condiciones de la transmisión de datos a través del canal radio y la interacción de los vehículos bajo un modelo de tráfico real.

El simulador de red constituye una herramienta para modelar y evaluar el desempeño de ciertos componentes de los sistemas de comunicación (como estándares, protocolos, algoritmos, configuraciones, etcétera.), con el fin de realizar pruebas del diseño sin efectuar la implementación real.

Por otra parte, la función del simulador de tráfico es generar un modelo de movilidad en un escenario topográfico real, donde se muestran las posibles trayectorias de los nodos, teniendo en cuenta parámetros como la velocidad de los vehículos, la densidad del tráfico, la topología vial, entre otros.

Los modelos de movilidad determinan el comportamiento del flujo vehicular e indican la ubicación de los nodos (vehículos con equipados de una OBU) en la topología; la posición de los nodos en cada instante del tiempo es determinante en el desempeño de las VANET (conectividad, *throughput*, etc.).

De acuerdo con las características, los modelos de movilidad se clasifican en las siguientes categorías:

- Modelos aleatorios: La movilidad vehicular y los parámetros de la simulación, como la velocidad, la aceleración, los puntos de partida y destino, entre otros, se obtienen de procesos aleatorios. La implementación de este tipo de modelos es computacionalmente sencilla pero no refleja el comportamiento real del tráfico vial. Entre los modelos de movilidad aleatorios se destacan:

    - *Random Waypoint Model* (RWM)

    - *Random Walk Model (RWalk)*

    - *Reference Point Group Mobility Model* (RPGM)

- Modelos de flujo: Con el fin de incrementar el nivel de realismo en los modelos de movilidad, los modelos de flujos consideran la interacción entre los vehículos y su entorno. Existe una subclasificación de acuerdo con la granularidad del modelo:

    - Microscópico: Describe el comportamiento y los parámetros de movilidad de cada uno de los vehículos y la interacción entre ellos, como la distancia inter-vehicular, la velocidad, la aceleración, desaceleración, tiempo de reacción ante un evento, entre otros. Los modelos microscópicos son los más apropiados para la simulación de redes vehiculares.

    - Macroscópico: Este modelo no considera las características de cada vehículo en particular y en lugar de ello, describe a nivel general el comportamiento del flujo, la densidad y la velocidad de un "bloque" o conjunto De vehículos.

- Mesoscópico: Combina las propiedades de los modelos microscópico y macroscópico.

- Modelos de tráfico: Describen el comportamiento de los vehículos en función de la trayectoria y la interacción con los elementos que hacen parte de esta, como semáforos, intersecciones, señales de parada, cruces, entre otros.

- Modelos de comportamiento: Son una aproximación a los patrones del movimiento humano, basados en teorías del comportamiento. Los patrones del tráfico se adaptan dinámicamente a las condiciones del escenario, influenciados por patrones sociales y procesos de aprendizaje mediante inteligencia artificial.

- Modelos basados en trazas: Se definen mediante movimientos (trazas) preestablecidos de los vehículos.

Debido a la funcionalidad independiente de los simuladores, se requiere la ejecución en paralelo del software de red y de tráfico, de manera que exista una interacción dinámica entre ambos simuladores y se generen cambios en los flujos de la red basados en los patrones de movilidad y viceversa; la retroalimentación entre los módulos de red y movilidad permite la evaluación de las aplicaciones de seguridad y eficiencia vial, puesto que se obtiene una respuesta en el comportamiento de la red y en el modelo de tráfico vehicular simultáneamente.

Uno de los entornos de trabajo más utilizados es VEINS [7] que utiliza el simulador de tráfico SUMO [8] y el popular simulador de redes OMNet++ [9] para componer un entorno de sistema V2X.

Para que la plataforma VEINS sea capaz de simular VANETs dinámicas, se utiliza TraCI (*Traffic Control Interface*), que es la interfaz utilizada en el acoplamiento de OMNet++ y SUMO; por medio de una arquitectura cliente-servidor sobre el protocolo TCP se intercambian mensajes entre ambos simuladores; el resultado se ve reflejado en cambios sobre los patrones de movilidad y sobre el funcionamiento de la red.

Para la simulación de la aplicación de *Platooning*, existe una extensión de VEINS llamada PLEXE [61] que permite caracterizar la dinámica de los vehículos y los modelos de control de crucero dentro del entorno ofrecido por VEINS.

Otros simuladores conocidos que funcionan de forma similar a VEINS podrían ser OVNIS [62] o TraNs [63].

Todos ellos presentan una limitación ya que el control de la simulación está incluido en uno de los simuladores acoplados, por ello también han surgido otro tipo de soluciones como podría ser el simulador iTETRIS [64], que gestiona el control de la simulación y hace que su capacidad de evolución no dependa de los simuladores acoplados a través de una interacción entre simuladores de referencia de código abierto que es independiente de sus respectivas implementaciones.

En [65] se puede encontrar una comparación y descripción detallada de los simuladores que existen actualmente además de la Figura 20 dónde se presentan de una forma sencilla estos simuladores y las relaciones entre los mismos.

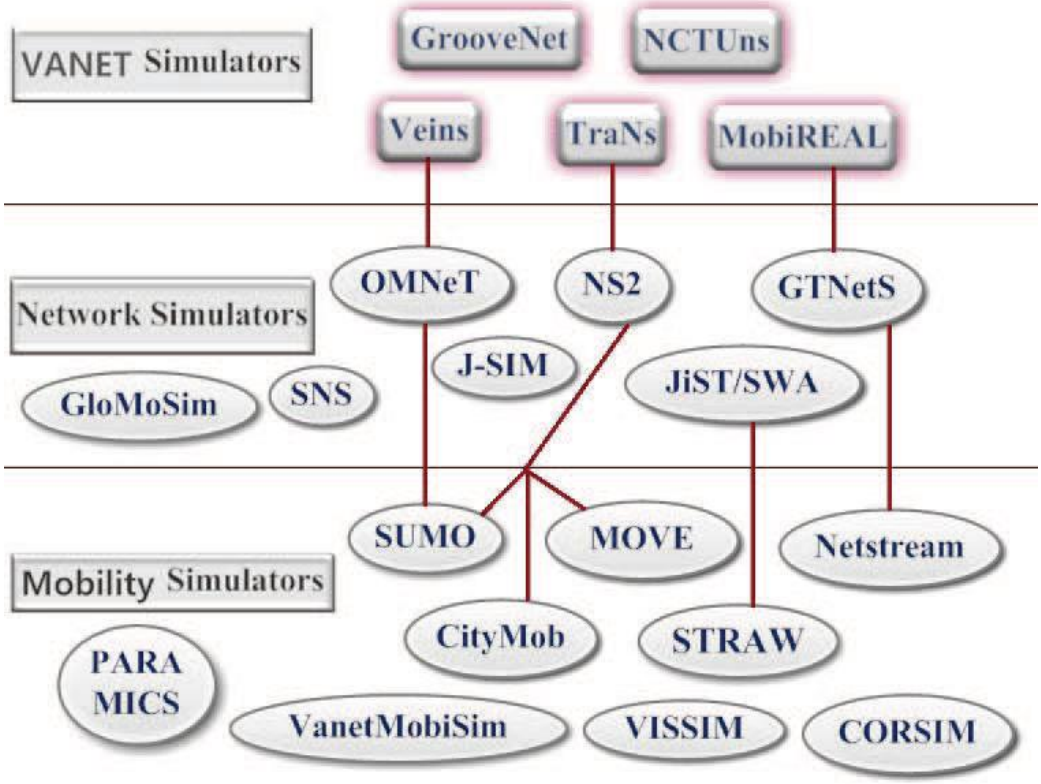

Figura 20. Simuladores existentes en la actualidad [65].

Para comparar sus características se puede ver la Figura 21 donde se presentan los simuladores para VANETs que existen en la actualidad. Como se puede deducir VEINS es uno de los más completos y por esa razón es el que se ha elegido para el desarrollo de este trabajo.

Criteria/ simulator	GrooveNet	TraNS	NCTUns	VEINS
Portability	X	X	X	✓
Freeware	✓	✓	X	✓
Open source	✓	✓	X	✓
Language	C++	Java,C++	C++	C++
Documentation	X	✓	✓	✓
Available examples	X	✓	X	✓
Continuous development	X	X	✓	✓
Console	X	X	X	✓
GUI	✓	✓	✓	✓
Ease of setup	Moderate	Moderate	Hard	Easy
Ease of use	Moderate	Moderate	Moderate	Easy
Wireless Technology				
VANETs	✓	✓	✓	✓
MANETs	X	X	✓	✓ (OMNET++)
Sensors	X	X	✓	✓ (OMNET++)
LTE	X	X	X	✓
Platooning	X	X	X	✓
Hybrid	✓	X	✓	✓
Realistic propagation models	✓	✓	✓	✓
Scalability	✓	✓	✓	✓

Figura 21. Comparación de los simuladores de VANETs [65].

4. Descripción del escenario

Después de todo lo presentado en los capítulos anteriores se va a abordar el problema que existe en las VANETs con los mecanismos de *Beaconing* estáticos y el acceso al medio.

Y para ello se analiza los parámetros que más afectan a las redes vehiculares demostrando así la necesidad de utilizar protocolos de *Beaconing* adaptativos para ser capaces de cumplir con los requisitos de las aplicaciones vehiculares cooperativas que existen en la actualidad.

Para proponer una solución adecuada se han seleccionado diferentes métricas de rendimiento que indiquen si el sistema es capaz de cumplir los requisitos de la aplicación de *Platooning*.

4.1 Entorno de simulación

Para el análisis de estos protocolos de *Beaconing* se va a establecer un entorno de simulación de los modelos teóricos. Al simular se provee de un entorno donde existen variaciones aleatorias y hacen que se llegue a situaciones más realistas donde los resultados son más precisos y confiables.

En este proyecto se utiliza la plataforma VEINS [7] en conjunto con el simulador de tráfico SUMO [8] y el simulador de redes OMNeT++ [9]. Como este trabajo se ha centrado en la aplicación de *Platooning* también se ha añadido al entorno de simulación una extensión de VEINS que facilita la implementación y simulación de esta aplicación. Esta herramienta llamada PLEXE [66] es Open Source y ofrece a los investigadores un entorno de simulación capaz de ejecutar experimentos, en escenarios realistas, teniendo en cuenta la física y la mecánica de los vehículos, las limitaciones de las comunicaciones y las redes, y las pilas de protocolos de Comunicaciones Inter-Vehiculares (IVC). PLEXE es fácilmente extensible y ya implementa protocolos de *Platooning* y de conducción colaborativa además de varios modelos de control de crucero *state of the art*.

Hay que destacar que VEINS se basa en modelos detallados de las capas de red IEEE 802.11p e IEEE 1609.4 DSRC / WAVE, incluida la operación multicanal.

En se pueden ver las herramientas que en su conjunto forman el simulador extendido.

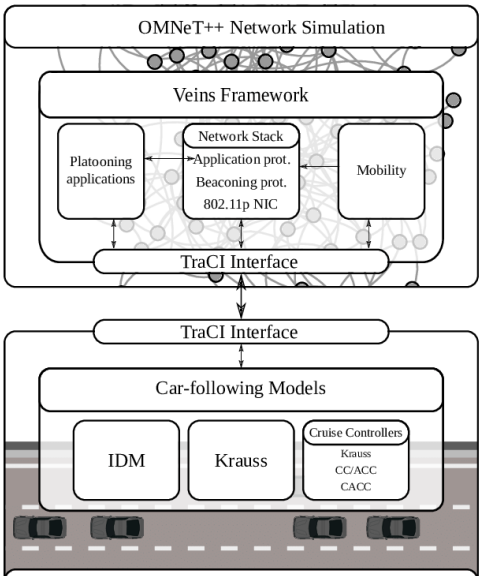

Figura 22. Estructura del simulador extendido con PLEXE [61].

Los objetivos de cada elemento que forma el marco de simulación son los siguientes:

- El objetivo de la plataforma VEINS es permitir la simulación de redes V2X proveyendo de la pila de comunicaciones vehiculares completa y que está basada en el estándar IEEE 802.11p. También se encarga de acoplar el simulador de red y el simulador de tráfico haciendo que se cree un nodo de la red de OMNeT++ por cada vehículo moviéndose en SUMO. Cada vez que un vehículo se mueve en SUMO, VEINS replica el movimiento en el nodo correspondiente de OMNeT++ actualizando el modelo de la red.
- Cada nodo de OMNeT++ implementa la pila de comunicaciones V2X con una interfaz inalámbrica 802.11p y un protocolo de *Beaconing* además de una o más aplicaciones. Su objetivo es llevar a cabo la lógica de los protocolos de comunicaciones y los mecanismos de *Beaconing*.
- En cuanto al simulador de tráfico, SUMO se encarga de proporcionar a VEINS los datos del estado del tráfico actual y es capaz de modificar la dinámica de los vehículos, por ejemplo, aumentando o disminuyendo su velocidad o cambiando su ruta.
- La extensión anteriormente mencionada, PLEXE, está explicada en detalle en [61], ésta se encarga de extraer datos de los vehículos en SUMO para que sean utilizados por las aplicaciones y protocolos de *Platooning*. Hace que sea posible que los CACCs en SUMO reciban sus datos a través de VEINS que a su vez se encarga de procesar los datos recibidos de los otros vehículos.

PLEXE además utiliza tanto una versión modificada de SUMO como una versión modificada de VEINS en la que han añadido las siguientes características.

En la Figura 23 se ve un esquema sencillo en el que se incluyen estas herramientas modificadas por PLEXE.

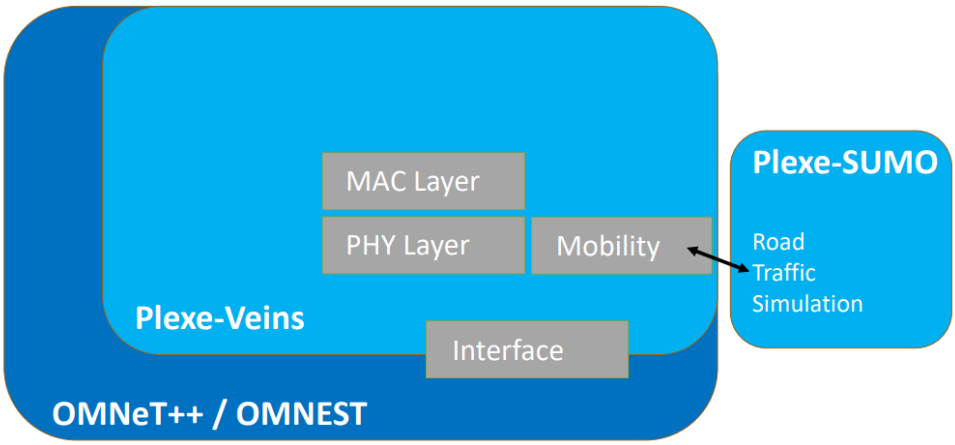

Figura 23. Esquema de PLEXE integrado con el resto de las herramientas de simulación [67].

4.2 Métricas de rendimiento

Las métricas de rendimiento nos indican las mejoras del funcionamiento de un protocolo de *Beaconing* en concreto. Para evaluar el funcionamiento del sistema completo se suelen utilizar métricas receptor-transmisor como rendimiento, ratio de entrega de paquetes, latencia, etc. Cuando se quiere evaluar el sistema a nivel de aplicación se suele utilizar métricas centradas en el receptor como podrían ser la probabilidad de recepción de mensajes, el tiempo de reacción del conductor o el retraso en la actualización.

Para el análisis de la aplicación de *Platooning* las siguientes métricas son las que mejor describirían el funcionamiento del escenario según lo descrito en [6] y que corresponden a ambos de los tipos explicados anteriormente:

- Tasa de entrega de paquetes (PDR, *packet delivery ratio*): Es la relación entre los paquetes transmitidos y recibidos correctamente en un determinado par transmisor-receptor. Los parámetros que afectan a esta métrica son por ejemplo la densidad del tráfico o número de nodos, la potencia de transmisión, el tamaño de los paquetes, el escenario de la red, etc.

- Retardo extremo-extremo (E2E *end-to-end delay*): Es el tiempo que pasa entre la generación del paquete en la aplicación del transmisor hasta que llega a la capa de aplicación del receptor. A esta medida afectan parámetros como el tamaño del paquete, el tiempo de procesamiento, el tiempo de propagación, etc.

- Retardo en la actualización (UD, *update delay*): Esta métrica es de las que evalúa el sistema a nivel de aplicación y se define como el tiempo transcurrido entre dos mensajes consecutivos recibidos correctamente entre un determinado par transmisor-receptor.

