

UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ELCHE

GRADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS DE  
TELECOMUNICACIÓN



“DISEÑO Y EVALUACIÓN DE  
PROTOCOLOS DE COMUNICACIÓN  
MULTICANAL CON IEEE 802.11P  
PARA VEHÍCULO AUTÓNOMO  
CONECTADO”

TRABAJO FIN DE GRADO

Marzo -2021

AUTOR: Rocío Martínez Martínez

DIRECTOR/ES: Miguel Sepulcre Ribes

UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE  
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ELCHE  
GRADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS DE  
TELECOMUNICACIÓN



“DISEÑO Y EVALUACIÓN DE  
PROTOCOLOS DE COMUNICACIÓN  
MULTICANAL CON IEEE 802.11P  
PARA VEHÍCULO AUTÓNOMO  
CONECTADO”

TRABAJO FIN DE GRADO

Marzo-2021

AUTOR: Rocío Martínez Martínez

DIRECTOR/ES: Miguel Sepulcre Ribes

## Resumen

Las redes de comunicación vehiculares permitirán el intercambio de información entre vehículos autónomos conectados en tiempo real para mejorar la seguridad vial y la eficiencia del tráfico. A medida que aumenta el ancho de banda requerido por cada uno de estos vehículos, también se incrementa el ancho de banda necesario para el correcto funcionamiento del sistema.

Hasta el momento, los sistemas de comunicación vehiculares basados en comunicaciones directas entre vehículos V2V (*Vehicle-to-Vehicle*) han utilizado un único canal de 10 MHz para el intercambio de información. El auge del vehículo autónomo conectado requerirá la necesidad del empleo de múltiples canales de comunicación, estudio que el propio organismo de la ETSI se encuentra investigando actualmente.

En este trabajo de fin de grado se estudiará el rendimiento de las comunicaciones V2V multicanal en sistemas vehiculares para identificar las ventajas e inconvenientes de cada una de las configuraciones posibles. Con ello se pretenden identificar las claves para el establecimiento de las futuras comunicaciones multicanal para el vehículo autónomo conectado.



## **Abstract**

Wireless vehicular networks will allow the exchange of information between connected automated vehicles in real time in order to improve road safety and traffic efficiency. As the bandwidth required by each vehicle increases, the bandwidth necessary for the correct operation of the system also increases.

To date, wireless vehicular systems based on direct communications among vehicles V2V (*Vehicle-to-Vehicle*) have used a single 10 MHz channel for information exchange. The rise of the connected automated vehicle will require the use of multiple communication channels, study that the ETSI standardization body is currently developing.

In this final degree project, the performance of multi-channel V2V communications in vehicle systems will be studied to identify the advantages and disadvantages of different possible configurations. This is to identify the key factors for the establishment of future multi-channel communications for connected automated vehicles.



## Índice

<b>1. Introducción</b> .....	<b>15</b>
<b>2. Comunicación multicanal en redes vehiculares</b> .....	<b>18</b>
2.1. Servicios y aplicaciones vehiculares.....	18
2.1.1. CAM .....	19
2.1.2. CPM.....	20
2.1.3. MCM.....	22
2.1.4. Aplicaciones .....	24
2.2. Tecnología de comunicación IEEE 802.11p .....	24
2.3. Comunicaciones multi-canal .....	26
<b>3. Diseño e implementación de comunicaciones multicanal.</b> .....	<b>28</b>
3.1. ns-3.....	28
3.2. Comunicaciones Wi-Fi en ns-3 con múltiples canales .....	29
3.3. Creación de nodos con múltiples interfaces en ns-3.....	35
3.4. Métricas.....	45
<b>4. Simulación y análisis de resultados.</b> .....	<b>47</b>
4.1. Parámetros y escenarios de simulación.....	47
4.2. Escenario con un único canal radio. ....	52
4.3. Escenario multicanal con separación de vehículos por canal.....	55
4.3.1. Dos canales radio.....	55
4.3.1.1. Dos canales y una única interfaz radio. ....	55
4.3.1.2. Dos canales y dos interfaces radio.....	57
4.3.2. Tres canales radio. ....	59
4.3.2.1. Tres canales y una única interfaz radio.....	60
4.3.2.2. Tres canales y dos interfaces radio. ....	62
4.3.2.3. Tres canales y tres interfaces radio.....	64

4.4.	Escenario multicanal con separación de servicios por canales. ....	66
4.4.1.	Dos canales radio. ....	67
4.4.1.1.	Coexistencia de vehículos con diferentes servicios. ....	67
4.4.1.2.	Todos los vehículos implementan todos los servicios. ....	73
4.4.2.	Tres canales radio. ....	77
4.4.2.1.	Coexistencia de vehículos con diferentes servicios. ....	77
4.4.2.2.	Todos los vehículos implementan todos los servicios. ....	82
4.5.	Análisis. ....	86
<b>5.</b>	<b>Conclusiones y líneas futuras de trabajo. ....</b>	<b>88</b>
	<b>Bibliografía. ....</b>	<b>90</b>



## Índice de figuras

Figura 1. Estructura general de un CAM según ETSI [2].	20
Figura 2. Estructura general de un CPM según ETSI [3].	22
Figura 3. Estructura general de un MCM según TransAID [4].	23
Figura 4. Asignación europea de frecuencias para ITS [10].	27
Figura 5. Números de canal definidos.	31
Figura 6. Creación y configuración del objeto YansWifiPhy y del objeto YansWifiChannel de un canal.	33
Figura 7. Creación y configuración de los NetDeviceContainer de cada canal.	34
Figura 8. Asignación de interfaces en la simulación con un canal radio en la que todos los vehículos tienen una interfaz radio.	36
Figura 9. Primera parte de la función GenerateAll, mediante la cual se asignan las interfaces y los mensajes transmitidos en cada canal.	38
Figura 10. Segunda parte de la función GenerateAll, mediante la cual se asignan las interfaces y los mensajes transmitidos en cada canal.	39
Figura 11. Asignación de interfaces en la simulación con dos canales radio en la que todos los vehículos tienen dos interfaces radio.	41
Figura 12. Asignación de interfaces en la simulación con dos canales radio y separación de servicios por canales, en la que coexisten vehículos con diferentes servicios.	43
Figura 13. Diagrama de flujo para una distribución de servicios por canales.	44
Figura 14. Diagrama de flujo para una distribución de vehículos por canales.	44
Figura 15. Entorno de simulación.	48
Figura 16. Separación por vehículos en 3 canales.	52
Figura 17. Separación por servicios en 2 y 3 canales.	52
Figura 18. PDR en el escenario con un único canal.	54
Figura 19. PDR de los mensajes CAM en el escenario con un único canal.	54
Figura 20. PDR experimentada en uno de los canales en el escenario con dos canales y una interfaz radio por vehículo.	57

Figura 21 . PDR global experimentada en el escenario con dos canales y una interfaz radio por vehículo. ....	57
Figura 22. PDR experimentada en uno de los canales en el escenario con dos canales y dos interfaces radio por vehículo. ....	59
Figura 23. PDR global experimentada en el escenario con dos canales y dos interfaces radio por vehículo. ....	59
Figura 24. PDR experimentada en uno de los canales en el escenario con tres canales y una interfaz radio por vehículo. ....	61
Figura 25. PDR global experimentada en el escenario con tres canales y una interfaz radio por vehículo. ....	62
Figura 26. PDR experimentada en uno de los canales en el escenario con tres canales y dos interfaces radio por vehículo. ....	63
Figura 27. PDR global experimentada en el escenario con tres canales y dos interfaces radio por vehículo. ....	64
Figura 28. PDR experimentada en uno de los canales en el escenario con tres canales y tres interfaces radio, en el escenario con tres canales y dos interfaces radio, y en el escenario con tres canales y una interfaz radio. ....	66
Figura 29. PDR global experimentada en el escenario con tres canales y tres interfaces radio por vehículo. ....	66
Figura 30. PDR de los mensajes CAM experimentada en el canal 1, en el escenario con separación de servicios en dos canales, en el que coexisten vehículos con distintos servicios. ....	70
Figura 31. PDR de los mensajes CPM experimentada en el canal 1, en el escenario con separación de servicios en dos canales, en el que coexisten vehículos con distintos servicios. ....	70
Figura 32. PDR de los mensajes MCM experimentada en el canal 2, en el escenario con separación de servicios en dos canales, en el que coexisten vehículos con distintos servicios. ....	71

Figura 33. PDR global de los mensajes MCM experimentada por los vehículos con una sola interfaz, en el escenario con separación de servicios en dos canales, en el que coexisten vehículos con distintos servicios. ....	72
Figura 34. PDR global experimentada por los vehículos con una sola interfaz, en el escenario con separación de servicios en dos canales, en el que coexisten vehículos con distintos servicios.....	72
Figura 35. PDR global experimentada por los vehículos con dos interfaces, en el escenario con separación de servicios en dos canales, en el que coexisten vehículos con distintos servicios.....	73
Figura 36. PDR global de los mensajes CAM experimentada en el escenario con separación de servicios en dos canales en el que todos los vehículos implementan todos los servicios. ....	75
Figura 37. PDR global de los mensajes CPM experimentada en el escenario con separación de servicios en dos canales en el que todos los vehículos implementan todos los servicios. ....	76
Figura 38. PDR global de los mensajes MCM experimentada en el escenario con separación de servicios en dos canales en el que todos los vehículos implementan todos los servicios. ....	76
Figura 39. PDR global experimentada en el escenario con separación de servicios en dos canales en el que todos los vehículos implementan todos los servicios. ....	77
Figura 40. PDR de los mensajes CAM experimentada en el canal 1, en el escenario con separación de servicios en tres canales, en el que coexisten vehículos con distintos servicios.....	79
Figura 41. PDR de los mensajes CPM experimentada en el canal 2, en el escenario con separación de servicios en tres canales, en el que coexisten vehículos con distintos servicios.....	79
Figura 42. PDR de los mensajes MCM experimentada en el canal 3, en el escenario con separación de servicios en tres canales, en el que coexisten vehículos con distintos servicios.....	80

Figura 43. PDR global experimentada por los vehículos con una sola interfaz, en el escenario con separación de servicios en tres canales, en el que coexisten vehículos con distintos servicios.....	81
Figura 44. PDR global experimentada por los vehículos con dos interfaces, en el escenario con separación de servicios en tres canales, en el que coexisten vehículos con distintos servicios.....	81
Figura 45. PDR global experimentada por los vehículos con tres interfaces, en el escenario con separación de servicios en tres canales, en el que coexisten vehículos con distintos servicios.....	82
Figura 46. PDR de los mensajes CAM experimentada en el canal 1, en el escenario con separación de servicios en tres canales en el que todos los vehículos implementan todos los servicios. ....	84
Figura 47. PDR de los mensajes CPM experimentada en el canal 2, en el escenario con separación de servicios en tres canales en el que todos los vehículos implementan todos los servicios. ....	85
Figura 48. PDR de los mensajes MCM experimentada en el canal 3, en el escenario con separación de servicios en tres canales en el que todos los vehículos implementan todos los servicios. ....	85
Figura 49. PDR global experimentada en el escenario con separación de servicios en tres canales en el que todos los vehículos implementan todos los servicios. ....	86

## Índice de tablas

Tabla 1. Parámetros técnicos constantes en las simulaciones. ....	49
Tabla 2. Frecuencias de los canales empleados en las simulaciones. ....	49
Tabla 3. Parámetros de los servicios CAM, CPM y MCM. ....	49
Tabla 4. Configuraciones del escenario 2 implementadas y evaluadas. ....	50
Tabla 5. Configuraciones del escenario 3 implementadas y evaluadas. ....	51
Tabla 6. CBR media en el escenario con un único canal. ....	53
Tabla 7. CBR media por canal en el escenario con un canal y en el escenario con dos canales y una interfaz radio por vehículo. ....	56
Tabla 8. CBR media por canal en el escenario con un canal y en el escenario con dos canales y dos interfaces radio por vehículo. ....	58
Tabla 9. CBR media por canal en el escenario con un canal, en el escenario con dos canales y en el escenario con tres canales y una interfaz radio por vehículo. ....	60
Tabla 10. CBR media por canal en el escenario con un canal, en el escenario con dos canales y en el escenario con tres canales y dos interfaces radio por vehículo. ....	63
Tabla 11. CBR media por canal en el escenario con un canal, en el escenario con dos canales y en el escenario con tres canales y tres interfaces radio por vehículo. ....	65
Tabla 12. CBR media de los dos canales en el escenario con separación de servicios en dos canales, en el que coexisten vehículos con distintos servicios y en el escenario con separación de vehículos en dos canales. ....	69
Tabla 13. CBR media del canal 1, en el escenario con separación de servicios en dos canales en el que coexisten vehículos con distintos servicios, y en el escenario con separación de servicios en dos canales en el que todos los vehículos implementan todos los servicios. ....	74
Tabla 14. CBR media del canal 2, en el escenario con separación de servicios en dos canales en el que coexisten vehículos con distintos servicios, y en el escenario con separación de servicios en dos canales en el que todos los vehículos implementan todos los servicios. ....	74

Tabla 15. CBR media de los tres canales en el escenario con separación de servicios en tres canales, en el que coexisten vehículos con distintos servicios. ....	78
Tabla 16. CBR media del canal 1 en el escenario con separación de servicios en tres canales en el que coexisten vehículos con distintos servicios, y en el escenario con separación de servicios en tres canales en el que todos los vehículos implementan todos los servicios. ....	83
Tabla 17. CBR media del canal 2 en el escenario con tres canales, en el escenario con separación de servicios en tres canales en el que coexisten vehículos con distintos servicios, y en el escenario con separación de servicios en tres canales en el que todos los vehículos implementan todos los servicios. ....	83
Tabla 18. CBR media del canal 3 en el escenario con tres canales, en el escenario con separación de servicios en tres canales en el que coexisten vehículos con distintos servicios, y en el escenario con separación de servicios en tres canales en el que todos los vehículos implementan todos los servicios. ....	83



## **Glosario de términos**

**BSS:** *Basic Set of Services.*

**CAM:** *Cooperative Awareness Message.*

**CAS:** *Cooperative Awareness Service.*

**CAV:** *Connected and Automated Vehicles.*

**CBR:** *Channel Busy Ratio.*

**CCA:** *Clear Channel Assessment.*

**CCH:** *Control Channel.*

**CPM:** *Collective Perception Message.*

**CPS:** *Collective Perception Service.*

**CSMA/CA:** *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance.*

**CW:** *Contention Window.*

**ETSI:** *European Telecommunications Standards Institute.*

**ITS:** *Intelligent Transportation Systems.*

**ITS PDU:** *ITS Protocol Data Unit.*

**LOS:** *Line of Sight.*

**MAC:** *Media Access Control.*

**MCM:** *Maneuver Coordination Messages.*

**MCO:** *Multi-Channel Operation.*

**MCS:** *Maneuver Coordination Service.*

**NLOS:** *Non Line of Sight.*

**NS-3:** *Network Simulator 3.*

**OCB:** *Outside the Context of a BSS.*

**OFDM:** *Orthogonal Frequency-Division Multiplexing.*

**PDR:** *Packet Delivery Ratio.*

**RSU:** *Road Side Unit.*

**RSSI:** *Received Signal Strength Indicator.*

V2V: *Vehicle-to-Vehicle.*

V2X: *Vehicle-to-Everything.*



## 1. Introducción

El vehículo autónomo conectado es un vehículo capaz de imitar las capacidades humanas a la hora de controlar el vehículo. Estos vehículos tienen incorporados una serie de sensores (cámaras, radares, etc.), los cuales le permiten percibir el entorno y, en consecuencia, conducir de manera autónoma. Sin embargo, estos sensores, presentan notables limitaciones especialmente cuando están obstruidos por otros obstáculos o por climatología adversa, por lo que basar la conducción únicamente en la información de estos sensores provoca múltiples desventajas. Las comunicaciones V2X (*Vehicle-to-Everything*) permiten la interacción directa de vehículos autónomos conectados o CAV (*Connected and Automated Vehicles*), mediante el empleo de las redes de comunicación vehiculares. Los CAV son capaces de intercambiar información entre ellos para una mejora de la seguridad vial y la eficiencia del tráfico. Mediante este intercambio de información, los CAV son capaces de conocer el estado de la vía (objetos, atascos...) más allá de su campo de visión, gracias a lo que perciben a través de sus sensores cada uno de ellos. Además, los CAV también podrán intercambiar información sobre sus movimientos planificados (como por ejemplo un cambio de carril, aceleración, etc.), permitiendo que los vehículos coordinen sus maniobras y se produzcan menos accidentes.

Para permitir el intercambio de esta información se están desarrollando nuevos servicios, útiles para asegurar la conducción vial y disminuir el número de fallos que se producen en la conducción autónoma, los cuales suponen un aumento en el ancho de banda necesario por cada vehículo y, por tanto, un incremento del ancho de banda necesario para el sistema.

Hasta la fecha se ha empleado un único canal de ancho de banda de 10 MHz para el intercambio de información en los sistemas de comunicación vehiculares. Este canal corresponde a uno de los 7 canales disponibles en el espectro reservado para la primera tecnología de comunicación vehicular estandarizada: IEEE 802.11p. Debido al aumento del ancho de banda requerido por el sistema, es necesario el aumento del número de canales disponibles en las redes de comunicación vehiculares. La utilización de múltiples canales de manera simultánea por los vehículos es conocida como MCO o *Multi-Channel Operation*. El propio organismo de estandarización ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*) se encuentra diseñando los nuevos estándares de telecomunicaciones para el vehículo autónomo conectado que permitan el uso más eficiente posible de los

canales disponibles para ITS (*Intelligent Transportation Systems*), en los nuevos sistemas de comunicación multicanal.

El diseño de los nuevos estándares de ETSI para comunicaciones multicanal todavía no está finalizado. Para contribuir en dicho diseño, en este trabajo se han implementado diferentes configuraciones de comunicaciones vehiculares multicanal para evaluar las ventajas y desventajas de cada una de ellas. En concreto, se han realizado diversas configuraciones basándose en la separación de vehículos por canales, por un lado, y en la separación de servicios por canales por otro. Las configuraciones basadas en separación de vehículos por canales implican repartir el total de los vehículos en los canales disponibles (2 o 3). Por tanto, en estas configuraciones se reparte de manera equilibrada la carga total de vehículos en los múltiples canales, y cada vehículo transmitirá todos sus mensajes por el canal asignado. Mientras que las configuraciones basadas en separación de servicios por canales se basan en la asignación de la transmisión de un tipo de mensaje en concreto, a un canal en concreto. De esta manera, los vehículos serán capaces de transmitir y recibir un tipo de mensaje en concreto, si disponen de la interfaz radio correspondiente al canal por el que se transmita el mensaje en cuestión.

Para implementar y evaluar las distintas configuraciones se ha empleado el simulador de redes ns-3 (*Network Simulator 3*), ampliamente utilizado en la comunidad científica. Para cada una de las configuraciones, se han obtenido distintas métricas, evaluando tanto el funcionamiento de cada uno de los canales, como el funcionamiento global. De esta manera, se pretende identificar la viabilidad de cada una de las configuraciones para el futuro establecimiento de las comunicaciones multicanal para el vehículo autónomo conectado. Con ello se pretenden obtener directrices que permitan avanzar en el diseño de los estándares de ETSI para comunicación multicanal.

La memoria de este trabajo se estructura de la siguiente manera. En el capítulo 2 se describen los servicios empleados en las simulaciones para la transmisión de información, y la tecnología empleada para ello; esto es IEEE 802.11p. Además, en el capítulo 2 también se explica la necesidad del uso de múltiples canales en las comunicaciones vehiculares. El capítulo 3 explica la implementación de las diversas configuraciones realizadas en ns-3, centrándose en el diseño de comunicaciones con múltiples canales, y en el diseño de nodos con múltiples interfaces ns-3. En el capítulo 3 también podemos observar una breve descripción del simulador ns-3 y una explicación de las modificaciones realizadas en las métricas usadas para la evaluación de las diferentes

configuraciones, para poder observarlas según el tipo de servicio o el canal deseado. El capítulo 4 explica cada una de las configuraciones multicanal implementadas, realizando un exhaustivo análisis de los resultados obtenidos en cada una de ellas. Por último, en el capítulo 5 se muestran las conclusiones obtenidas del estudio realizado.



## 2. Comunicación multicanal en redes vehiculares

En este capítulo se presentan los servicios empleados para la transmisión de información entre vehículos. Estos servicios emplean mensajes V2X estandarizados por la ETSI: mensajes para el conocimiento cooperativo básico (CAMs, *Cooperative Awareness Messages*), mensajes de percepción colectiva o cooperativa (CPMs, *Collective Perception Messages*) y mensajes de coordinación de maniobras (MCMs, *Maneuver Coordination Messages*). Los servicios escogidos para este estudio son los que más ancho de banda consumen, ya que requieren la transmisión continua de mensajes en modo broadcast. También hablaremos sobre algunas de las aplicaciones a las que pueden dar servicio estas aplicaciones.

### 2.1. Servicios y aplicaciones vehiculares

Los mensajes CAM son mensajes básicos de difusión para transmitir información del vehículo transmisor y contienen información básica, como la posición, velocidad y estado del vehículo. Los mensajes CAM se transmiten regularmente de manera que los vehículos puedan mejorar el conocimiento del entorno de conducción. Además, los mensajes CAM son la base de muchas aplicaciones, por ejemplo: advertencia de colisión en una intersección, o presencia de un vehículo lento. Los vehículos autónomos conectados también transmitirán mensajes CPM para la percepción cooperativa o colectiva en la conducción autónoma conectada. La idea es que los vehículos autónomos conectados compartan información sobre objetos detectados por sus sensores a bordo. Mediante esta información compartida, los vehículos pueden extender su conocimiento más allá del campo de visión de sus sensores. Los mensajes MCM se están diseñando para implementar maniobras de conducción cooperativas. El objetivo es que los vehículos compartan sus trayectorias planeadas y deseadas para coordinar de manera segura y eficiente sus maniobras de conducción. Las trayectorias planeadas siempre se incluyen en los mensajes MCM transmitidos, y se usan para mejorar la predicción de las posiciones futuras de los vehículos cercanos y para detectar conflictos. Las trayectorias deseadas se utilizan para solicitar una coordinación entre vehículos [1]. A continuación, explicaremos con más detalle y resumiremos la estructura y el formato de los diferentes mensajes definidos por la ETSI.

### 2.1.1. CAM

Un CAM es el mensaje utilizado por el servicio básico de conocimiento cooperativo o CAS (*Cooperative Awareness Service*). La información a intercambiar para el conocimiento cooperativo está empaquetada en los mensajes CAM transmitidos de manera periódica. La construcción, gestión y tramitación de los CAM se realiza mediante el servicio básico de conocimiento cooperativo.

Los mensajes de conocimiento cooperativo CAM son mensajes intercambiados en la red de ITS entre vehículos para crear y mantenerse al tanto del resto de vehículos y para apoyar al funcionamiento cooperativo de los vehículos que usan la red de carreteras. Un CAM contiene información sobre el estado y los atributos del vehículo origen. El contenido del mensaje CAM varía en función del tipo de vehículo. Normalmente la información de estado incluye la hora, posición, estado del movimiento, sistemas activos... La información sobre los atributos en el caso de vehículos incluye datos sobre el tamaño, el tipo de vehículo y la función en el tráfico vial. Mediante la recepción un CAM, el vehículo receptor, es capaz de conocer la presencia, el tipo y el estado del vehículo transmisor. La información recibida puede ser empleada por el vehículo para múltiples aplicaciones. Por ejemplo, a través de la comparación de la información de estado del vehículo transmisor y el estado del vehículo receptor, este último es capaz de estimar el riesgo de colisión con el vehículo originador y si fuese necesario informar al conductor del vehículo [2].

En la Figura 1 podemos ver la estructura del mensaje CAM, el cual está compuesto de una cabecera de ITS PDU (*ITS Protocol Data Unit*) y varios contenedores. La cabecera de ITS PDU es común a múltiples mensajes. Incluye datos como el tipo de mensaje y el identificador del vehículo transmisor o de la RSU (*Road Side Unit*), la cual proporciona conectividad y soporte de información a los vehículos. Los CAM transmitidos por vehículos deben incluir un contenedor básico y un contenedor de alta frecuencia. El contenedor básico incluye información básica del vehículo que transmite el CAM, como el tipo de vehículo o su latitud y longitud. El contenedor de alta frecuencia contiene información del vehículo transmisor como su rumbo o velocidad. Los CAM también pueden tener contenedores opcionales, como el contenedor de baja frecuencia y uno o varios contenedores especiales. El contenedor de baja frecuencia incluye datos como la función del vehículo, el estado de las luces exteriores o el historial de rutas. El contenedor de vehículos especiales incluye información relacionada con la función del vehículo, y

fue diseñado para vehículos de transporte público o vehículos de emergencia, entre otros. Todos los contenedores tienen campos de datos opcionales y obligatorios [1]. Por tanto, el tamaño de los mensajes CAM dependerá del número de contenedores opcionales y de los de datos opcionales considerados.

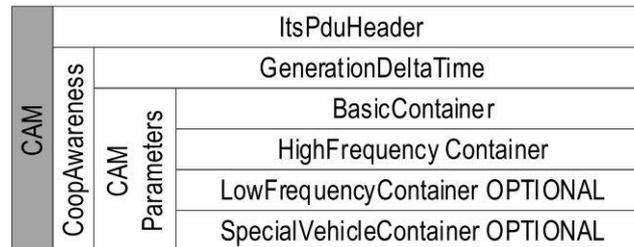


Figura 1. Estructura general de un CAM según ETSI [2].

### 2.1.2. CPM

El mensaje CPM es el utilizado por el servicio de percepción colectiva o CPS (*Collective Perception Service*), el cual se encarga de la construcción y gestión de estos mensajes. El mensaje CP ofrece a los vehículos la posibilidad de compartir información sobre objetos del entorno que han sido detectados por sensores, cámaras u otras fuentes de información disponibles en el transmisor. A continuación, mencionamos algunos casos de uso para los cuales el servicio CP es beneficioso [3]:

Detección de usuarios de carretera no conectados, como vehículos no automatizados, ciclistas, peatones... En este caso, los usuarios que no sean capaces de comunicarse por sí mismos, pueden ser detectados por estaciones o vehículos equipadas con sensores, aunque el alcance del conocimiento de estos vehículos está limitado por el campo de visión de dichos sensores. Mediante los CPM el número de usuarios reconocidos y compartidos mediante vehículos incrementa de manera considerable, y con ello también incrementa la precisión de los parámetros estimados como la posición del objeto, su velocidad, tamaño... Los vehículos reciben los CPM (aunque estas no estén capacitadas con sensores) y los reenvían a otros, pudiendo juntar la información recibida de todos los CPM en un nuevo mensaje.

El servicio CP también resulta útil para la detección de objetos críticos para la seguridad. Aparte de los usuarios de carretera que no son capaces de comunicarse, puede haber

objetos en la carretera o alrededores que supongan un riesgo potencial para los usuarios. Algunos ejemplos de estos objetos pueden ser una rama de árbol, escombros o una mercancía perdida en medio o cerca del carril. Compartir información de la presencia de estos objetos críticos para la seguridad vial permite advertir a los vehículos cercanos de la presencia de estos objetos en la vía. Además, los vehículos que no estén equipados con sensores, o con sensores que no sean capaces de detectar este tipo de objetos, pueden conocer la presencia de estos, al reenviarse CPMs entre los distintos vehículos.