- Mínima distancia entre vehículos: Esta es una métrica característica de la aplicación de *Platooning*, para cada repetición se evalúa la mínima distancia a la que pueden estar cada par de vehículos del *platoon*.

Además de estas métricas específicas para la aplicación de *Platooning*, a lo largo de este trabajo también se van a analizar las colisiones que se producen en los nodos y una métrica muy importante en todas las VANETs que es la tasa de ocupación del canal.

La mayoría de los estudios estiman la carga del canal a partir de la métrica CBR, *Channel Busy Ratio*, y que devuelve la ratio de ocupación del canal en la capa MAC en un intervalo de tiempo concreto.

5. Simulación de redes vehiculares

En todas las simulaciones realizadas con OMNeT++ se obtienen dos tipos de ficheros, el fichero de salida vector que puede contener información de la simulación a lo largo del tiempo y el fichero de salida escalar que contiene estadísticas como el número de paquetes transmitidos, número de paquetes recibidos, número de paquetes perdido, etc. A partir de estos ficheros, se extraen resultados con los que se pueden obtener diferentes métricas de rendimiento del sistema.

Lo primero que se ha hecho ha sido comprobar que a partir de los datos que se obtenían de estas simulaciones se podía obtener métricas que realmente indicaran el rendimiento de la red.

Para obtener el E2E Delay ha sido necesario realizar una pequeña modificación del código de forma que cuando un paquete llegara a la capa de aplicación del nodo se hiciera el siguiente cálculo:

$$e2eDelay = simulationTime - MsgCreationTime$$

Esta operación se realiza en la capa de aplicación cada vez que llega un mensaje al nodo de forma correcta.

En los siguientes apartados se va a hacer una descripción de los escenarios concretos que se han analizado y se van a presentar las gráficas y resultados obtenidos durante el trabajo.

5.1 Escenario de tráfico aleatorio en un entorno urbano

En esta sección se ha partido del ejemplo del simulador VEINS ya que se ha considerado que es un buen punto de partida para entender los resultados de las simulaciones y en general del funcionamiento de las VANETs.

En la Figura 24 se ve el entorno de movilidad que se genera con SUMO y que se encarga de generar los datos de tráfico y de la dinámica de los vehículos. En este escenario se van introduciendo los vehículos progresivamente a lo largo del tiempo, por lo que al inicio de la simulación se empieza con una comunicación entre el nodo 1 y la RSU y al final de la simulación habrá una comunicación entre todos los nodos definidos para en escenario (V2V) y también entre estos y la RSU (V2I).

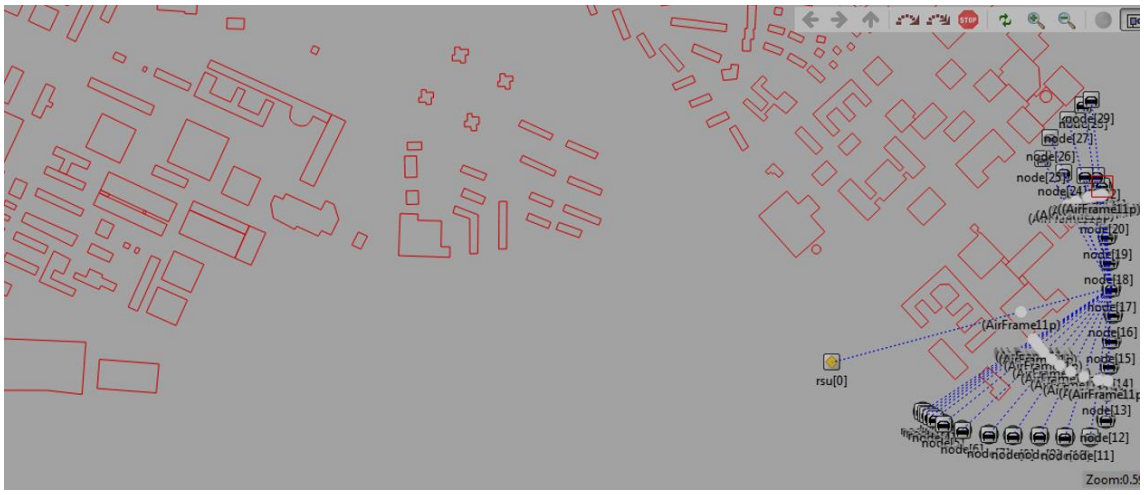

Figura 24. Escenario de tráfico del ejemplo de VEINS

A lo largo de esta sección se van a ir modificando valores de los parámetros del entorno de simulación para ver los diferentes efectos que estos producen y para así obtener diferentes escenarios a partir de una situación inicial sencilla. Las modificaciones que se han realizado han sido incrementales respecto al escenario inicial.

Escenario 1

Los parámetros que se plantean en este primer escenario están resumidos en la Tabla 2:

Parámetro	**Valor**
Densidad del tráfico	20 vehículos
Tamaño del paquete	10 B
Tasa de transmisión de paquete	10 Hz
Potencia de transmisión	20 mW
Tasa de bits	6 mbps
Sensibilidad 802.11p	-89 dBm
Tasa de transmisión RSU	1 Hz
Situación de accidente	Si
Inicio y duración del accidente	75 s / 50 s
Tiempo de simulación	~400 s

Tabla 2. Parámetros del primer escenario de simulación.

Con esta configuración se han obtenido las siguientes métricas de rendimiento y los resultados se presentan en forma de gráficas que se van a ir analizando en detalle a continuación:

- El parámetro "Tiempo de ocupación" es definido como el tiempo en el que un vehículo en particular está participando en una comunicación V2V o V2I. Si el valor de la ocupación es alto significa que el vehículo está más comprometido con la comunicación ya bien sea con otros vehículos o con las estaciones. Este "tiempo de ocupación" depende en gran medida de la cantidad de vehículos que estén participando en la comunicación.

  En este caso se compara el valor del tiempo que un nodo está ocupado con el tiempo que el nodo ha participado en la simulación, esto se puede ver en la gráfica de la Figura 25 y se puede observar que los valores son parecidos entre todos los nodos pero que los valores obtenidos de los nodos que entran a formar parte de la comunicación más tarde, son ligeramente inferiores.

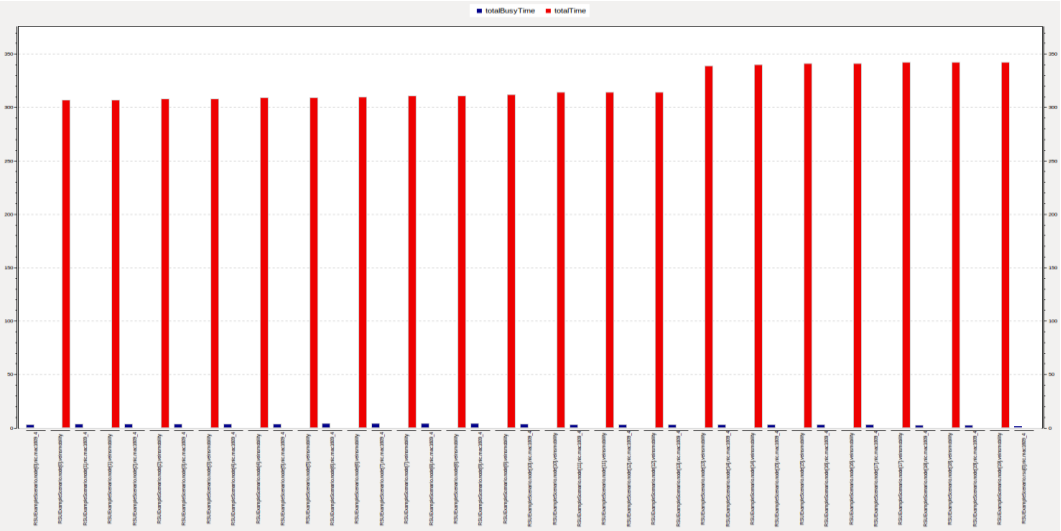

Figura 25. Escenario 1: Tiempo de ocupación respecto al tiempo de simulación.

- Otra gráfica que también puede ayudar a comprender mejor si el funcionamiento del escenario está siendo correcto es el número de colisiones que se producen en la capa física. En este escenario de baja densidad de tráfico, tamaño de paquetes pequeño y potencia de transmisión baja el resultado es el mostrado en la Figura 26:

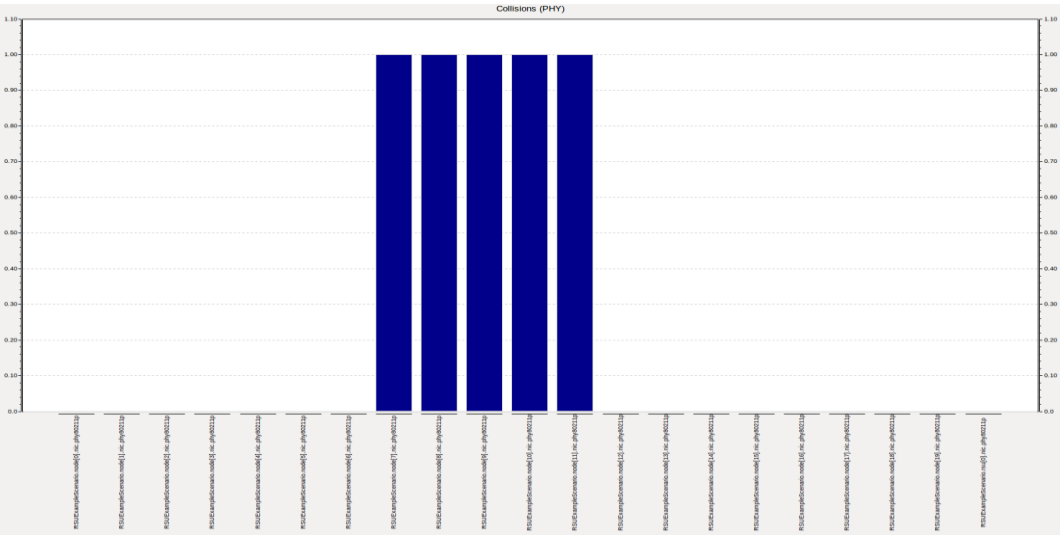

Figura 26. Escenario 1: Colisiones que se producen en la capa física para todos los nodos.

- Para hacer una comparación de los paquetes que se pierden, que puede ocurrir por diversas causas como puede ser la colisión o por error al recibir cuando se estaba enviando, con los *beacons* totales recibidos, en la Figura 27 se muestran los *beacons broadcast* recibidos (en esta aplicación solo se reciben paquetes *broadcasts*) y los que no llegan a recibirse correctamente. Esta figura se obtiene con los datos de la capa MAC de la pila de protocolos de cada nodo y se puede ver que los *beacons* perdidos en los nodos corresponden con los que han sufrido colisión en la gráfica anterior.

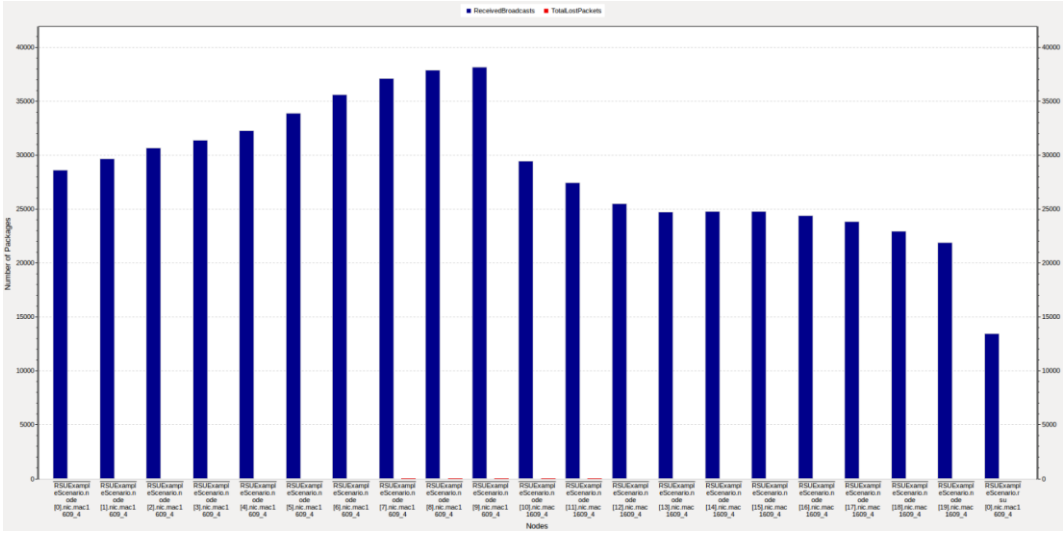

Figura 27. Escenario 1: *Broadcasts* recibidos y paquetes perdidos.

- Por último, se va a mostrar el tiempo medio de retardo de un paquete, el *E2E Delay* a lo largo de todo el tiempo de simulación. Cada una de las líneas mostradas en la Figura 28 corresponde con cada uno de los nodos que participan en la comunicación y se puede ver claramente una tendencia de este valor a subir cuando se produce el accidente ya que obtiene su valor máximo alrededor del segundo 90 con un máximo 0.013s, cuando el accidente ya se ha producido y los vehículos tendrán que avisar del incidente para que se tomen las medidas pertinentes.

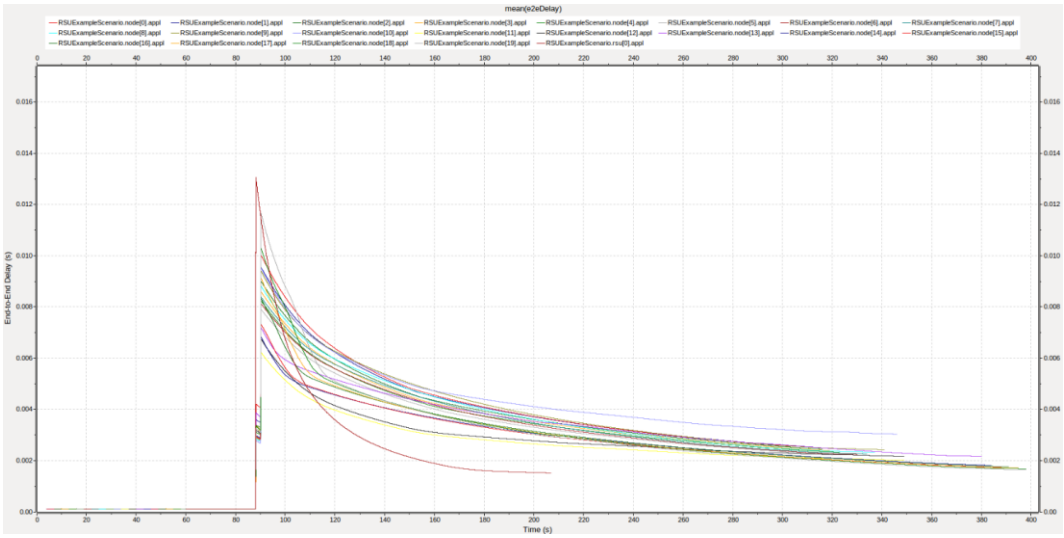

Figura 28. Escenario 1: *E2E Delay* promedio a lo largo del tiempo de simulación.

Escenario 2

A continuación, se muestran las modificaciones respecto a la tabla de parámetros del escenario anterior en la Tabla 3 y los datos obtenidos del escenario 2, dónde lo más significativo es el aumento en la densidad del tráfico.

Parámetro	**Valor**
Densidad del tráfico	74 vehículos
Tiempo de simulación	~155s

Tabla 3. Modificaciones en los valores para obtener el escenario 2.

- En la siguiente gráfica de la Figura 29 se puede ver que el tiempo que están ocupados los nodos respecto al tiempo de simulación ha aumentado considerablemente al aumentar la densidad del tráfico. El tiempo de simulación es muy diferente para cada vehículo y más adelante se verá un resumen de los resultados para ver si realmente este tiempo es mayor en proporción con el tiempo de simulación total.