En algunas situaciones puede ser significativo usar información obtenida de mensajes CAM para generar y transmitir un mensaje CPM. Por ejemplo, un sistema central que recibe CPMs y CAMs puede juntar la información recibida y reenviarla a otros vehículos para aumentar el conocimiento del entorno más allá del alcance del sensor local y de la comunicación V2X de corto alcance.

En la Figura 2 podemos observar la estructura general de un mensaje CPM. Esta estructura incluye una cabecera de ITS PDU y cinco tipos de contenedores: un contenedor de administración, un contenedor de datos de la estación, un contenedor de información del sensor, un contenedor de objetos percibidos y un contenedor de anexo de espacio libre. Además, también contiene un dato que especifica el número actual de objetos detectados. Este número no tiene que coincidir necesariamente con el número de objetos incluido en el CPM porque todos los objetos detectados no se incluyen en todos los CPM. El contenedor de administración y el contenedor de datos de la estación incluyen información sobre el transmisor. El contenedor de administración es obligatorio e incluye la posición y el tipo de transmisor (vehículo o RSU). Este contenedor también incluye un elemento de datos opcional para notificar si el CPM transmitido es parte de un CPM más grande que se ha segmentado debido a las limitaciones del tamaño del mensaje. El contenedor de datos de la estación es opcional e incluye información adicional sobre el vehículo transmisor o RSU. Para los vehículos este contenedor incluye información sobre la dinámica del vehículo como su rumbo, velocidad, ángulo y tamaño. Para las RSU, este contenedor incluye información como el identificador del segmento de carretera o el identificador de referencia de intersección. El contenedor de información del sensor, el contenedor de objetos percibidos y el contenedor de anexo de espacio libre se emplean para intercambiar información sobre los sensores de a bordo y el entorno percibido (objetos detectados y espacio libre). El contenedor de información del sensor es opcional e informa de los sensores a bordo que utiliza el transmisor (hasta 128 sensores). Para cada

sensor, este contenedor incluye el identificador del sensor, el tipo de sensor (cámara, radar o lidar) y su área de detección. El receptor puede usar esta información para estimar las zonas cubiertas por los sensores del transmisor. El contenedor de objetos percibidos también es opcional e incluye información de los objetos detectados (hasta 128 objetos detectados). Para cada objeto, incluye información como el identificador del objeto, su posición, velocidad, aceleración y el tamaño del objeto, entre otros. Finalmente, el contenedor de anexo de espacio libre también es opcional, y describe las áreas de espacio libre, dentro de las zonas de detección del sensor [1]. Esta información es útil para que el receptor pueda mejorar la estimación de áreas de espacio libre alrededor del vehículo transmisor.

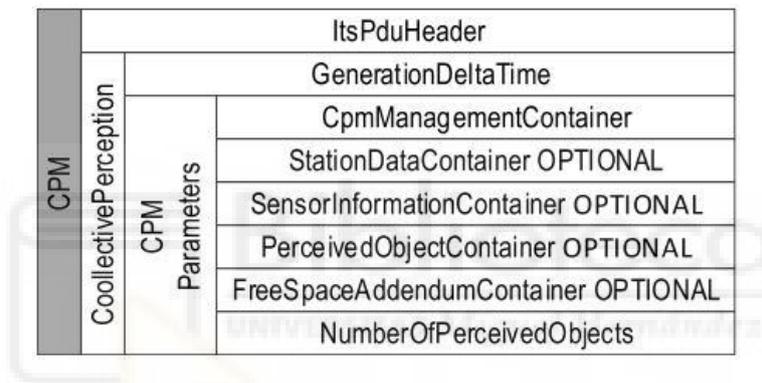


Figura 2. Estructura general de un CPM según ETSI [3].

### 2.1.3. MCM

Una maniobra cooperativa está definida como la coordinación de las maniobras de dos o más vehículos para una conducción más efectiva y segura. El comité técnico de la ETSI en ITS ha comenzado a trabajar para estandarizar un servicio de coordinación de maniobras o MCS (*Maneuver Coordination Service*), aunque aún no se ha llegado a un acuerdo de como los vehículos deben coordinar sus maniobras. La propuesta es una solución donde los vehículos coordinen sus maniobras mediante el intercambio de sus trayectorias planificadas y deseadas, mediante la comunicación V2V. La propuesta se divide en tres etapas. Primero, se detecta la necesidad de coordinar una maniobra, en segundo lugar, se acuerda el tipo de coordinación entre los vehículos involucrados y finalmente se lleva a cabo la maniobra coordinada. Esta propuesta requiere que todos los vehículos transmitan de manera continua los MCM incluyendo sus trayectorias

planificadas. Esto se hace para que los vehículos puedan detectar la necesidad coordinar una maniobra sin tener que predecir las trayectorias planificadas de otros vehículos, ya que esto puede dar lugar a errores [4].

Aunque la estandarización de los mensajes MCM aún no ha concluido, en la Figura 3 podemos ver el formato propuesto en el proyecto TransAID H2020, que sigue los debates actuales de la ETSI. Como podemos ver, los MCM están compuestos por la cabecera de ITS PDU, y los contenedores que a continuación se enumeran. El contenedor básico que incluye la posición geográfica y el tipo de transmisor (vehículo o RSU). Un contenedor de maniobras, el cual puede incluir un contenedor de maniobras de vehículo si el MCM es transmitido por un vehículo, o un contenedor de maniobra sugerida de RSU si es transmitido por la infraestructura de la carretera. Los vehículos transmiten el contenedor de maniobra del vehículo, que debe incluir siempre la trayectoria prevista del vehículo. Además, este vehículo puede incluir la trayectoria deseada. Cada trayectoria contiene un número variable de puntos de trayectoria, cada uno de ellos con sus coordenadas relativas a la posición del vehículo, el tiempo restante para alcanzar el punto, y el rumbo y velocidad del vehículo cuando alcanza el punto deseado. El contenedor también incluye información como el rumbo, velocidad o aceleración. Las RSU utilizan el contenedor de maniobra sugerida de RSU para dar soporte a la coordinación de maniobras. Este contenedor incluye una lista de avisos de circulación o sugerencias enviadas a los vehículos para ayudarles a coordinar las maniobras, pero no controla la conducción [1].

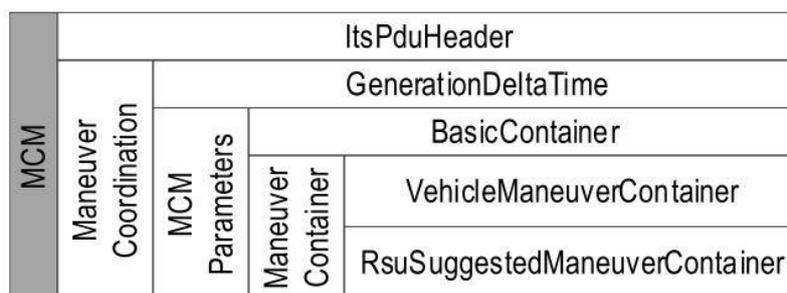


Figura 3. Estructura general de un MCM según TransAID [4].

#### 2.1.4. Aplicaciones

Los servicios anteriormente descritos proporcionan soporte a una gran variedad de aplicaciones. Una de las principales aplicaciones es la asistencia a la conducción para el conocimiento y la percepción cooperativa, ya que permite conocer diversas advertencias de colisiones, vehículos parados, vehículo de emergencia, aproximación de vehículos motorizados... Otra aplicación útil es la asistencia a la conducción mediante advertencia de peligro en la carretera, la cual se puede usar en casos como la activación de luces de freno electrónicas de emergencia, advertencia de conducción en sentido contrario, accidente y advertencia de condiciones de tráfico o meteorológicas adversas, entre otros. La conducción autónoma es otra de las aplicaciones esenciales que emplean los servicios CAM, CPM y MCM. En este caso en particular, el servicio más innovador es el MCM ya que permite coordinar las maniobras de diferentes vehículos, disminuyendo el riesgo de colisión o choque. Aunque tanto el servicio CPM para detectar la presencia de otros vehículos y el servicio CAM a la hora de conocer la velocidad de los vehículos son esenciales para la conducción autónoma. Algunos casos de uso de la conducción autónoma podrían ser, por ejemplo, para esquivar un objeto en la vía o realizar un adelantamiento.

Hay otras aplicaciones como la gestión de la velocidad mediante notificación de los límites de velocidad reglamentarios, o la navegación cooperativa usada para seguir un itinerario recomendado según la información de tráfico recibida. También existen aplicaciones basadas en la localización: notificación de un punto de interés, gestión y control automático del aparcamiento [5].

#### 2.2. Tecnología de comunicación IEEE 802.11p

Los mensajes empleados por los servicios se transmiten mediante la tecnología de comunicación IEEE 802.11p, adaptada al contexto europeo en la tecnología ITS-G5. El funcionamiento de esta tecnología de acceso radio está basado en IEEE 802.11a. Utiliza la multiplexación por división de frecuencias ortogonales o OFDM (*Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*) con 52 subportadoras, de las cuales 48 se emplean para la transmisión de datos y 4 para señales piloto. IEEE 802.11p utiliza canales de 10 MHz de ancho de banda, y trabaja en la banda de frecuencia de 5 GHz. Las modulaciones soportadas son BPSK, QPSK, 16-QAM y 64-QAM, con tasas de codificación de 1/2, 2/3 y 3/4, dando como resultado tasas de transmisión de datos desde 3Mbps hasta 27Mbps.

Si bien el estándar soporta potencias de transmisión de hasta 33dBm, los equipos reales suelen tener una potencia máxima de 23dBm [6].

Los equipos de radio en IEEE 802.11p transmiten en un modo ad-hoc básico, llamado OCB (*Outside the Context of a BSS (Basic Set of Services)*). El modo OCB simplifica el funcionamiento respecto a una red inalámbrica BSS, deshabilitando algunos procedimientos como escaneo de canal, autenticación y asociación. De esta manera, los vehículos son capaces de transmitir mensajes de manera directa e inmediata, evitando retardos innecesarios como el que se invierte en el intercambio de tramas de control [7]. Este tipo de retardos son perjudiciales para las redes vehiculares, ya que las aplicaciones de seguridad vehicular no pueden tolerar largos retardos en el establecimiento de la conexión para comunicarse con otros vehículos. De manera similar, las aplicaciones vehiculares no dedicadas a la seguridad también demandan una conexión eficiente con las estaciones de carretera que brindan servicios, debido al tiempo limitado que un vehículo permanece en el área de cobertura [8].

Para el acceso al medio (capa MAC o *Media Access Control*), IEEE 802.11p emplea acceso múltiple por detección de portadora y prevención de colisiones o CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*). En CSMA/CA, un nodo tiene que realizar un sensado del medio antes de transmitir un paquete. Si el nodo transmisor detecta que el canal está libre, el nodo puede iniciar la transmisión del paquete. Si, por el contrario, el canal se encuentra ocupado por otras transmisiones, se aplaza la transmisión hasta que el medio vuelva a estar libre. El CCA (*Clear Channel Assessment*) *threshold* es el umbral de intensidad de señal recibida o RSSI (*Received Signal Strength Indicator*) a partir del cual se considera el canal ocupado en CSMA/CA, y su valor debe ser superior a la sensibilidad del receptor. Si se supera el CCA *threshold*, el nodo detecta el canal como ocupado, y debe esperar a que el canal se desocupe para volver a transmitir. Una vez que el canal se desocupe, el nodo debe esperar un determinado tiempo de contención para volver a transmitir, con el fin de evitar colisiones debidas a la transmisión simultánea de múltiples nodos que también habían pospuesto sus transmisiones al detectar el canal como ocupado. Este tiempo de contención se calcula multiplicando el parámetro *aSlotTime* por un número entero seleccionado aleatoriamente en el intervalo  $[0, CW]$ ; donde CW es la ventana de contención (*Contention Window*). Para la transmisión de paquetes en modo *broadcast* en un canal de 10MHz,  $CW = aCW_{min} = 15$  y  $aSlotTime = 13\mu s$ . Si el canal vuelve a estar ocupado antes de que transcurra el tiempo de

contención, se establece un nuevo tiempo de contención hasta que el canal sea desocupado de nuevo [6].

### 2.3. Comunicaciones multi-canal

En la fase de implementación inicial, los C-ITS operando en la banda de 5 GHz empleaban un único canal de comunicación, para la transmisión de los distintos servicios. El despliegue inicial estaba enfocado a un conjunto limitado de aplicaciones, asumiendo que los equipos de los que disponen los vehículos y estaciones de carretera son bastante limitados. Los estudios actuales dedicados a la investigación de futuras aplicaciones C-ITS indican un crecimiento considerable en la penetración de C-ITS en los próximos años. Un canal con un ancho de banda de 10 MHz se consideraba inicialmente suficiente para aplicaciones básicas de seguridad y eficiencia del tráfico, incluyendo el intercambio de información necesario con las infraestructuras de carretera.

Con el aumento del número de C-ITS y de la tasa de equipamiento de los vehículos (lo que supone un aumento en el ancho de banda requerido por cada vehículo), así como la introducción de aplicaciones y servicios novedosos actualmente en desarrollo, la demanda del ancho de banda del sistema crece, superando la capacidad de un único canal de 10 MHz [9]. Por este motivo surge la necesidad de realizar uso de múltiples canales en las comunicaciones vehiculares.

En la Figura 4 vemos la asignación de frecuencias regulada para ITS. El espectro total es de 70 MHz. Inicialmente este espectro fue dividido en 5 canales de 10 MHz cada uno. De estos 5 canales, los dos canales inferiores desde 5855 MHz hasta 5875 MHz están destinados a aplicaciones relacionadas con la eficiencia del tráfico, mientras que la banda de 5875 MHz a 5905 MHz está destinada a aplicaciones relacionadas con la seguridad del tráfico. En la actualización del reglamento en 2020, se han puesto a disposición para el uso 20 MHz adicionales. Estos 20 MHz se dividen en una banda de 10 MHz (desde 5905 MHz hasta 5915 MHz) totalmente disponible para la regulación de la seguridad vial, y una banda de 10 MHz (desde 5915 MHz hasta 5925 MHz) dedicada tanto a la seguridad vial de C-ITS como a ITS de ferrocarril, donde el ITS de ferrocarril tiene prioridad [10]. Por tanto, el espectro total actual cuenta con 7 canales de 10 MHz cada uno, disponibles para la comunicación entre C-ITS. De estos 7 canales, en el despliegue inicial, donde se empleaba un único canal, este era el SCH0 o CCH (*Control Channel*). El CCH es

conocido como el canal de control, y actualmente se emplea como el canal de seguridad primario.

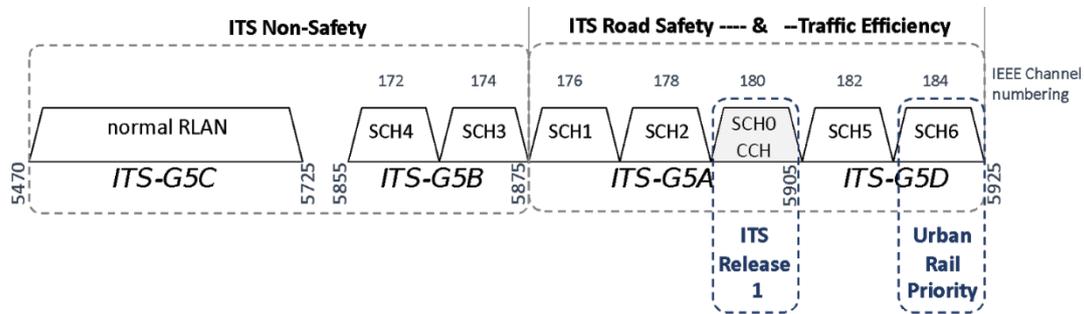


Figura 4. Asignación europea de frecuencias para ITS [10].

En general, el uso de múltiples canales ofrece diversas ventajas como la mejora del rendimiento y de la eficiencia espectral. Sin embargo, estas mejoras suponen un aumento en la complejidad de los sistemas, debido a la lógica adicional necesaria para la conmutación de canales y la necesidad de transceptores de radio dual (o en general de radio múltiple). Además, habilitar múltiples canales en la comunicación V2X es un desafío debido a las características de la red. En primer lugar, las múltiples aplicaciones que emplean las redes vehiculares tienen distintos requisitos, a los que los múltiples canales deben dar soporte. En segundo lugar, la naturaleza descentralizada y dinámica de las redes vehiculares aporta una serie de desafíos adicionales a la hora de diseñar los diversos protocolos MCO [11].

En cualquier lugar, en este trabajo se utilizan tres de los siete canales disponibles para estudiar el rendimiento de las comunicaciones V2V multicanal en sistemas vehiculares para identificar las ventajas e inconvenientes de cada una de las posibles configuraciones. En concreto, se emplearán los tres canales separando tanto servicios como vehículos en los diversos canales, para estudiar cómo afecta un aumento del número de canales en la comunicación entre C-ITS.

### **3. Diseño e implementación de comunicaciones multicanal.**

Como ya hemos comentado en apartados anteriores, el objetivo de este trabajo es la comparación entre diversas configuraciones multicanal con separación de vehículos o de servicios por canales. En este capítulo se describe el trabajo realizado en cuanto a implementación en el simulador ns-3: desarrollo de comunicaciones Wi-Fi con múltiples canales y creación de nodos con múltiples interfaces en ns-3. También se realiza una breve descripción del simulador ns-3.

#### **3.1. ns-3**

La evaluación de las diferentes configuraciones multicanal de este trabajo se ha llevado a cabo mediante el simulador ns-3. ns-3 es un simulador de redes basado en eventos discretos, diseñado principalmente para uso educativo y de investigación, en el que el núcleo de simulación y los modelos se implementan en C ++. El objetivo de ns-3 es desarrollar un entorno de simulación de código abierto y extensible orientado a la investigación de redes, que debe estar alineado con las necesidades de simulación de la investigación en redes actuales. El proyecto de ns-3 se esfuerza por mantener un entorno abierto para que los investigadores puedan contribuir y compartir su software. El proyecto de ns-3 se compromete a construir un núcleo de simulación sólido que esté bien documentado, sea fácil de usar y depurar y que satisfaga las necesidades de todo el flujo de trabajo de la simulación, desde la configuración de la simulación hasta la recopilación y el análisis de trazas. El desarrollo de ns-3 comenzó en 2011, y sigue activo hasta hoy día, lanzándose cada 3-4 meses una nueva versión, con actualizaciones. Los principales encargados del mantenimiento de ns3 tienen la responsabilidad y autoridad de supervisar distintas partes del código base. Estos desarrolladores trabajan junto con contribuyentes externos de ns-3 (se trata de un entorno de simulación de código abierto) para revisar posibles parches o realizar extensiones de sus respectivos módulos. En general, se encargan de realizar diversas revisiones del código cada cierto tiempo, corregir errores y contestar a las preguntas realizadas tanto en los correos pertenecientes a la lista de desarrolladores activos (1560 hasta enero de 2018) como en los correos electrónicos de los usuarios del foro para usuarios de ns-3. En el grupo para los usuarios de ns-3 habían cerca de los 8200 participantes hasta enero de 2018, alcanzando aproximadamente 700 publicaciones al mes [12]. Los principales desarrolladores de ns-3 son Tom Henderson (líder), Peter Barnes, Ankit Deepak, Gustavo Carneiro, Biljana Bojovic, Cristiano

Tapparello, Tommaso Pecorella, Mohit Tahiliani, Vivek Jain, Marco Miozzo, Manuel Requena, Alexander Krotov, Zoraze Ali, Stefano Avallone, Federico Guerra, Sebastien Deronne, Getachew Redieteb, Matias Richart y Abhijith Anilkumar [13]. Cada uno de ellos está especializado en uno o múltiples módulos de los disponibles. El Consorcio ns-3 de la universidad de Washington, es un conjunto de organizaciones cooperando para apoyar el proyecto de código abierto, las cuales dan soporte a las actividades administrativas y compras necesarias para el buen funcionamiento del proyecto. La afiliación al Consorcio está abierta a aquellas instituciones que lo deseen, mediante la firma del convenio de afiliación y el pago de las cuotas anuales.

Además, la infraestructura de ns-3 fomenta el desarrollo de modelos de simulación que sean lo suficientemente realistas para permitir que ns-3 se use como un emulador de red en tiempo real, interconectado con el mundo real y que permita reutilizar muchas de las implementaciones de protocolos existentes en la práctica. El núcleo de simulación de ns-3 permite la investigación tanto en redes basadas en IP como en redes no basadas en IP. La mayoría de los usuarios se enfoca en realizar simulaciones inalámbricas/IP que involucran modelos para Wi-Fi, WiMAX o LTE para las capas 1 y 2, y una variedad de protocolos de enrutamiento estáticos o dinámicos [14].

ns-3 está diseñado como un conjunto de bibliotecas que pueden combinarse entre sí y con otras bibliotecas de software externas. Mientras algunas plataformas de simulación proporcionan a los usuarios un entorno de interfaz gráfica de usuario único e integrado en el cual se llevan a cabo todas las tareas, ns-3 se caracteriza por ser más modular en este sentido. Con ns-3 pueden usar distintos animadores externos, y herramientas de análisis y visualización de datos. Sin embargo, los usuarios deben trabajar mediante línea de comandos y con herramientas de desarrollo de software C++ y/o Python. ns-3 no es un producto de software con soporte oficial de ninguna empresa, y el soporte se realiza en el foro existente para usuarios de ns-3 [15].

### 3.2. Comunicaciones Wi-Fi en ns-3 con múltiples canales

El primer paso para poder utilizar múltiples canales radio en las distintas simulaciones es crear estos canales. Para ello en primer lugar es necesario crear un objeto `YansWifiPhy` por cada uno de los canales empleados en los distintos escenarios (como usamos tres canales, crearemos tres objetos de este tipo). El objeto `YansWifiPhy` se encarga de enviar y recibir la señal inalámbrica del canal. Para ello, `YansWifiPhy` decide si cada trama se

decodifica con éxito o no dependiendo de la intensidad de la señal recibida y del ruido y la interferencia [16]. Mediante el objeto `YansWifiPhy`, creamos un modelo de capa física de IEEE 802.11. Además de crear el objeto `YansWifiPhy`, establecemos una configuración que caracterizará la capa física. Uno de los atributos más importantes es la frecuencia de la señal portadora, la cual cambiará de un canal a otro. El resto de los atributos que establecemos en un objeto `YansWifiPhy` no cambian de un canal a otro, ya que principalmente sirven para calcular la probabilidad de decodificar una trama con éxito, en función de la señal. Los parámetros que permanecen sin alterar son de un canal a otro son: `TxPowerStart`, `TxPowerEnd`, `RxNoiseFigure`, `CcaEdThreshold` y `RxSensitivity`. A continuación, vamos a enumerar y a definir según [17] los parámetros del objeto `YansWifiPhy` que nosotros hemos decidido modificar (el resto tendrán el valor por defecto):

- `ChannelNumber`: Siempre que se establezca un valor distinto de cero, este atributo controlará la asignación de la frecuencia central y el ancho de banda del canal. Los números de canal están definidos para los estándares. En nuestro caso nos interesa conocer los de la banda de 5 GHz. Los números de canal conocidos, están definidos en el archivo de implementación de ns3: `src/wifi/model/wifi-phy.cc`. Si fuese necesario, este archivo puede ser modificado por los usuarios para definir nuevos canales. Los canales definidos para los estándares de 5 GHz tienen un ancho de banda de 10 MHz para IEEE 802.11p, y son los siguientes: 172, 174, 176, 178, 180, 182, 184. Hemos extraído del archivo `wifi-phy.cc` las líneas de código correspondientes a los valores de las frecuencias de cada uno de estos números de canal y podemos observarlos en la Figura 5 donde el primer número hace referencia al número de canal, el penúltimo hace referencia a la frecuencia del canal en MHz, y el último corresponde al ancho de banda del canal (10 MHz en todos los casos). Por ejemplo, en la línea 154 vemos que el canal 172 corresponde a una frecuencia de 5860 MHz (5.86 GHz), y tiene un ancho de banda de 10 MHz.

```
IEEE 802.11p 10 MHz channels at the 5.855-5.925 band
```

```
154. { { {172, WIFI_PHY_BAND_5GHZ}, WIFI_PHY_STANDARD_80211p}, {5860, 10} },  
155. { { {174, WIFI_PHY_BAND_5GHZ}, WIFI_PHY_STANDARD_80211p}, {5870, 10} },  
156. { { {176, WIFI_PHY_BAND_5GHZ}, WIFI_PHY_STANDARD_80211p}, {5880, 10} },  
157. { { {178, WIFI_PHY_BAND_5GHZ}, WIFI_PHY_STANDARD_80211p}, {5890, 10} },  
158. { { {180, WIFI_PHY_BAND_5GHZ}, WIFI_PHY_STANDARD_80211p}, {5900, 10} },  
159. { { {182, WIFI_PHY_BAND_5GHZ}, WIFI_PHY_STANDARD_80211p}, {5910, 10} },  
160. { { {184, WIFI_PHY_BAND_5GHZ}, WIFI_PHY_STANDARD_80211p}, {5920, 10} },
```

Figura 5. Números de canal definidos.

- TxPowerStart: Nos da el mínimo nivel de transmisión disponible (dBm). Coincide con la potencia mínima definida en los estándares.
- TxPowerEnd: Establece el máximo nivel de transmisión disponible (dBm). Coincide con la potencia máxima definida en los estándares.
- RxNoiseFigure: Pérdida en dB en la relación señal /ruido debido a la no idealidad del receptor. Es decir, la diferencia en dB entre la salida de ruido de un receptor real y la salida de ruido de un receptor ideal con la misma ganancia y ancho de banda que el real, cuando ambos receptores están conectados a una fuente con la temperatura de ruido estándar (normalmente 290 K).
- CcaEdThreshold: La energía de una señal recibida sin Wi-Fi debe superar este umbral (dBm) para que la capa física declare el estado ocupado (bussy).
- RxSensitivity: La energía de una señal recibida debe ser mayor que este umbral (dBm) para que la capa física detecte la señal.

El siguiente paso es crear un objeto YansWifiChannel por cada canal. Este objeto está diseñado para usarse junto al objeto YansWifiPhy, y soporta un modelo de pérdidas por propagación (PropagationLossModel) y un modelo de retardo de propagación (PropagationDelayModel). Estos modelos de propagación hay que configurarlos antes de usar el canal. Debemos asignar el canal a la capa física.