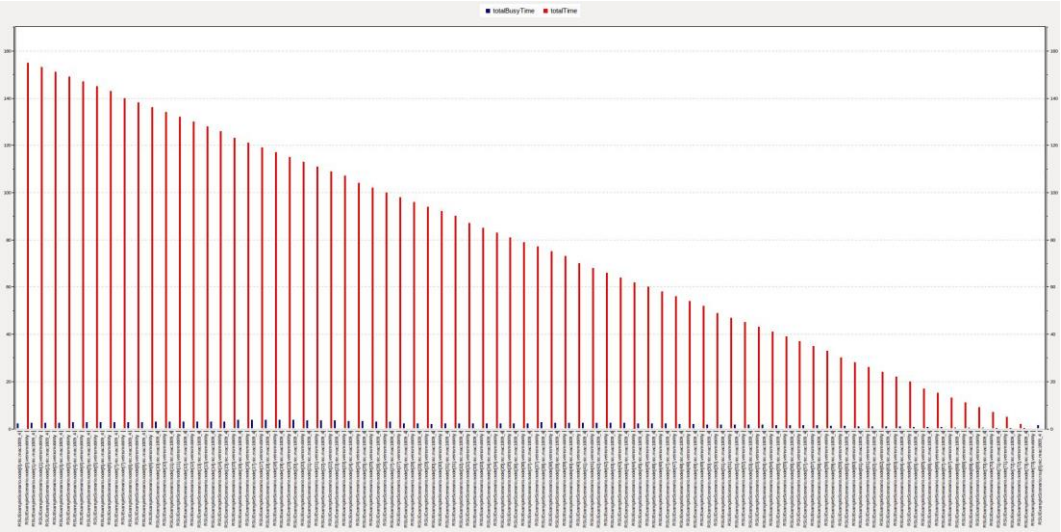

Figura 29. Escenario 2: Tiempo de ocupación respecto al tiempo total de simulación.

- Al igual que en caso anterior, se muestra ahora el número de colisiones que se producen para cada vehículo, se ve en la gráfica de la Figura 30 que ahora todos los nodos han sufrido colisiones durante la simulación.

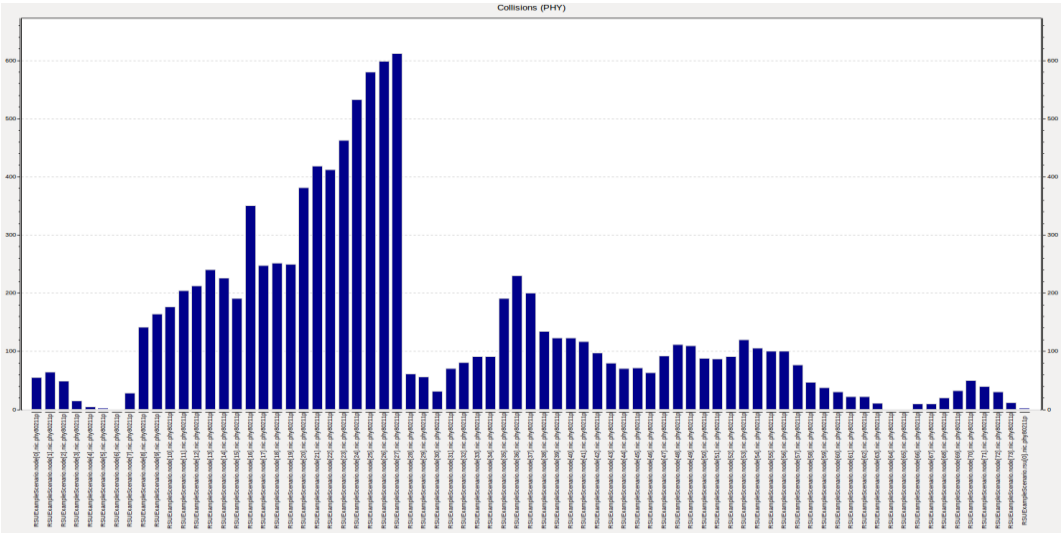

Figura 30. Escenario 2: Colisiones que se producen en la capa física de cada nodo.

- La comparación del número de paquetes totales recibidos con los paquetes perdidos se puede ver en la siguiente gráfica de la Figura 31,y acorde con la figura anterior, los paquetes perdidos corresponden prácticamente en su totalidad con los paquetes que sufren colisión en la capa física, por lo que se ve que la mayoría de las ocasiones estas pérdidas se producen por una colisión en el medio.

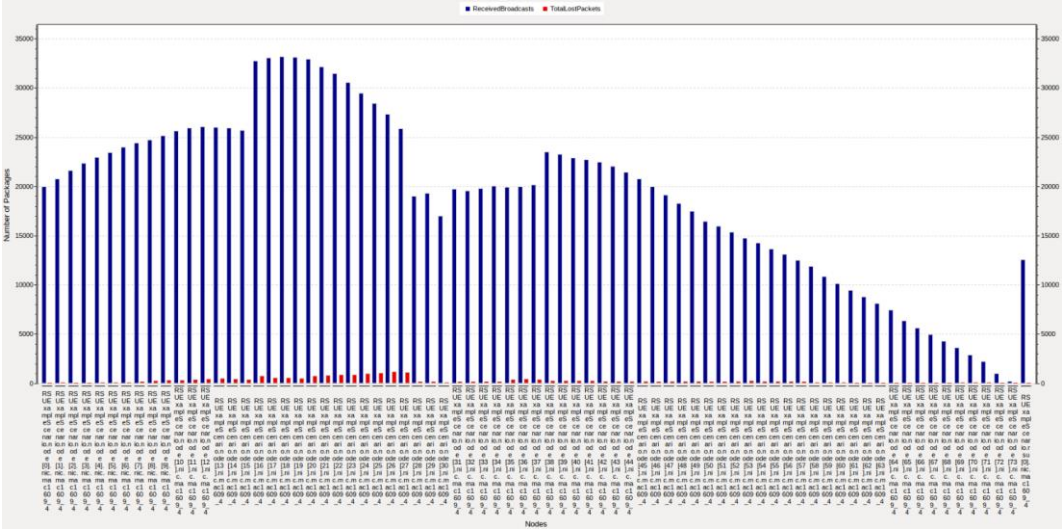

Figura 31. Escenario 2: Broadcasts recibidos y paquetes perdidos

- Por último, en la Figura 32 se muestra el tiempo el retardo medio de los paquetes que sigue una gráfica muy parecida a la del escenario 1 pero tomando valores mayores, en este caso el máximo valor también se produce alrededor del segundo 90 y llega hasta valores de 1.5s.

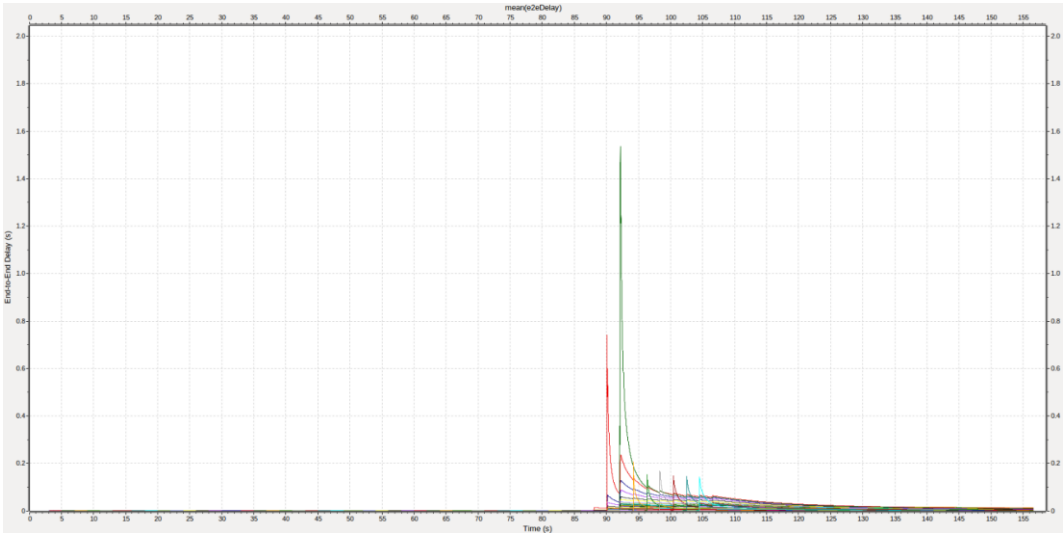

Figura 32. Escenario 2: *E2E Delay* promedio a lo largo del tiempo de simulación.

Escenario 3

Para obtener el escenario 3, el valor que se ha modificado es el tamaño de mensajes que se intercambian entre los nodos. De esta forma, se quiere demostrar que este parámetro también es importante a la hora de evaluar el rendimiento de un escenario en concreto. Las modificaciones se muestran en la Tabla 4.

Parámetro	**Valor**
Densidad del tráfico	85 vehículos
Tamaño del paquete	210 B (10 B cabecera)
Tiempo de simulación	~180s

Tabla 4. Modificaciones en los valores para obtener el escenario 3.

En la presentación de los resultados, se sigue el mismo orden que en los casos anteriores por lo que se muestran las diferentes métricas de rendimiento a continuación.

- El tiempo de ocupación se incrementa considerablemente ya que al aumentar el tamaño del paquete se necesita reservar más tiempo para la transmisión de estos, y por lo tanto el medio estará ocupado durante más tiempo. En la Figura 33 se ve que, para un tiempo de simulación muy similar al escenario anterior, el tiempo que los nodos están ocupados enviando es mucho mayor.

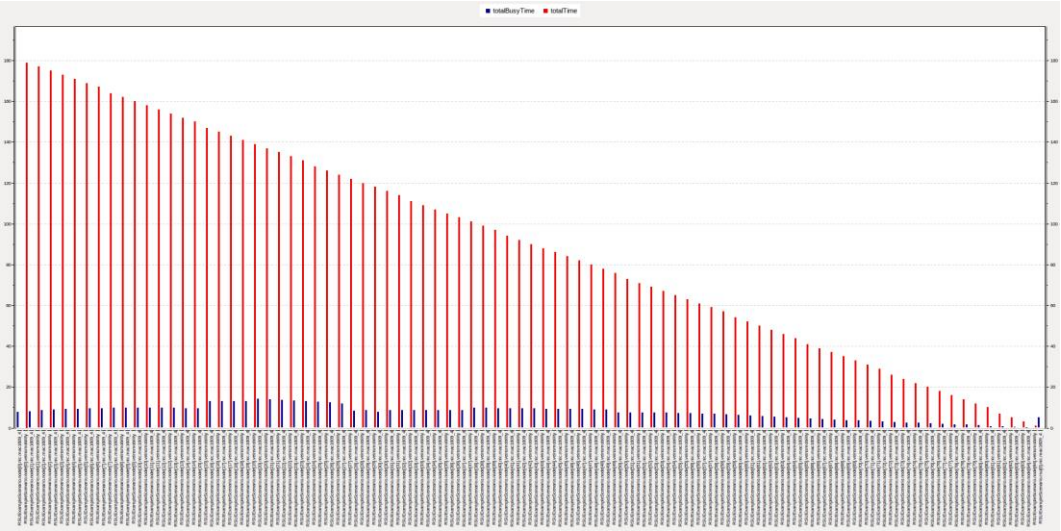

Figura 33. Escenario 3: Tiempo de ocupación respecto al tiempo total de simulación.

- Las colisiones que se producen en este escenario son mucho mayores que en el caso anterior, bien es cierto que la comparación no es del todo correcta ya que el tiempo de simulación es mayor para este escenario y como es lógico, en un escenario congestionado, a mayor tiempo de simulación mayor número de colisiones se producen, se pueden ver los datos representados en la gráfica de la Figura 34.

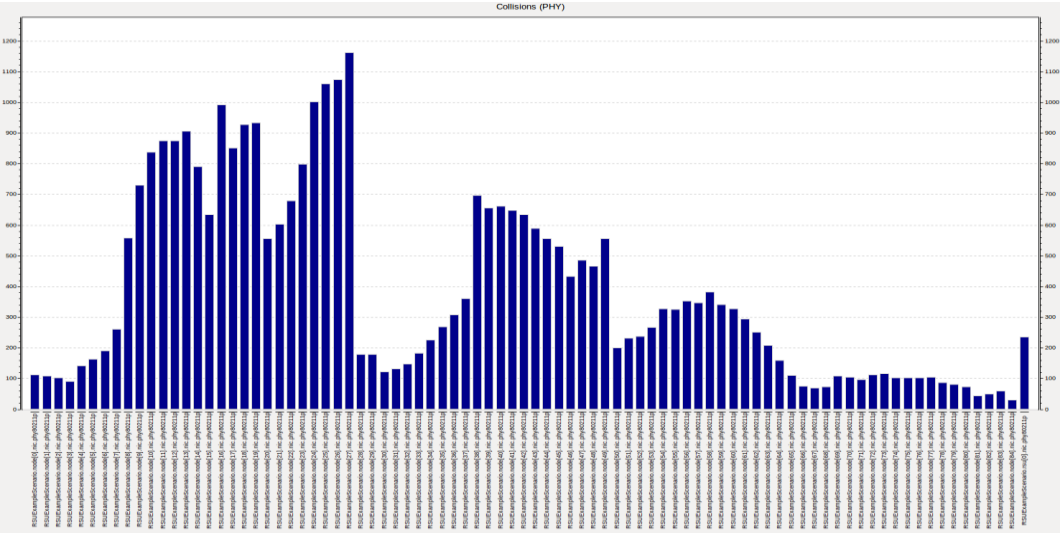

Figura 34. Escenario 3: Colisiones que se producen en la capa física.

- Relacionado con las colisiones, se muestra en la Figura 36 el número de paquetes perdidos con el número de paquetes broadcasts recibidos correctamente. De nuevo en esta ocasión se puede ver que el número de paquetes perdidos vuelve a aumentar.

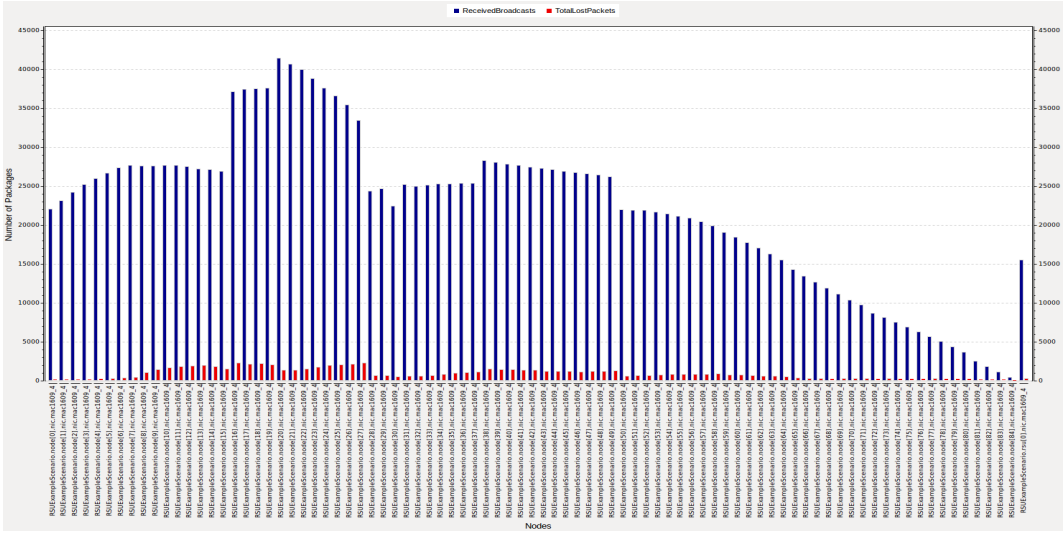

Figura 36. Escenario 3: *Broadcasts* recibidos y paquetes perdidos.

- En cuanto al *E2E Delay* no se puede decir que cambie significativamente entre estos dos últimos escenarios, la gráfica que se muestra en la Figura 35 muestra un comportamiento similar al escenario anterior y también toma el máximo de su valor de aproximadamente 1.3 s en el segundo 90 de simulación.

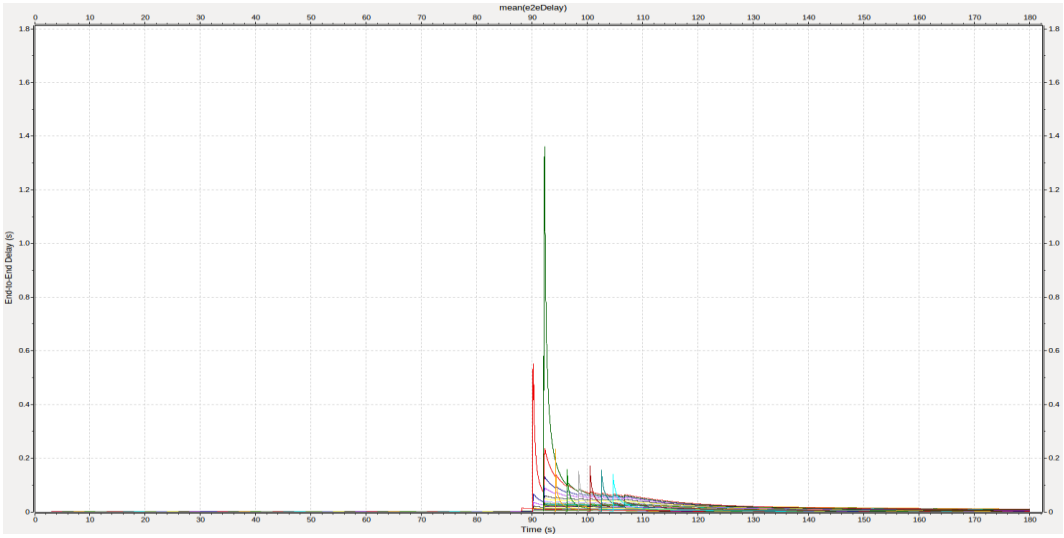

Figura 35. Escenario 3: *E2E Delay* promedio a lo largo del tiempo de simulación.

Escenario 4

En el escenario 4 se ha hecho un cambio que es clave para entender el diseño de los mecanismos de *Beaconing* adaptativos, la potencia de transmisión. En este caso se ha aumentado el valor de la potencia para ver los efectos que produce el cambio en el escenario que se ha ido construyendo. Como ya se ha mencionado, muchos de los mecanismos de *Beaconing* adaptativos utilizan este parámetro para modificar el rendimiento de las aplicaciones. La modificación se muestra en la Tabla 5.

Parámetro	Valor
Densidad del tráfico	84 vehículos
Potencia de transmisión	100 mW
Tiempo de simulación	~180s

Tabla 5. Modificaciones en los valores para obtener el escenario 4.

Los resultados de estas simulaciones se presentan a continuación:

- El tiempo de ocupación que se puede observar en la gráfica de la Figura 37, no demuestra una gran diferencia con el caso anterior de menor potencia de transmisión. Por lo que se puede decir que, para este aumento de potencia, la ocupación del canal no sufre grandes variaciones.

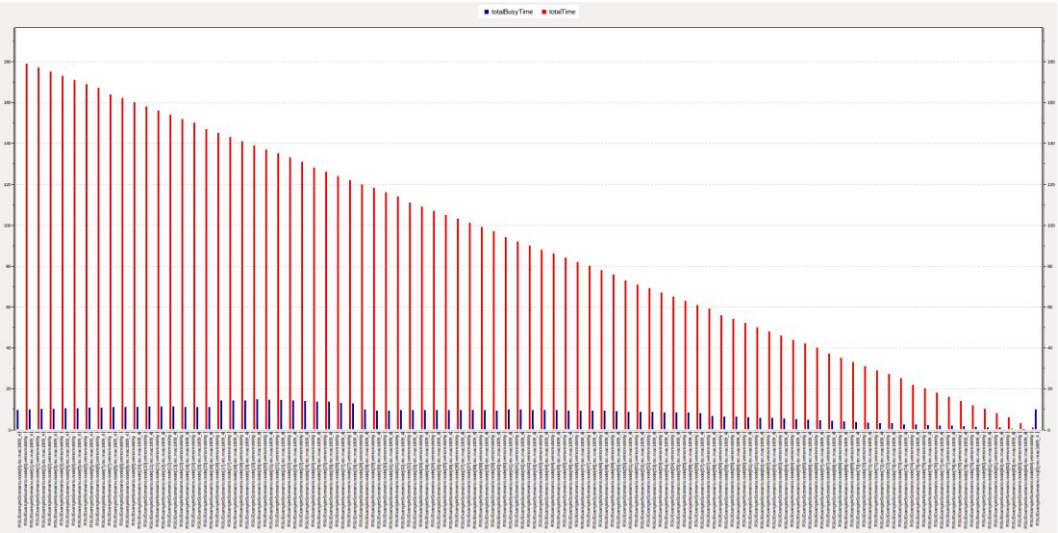

Figura 37. Escenario 4: Tiempo de ocupación respecto al tiempo total de simulación.

- Si se compara con el caso anterior, se puede ver que el número de colisiones es en general menor para todos los nodos. Los resultados se pueden ver en la gráfica de la Figura 38.

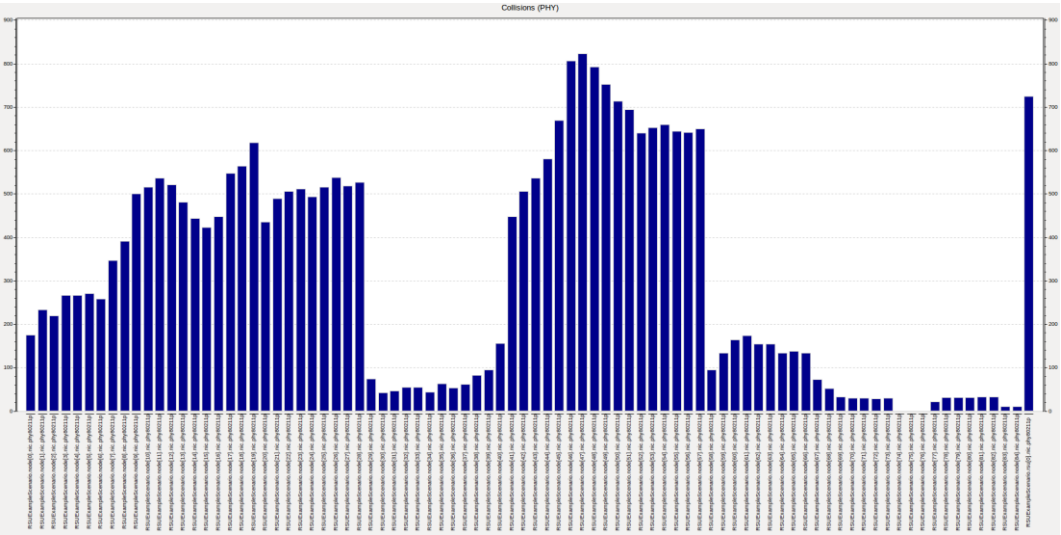

Figura 38. Escenario 4: Colisiones que se producen en la capa física.

- El número de paquetes perdidos es, por lo tanto, menor que en caso anterior también, ya que las colisiones que se producen son menores. Se demuestra así que aumentando la potencia de transmisión es posible aumentar el rendimiento de la red. Podemos ver estos resultados en la Figura 39.

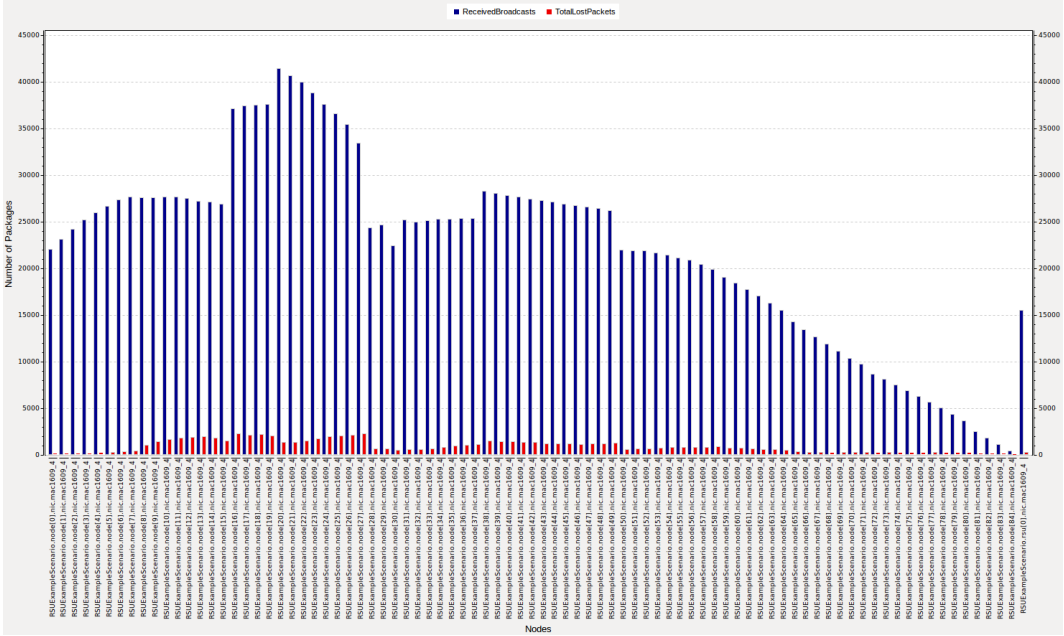

Figura 39. Escenario 4: *Broadcasts* recibidos y paquetes perdidos.

- El *E2E Delay* sí difiere del caso anterior ya que como se puede ver en la Figura 40, hay más nodos que tienen picos de retardos altos que en los anteriores escenarios. Se puede ver que alrededor del segundo 90 y alrededor del segundo 115 hay varios nodos que reciben paquetes con un retardo promedio de más de 1 segundo, superando incluso el valor de 1.6 segundos.

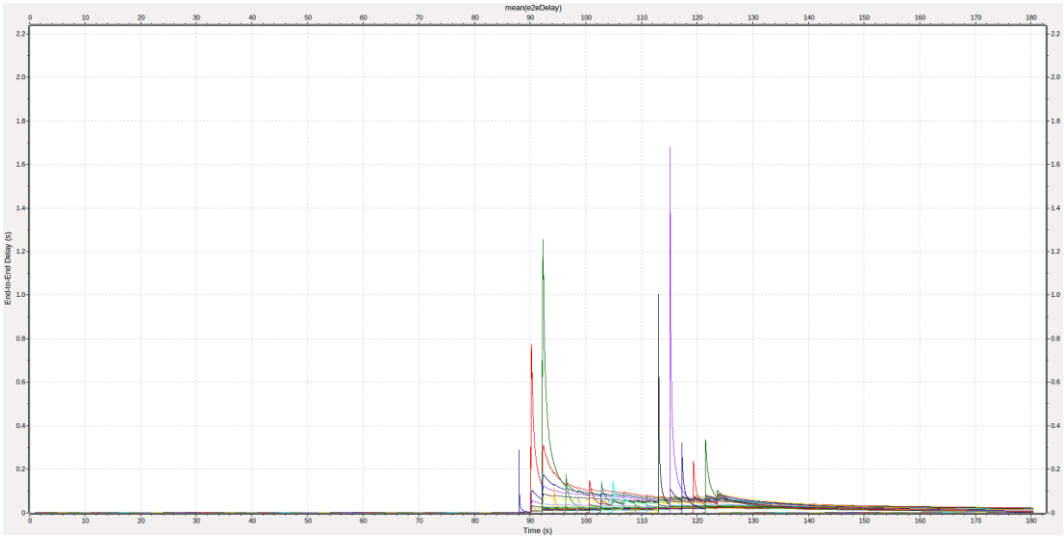

Figura 40. Escenario 4: *E2E Delay* promedio a lo largo del tiempo de simulación.

Para resumir los resultados obtenidos de las simulaciones anteriores, se han calculado dos métricas que servirán para entender los efectos de los parámetros de comunicación en los entornos V2X.

La primera es el tanto por ciento de los paquetes perdidos respecto al número total de paquetes recibidos en cada nodo. Se consideran el número total de paquetes recibidos como los paquetes *broadcast* recibidos correctamente en la capa MAC más los recibidos incorrectamente ya sea por colisión o por error al recibir cuando se estaba enviando.

La segunda métrica es el promedio de todos los nodos del tiempo de ocupación, es decir cuántos segundos la capa MAC considera que el canal está ocupado, entre el tiempo total que ese nodo ha estado en la simulación. Dicho de otra forma, la fracción de tiempo que la capa MAC no podría enviar un mensaje.

Podemos ver los datos en la Tabla 6 y hay que destacar que para realizar los cálculos no se han incluido los valores del nodo RSU.

Escenario	**Promedio del total de paquetes perdidos - Total recibidos**	**Promedio de tiempo de ocupación - Tiempo total en el escenario**
Escenario 1	0,00132 %	1,06233%
Escenario 2	1,52974 %	3,13429%
Escenario 3	3,77302%	9,81429%
Escenario 4	2,67549 %	10,61627%

Tabla 6. Resumen de las métricas obtenidas.

Además de este entorno de tráfico en el que existen accidentes, se realizó una primera simulación en la que no ocurría ningún accidente viendo así que el número de paquetes perdidos era cero para una situación ideal.

Tras realizar esta serie de simulaciones se ha comprendido que en situaciones de baja densidad de tráfico los mecanismos de *Beaconing* estáticos funcionan correctamente y para esta aplicación de ejemplo serían suficiente. El problema está en situaciones de alta densidad de tráfico, ya que cuando las condiciones no son ideales, el canal no es capaz de mantener la calidad en las comunicaciones V2X y es cuando aparece la necesidad de los mecanismos de *Beaconing* adaptativos. Por ejemplo, en el escenario 4, en situaciones donde el medio no está congestionado, el nivel de potencia mejora el rendimiento ya que se puede ver que el tanto por ciento de paquetes perdidos es menor, pero, cuando el medio se ve congestionado debido a los *beacons* que se envían relativos a un evento, por ejemplo, un accidente, se podría utilizar un mecanismo adaptativo TPC, en el que se redujera la potencia y así asegurar que estos *beacons* fueran transmitidos correctamente.

En la siguiente sección se va a aplicar la misma metodología que en esta de modificación de diversos parámetros para realizar las simulaciones en torno a la aplicación de *Platooning*.

5.2 Escenario de tráfico para *Platooning* en una autopista

Este escenario de simulación de tráfico está adecuado a la aplicación de *Platooning*. Consiste en una autopista con tres carriles para cada sentido y uno de los cuales está destinado específicamente para los *platoons*.

Las simulaciones se han realizado en torno a diferentes parámetros que afectan al rendimiento del sistema con el objetivo de analizarlas y obtener conclusiones. Básicamente lo que se ha realizado son diferentes escenarios con y sin tráfico adicional al *platoon*, con diferentes densidades de tráfico y frecuencias de envío de mensajes.

Hay que destacar que estas simulaciones se han llevado a cabo con el simulador PLEXE, como se ha descrito en la sección 4.1 de este trabajo.

En la Figura 41. Simulación con SUMO de un *platoon* en una autopista. aparece una captura de la simulación de un *platoon* con el simulador de tráfico SUMO. Este escenario va a ser el punto de partida para la realización de las diferentes simulaciones.

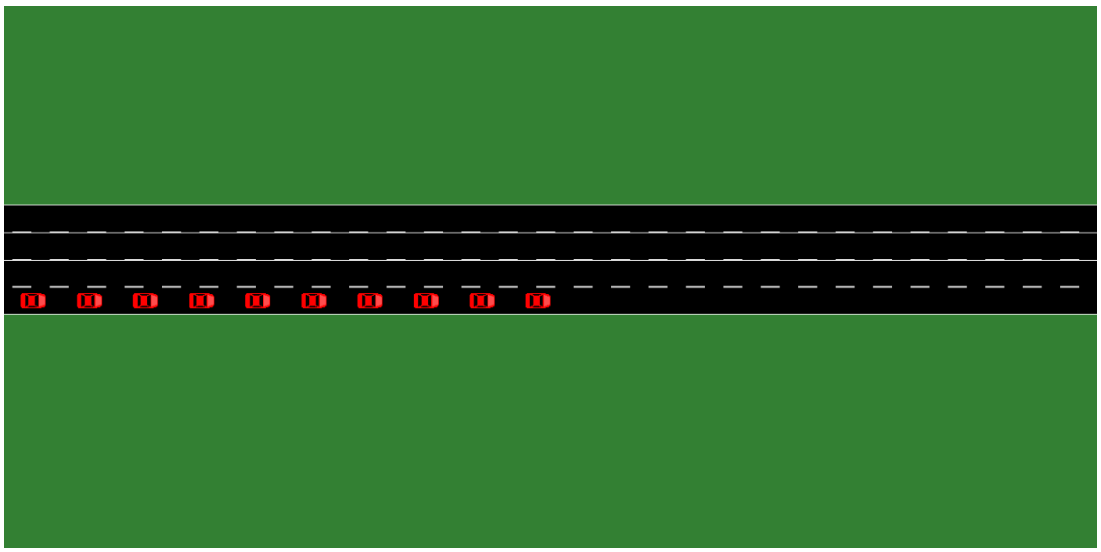

Figura 41. Simulación con SUMO de un *platoon* en una autopista.

Escenario 1

El protocolo de *Beaconing* que se utiliza es un protocolo periódico clásico que envía los *beacons* cada cierto intervalo configurable por el usuario.

También hay que destacar la dinámica que sigue el PT, este acelera y decelera siguiendo una forma sinusoidal y que también permite mostrar algunas propiedades del CACC que se utiliza en PLEXE.