En la Figura 6 vemos las líneas de código necesarias para la creación y configuración tanto del objeto `YansWifiPhy` como del objeto `YansWifiChannel`. El empleo de los *helper* en ns-3 es bastante útil a la hora de crear algunos objetos, ya que conseguimos que los programas sean más fáciles tanto de escribir como de leer, además de facilitar la creación y gestión de los propios objetos. El fragmento de código que se muestra en la Figura 6 ha sido empleado en nuestro estudio para la configuración del canal 1. Como podemos ver, al canal 1 del estudio se le asigna el número de canal 180, que corresponde a una frecuencia de 5.9 GHz. La configuración de los otros dos canales empleados en el estudio se realiza de manera análoga a la del canal 1, pero modificando el número de canal e indicando la frecuencia correspondiente en el modelo de pérdidas por propagación. Para los canales 2 y 3 se han creado dos nuevos objetos `YansWifiPhy`, llamados `YansPhy2` y `YansPhy3` respectivamente. También se han creado dos nuevos objetos `YansWifiChannel` para los canales 2 y 3 llamados `YansChannel2` y `YansChannel3`. El número de canal establecido para el objeto `YansPhy2` es el 176, que corresponde a una frecuencia de 5.88 GHz. Para el `YansPhy3` el número de canal que hemos fijado es el 178, que corresponde a una frecuencia de 5.89 GHz. La radiopropagación se configura mediante el modelo de propagación Winner+ B1, el cual se explica en la sección 4.1, en la que se hace referencia a los parámetros de simulación. El modelo se configura mediante la función `AddPropagationLoss`.

```

YansWifiPhyHelper YansPhy1 = YansWifiPhyHelper::Default ();

YansPhy1.Set ("TxPowerStart", DoubleValue (23.0));
YansPhy1.Set ("TxPowerEnd", DoubleValue (23.0));
YansPhy1.Set ("RxNoiseFigure", DoubleValue (9));
YansPhy1.Set ("CcaEdThreshold", DoubleValue (-85));
YansPhy1.Set ("RxSensitivity", DoubleValue (-85));
YansPhy1.Set ("ChannelNumber", UIntegerValue (180));

YansWifiChannelHelper YansChannel1;

YansChannel1.AddPropagationLoss ("ns3::WINNERBlplusFreeWayPropagationLossModel", "Frequency", DoubleValue (5.9e9), "StdShadowFading", DoubleValue (3.0));
YansChannel1.SetPropagationDelay ("ns3::ConstantSpeedPropagationDelayModel");

YansPhy1.SetChannel (YansChannel1.Create ());

```

Figura 6. Creación y configuración del objeto YansWifiPhy y del objeto YansWifiChannel de un canal.

A continuación, crearemos un objeto común a todos los canales de tipo Wifi80211p, que es un objeto de tipo WifiNetDevice, en particular de Wi-Fi IEE 802.11p. El WifiNetDevice modela un controlador de interfaz de red inalámbrica basado en el estándar IEEE 802.11 (en nuestro caso IEE 802.11p) y se encarga de agrupar a todos los objetos relacionados con Wi-Fi. También es necesario crear otro objeto común a todos los canales: NqosWaveMac. El NqosWaveMac, será el objeto que establecerá las características de la subcapa MAC del dispositivo (capa inferior de la capa de enlace de datos). Por último, tenemos que crear un objeto de tipo NetDeviceContainer por cada canal, el cual contiene un vector de punteros a objetos de tipo NetDevice. Un objeto NetDevice es la interfaz entre la capa de red y las inferiores. Una vez creado el NetDeviceContainer, instalamos en cada uno de los nodos o vehículos de la simulación el NetDevice correspondiente a cada canal, indicando la capa física que queremos usar (dependiendo de la frecuencia), la capa MAC que vamos a emplear (en nuestro caso siempre es la misma) y en qué nodos queremos que esté disponible.

En la Figura 7 podemos observar el proceso que acabamos de describir. En nuestro caso hemos denominado wifiMac a nuestro NqosWaveMac. Nuestro Wifi80211p se llama wifi. El NetDeviceContainer correspondiente al canal 1 es el devices\_yans1, el correspondiente al canal 2 es el devices\_yans2, y el correspondiente al canal 3 es el devices\_yans3. Como podemos ver, en el devices\_yans1 instalamos en cada nodo un NetDevice con las características de la capa física del canal 1, en el devices\_yans2 tenemos las características de la capa física del canal 2, y en el devices\_yans3 tenemos las características correspondientes a la capa física del canal 3. Por tanto, cada nodo dispondrá de tres NetDevice, en el que cada uno corresponde a uno de los tres canales disponibles. Esto es necesario para que todos los nodos tengan las características de todas las capas físicas que hemos creado, ya que de esta manera todos tendrán acceso a los múltiples canales, pues como hemos explicado anteriormente, cada capa física trabaja a una frecuencia.

```
NqosWaveMacHelper wifiMac = NqosWaveMacHelper::Default();
wifiMac.SetType("ns3::OcbWifiMac", "QosSupported", BooleanValue(false));

Wifi80211pHelper wifi = Wifi80211pHelper::Default();
wifi.SetStandard(WIFI_PHY_STANDARD_80211_10MHZ);

NetDeviceContainer devices_yans1;
devices_yans1 = wifi.Install(YansPhy1, wifiMac, MultiChannelNodes);

NetDeviceContainer devices_yans2;
devices_yans2 = wifi.Install(YansPhy2, wifiMac, MultiChannelNodes);

NetDeviceContainer devices_yans3;
devices_yans3 = wifi.Install(YansPhy3, wifiMac, MultiChannelNodes);
```

Figura 7. Creación y configuración de los NetDeviceContainer de cada canal.

### 3.3. Creación de nodos con múltiples interfaces en ns-3

Para que los vehículos puedan disponer de varias interfaces, es importante explicar primero el proceso que se lleva a cabo para conectar uno de ellos a cualquiera de los canales. En el siguiente ejemplo, el cual podemos ver en la Figura 8, vemos el código que hemos empleado para que todos los vehículos transmitan todos sus mensajes por el canal 1: simulación con un solo canal radio y una sola interfaz radio. En el código completo tenemos 10 variables booleanas, una por cada simulación, y por defecto estas variables tienen el valor de *false*. Por línea de comandos, cada vez que ejecutamos el código, pasamos el identificador de la simulación que queremos ejecutar, y según la simulación escogida, el valor de una de las variables booleanas pasará a ser *true*. En la Figura 8 contemplamos el caso en el que la variable correspondiente a la simulación número 1 (*sim1*) sea *true*. En este caso el bucle *for* recorre todos los vehículos de la simulación, y para cada uno de ellos vamos a obtener un objeto de tipo *NetDevice*, al que llamaremos *device*. Para ello extraeremos del *NetDeviceContainer* *devices\_yans1* (el correspondiente al canal 1) el *WifiNetDevice* de cada vehículo. Todos los *NetDevice* del *devices\_yans1*, tendrán un *WifiNetDevice* con la capa física del canal 1, y por tanto trabajarán a la frecuencia del canal 1. Al llamar a la función *GenerateAll* pasaremos el *NetDevice* (*device*), el cual opera a la frecuencia del canal deseado, y de esta manera el vehículo estará conectado a dicho canal.

También obtenemos una IP local para el socket, del rango de direcciones que hemos asignado al *devices\_yans1*, o en cada caso, al *NetDeviceContainer* de cada canal. Por último, llamamos a la función “*GenerateAll*”, la cual podemos observar en la Figura 9 (primera parte) y Figura 10 (segunda parte) y que explicaremos un poco más tarde. Mediante la orden *Simulator::ScheduleNow* programamos que la llamada a la función se ejecute a la hora virtual de simulación actual; es decir que se ejecute justo en el momento de llamada.

```

if(sim1==true){
    for (i = 0; i < NumCars; i++) {
        Ptr<NetDevice> device = devices_yans1.Get(i)
>GetObject<WifiNetDevice>();
        InetSocketAddress local =
InetSocketAddress(allInterfaces_Yans1.GetAddress(i, 0), 80);

        Simulator::ScheduleNow(&GenerateAll,device,tid,local, caso=1);
    }
}

```

Figura 8. Asignación de interfaces en la simulación con un canal radio en la que todos los vehículos tienen una interfaz radio.

En la Figura 9 tenemos la primera parte del código correspondiente a la función `GenerateAll`. Esta función se encarga de conectar cada interfaz de cada vehículo al canal deseado, como hemos comentado. Pasando el `NetDevice` del canal al que queremos conectar un determinado vehículo, establecemos la interfaz con el canal, pero es necesario indicar qué tipo de paquetes queremos generar, o por el contrario si no queremos generar ningún tipo de paquete, en cuyo caso solo se empleará el canal para la recepción de paquetes. Esto lo indicamos mediante el valor pasado a la función `GenerateAll` en el parámetro “caso”. En esta primera parte podemos observar que el parámetro “caso” pasado en la llamada de la función coincide con el parámetro “select” de la declaración de la misma. También podemos ver que tenemos 5 variables booleanas: `all`, `CAMyCPM`, `onlyCAM`, `onlyCPM` y `onlyMCM`. Según el valor pasado a la variable “caso” al llamar una función, el valor de una de estas variables pasará a ser `true`. Podemos ver cuál de las variables pasará a ser `true` según el valor pasado en la estructura del *switch*: si el valor pasado es 1 se activará la variable `all`, si el valor pasado es 2 se activará la variable `CAMyCPM`, etc.

En la Figura 10 tenemos la segunda parte de la función `GenerateAll`. En primer lugar, se obtiene el nodo del cual hemos pasado el `NetDevice` y crearemos un socket para el intercambio del flujo de información de este nodo o vehículo. Luego vinculamos el socket creado con el `NetDevice` (`device1`), permitiendo la comunicación del vehículo en el canal o frecuencia deseados. Mediante el `SetReceiveCallback` indicamos que cada vez que se ha recibido un paquete queremos invocar a la función `ReceivePacket`, la cual se encarga

de recibir los paquetes y transmitirlos a las capas superiores. De esta manera permitimos la recepción de paquetes en el canal deseado. Por último, tenemos el medio para transmitir la información en el canal que queremos, pero hasta ahora no se están generando paquetes, para ello tenemos la estructura *if-else*. En esta estructura contemplamos las variables booleanas comentadas en la primera parte de la función *GenerateAll*, y según cuál de ellas tenga un valor *true*, generaremos paquetes de distintos tipos. Si la variable *all* tiene un valor *true*, generaremos paquetes de todos los tipos (CAM, CPM y MCM). Si es la variable *CAMyCPM* la que tiene un valor *true*, generaremos paquetes CAM y CPM. Si las variables *onlyCAM*, *onlyCPM* o *onlyMCM* tienen valor *true*, se generarán solamente paquetes CAM, CPM o MCM respectivamente. Es importante destacar, que cada tipo de mensaje tiene un instante de inicio aleatorio, para que los vehículos que implementen varios servicios simultáneamente no comiencen a transmitir los mensajes correspondientes a estos a la vez.



```

void GenerateAll (Ptr<NetDevice> device1, TypeId tid, InetSocketAddress
local1, uint32_t select) {

    bool all=false;
    bool CAMyCPM=false;
    bool onlyCAM=false;
    bool onlyCPM=false;
    bool onlyMCM=false;

    uint32_t myselect=select;

    switch(myselect) {
        case 1:
            all=true;
            break;
        case 2:
            CAMyCPM=true;
            break;
        case 3:
            onlyCAM=true;
            break;
        case 4:
            onlyCPM=true;
            break;
        case 5:
            onlyMCM=true;
            break;
    }
}

```

Figura 9. Primera parte de la función GenerateAll, mediante la cual se asignan las interfaces y los mensajes transmitidos en cada canal.

```

Ptr<Node> node = device1->GetNode();
Ptr<Socket> NEWsocket = Socket::CreateSocket(node, tid);
NEWsocket->BindToNetDevice(device1);

device1->SetReceiveCallback (MakeCallback(&ReceivePacket));

if(all){
    Simulator::Schedule(Seconds(start), &GeneratePacketsCAM, NEWsocket,
CAMSize, inicialTime, interCAMInterval);
    Simulator::Schedule(Seconds(start + 0.5* (var->GetValue())) ,
&GeneratePacketsCPM, NEWsocket, CPMSize, inicialTime,
interCPMInterval);
    Simulator::Schedule(Seconds(start + var->GetValue()),
&GeneratePacketsMCM, NEWsocket, MCMSize, inicialTime,
interMCMInterval);
}
else if (CAMyCPM){
    Simulator::Schedule(Seconds(start), &GeneratePacketsCAM, NEWsocket,
CAMSize, inicialTime, interCAMInterval);
    Simulator::Schedule(Seconds(start + var->GetValue()),
&GeneratePacketsCPM, NEWsocket, CPMSize, inicialTime,
interCPMInterval);
}
else if(onlyCAM){
    Simulator::Schedule(Seconds(start + 0.5* (var->GetValue())) ,
&GeneratePacketsCAM, NEWsocket, CAMSize, inicialTime,
interCAMInterval);
}
else if (onlyCPM){
    Simulator::Schedule(Seconds(start), &GeneratePacketsCPM, NEWsocket,
CPMSize, inicialTime, interCPMInterval);
}
else if (onlyMCM){
    Simulator::Schedule(Seconds(start+ var->GetValue()),
&GeneratePacketsMCM, NEWsocket, MCMSize, inicialTime,
interMCMInterval);
}
}

```

Figura 10. Segunda parte de la función GenerateAll, mediante la cual se asignan las interfaces y los mensajes transmitidos en cada canal.

Para terminar de comprender como establecer varias interfaces, vamos a explicar algunos ejemplos más de las simulaciones que hemos realizado en el estudio. En la Figura 11 tenemos el código correspondiente a la simulación en la que tenemos dos canales radio y la mitad de los vehículos transmiten todos sus mensajes por el canal 1 y la otra mitad por el canal 2, pero todos tienen dos interfaces radio. Para la primera mitad de los vehículos (bucle *for* hasta  $\text{Numcars}/2$ ), tenemos dos NetDevice. El primer NetDevice es el que hemos llamado *device*, el cual obtenemos del *devices\_yans1* (canal 1), y se usa para llamar a la función *GenerateAll* con la variable *caso=1*, por lo que estos vehículos transmitirán todos los tipos de mensaje por el canal 1, y también serán capaces de recibir por este canal. El segundo NetDevice es el que hemos denominado *device2*, que se obtiene del *devices\_yans2* (canal 2) y se usa para llamar a *GenerateAll* con la variable *caso=100*. Los valores de la variable *caso* con los que generábamos algún tipo de paquete iban de 1 a 5, por lo que estableciendo un valor fuera de este rango, establecemos la interfaz en el canal deseado solo en modo recepción. De esta manera, llamando a *GenerateAll* con el *device2* y un valor en la variable *caso=100*, establecemos en la primera mitad de los vehículos el canal 2 como segunda interfaz en modo recepción. Para la segunda mitad (bucle *for* desde  $\text{Numcars}/2$  hasta *Numcars*) también tenemos dos NetDevice. El primer NetDevice para estos vehículos se obtiene del *devices\_yans2*, lo hemos llamado *device* y se usa para llamar a la función *GenerateAll* con la variable *caso=1*, de esta manera los vehículos transmiten todos sus mensajes por el canal 2 y también pueden recibir por este. El segundo NetDevice es el *device1*, el cual se obtiene de *devices\_yans1* y se usa para llamar a *GenerateAll* con la variable *caso=100*, habilitando el canal 1 como segunda interfaz en modo recepción.

```

else if(sim6==true){

    for(i = 0; i < NumCars/2; i++){
        Ptr<NetDevice> device = devices_yans1.Get(i)-
>GetObject<WifiNetDevice>();
        InetSocketAddress local =
InetSocketAddress(allInterfaces_Yans1.GetAddress(i, 0), 80);

        Simulator::ScheduleNow(&GenerateAll,device,tid,local, caso=1);

        Ptr<NetDevice> device2 = devices_yans2.Get(i)-
>GetObject<WifiNetDevice>();
        InetSocketAddress local2 =
InetSocketAddress(allInterfaces_Yans2.GetAddress(i, 0), 80);

        Simulator::ScheduleNow(&GenerateAll,device2,tid,local2, caso=100);
    }

    for(i = (NumCars/2); i < NumCars; i++){
        Ptr<NetDevice> device = devices_yans2.Get(i)-
>GetObject<WifiNetDevice>();
        InetSocketAddress local =
InetSocketAddress(allInterfaces_Yans2.GetAddress(i, 0), 80);

        Simulator::ScheduleNow(&GenerateAll,device,tid,local, caso=1);

        Ptr<NetDevice> device1 = devices_yans1.Get(i)-
>GetObject<WifiNetDevice>();
        InetSocketAddress local1 =
InetSocketAddress(allInterfaces_Yans1.GetAddress(i, 0), 80);

        Simulator::ScheduleNow(&GenerateAll,device1,tid,local1, caso=100);
    }
}
}

```

Figura 11. Asignación de interfaces en la simulación con dos canales radio en la que todos los vehículos tienen dos interfaces radio.

Por último, en la Figura 12, vamos a explicar el código correspondiente a una simulación en la que los canales se usan para transmitir distintos servicios en cada uno de ellos, en vez de repartir la carga de vehículos. En particular, vamos a tratar la simulación en la que los mensajes CAM y CPM se transmiten por el canal 1, mientras que los mensajes MCM se transmiten por el 2. Además, en esta simulación la mitad de los vehículos tienen una interfaz (la de CAM y CPM por el canal 1), y la otra mitad tienen dos interfaces. En esta simulación, para la primera mitad de los coches solo tenemos un NetDevice llamado device, el cual se obtiene del devices\_yans1, y se usa para llamar a la función GenerateAll con la variable caso=2. Un valor de 2 en esta variable nos indicaba que se generaban paquetes de tipo CAM y CPM. Por tanto, esta primera mitad de los vehículos tienen una sola interfaz, correspondiente al canal 1, por el que son capaces de transmitir (solo paquetes de tipo CAM y CPM) y recibir. Para la segunda mitad de los vehículos tenemos dos NetDevice. El primero es el que hemos llamado device1, obtenido del devices\_yans1 y se usa para llamar a GenerateAll, al igual que la primera mitad de vehículos con la variable caso=2, para transmitir solamente mensajes de tipo CAM y CPM por este canal. Además, tenemos un segundo NetDevice llamado device2, que se obtiene del device\_yans2, y se usa para llamar a GenerateAll con la variable caso=5. Un valor de la variable caso=5, indicaba activaba la variable onlyMCM de la función GenerateAll, haciendo que solo se generen paquetes de tipo MCM, por lo que estos vehículos serán capaces de transmitir mensajes MCM por el canal 2. Por tanto, todos los vehículos de esta simulación pueden transmitir y recibir mensajes CAM y CPM por el canal 1, y la segunda mitad de los vehículos pueden transmitir y recibir mensajes MCM por el canal 2.

Debemos recalcar que, aunque en las simulaciones la asignación de los canales y de las interfaces de las que dispone cada vehículo se realice en orden (la primera o segunda mitad), en realidad cada vehículo se coloca en una posición aleatoria del escenario, por lo que esta asignación realmente también será aleatoria. Esto es así para todas las simulaciones, incluso en las que tenemos tres canales.

```

else if(sim9==true){

    for(i = 0; i < NumCars/2; i++)    Ptr<NetDevice> device =
devices_yans1.Get(i)->GetObject<WifiNetDevice>();

    InetSocketAddress local =
InetSocketAddress(allInterfaces_Yans1.GetAddress(i, 0), 80);

    Simulator::ScheduleNow(&GenerateAll,device,tid,local, caso=2);
}

for(i = (NumCars/2); i < NumCars; i++){

    Ptr<NetDevice> device1 = devices_yans1.Get(i)-
>GetObject<WifiNetDevice>();

    InetSocketAddress local1 =
InetSocketAddress(allInterfaces_Yans1.GetAddress(i, 0), 80);

    Simulator::ScheduleNow(&GenerateAll,device1,tid,local1, caso=2);

    Ptr<NetDevice> device2 = devices_yans2.Get(i)-
>GetObject<WifiNetDevice>();

    InetSocketAddress local2 =
InetSocketAddress(allInterfaces_Yans2.GetAddress(i, 0), 80);

    Simulator::ScheduleNow(&GenerateAll,device2,tid,local2, caso=5);
}
}

```

Figura 12. Asignación de interfaces en la simulación con dos canales radio y separación de servicios por canales, en la que coexisten vehículos con diferentes servicios.

En la Figura 13 tenemos el diagrama de flujo que tendríamos que seguir para realizar una distribución de servicios por canales, y en la Figura 14 tenemos el diagrama de flujo correspondiente a la distribución de vehículos por canales. En ambos casos partimos de que los canales ya se han creado como se explica en el apartado 3.2 y nos centramos en el camino a seguir para un vehículo o grupo de vehículos. Siguiendo estos diagramas de flujo, podemos realizar múltiples escenarios, como los que hemos expuesto en la Figura 8, Figura 11 o Figura 12.

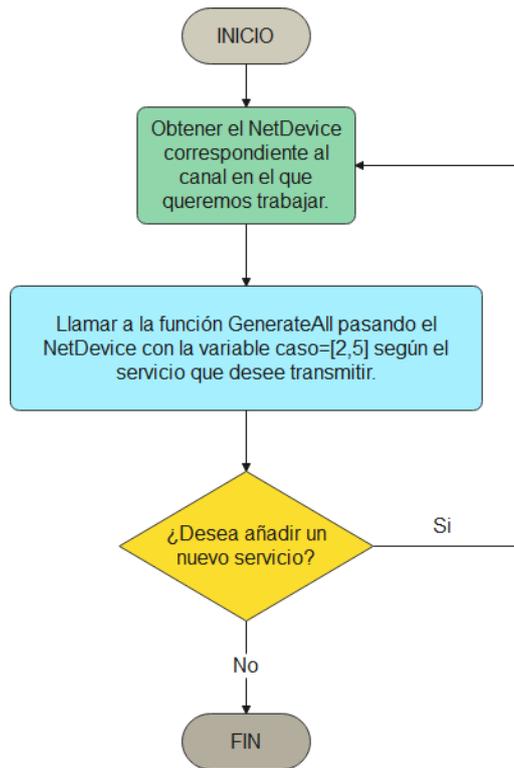


Figura 13. Diagrama de flujo para una distribución de servicios por canales.

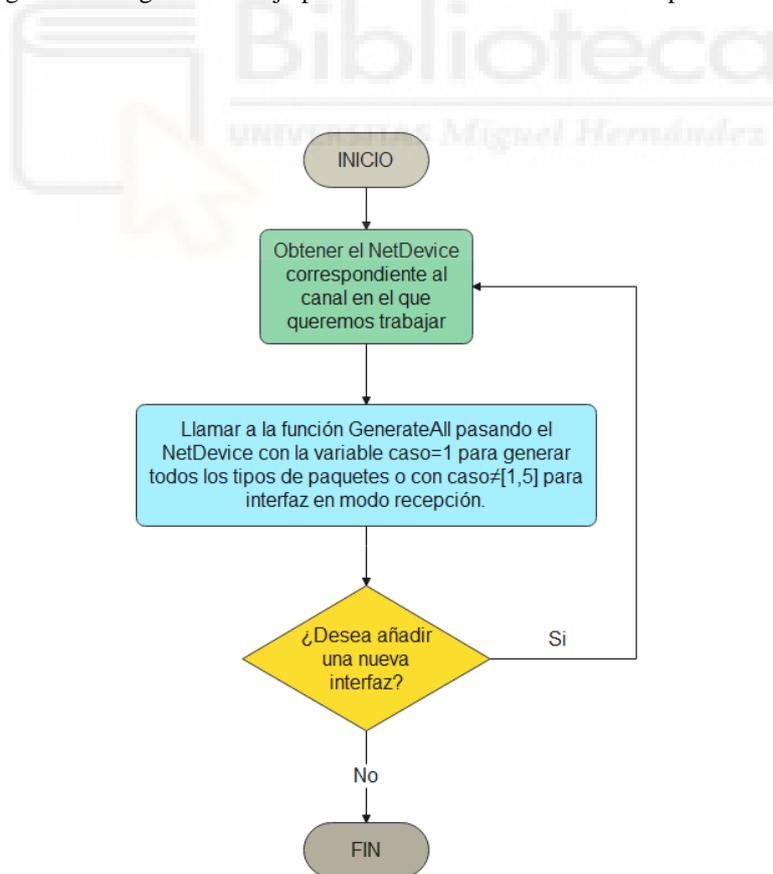


Figura 14. Diagrama de flujo para una distribución de vehículos por canales.

### 3.4. Métricas.

Las métricas que hemos empleado para el análisis de las simulaciones son la CBR (*Channel Busy Ratio*) y la PDR (*Packet Delivery Ratio*).

La PDR se define como el ratio de paquetes que en promedio se reciben correctamente en función de la distancia entre el transmisor y el receptor, y es una métrica que cuantifica la fiabilidad de las comunicaciones. Para implementar esta métrica en ns-3, tenemos dos funciones mediante las cuales almacenamos una serie de datos en dos archivos de texto separados por comas, que posteriormente nos servirán para obtener las gráficas: una función llamada `LogPacketsTx` y otra llamada `LogPacketsRxOk`. Inicialmente en la función `LogPacketsTx`, almacenamos una fila cada vez que se transmite un paquete con los siguientes datos: identificador del paquete y distancia entre el transmisor y el receptor. A su vez, en la función `LogPacketsRxOk`, cargamos una fila cada vez que un paquete se reciba de manera correcta, con los mismos datos: identificador del paquete y distancia entre transmisor y receptor. Para extender esta métrica hemos añadido dos columnas nuevas al archivo, que contienen información sobre el tipo de mensaje transmitido o recibido, y el canal. Para ello, ns-3 proporciona un mecanismo de seguimiento (*Tracing*), el cual emplea fuentes de rastreo llamadas *Trace sources* que sirven para registrar eventos ocurridos en la simulación, como el envío o la recepción de un paquete, y proporcionan acceso a datos de capas inferiores. Por ejemplo, pueden proporcionar acceso al contenido de un paquete. Pues en nuestro caso, se usa un *string* llamado `context`, proporcionado por las *Trace Sources*, mediante el cual tenemos acceso a distintos parámetros. El parámetro de nuestro interés en este *string* es el número del canal (que coincide con el `NetDevice` usado por el nodo), por lo que filtramos esta información del *string* y la almacenamos en el archivo. Para obtener el tipo de mensaje es más sencillo: podemos obtener directamente el tamaño del paquete recibido, ya que todos los objetos de tipo *packet* tienen una función para ello llamada `GetSize()`. Una vez obtenido el tamaño, como conocemos el tamaño de cada uno de los mensajes, mediante una estructura *if-else*, almacenamos en una variable un valor de 1 si el tamaño coincide con el de los mensajes CAM, un valor de 2 si coincide con el tamaño de los CPM y un valor de 3 si coincide con el tamaño de los mensajes MCM. Por último, almacenamos el valor de esta variable también en el archivo. Por lo que finalmente para cada paquete recibido o transmitido tendremos cuatro columnas con la siguiente información. Identificador del paquete, distancia transmisor-receptor, tipo de mensaje y canal.

La métrica CBR sirve para medir la carga en un canal y se define como la proporción de tiempo que un vehículo determina el canal como ocupado. Para la CBR también hemos almacenado el identificador del canal, siguiendo el mismo proceso que en la PDR. En este caso solo tenemos una función en ns-3 encargada de generar el fichero de texto separado por comas con los datos necesarios para la generación de las gráficas, ya que lo que esta métrica cuantifica es el estado del canal en distintos instantes: si se encuentra transmitiendo, recibiendo, ocupado o libre. Para la PDR eran necesarios dos ficheros distintos, ya que para cuantificar esta métrica es necesario dividir el número de paquetes recibidos, los cuales se almacenan en un fichero entre el número total de paquetes transmitidos, que almacenamos en otro fichero.

El último paso para poder obtener una PDR o CBR en función del canal o del mensaje se debe realizar en un script de Matlab que procese los datos generados por ns-3. Para ello, debemos tratar el archivo que contiene todos los datos como una matriz. Si por ejemplo queremos obtener una de estas métricas en función del canal 1, buscaremos en la columna en la que almacenamos los datos correspondientes al número de canal, todos los valores que sean distintos de 1 y eliminaremos estas filas. El procedimiento es el mismo si queremos filtrar según el tipo de mensaje: buscaremos en la columna en la que almacenamos el tipo de mensaje y eliminaremos todas las filas que tengan un valor distinto al valor del mensaje deseado. Para la PDR podemos incluso obtener un tipo de mensaje concreto en un canal determinado de la siguiente manera: una vez que hemos filtrado la matriz total según un número de canal, podemos volver a filtrar la matriz obtenida según un tipo de mensaje en particular.