Como este no es el objetivo del estudio, todas las simulaciones se van a realizar utilizando un CACC básico sin tener en cuenta las otras opciones que PLEXE ofrece.

El escenario de simulación está basado en los parámetros de tráfico y transmisión que se ven en la Tabla 7.

Parámetro	**Valor**
Densidad del tráfico	10 vehículos
Tamaño del paquete	400 B
Tasa de transmisión de paquete	40 Hz
Potencia de transmisión	100 mW
Tasa de bits	6 mbps
Sensibilidad 802.11p	-94 dBm
Tamaño del platoon	10 vehículos
Distancia entre vehículos del platoon	5 m
Velocidad media del platoon	100 kmh
Tiempo de simulación	~500 s

Tabla 7. Parámetros de simulación del escenario 1.

Las métricas de simulación que se han analizado son similares a las del caso anterior:

- Primero se evalúa la tasa de ocupación del canal para cada nodo que participa en la simulación. Se puede ver una gráfica con los resultados en la Figura 42. Se puede destacar que para todos los nodos la ocupación del canal es la misma.

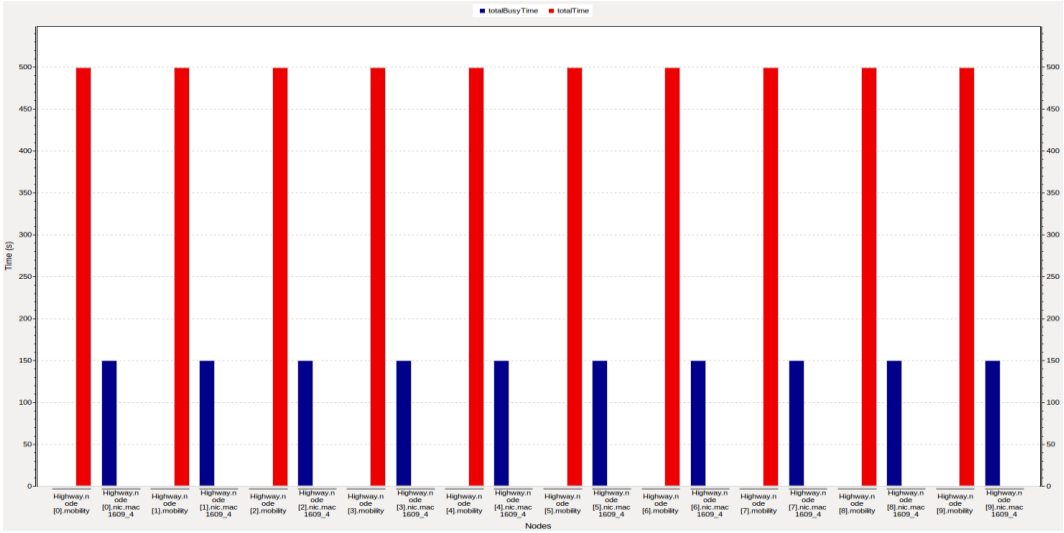

Figura 42. Escenario 1: Tiempo de ocupación respecto al tiempo total de simulación.

- Lo siguiente a analizar es los paquetes perdidos y los paquetes recibidos correctamente. En la Figura 43 se pueden ver estos valores para cada uno de los miembros del *platoon*.

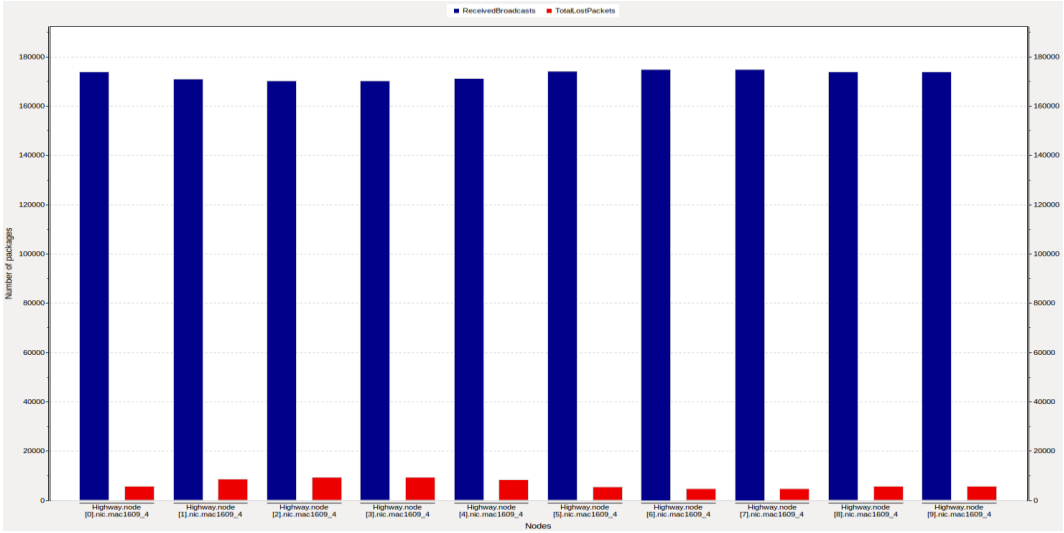

Figura 43. Escenario 1: *Broadcasts* recibidos y paquetes perdidos.

- Otra métrica de la que ya se ha hablado en las secciones anteriores es el *E2E Delay*, se pueden ver los resultados de este escenario en la Figura 45 en forma de gráfica a lo largo del tiempo.

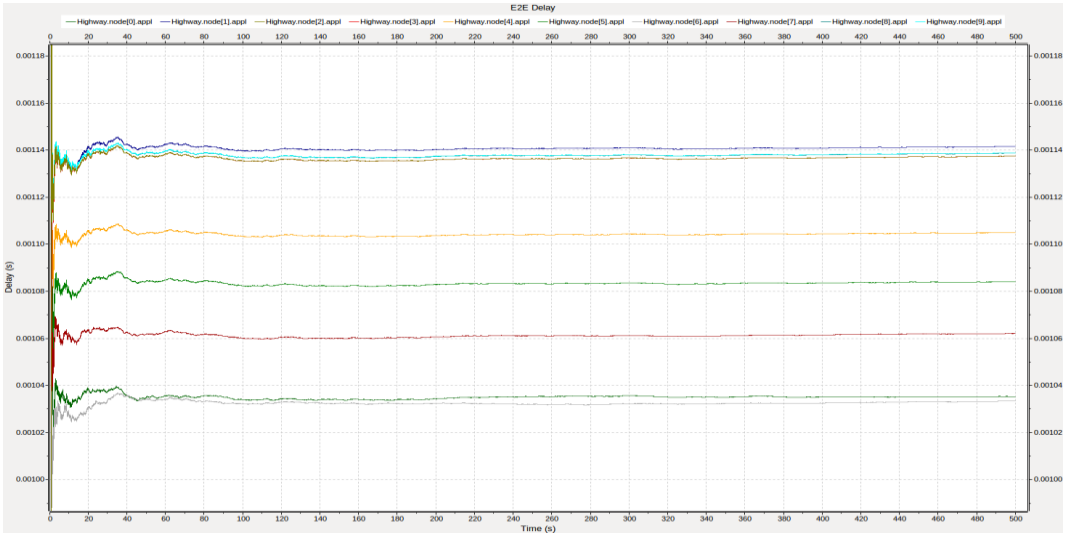

Figura 45. Escenario 1: *E2E Delay* a lo largo del tiempo.

- Distancia entre vehículos: esta métrica es una de las mencionadas como importantes cuando se habla de la aplicación de *Platooning*, ya que para que la aplicación pueda cumplir su función de reducir el combustible utilizado y mejorar la eficiencia del tráfico es necesario que la distancia entre vehículos se mantenga y sea suficientemente pequeña. La distancia que se desea mantener entre todos los vehículos es de 5 m, vemos que todos los vehículos del platoon se mantienen muy cerca de este valor para un escenario ideal, aunque se puede destacar que el primer miembro que solo tiene datos del PT tiene una media de 4,9702 m mientras que el resto tienen una media aproximadamente de 4,99 m. Podemos ver los resultados en la Figura 44.

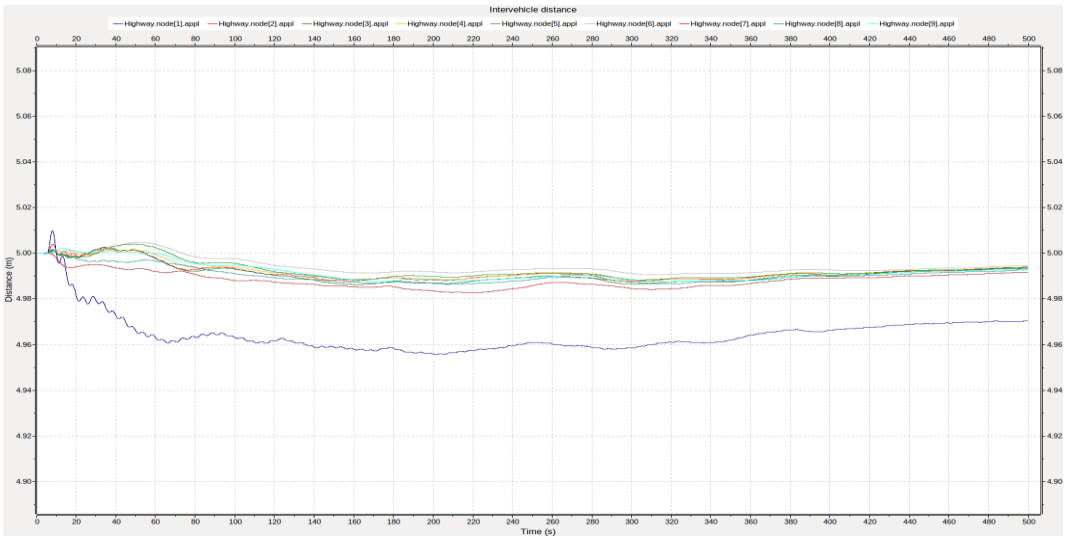

Figura 44. Distancia entre los vehículos del platoon.

Escenario 2

En este escenario se va a modificar la frecuencia de transmisión de los *beacons* para ver cómo afectaría al rendimiento de la aplicación. A partir del Escenario 1 se realiza la siguiente modificación que aparece en la Tabla 8:

Parámetro	**Valor**
Tasa de transmisión de paquete	10 Hz

Tabla 8. Modificación respecto a los parámetros del escenario 1.

- Tasa de ocupación respecto al tiempo total de simulación. Al reducir la frecuencia de mensajes se puede observar que el tiempo de ocupación del canal para el mismo tiempo de simulación se reduce considerablemente. La Figura 46 muestra los resultados obtenidos en una gráfica.

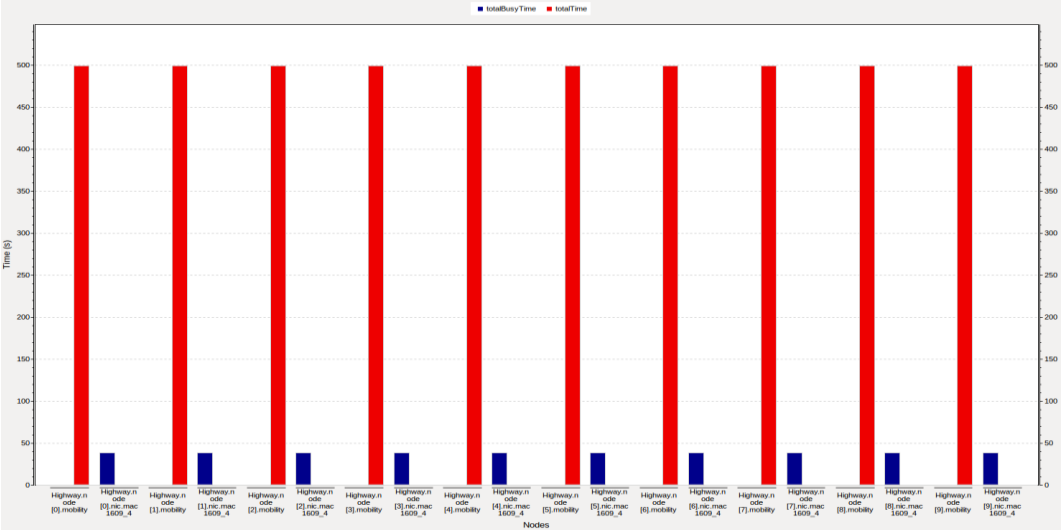

Figura 46. Escenario 2: Tiempo de ocupación respecto al tiempo total de simulación.

- La gráfica de los paquetes perdidos no es necesario obtenerla porque este valor es cero para todos los nodos. Con la reducción de la frecuencia de envío de mensajes se ha conseguido que no se pierda ningún *beacon*.
- En cuanto al *E2E delay* se puede ver la gráfica de los resultados en Figura 47, en ella se ve que este valor también se ha reducido en gran medida para todos los nodos, especialmente para el nodo 0, que tiene valores alrededor de 0.00078 s.

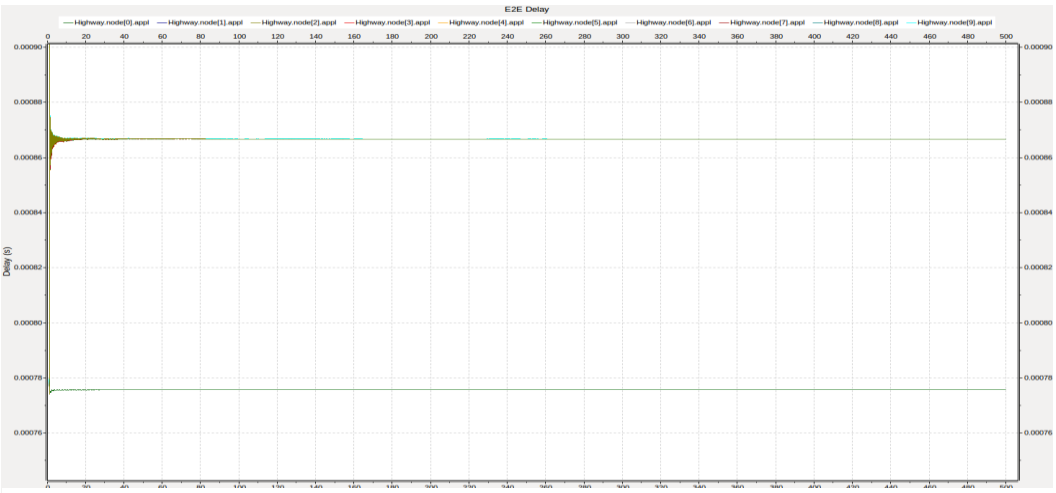

Figura 47. Escenario 2: *E2E Delay* promedio a lo largo del tiempo.

- La distancia entre vehículos del *platoon* se puede ver en la Figura 48. Hay que destacar que el tiempo que se tarda en estabilizar los valores es mayor que en el caso anterior, pero se puede ver que según va pasando el tiempo los valores que se van obteniendo son mucho más estables y no hay ningún vehículo que se aleje del valor de 5 metros más de una milésima de metro.

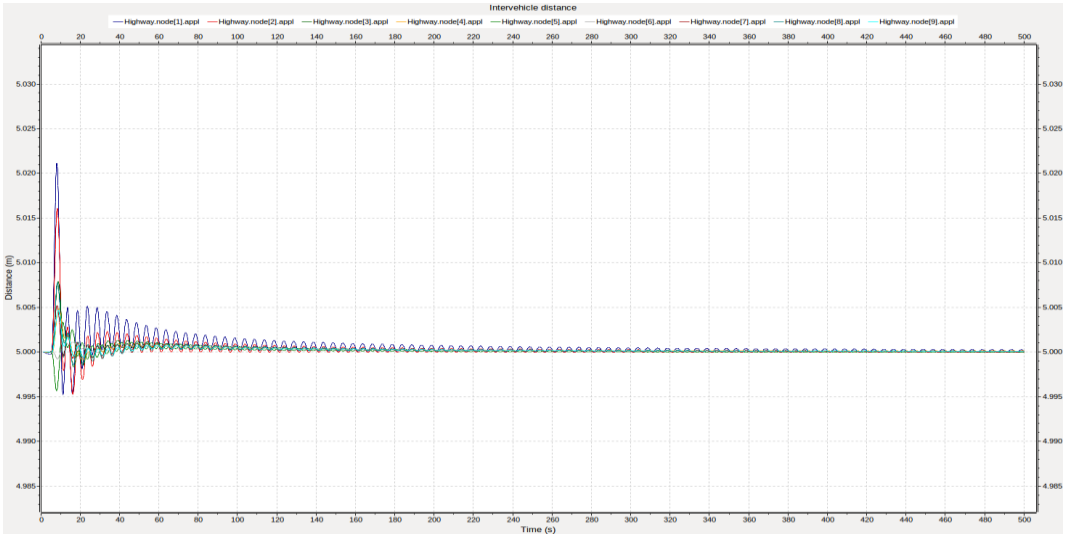

Figura 48. Escenario 2: Distancia entre vehículos del *platoon.*

Escenario 3

En este escenario se va a realizar una simulación en la que el PT realiza una maniobra de frenado de emergencia. Los parámetros de simulación se mantienen respecto al escenario anterior, pero es necesario cambiar el modelado de la dinámica del primer vehículo del *Platoon,* ya que, en vez de realizar aceleraciones y deceleraciones de forma sinusoidal, va a realizar un frenado brusco y se espera que el resto de los vehículos sean capaces de frenar también sin colisionar con el vehículo que esté inmediatamente delante.