#### **4. Simulación y análisis de resultados.**

En esta sección se presentan las distintas simulaciones que hemos realizado para el estudio de dimensionado de comunicaciones multicanal. Analizaremos los resultados que hemos obtenido en cada uno de los distintos escenarios. En el apartado 4.1 se describen los principales parámetros configurados en ns-3 así como el entorno empleado para simular los distintos escenarios. El apartado 4.2 presenta el escenario de simulación con un canal radio, que nos servirá como punto de referencia puesto que es el escenario actual sin considerar múltiples canales. En el apartado 4.3 se analizan los escenarios multicanal en los que se considera una separación de vehículos por canal, es decir, los vehículos se distribuyen en los diferentes canales disponibles. Este escenario se ha estudiado considerando dos canales (4.3.1) y tres canales (4.3.2). En los escenarios multicanal se estudiará cómo afecta el número de interfaces disponible en cada vehículo. También realizaremos un análisis de escenarios multicanal con separación de servicios por canales en el apartado 4.4, distribuyendo los servicios de los que disponemos tanto en 2 canales (4.4.1), como en 3 canales (4.4.2). Por último, en el apartado 4.5 haremos un análisis general de los escenarios configurados, analizando las ventajas y desventajas, para escoger cuál sería el escenario más favorable.

##### **4.1. Parámetros y escenarios de simulación.**

En este apartado vamos a describir los escenarios configurados para realizar las distintas simulaciones, así como los principales parámetros establecidos en ns-3 y el entorno de simulación.

En la Figura 15 podemos observar el entorno de simulación, el cual está compuesto por una carretera de 5 Km de longitud, con 6 carriles, de los cuales 3 son para un sentido y 3 para el otro. A la hora de almacenar los datos de la PDR y CBR, que se emplean para el estudio de cada uno de los escenarios, filtramos los datos de los vehículos que se encuentran en los 2 Km centrales de la carretera, puesto que en los extremos del escenario los vehículos experimentan una menor carga y menor interferencia, afectando a sus métricas PDR y CBR. Inicialmente, cada vehículo se coloca en una posición aleatoria dentro de la carretera y se desplaza a una velocidad constante. Si algún vehículo llega a alcanzar el final del escenario, se volverá a colocar al principio del mismo para mantener la densidad de vehículos constante.

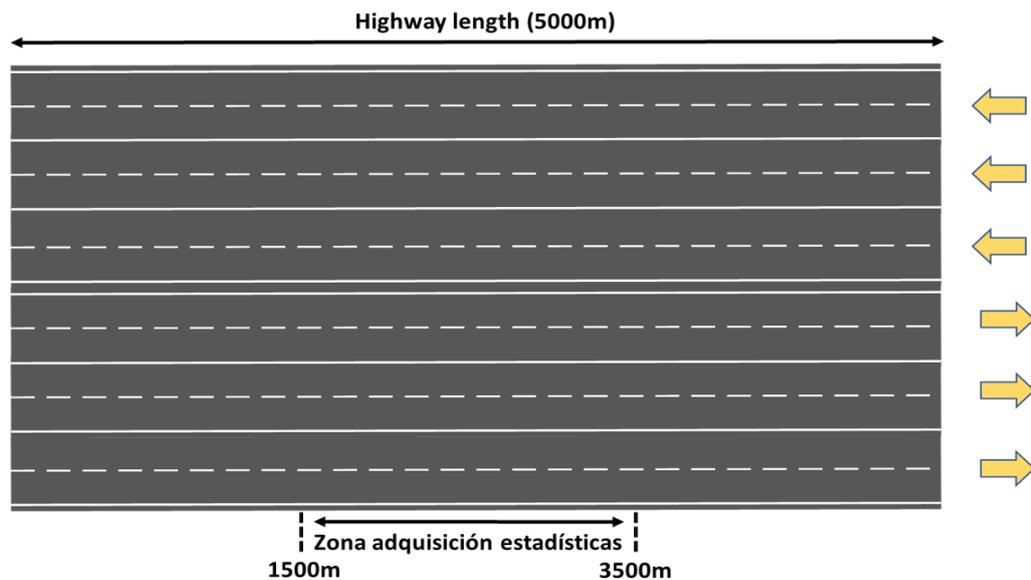


Figura 15. Entorno de simulación.

Para estudiar el efecto en los distintos los canales al aumentar o disminuir el número de vehículos, cada escenario se ha simulado para tres densidades de tráfico distintas, y en cada una de ellas los vehículos tendrán una velocidad constante. La densidad baja implica 48 veh/Km y una velocidad de 115 Km/h. Para la densidad media tenemos 96 veh/Km a una velocidad de 90 Km/h. En la densidad alta tenemos 144 veh/Km a una velocidad de 70 Km/h.

Hay algunos parámetros que permanecen constantes a lo largo de las simulaciones los cuales se muestran en la Tabla 1, en la Tabla 2 y en la Tabla 3. En la Tabla 1 podemos ver los parámetros de comunicación, como la sensibilidad, la modulación o la potencia. En la Tabla 2 podemos ver las frecuencias de los canales utilizados para las distintas simulaciones. Y en la Tabla 3 podemos observar los parámetros relacionados con los diferentes servicios de los que disponemos, como el tamaño o el intervalo de generación de cada uno de los paquetes.

Parámetro	Valor
Modulación	OFDM
Data Rate	6 Mbps (QPSK ½)
Ancho de banda de los canales	10 MHz
Sensibilidad mínima	-85 dBm
Potencia transmitida	23 dBm
Figura de ruido	9 dB

Tabla 1. Parámetros técnicos constantes en las simulaciones.

Canal	Identificador del canal	Frecuencia
<b>1</b>	180	5.9 GHz
<b>2</b>	176	5.88 GHz
<b>3</b>	178	5.89 GHz

Tabla 2. Frecuencias de los canales empleados en las simulaciones.

Servicio	Tamaño	Tasa de generación
<b>CAM</b>	350 Bytes	3 Hz
<b>CPM</b>	600 Bytes	5 Hz
<b>MCM</b>	300 Bytes	10 Hz

Tabla 3. Parámetros de los servicios CAM, CPM y MCM.

La radio propagación se modela mediante el uso del modelo de propagación Winner+ B1. Este modelo es válido para el rango de frecuencia de 0.45-6GHz. El modelo Winner+ B1 incluye un modelo de pérdidas de propagación logarítmico, para el cálculo de la pérdida de propagación promedio en función de la distancia entre transmisor y receptor. Se emplea una variable aleatoria logarítmica normal para modelar el efecto causado por los obstáculos del entorno. El modelo diferencia entre condiciones LOS (*Line of Sight*) y condiciones NLOS (*Non Line of Sigh*) [18].

Por último, vamos a explicar los escenarios que hemos escogido para realizar el estudio de dimensionado, los cuales son analizados en los siguientes apartados del capítulo actual. En el primer escenario (sección 4.2) únicamente tenemos un canal radio, en el que todos los vehículos de la simulación transmiten y reciben todos sus mensajes. Este escenario nos servirá para observar las limitaciones que supone tener un solo canal radio, y para posteriormente demostrar el efecto positivo del empleo de múltiples canales.

En el segundo escenario (sección 4.3) consideramos el empleo de varios canales (dos o tres, según la simulación), y variamos el número de interfaces que tienen los vehículos. En este escenario consideramos que cada vehículo transmite siempre todos sus mensajes

por una misma interfaz y el resto de interfaces (si las tuviera) las utiliza para recibir información en otros canales. El canal para la transmisión se selecciona de forma aleatoria y se fija durante toda la simulación. En comparación con el escenario 1, en el escenario 2 aumentamos el número de canales para ver cómo afecta a la comunicación gracias al empleo de un mayor ancho de banda, con un protocolo sencillo de selección de canal de transmisión aleatorio. Analizaremos la influencia del número de canales y el número de interfaces, aspecto interesante puesto que, desde el punto de vista del fabricante, un mayor número de interfaces supone un mayor coste. La Tabla 4 lista las configuraciones implementadas y evaluadas en este escenario en cuanto a número de canales e interfaces por vehículo.

Escenario	Descripción general	Número de canales	Número de interfaces
2	Multicanal con separación por vehículos	2	1
			2
		3	1
			2
			3

Tabla 4. Configuraciones del escenario 2 implementadas y evaluadas.

En el tercer escenario (sección 4.4) se considera el empleo de varios canales pero en este caso se realiza una separación de servicios por canales. Es decir, se asume la existencia de un protocolo de comunicación multicanal que pre-asigna cada servicio a un canal concreto. De esta forma, todos los vehículos que implementan un servicio (por ejemplo, CAM) han de transmitir y recibir los mensajes correspondientes por el canal que se haya asignado a los mensajes CAM. En este caso se han realizado también simulaciones con dos y con tres canales radio para observar la influencia del ancho de banda total en el rendimiento del sistema. Además, en este escenario coexisten diferentes tipos de vehículos, en función del número de servicios y de interfaces que implementan. Esto se ha realizado así para evaluar el rendimiento cuando coexisten vehículos menos avanzados (con menos interfaces y menos servicios) con vehículos más avanzados o de alta gama (con más interfaces y más servicios). La Tabla 5 muestra las configuraciones implementadas y evaluadas en este escenario.

Escenario	Descripción general	Número de canales	Tipos de vehículos
3	Multicanal con separación por servicios	2 (en el canal 1 se transiten los CAM y CPM y en canal 2 los MCM)	La mitad tienen 1 interfaz e implementan CAM y CPM y la otra mitad tienen 2 interfaces e implementan CAM, CPM y MCM
			Todos tienen 2 interfaces e implementan CAM, CPM y MCM
		3 (en el canal 1 se transiten los CAM, en el canal 2 los CPM y en canal 3 los MCM)	Un tercio tienen 1 interfaz e implementan CAM, un tercio tienen 2 interfaces e implementan CAM y CPM, y el tercio restante tienen 3 interfaces e implementan CAM, CPM y MCM
			Todos tienen 3 interfaces e implementan CAM, CPM y MCM

Tabla 5. Configuraciones del escenario 3 implementadas y evaluadas.

En la Figura 16 y Figura 17 se ilustran a modo de ejemplo diversos entornos con dos o tres canales, en el que cada color simula un servicio distinto: CAM rojo, CPM azul y MCM amarillo. En la Figura 16 podemos observar el entorno para el escenario multicanal con separación por vehículos en tres canales. En Figura 17 el entorno ilustrado corresponde al escenario multicanal con separación de servicios en dos y tres canales. A la izquierda podemos ver el entorno correspondiente al escenario multicanal con separación de servicios en tres canales: CAM en el canal 1, CPM en el canal 2 y MCM en el canal 3. A la derecha observamos el caso con dos canales en el que se transmiten CAM y CPM en el canal 1 y MCM en el 2.

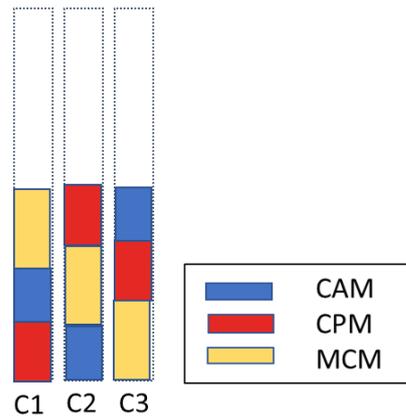


Figura 16. Separación por vehículos en 3 canales.

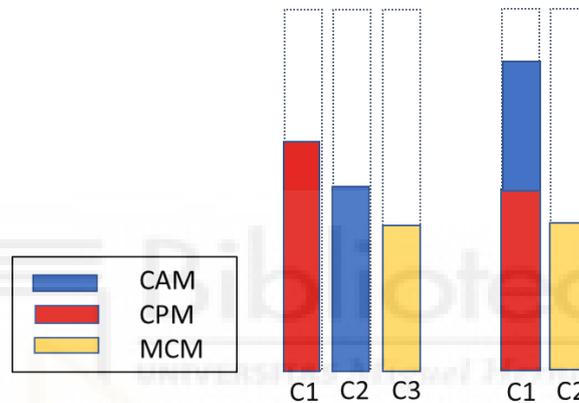


Figura 17. Separación por servicios en 2 y 3 canales.

#### 4.2. Escenario con un único canal radio.

En este escenario se ha considerado el empleo de un único canal radio sobre el que se realizan todas las transmisiones. Este escenario puede considerarse equivalente al despliegue inicial de sistemas basados en comunicaciones vehiculares, puesto que únicamente utilizarán un canal radio. Consideraremos en este escenario que todos los vehículos están equipados con una interfaz IEEE 802.11p y todos ellos transmiten mensajes CAM, CPM y MCM.

La Tabla 6 muestra el nivel de CBR experimentado en este escenario para las tres densidades de tráfico simuladas. En la tabla se observa que la CBR obtenida para la densidad baja es ya relativamente elevada, puesto que se sitúa en torno al nivel límite objetivo de los protocolos de control de congestión definidos por el ETSI para IEEE

802.11p [19]. Estos niveles tan elevados se producen al introducir varios servicios con altos requisitos de ancho de banda como los basados en CAM, CPM y MCM. La Tabla 6 también muestra que a medida que se aumenta la densidad de tráfico la CBR también aumenta. De hecho, se observa cómo se satura el canal radio puesto que el nivel de CBR se aproxima a 1. Cuando se satura el canal radio, los vehículos prácticamente no detectan oportunidades de transmisión por encontrar el canal ocupado. Cuando se desea transmitir un mensaje, pero el canal se detecta como ocupado, el mensaje se almacena en una cola o buffer de salida. Cuando esa cola se desborda, los mensajes que no caben son descartados. Esto está ocurriendo especialmente en este escenario para las densidades de tráfico media y alta.

Densidad baja	Densidad media	Densidad alta
0.49	0.73	0.87

Tabla 6. CBR media en el escenario con un único canal.