Este cambio es una de las opciones que ofrece PLEXE en la configuración de su escenario de tráfico por lo que no hay más que seleccionar esta opción en la ejecución de la simulación.

Se muestran los resultados obtenidos en las gráficas de las figuras siguientes.

En la Figura 50 se observa que la gráfica obtenida es prácticamente igual que en el escenario anterior.

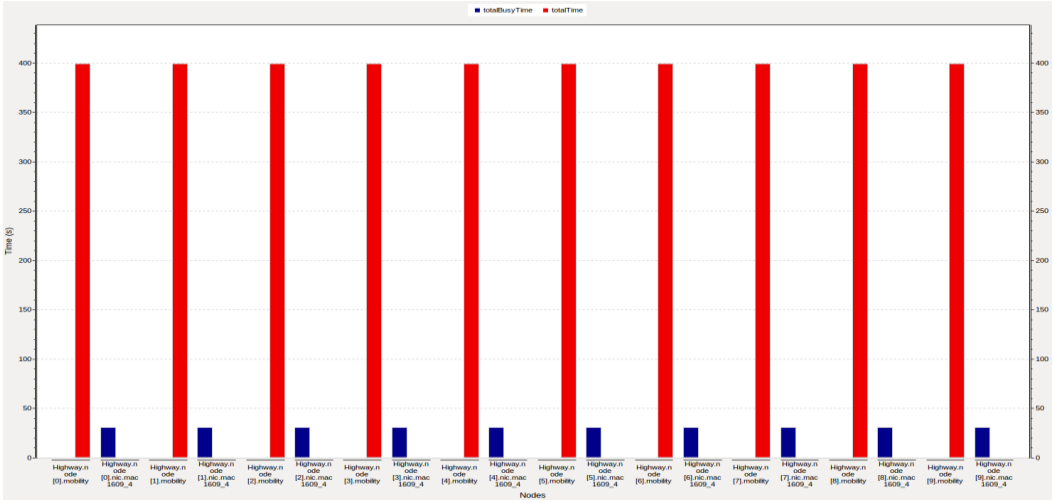

Figura 50. Escenario 3: Tiempo de ocupación respecto al tiempo total de simulación.

- El promedio del *E2E Delay* se puede ver en la Figura 49 y se observa que al igual que ocurría con el tiempo de ocupación, los valores obtenidos en esta gráfica son prácticamente iguales a los obtenidos en el Escenario 3Escenario 2.

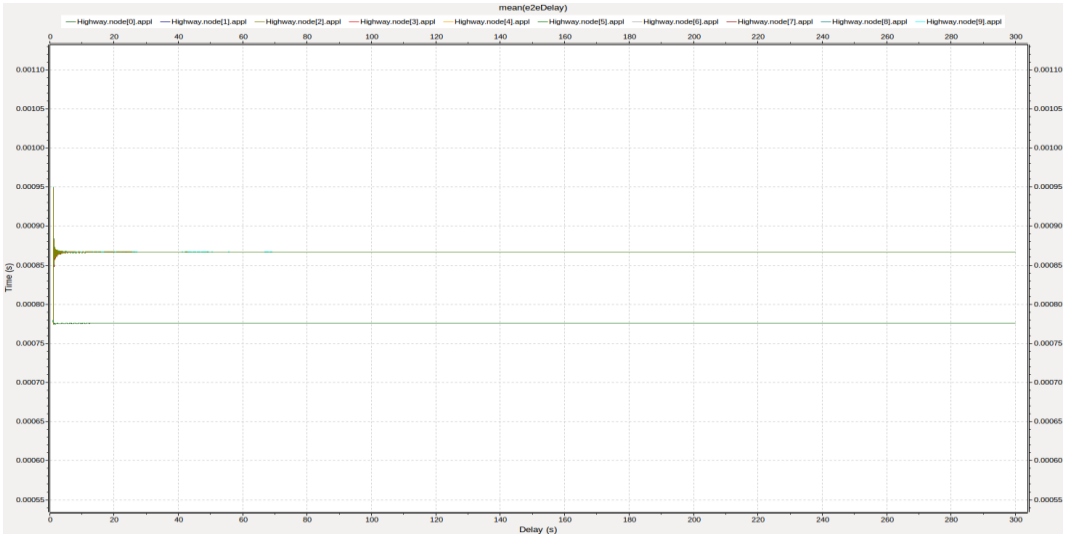

Figura 49. Escenario 3: *E2E Delay* a lo largo del tiempo de simulación.

- La distancia entre vehículos es un parámetro que lógicamente ha sufrido variaciones en esta simulación, pero, aunque la distancia entre los vehículos comienza a reducirse en el momento de frenado (segundo 250), los vehículos son capaces de frenar sin sufrir ninguna colisión entre ellos. se puede observar que cuando se produce la situación de frenado la distancia se reduce hasta valores de aproximadamente 4.7m. Podemos ver la gráfica de la distancia a lo largo del tiempo en la Figura 51.

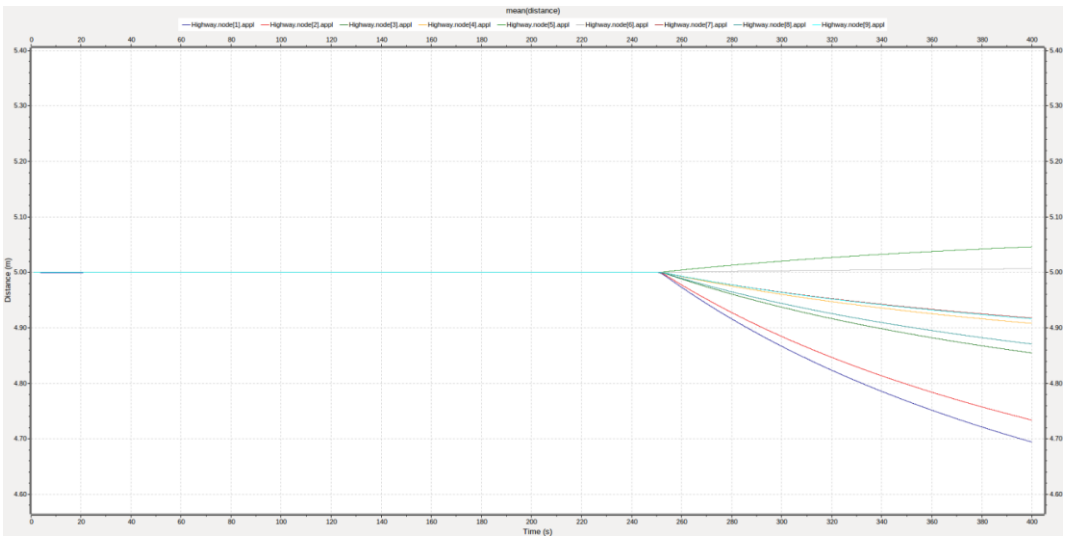

Figura 51. Escenario 3: Distancia entre vehículos del *platoon*.

Con los resultados obtenidos se puede ver que el comportamiento de la red es muy similar al caso anterior, no existen pérdidas de paquetes y la congestión del canal se mantiene en niveles bajos.

Para resumir los escenarios descritos, se han realizado los mismos cálculos y se han obtenido las mismas métricas que para la sección 5.1 y se han agrupado en la Tabla 9.

Escenario	**Promedio del total de paquetes perdidos -Total recibidos**	**Promedio de tiempo de ocupación - Tiempo total en el escenario**
Escenario 1	3,93832%	30,00%
Escenario 2	0 %	7,67931%
Escenario 3	0 %	7,6789%

Tabla 9. Resumen de las métricas obtenidas.

Vistos estos resultados, se concluye que, en un escenario ideal, reduciendo la frecuencia de envío de mensajes, mejora el rendimiento del sistema ya que la distancia entre los vehículos del platoon se mantiene muy cercana a 5 m, igual que en el caso anterior pero la congestión de la red y el número de paquetes perdidos es mucho menor.

Para los siguientes escenarios se ha realizado una modificación del entorno importante ya que se ha introducido tráfico adicional al *platoon*, de forma que se obtiene un escenario mucho más realista. En la Figura 52. Simulación del entorno con SUMO. se puede ver el escenario de tráfico que va a simular.

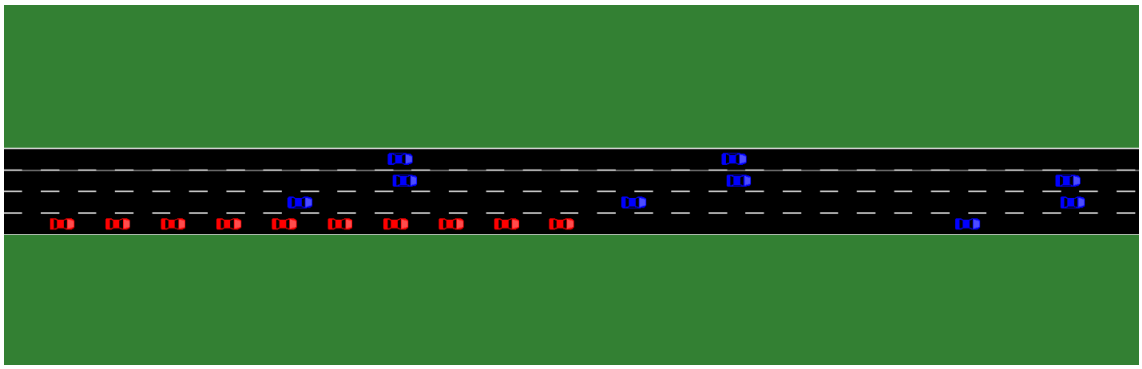

Figura 52. Simulación del entorno con SUMO.

Escenario 4

En este escenario se realiza la simulación con los parámetros que están definidos en la Tabla 10.

Parámetro	**Valor**
Densidad del tráfico	58 vehículos
Tamaño del platoon	10 vehículos
Tamaño del paquete platoon	400 B
Tamaño paquete vehículo adicional	200 B
Tasa de transmisión de paquete *platoon*	10 Hz
Tasa de transmisión de paquete veh. Adicional	10 Hz
Potencia de transmisión vehículo *platoon*	100 mW
Potencia de transmisión vehículo adicional	100 mW
Tasa de bits para platoon *beacons*	6 Mbps
Tasa de bits para *beacon* interferencia	3 Mbps
Sensibilidad 802.11p	-94 dBm

Distancia entre vehículos del *platoon*	5 m
Velocidad media del *platoon*	100 kmh
Tiempo de simulación	~500 s

Tabla 10. Parámetros de la simulación del escenario 4.

- En la Figura 53 se presenta una gráfica en la que se ve que el tiempo de ocupación es muy superior en comparación con los escenarios analizados anteriormente. Solo se ha hecho la representación de los nodos pertenecientes al *platoon*, ya que es la aplicación que se está estudiando en este caso.

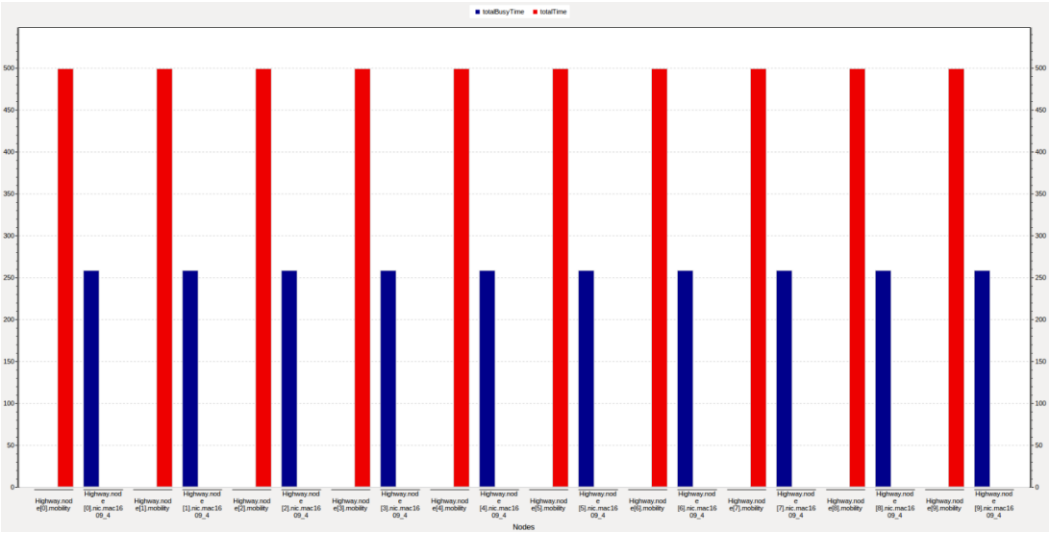

Figura 53. Escenario 4: Tiempo de ocupación respecto al tiempo total de simulación.

- El número de paquetes perdidos también es superior a los escenarios anteriores en los que no había tráfico adicional. Se puede ver en la Figura 54.

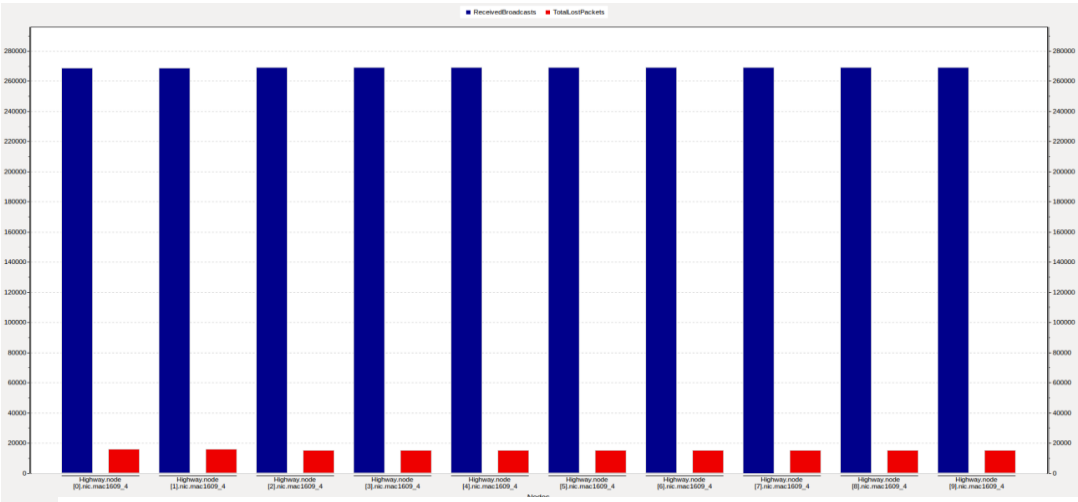

Figura 54. Escenario 4: Paquetes perdidos respecto a los *broadcasts* recibidos.

- También el valor del E2E Delay ha aumentado para esta situación. En este caso todos los nodos tienen un promedio que está alrededor de 0.0012 segundos. Muy superior a la situación ideal sin tráfico adicional. Los resultados se muestran en la gráfica de la Figura 55.

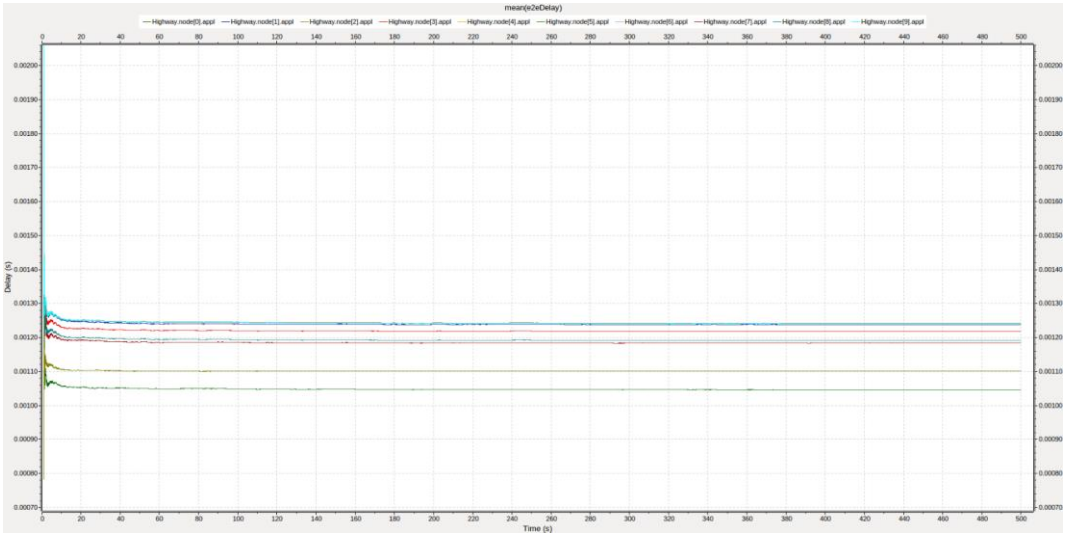

Figura 55. Escenario 4: *E2E Delay* a lo largo del tiempo de simulación.

- A pesar de que los valores obtenidos para el rendimiento de la red son peores que en los casos anteriores, en esta situación también se consigue mantener la distancia entre los vehículos muy cercana a los 5 metros que se había propuesto como objetivo. Se puede ver este comportamiento en la gráfica de la Figura 56.

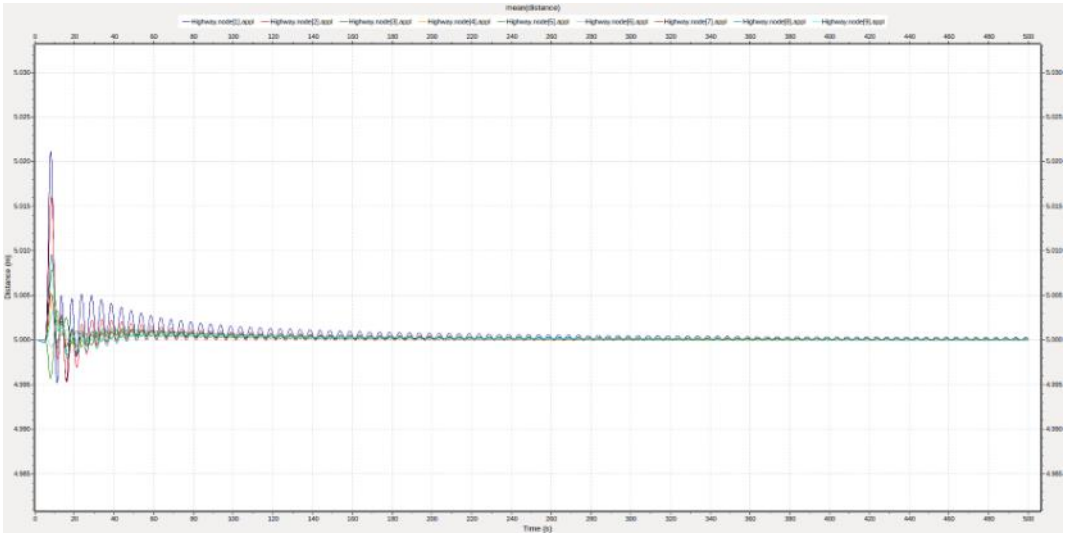

Figura 56. Distancia entre los vehículos del *platoon*.

Escenario 5

Igual que se ha hecho con la situación de tráfico sin vehículos adicionales al platoon, se va a analizar el comportamiento de la frecuencia de mensajes. Por lo tanto, en este escenario se modifica la frecuencia de transmisión de acuerdo con la Tabla 11.

Parámetro	**Valor**
Tasa de transmisión de paquete	40 Hz

Tabla 11. Modificación de parámetros para el escenario 5.

- El tiempo de ocupación es muy alto comparado con el caso anterior, como ya se ha demostrado en los anteriores escenarios, al tener una tasa de transmisión muy alta, se produce congestión del canal. Se muestra en la Figura 57.

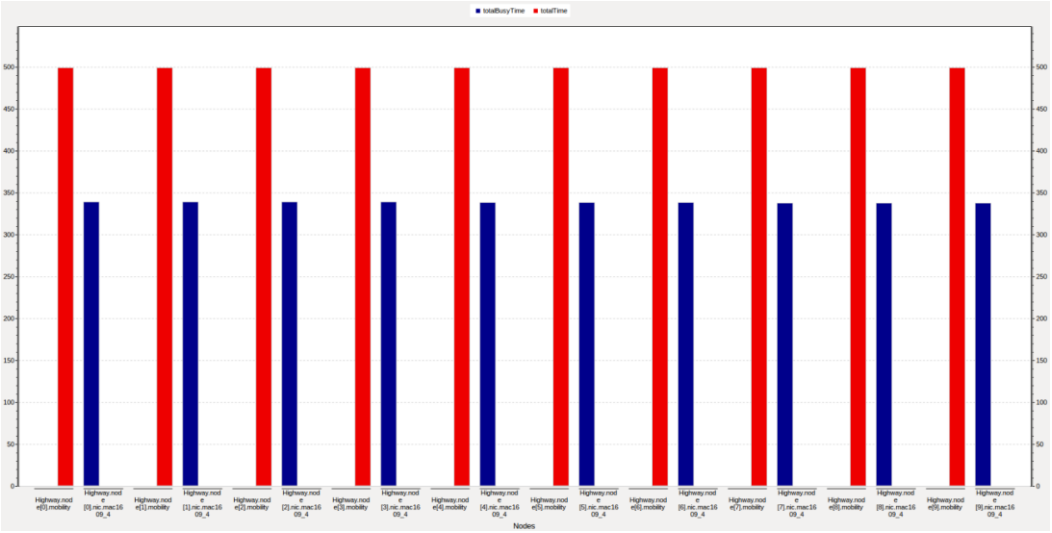

Figura 57. Escenario 5: Tiempo de ocupación respecto al tiempo total de simulación.

- La pérdida de paquetes también se ha visto incrementada en este caso como podemos apreciar en la Figura 58.

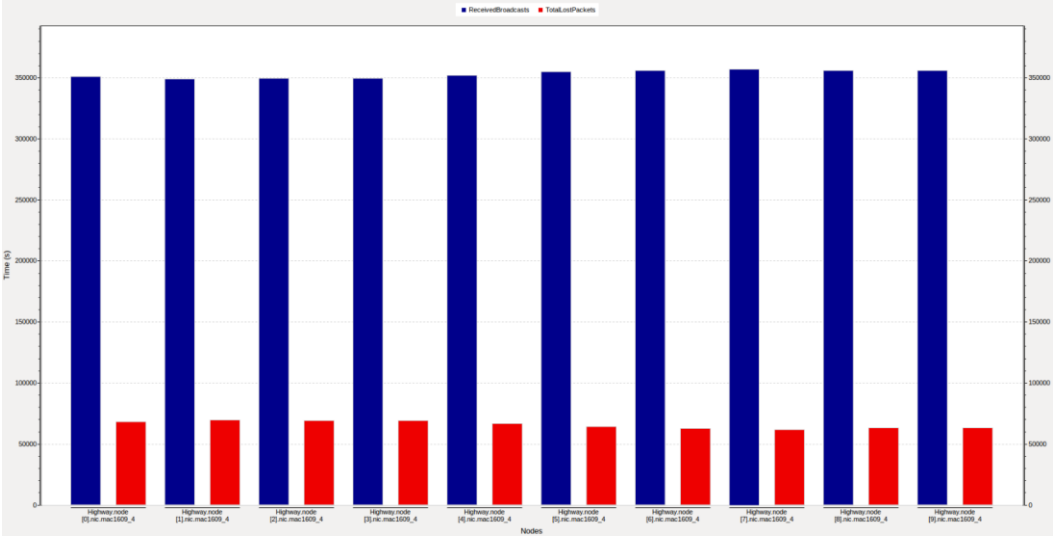

Figura 58. Escenario 5: *Broadcasts* recibidos y paquetes perdidos.

- Al igual que el resto de los valores obtenidos, como podemos ver en la Figura 59, los valores obtenidos son superiores al caso anterior.

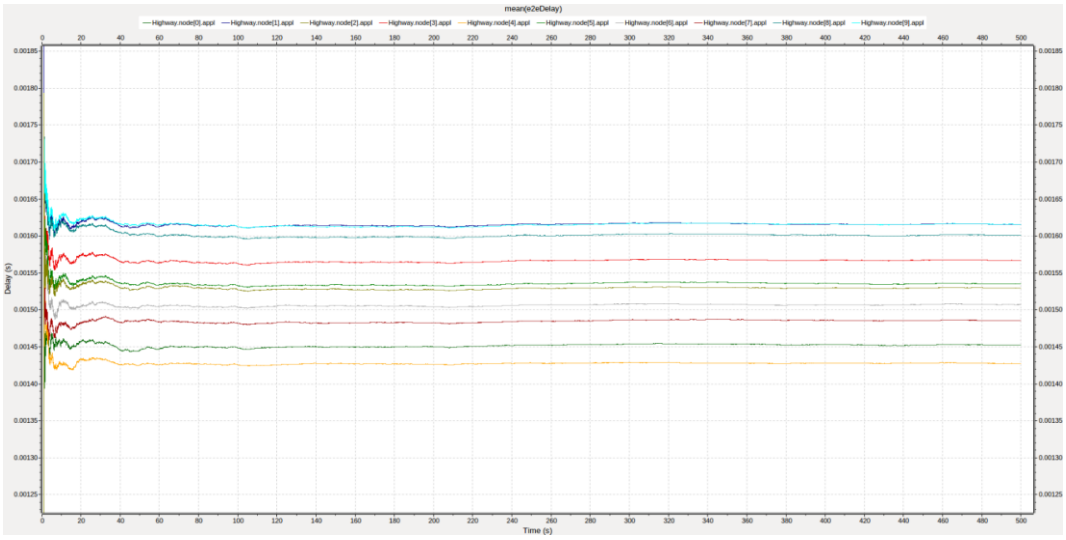

Figura 59. Escenario 5: *E2E Delay* a lo largo del tiempo de simulación.

- Distancia entre los vehículos. En la Figura 60 se ve una gráfica mucho menos estable que en anteriores ocasiones y que no consigue establecerse a un valor muy cercano a 5 metros según va pasando el tiempo, si no que empeora.

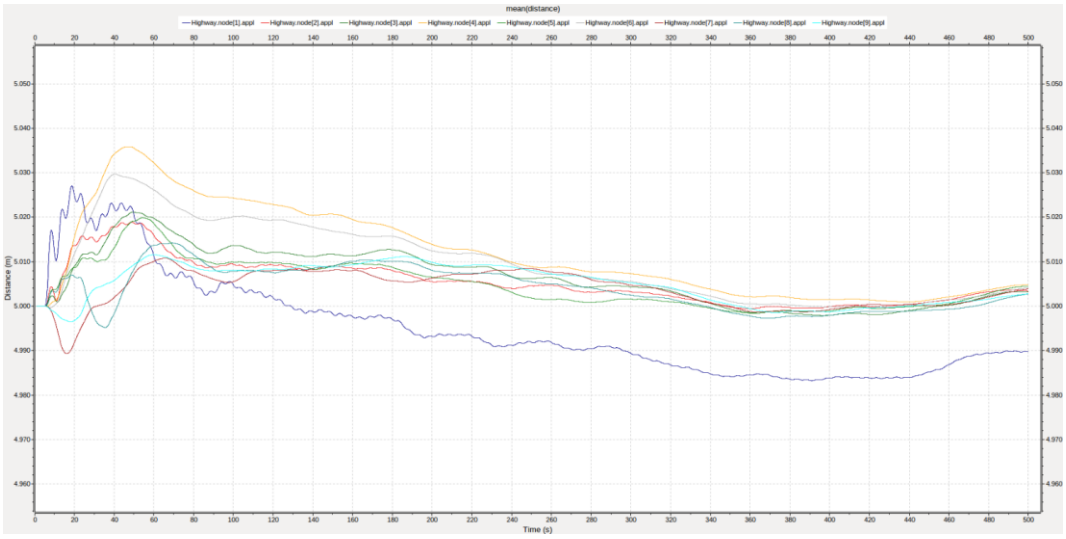

Figura 60. Escenario 5: Distancia entre vehículos del *platoon*.

En la Tabla 12 se resumen las métricas obtenidas a lo largo de los escenarios 4 y 5 en los que se ha añadido tráfico adicional. Podemos concluir que cuando la tasa de transmisión se acerca a los valores recomendados para la aplicación de *Platooning*, 40 Hz, los resultados obtenidos no son adecuados, y en rendimiento de la aplicación no es suficiente.

Escenario	**Promedio del total de paquetes perdidos – Total recibidos**	**Promedio de tiempo de ocupación - tiempo total en el escenario para todos los nodos**
Escenario 4	5,3696 %	51,7142 %
Escenario 5	15,6626 %	67,6 %

Tabla 12. Resumen de las métricas obtenidas para los escenarios 4 y 5.

6. Conclusiones

En este trabajo, se describen varios tipos de mecanismos de *Beaconing* adaptativos que se proponen para entornos de V2X. Vale la pena mencionar que la simulación, la implementación práctica y el modelado matemático son tres pilares complementarios para dar credibilidad a los mecanismos de *Beaconing* estudiados, ya que la implementación en el mundo real verifica los supuestos realizados en la fase de simulación y análisis matemático.

El presente documento se ha centrado en el análisis teórico y de simulación de los mecanismos de *Beaconing* estáticos y que actualmente se utilizan en los estándares de comunicaciones V2X.

Se ha llegado a la conclusión de que, bajo situaciones ideales de tráfico, estos mecanismos son suficientes para cumplir las expectativas de las aplicaciones cooperativas vehiculares, pero que, en situaciones en las que se producen incidentes este cumplimiento de requisitos para garantizar el rendimiento del sistema se ve afectado.

Otra conclusión obtenida de las simulaciones es que, bajo condiciones de baja ocupación del canal, el aumento de la potencia de transmisión mejora el rendimiento del sistema, haciendo que la pérdida de paquetes se vea reducida considerablemente.

También se ha descubierto que las VANETs y las aplicaciones vehiculares como *Platooning* son altamente dependientes de la densidad de tráfico, y por lo tanto en estas situaciones de alta densidad, las métricas obtenidas tanto para la aplicación en la que ocurren accidentes como para la aplicación de *Platooning* no son lo suficientemente buenas. Por ello, se ha visto demostrada la necesidad de utilizar los mecanismos de *Beaconing* adaptativos que se han estudiado a lo largo de todo el trabajo.

Los objetivos de este trabajo se han cumplido, aunque además de analizar teóricamente los mecanismos de *Beaconing* adaptativos y demostrar la necesidad que existe de utilizarlos habría sido de gran interés llegar a implementarlos en los simuladores utilizados.

Siguiendo en esta línea, este sería un punto importante con el que continuar este estudio para poder proponer mejoras en el funcionamiento de la aplicación de *Platooning* y que pudieran pasar a una implementación práctica en un entorno realista.

Si analizamos de forma crítica porque no se ha llegado a realizar esta última parte podemos decir que las causas son la falta de tiempo y el desconocimiento inicial sobre el área del trabajo a realizar. Por esta razón, el estudio de las tecnologías que se utilizan en las comunicaciones V2X y los simuladores que se han utilizado para desarrollar el trabajo fueron tareas que se alargaron mucho más de lo que estaba previsto en la planificación inicial.

La metodología que se había planteado en el inicio del trabajo se ha seguido adecuadamente, pasando por todas las fases, primero de investigación y estudio, después de análisis de los posibles escenarios y aplicaciones vehiculares cooperativas, aprendizaje del funcionamiento de los simuladores y por último simulaciones y conclusiones a partir de los resultados obtenidos.

En cuanto a las líneas de trabajo futuro que no se han podido explorar en el trabajo y quedan pendientes serían las siguientes:

1. Obtener la métrica de rendimiento de retardo en la actualización, *update delay,* ya que habría sido muy útil obtenerla para evaluar la aplicación de *Platooning* en los diferentes escenarios.

2. Realizar simulaciones modificando otros parámetros del entorno y de la red, como podría ser diferentes potencias de transmisión para el escenario de *Platooning* con vehículos adicionales. De esta forma las conclusiones obtenidas serían más fiables y se podría llegar a decidir qué tipo de mecanismo de *Beaconing* adaptativo sería más adecuado para esta aplicación en concreto.

3. Diseñar e implementar un mecanismo de *Beaconing* adaptativo para la aplicación de *Platooning* y utilizando el simulador PLEXE obtener el rendimiento del sistema en este caso.

7. Glosario de siglas

BSM	Basic Security Messages
C2X	Car-to-X Communication
CACC	Cooperative Adaptive Cruise Control
CAM	Cooperative Awareness Messages
CBR	Channel Busy Ratio
DCC	Decentralised Congestion Control
DENM	Decentralised Environmental Notification Messages
EDCA	Enhanced Distributed Channel Access
HMI	Human Machine Interface
I2V	Infrastructure to Vehicle
IAS	Intersection Assistance Systems
ITS	Intelligent Transport Systems
MANET	Mobile Ad-Hoc Network
MFC	Message Frequency Control
OBU	On Board Unit
OFDM	Orthogonal Frequency-Division Multiplexing
PT	Platoon Leader
PM	Platoon Member
RSU	Road Side Unit
TPC	Transmission Power Control
V2I	Vehicle to Infrastructure
V2P	Vehicle to Pedestrian
V2V	Vehicle to vehicle
V2X	Vehicle to any component
VANET	Vehicular Ad-Hoc Network
WAVE	Wireless Access in Vehicular Environments

8. Bibliografía

[1] E. T. ITS, *Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Definitions", ETSI TR 102 638 V1.1.1,* 2009.

[2] I. P. J. L. V. A. M. J. S. Guillem Boquet, *Adaptive beaconing for RSU-based intersection assistance systems: Protocols analysis and enhancement, Vehicular Communications,* 2018.

[3] I. T. S. (ITS), *Decentralized Congestion Control Mecha-nisms for Intelligent Transport Systems Operating in the 5 GHz Range; Access Layer Part,* 2011.

[4] J. Fernández Pastrana, *802.11p standard and V2X applications on commercial Wi-Fi cards,* U. d. V. E. T. S. d. I. d. Telecomunicación, Ed., 2017.

[5] S. J2945, *On-Board System Requirements for V2V Safety Communications,* 2016.

[6] I. &. S. S. &. d. P. M. F. Rashdan, *ITS-G5 Challenges and 5G Solutions for Vehicular Platooning.,* 2016.

[7] R. G. a. F. D. C. Sommer, «Bidirectionally Coupled Network and Road Traffic Simulation for Improved IVC Analysis,» *IEEE Transactions on Mobile Computing,* vol. 10, nº 1, pp. 3-15, Jan 2011.

[8] J. E. M. B. a. L. B. Daniel Krajzewicz, *Recent Development and Applications of SUMO - Simulation of Urban MObility,* vol. 5, I. J. O. A. i. S. a. Measurements, Ed., 2012, pp. 128-138.

[9] «OMNet++. Discrete Event Simulator,» OpenSim Ltd., [En línea]. Available: https://www.omnetpp.org/. [Último acceso: 08 10 2018].

[10] T. K. IEEE Standards Association, «1609 - Dedicated Short Range Communication,» [En línea]. Available: https://standards.ieee.org/develop/wg/1609_WG.html. [Último acceso: 01 01 2019].

[11] ETSI, "Intelligent Transport Systems - Standards," [Online]. Available: http://www.etsi.org/technologies-clusters/technologies/intelligent-transport. [Accessed 01 01 2019].

[12] ARIB, «STD-T109. 700MHz Band Intelligent Transport Systems,» [En línea]. Available: http://www.arib.or.jp/english/html/overview/doc/5-STD-T109v1_1-E1.pdf. [Último acceso: 01 01 2019].

[13] M. Atiquzzaman, Vehicular Communications, ELSEVIER.

[14] ETSI, «ES 202 663: ITS; European profile standard for the physical and medium access layer of Intelligent Transport Systems operating in the 5 GHz frequency band, Tech. Rep,» 2010. [En línea].

[15] ETSI, "TS 102 636-4-1: "Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular communications; GeoNetworking; Part 4: Geographical addressing and forwarding for point-to-point and point-to-multipoint communications; Sub-part 1: Media-Independent Functionality"," 06 2011. [Online]. Available: http://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/102600_102699/1026360401/01.01.01_60/ts_1026360401v010101p.pdf. [Accessed 01 01 2019].

[16] ETSI, «TS 102 636-3: "Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; GeoNetworking; Part 3: Network architecture",» 03 2010. [En línea]. Available: http://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/102600_102699/10263603/01.01.01_60/ts_10263603v010101p.pdf. [Último acceso: 01 01 2019].

[17] D. J. L. D. Qi Chen, «IEEE 1609.4 DSRC Multi-Channel Operations and Its,» 2009. [En línea]. Available: https://csi.dgist.ac.kr/uploads/Seminar/1409_DSRC_SSH.pdf. [Último acceso: 01 01 2019].

[18] ETSI, «EN 302 636-5-1: "Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; GeoNetworking; Part 5: Transport Protocols; Sub-part 1: Basic Transport Protocol,» 10 2013. [En línea]. Available: http://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302600_302699/3026360501/01.02.01_60/en_3026360501v010201p.pdf. [Último acceso: 01 01 2019].

[19] ETSI, «EN 302 637-2: "Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Part 2: Specification of Cooperative Awareness Basic Service,» 09 2014. [En línea]. Available: http://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302600_302699/30263702/01.03.01_30/en_30263702v010301v.pdf. [Último acceso: 01 01 2019].

[20] ETSI, «EN 302 637-3: "Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Part 3: Specifications of Decentralized Environmental Notification Basic Service",» 09 2014. [En línea]. Available: http://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302600_302699/30263703/01.02.01_30/en_30263703v010201v.pdf. [Último acceso: 01 01 2019].

[21] ETSI, "TS 102 724: "Intelligent Transport Systems (ITS); Harmonized Channel Specifications for Intelligent Transport Systems operating in the 5 GHz frequency band"," 10 2012. [Online]. Available: http://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/102700_102799/102724/01.01.01_60/ts_102724v010101p.pdf. [Accessed 01 01 2019].

[22] D. M. Laura, «Multi-Channel Congestion Control for ETSI ITS G5 A/B,» 06 2013. [En línea]. Available: http://www.bayern-france.org/cms/upload/2013/Sommer_uni_2013/Multi-Channel-DeMartini__poster.pdf. [Último acceso: 01 01 2019].

[23] J. A. S. Sánchez, *Redes Vehiculares Aplicadas a la Movilidad Inteligente y Sostenibilidad Ambiental en Entornos de Ciudades Inteligentes,* Tesis Doctoral, 2017.

[24] «AdaptIVe (Automated Driving Applications & Technologies for Intelligent Vehicles) Project,» [En línea]. Available: http://vra-net.eu/wp-content/uploads/2015/04/VRA_20140930_WP2_DEL2.1_v1.0.pdf.

[25] «DRIVE C2X (Accelerate Cooperative Mobility) Project,» [En línea]. Available: http://wiki.fot-net.eu/index.php/DRIVE_C2X.

[26] «PRESERVE (Preparing Secure V2X Communication Systems) Project,» [En línea]. Available: https://www.preserve-project.eu/.

[27] «Horizon 2020, "Mobility for Growth - Smart, green and integrated transport challenge",» [En línea]. Available: https://ec.europa.eu/inea/en/horizon-2020/mobility-growth .

[28] E. Commission, «SCOOP Project,» [En línea]. Available: https://ec.europa.eu/inea/en/connecting-europe-facility/cef-transport/2014-eu-ta-0669-s.

[29] «ECo-AT, The Austrian testbed for C-ITS,» [En línea]. Available: http://eco-at.info/home-en.html.

[30] «CVIS (Cooperative Vehicle-Infraestructure Systems) Project,» [En línea]. Available: https://www.evita-project.org/.

[31] «COMmunications for eSafety (COMeSafety) project,» [En línea]. Available: http://www.ecomove-project.eu/links/comesafety/.

[32] «EVITA (E-safety Vehicle Intrusion Protected Applications) project,» [En línea]. Available: https://www.evita-project.org/.

[33] S. H. Bouk, S. H. Ahmed, G. Kim y D. Kim, *Hybrid Adaptive Beaconing in Vehicular Ad Hoc Networks: A Survey,* A. Gkelias, Ed., Republic of Korea: School of Computer Science and Engineering, Kyungpook National University, 2015.

[34] V. V. Y. K. A. Vinel, "A simple analytical model for the periodic broadcasting in vehicular ad-hoc networks," Proceedings of the 2008 IEEE International GLOBECOM Workshops, Philadelphia, 2008.

[35] H. M. M. L. N. Mariyasagayam, «An adaptive forwarding mechanism for data dissemination in vehicular networks,» Proceedings of the 2009 IEEE Vehicular Networking Conference, Boston, 2009.

[36] K. Z. Ghafoor, J. Lloret, Kamalrulnizam, A. Bakar, A. S. Sadiq y S. A. B. Mussa, *Beaconing Approaches in Vehicular Ad Hoc Networks: A Survey,* 2013.

[37] E. A. F. X. A. K. M. S. a. R. M. N. S. A. A. Shah, *Adaptive Beaconing Approaches for Vehicular Ad Hoc Networks: A Survey,* vol. 12, IEEE Systems Journal, 2018, pp. 1263-1277.

[38] J. B. a. B. G. a. R. C. E. Kenney, *LIMERIC: A Linear Message Rate Control Algorithm for Vehicular DSRC Systems,* Las Vegas, Nevada: ACM, 2011, pp. 21-30.

[39] T. T. a. D. J. a. Q. C. a. L. D. a. H. Hartenstein, *Design methodology and evaluation of rate adaptation based congestion control for Vehicle Safety Communications,* 2011, pp. 116-123.

[40] G. a. L. H. a. K. J. B. a. P. C. Bansal, *EMBARC: Error Model Based Adaptive Rate Control for Vehicle-to-vehicle Communications,* Taipei: ACM, 2013, pp. 41-50.

[41] R. K. S. a. T. L. a. E. S. a. F. K. a. G. Schafer, «Exploration of adaptive beaconing for efficient intervehicle safety communication,» *IEEE Network,* vol. 24, nº 1, pp. 14-19, Jan 2010.

[42] C. R. a. R. W. P. A. Boukerche, «Improving neighbor localization in vehicular ad hoc networks to avoid overhead from periodic messages,» *Proc. IEEE Global Telecommun. Conf.,* pp. 1-6, 2009.

[43] R. S. a. H. K. S. Rezaei, «Reducing the communication required by DSRC-based vehicle safety systems,» *Proc. IEEE Intell. Transp. Syst. Conf.,* pp. 361-366, 2007.

[44] D. J. Q. C. L. D. a. H. H. T. Tielert, «Design methodology and evaluation of rate adaptation based congestion control for vehicle safety communications,» *Proc. IEEE Veh. Netw. Conf.,* p. 116–123.

[45] H.-H. C. T. M. C. a. W. C. J. He, «Adaptive congestion control for DSRC vehicle networks,» *IEEE Commun. Lett.,* vol. 14, nº 2, pp. 127-129, 2010.

[46] J. M. P. S. a. H. H. M. Torrent-Moreno, «Vehicle-to-vehicle communication: Fair transmit power control for safety-critical information,» *IEEE Trans. Veh. Technol.,* vol. 58, nº 7, pp. 3684-3703, 2009.

[47] B. K. e. al., «Dice the tx power-improving awareness quality in VANETs by random transmit power selection,» *Proc. Veh. Netw. Conf.,* pp. 56-63, 2012.

[48] F. T. J. H. a. H. H. J. Mittag, «A comparison of single-and multi-hop beaconing in VANETs,» *Proc. 6th ACM Int. Workshop Veh. Inter Netw.,* pp. 69-78, 2009.

[49] R. S. H. K. a. F. B. X. Guan, «A feedback-based power,» *Proc. IEEE Mobile Netw. Veh. Environ.,* pp. 67-72, 2007.

[50] A. J. G. H. A. a. L. B. M. Di Felice, «On the impact of multi-channel technology on safety-message delivery in ieee 802.11p/1609.4 vehicular networks,» *Proc. IEEE 21st Int. Conf. Comput. Commun. Netw.,* pp. 1-8, 2012.

[51] R. S. a. E. C. a. A.-L. Beylot, «Reverse back-off mechanism for safety vehicular ad hoc networks,» *Ad Hoc Networks,* vol. 10, pp. 210-224, 2014.

[52] Y. P. F. R. S. a. H. K. C.-L. Huang, «Adaptive intervehicle communication control for cooperative safety systems,» *IEEE Networks,* vol. 24, nº 1, pp. 6-13, Jan / Feb 2010.

[53] R. S. H. K. a. Y. P. F. C.-L. Huang, «Implementation and evaluation of scalable vehicle-to-vehicle safety communication control,» *IEEE Commun. Mag.,* vol. 49, nº 11, pp. 134-141, Nov 2011.

[54] J. G. J. H. a. H. H. M. Sepulcre, «Application-based congestion control policy for the communication channel in vanets,» *IEEE Commun. Lett.,* vol. 14, nº 10, pp. 951-953, Oct 2010.

[55] D. C. P. G. Y. a. S. O. D. B. Rawat, «Enhancing VANET performance by joint adaptation of transmission power and contention window size,» *IEEE Trans. Parallel Distrib. Syst.,* vol. 22, nº 9, pp. 1528-1535, Sep. 2011.

[56] G. Nardini, A. Virdis, C. Campolo, A. Molinaro y G. Stea, *Cellular-V2X Communications for Platooning: Design and Evaluation.,* vol. 18, Sensors, 2018.

[57] M. J. a. E. U. Annette Böhm, *Co-Existing Periodic Beaconing and Hazard Warnings in IEEE 802.11p-Based Platooning Applications,* Taipei, 2013, pp. 99-102.

[58] A. F. S. G. H. Jeroen Ploeg, *Connect & Drive: design and evaluation of cooperative adaptive cruise control for congestion reduction,* vol. 19, J. o. m. transportation, Ed., 2011, pp. 207-213.

[59] C. &. H. Q. &. B. A. &. R. T. Bergenhem, *Challenges Of Platooning On Public Motorways,* 2018.

[60] V. &. B. K. &. M. P. &. D. G. I. &. X. H. &. S. M. &. S. P. &. W. K. &. ,. D. &. T. I. Vukadinovic, *3GPP C-V2X and IEEE 802.11p for Vehicle-to-Vehicle communications in highway platooning scenarios.,* Ad Hoc Networks., 2018.

[61] M. Segata, S. Joerer, B. Bloessl, C. Sommer, F. Dressler y R. L. Cigno, *Plexe: A platooning extension for Veins,* 2014, pp. 53-60.

[62] Y. Pigne, G. Danoy y P. Bouvry, *A platform for realistic online vehicular network management,* 2010, p. 595–599.

[63] M. Piórkowski, M. Raya, A. Lezama, P. Papadimitratos, M. Grossglauser y J.-P. Hubaux, *TraNS: realistic joint traffic and network simulator for VANETs.*

[64] J. M. D. K. R. B. P. C. F. H. J. G. V. K. M. R. L. L. O. L. J. L. J. H. S. V. Y. L. M. S. M. W. Michele Rondinone, *iTETRIS: A modular simulation platform for the large scale evaluation of cooperative ITS applications,* vol. 34, 2013, pp. 99-125.

[65] S. A. B. Mussa, M. Manaf, K. Z. Ghafoor y Z. Doukha, *Simulation tools for vehicular ad hoc networks: A comparison study and future perspectives,* Marrakech, 2015, pp. 1-8.

[66] «Plexe. The Platooning extension for Veins,» [En línea]. Available: http://plexe.car2x.org/.

[67] C. G. F. T. CHRISTIAN NELSON, *A Simulation Framework for V2V Wireless Systems,* HALMSTAD UNIVERSITY, SWEDEN: SCHOOL OF INFORMATION SCIENCE, COMPUTER AND ELECTRICAL ENGINEERING.

[68] E. &. N. H. &. Z. W. Ben Hamida, *Security of Cooperative Intelligent Transport Systems: Standards, Threats Analysis and Cryptographic Countermeasures,* 10.3390/electronics4030380, 2009.

[69] Uwicore, *On the Importance of Application Requirements in Cooperative Vehicular Communications.*

[70] B. &. J. D. &. L. K. &. N. D. &. W. J. &. w. L. Liu, *A Joint Control-Communication Design for Reliable Vehicle Platooning in Hybrid Traffic,* 2016.

[71] A. EMEA, «EE News Automotive,» 21 Sept 2018. [En línea]. Available: http://www.eenewsautomotive.com/design-center/testing-challenges-v2x-devices/page/0/3. [Último acceso: 25 11 2018].