Para mostrar cómo el aumento de la carga degrada el rendimiento del sistema debido a las interferencias, la Figura 18 muestra la PDR experimentada para las tres densidades de tráfico estudiadas. En la Figura 18 puede observarse cómo la PDR se degrada significativamente a medida que aumenta la densidad de tráfico. Esta degradación se produce debido al aumento de las interferencias y las pérdidas de paquetes por colisión. La figura también muestra cómo la PDR decrece con la distancia, fundamentalmente debido al efecto negativo que producen las pérdidas de propagación radio. Dado que en este escenario todos los mensajes se transmiten en el mismo canal, la curva de PDR que se obtiene para CAM, CPM y MCM es prácticamente la misma. La Figura 19 muestra la PDR obtenida únicamente para los mensajes CAM para las tres densidades de tráfico simuladas. Para CPM y MCM se obtienen curvas muy similares.

Los resultados obtenidos en este escenario demuestran la necesidad de utilizar múltiples canales radio para obtener niveles adecuados de carga y fiabilidad cuando se despliegan múltiples servicios de comunicación vehicular como los basados en CAM, CPM y MCM.

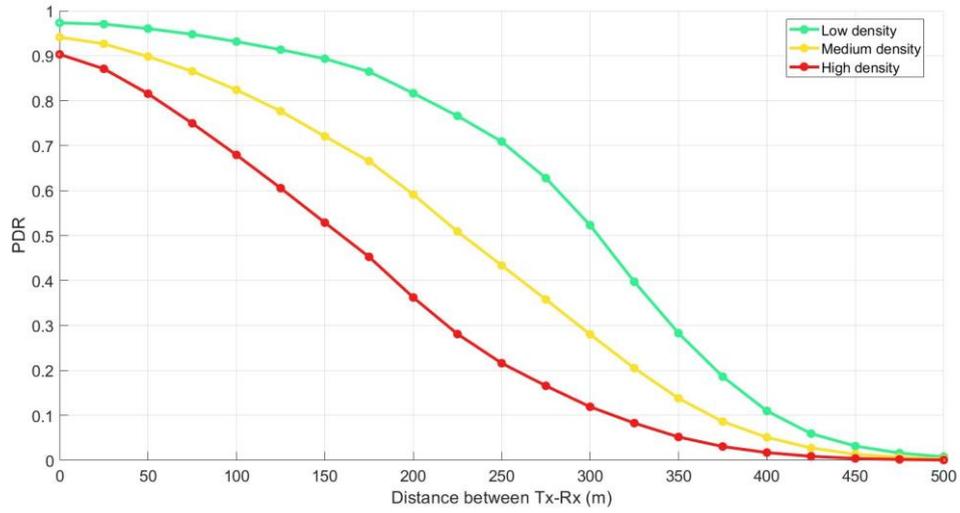


Figura 18. PDR en el escenario con un único canal.

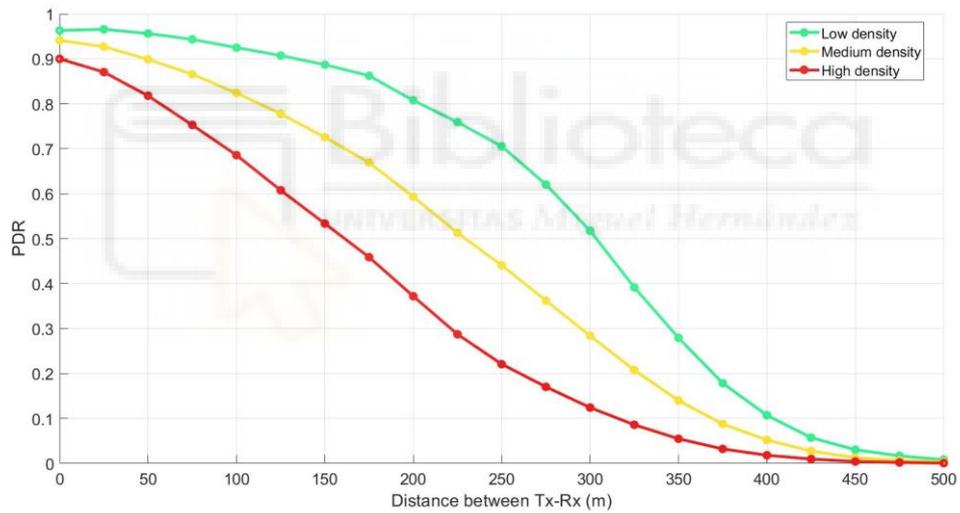


Figura 19. PDR de los mensajes CAM en el escenario con un único canal.

### 4.3. Escenario multicanal con separación de vehículos por canal.

#### 4.3.1. Dos canales radio.

En este escenario se han utilizado 2 canales radio, duplicando el ancho de banda del sistema con respecto al escenario con un único canal radio. Estos dos canales son iguales y del mismo ancho de banda (10 MHz) al empleado en el apartado anterior. Uno de los aspectos clave para poder aprovechar estos dos canales radio es el número de interfaces radio que tiene cada vehículo, dado que una interfaz solo puede transmitir (o recibir) mensajes por un canal radio en un instante concreto, así que evaluaremos los casos en los que los vehículos implementan una o dos interfaces radio.

##### 4.3.1.1. Dos canales y una única interfaz radio.

Este escenario considera el empleo de 2 canales radio, pero los vehículos solo tienen una única interfaz radio. Se ha considerado que cada vehículo selecciona aleatoriamente al inicio de la simulación uno de los canales radio para transmitir y recibir mensajes, y permanece en dicho canal durante toda la simulación. Como consecuencia, cada vehículo solo podrá recibir mensajes transmitidos por los vehículos que empleen su mismo canal. Esta consideración no limita el estudio realizado, ya que, aunque los vehículos estuvieran continuamente cambiando de canal, sólo podrían recibir información de uno de ellos en cada momento.

Al distribuir las transmisiones en 2 canales diferentes (la mitad de los vehículos en cada canal, aproximadamente), la CBR por canal disminuye respecto a la CBR obtenida en el apartado anterior (escenario con un único canal radio) ya que tenemos un mayor ancho de banda para la misma densidad de coches. Esto puede observarse en la Tabla 7, en la que se compara la CBR media por canal en el escenario con un único canal y el escenario con dos canales y una interfaz radio por vehículo. Reducir el número de transmisiones en cada canal a la mitad no reduce la CBR a la mitad debido al efecto de las colisiones y la pérdida de paquetes en la cola o buffer de transmisión. Por ejemplo, en el caso de la densidad baja, cuando tenemos un único canal la CBR es de 0.49. Esta CBR sería superior si no hubiera colisiones de paquetes, puesto que cuando dos paquetes colisionan se superponen en el tiempo y su contribución a la CBR es la misma que la contribución de un paquete sin colisión. Es decir, en dicho escenario podríamos estar hablando de una CBR teórica de 0.6 (por ejemplo) si no hubiera colisiones de paquetes. Como la probabilidad de colisión aumenta con la CBR, este efecto es menor cuando la CBR es

baja, es decir, cuando empleamos dos canales. El efecto de la cola o buffer de transmisión se observa especialmente cuando la CBR se aproxima a 1 (por ejemplo, para la densidad alta). En este caso, cuando solo tenemos un único canal, muchos de los mensajes ni siquiera se están transmitiendo. En cambio, esos mensajes si se transmiten cuando tenemos dos canales, dado que no estamos saturando tanto la cola o buffer de transmisión. De ahí que la diferencia relativa entre los dos escenarios analizados hasta el momento sea menor para densidades altas que para densidades bajas y medias.

Escenario	Densidad baja	Densidad media	Densidad alta
Un único canal	0.49	0.73	0.87
Dos canales	0.33	0.49	0.63

Tabla 7. CBR media por canal en el escenario con un canal y en el escenario con dos canales y una interfaz radio por vehículo.

Gracias a la distribución de las transmisiones en 2 canales, la CBR se reduce y la PDR experimentada en cada canal mejora. Esto puede observarse en la Figura 20, que ilustra la PDR obtenida en uno de los canales (para los vehículos que transmiten y reciben en dicho canal). Dada la simetría del escenario, la PDR en el otro canal es prácticamente la misma. La mejora experimentada respecto a la PDR de la Figura 18 es significativa.

Sin embargo, hay que tener en cuenta que cuando un vehículo transmite y recibe por uno de los canales, no es capaz de recibir la información transmitida por el otro canal. Dado que la mitad de los vehículos transmiten en el otro canal, esto supone una pérdida de información importante. Esta pérdida se puede cuantificar al medir la PDR que global que experimenta un vehículo. Esta PDR global tiene en cuenta los mensajes transmitidos en el otro canal como mensajes perdidos y se representa en la Figura 21. En esta figura se observa cómo la PDR global se sitúa en torno a 0.5 a distancias cortas. Esto se debe a que los vehículos solo tienen una interfaz y solo son capaces de recibir los mensajes de los que transmiten en su mismo canal. Teniendo en cuenta que la carga de vehículos de los canales está repartida en un 50% para cada canal, un vehículo en concreto podrá recibir como máximo la mitad de los mensajes (los transmitidos por los conectados en el otro canal se perderán). Es interesante mencionar de nuevo que, dado que en cada canal se transmiten todos los tipos de mensajes, y la carga de cada tipo de mensaje es similar, independientemente del tipo de mensaje, las PDR obtenidas para cada uno de ellos son equivalentes a las PDR mostradas en la Figura 20 y la Figura 21. Es decir, la PDR de los mensajes CAM, por ejemplo, en cada canal será similar a la PDR total experimentada en

uno de los canales. Y la PDR global de mensajes CAM también será similar a la PDR global experimentada.

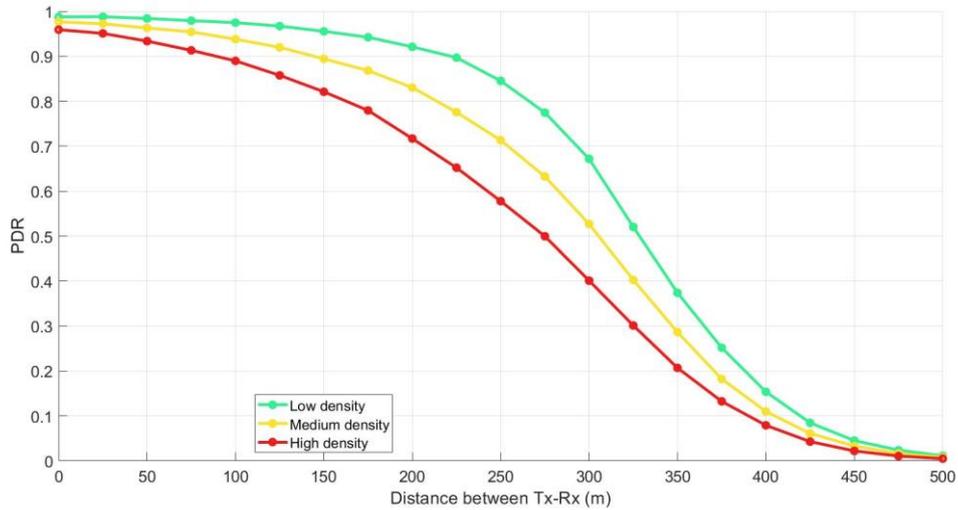


Figura 20. PDR experimentada en uno de los canales en el escenario con dos canales y una interfaz radio por vehículo.

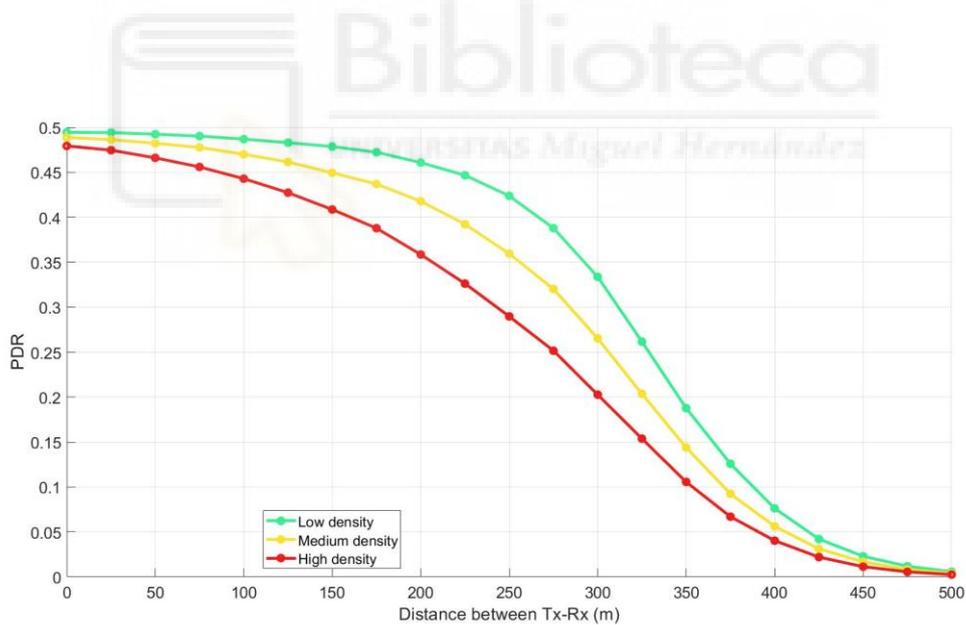


Figura 21 . PDR global experimentada en el escenario con dos canales y una interfaz radio por vehículo.

#### 4.3.1.2. Dos canales y dos interfaces radio.

Este escenario también considera el empleo de 2 canales radio. Sin embargo, para tratar de solventar las limitaciones asociadas al empleo de una única interfaz radio, en este caso consideraremos que todos los vehículos tienen 2 interfaces radio. Cada una de estas

interfaces está sintonizada a uno de los 2 canales radio. Al inicio de la simulación, cada vehículo selecciona aleatoriamente el canal por el cual transmitirá todos sus mensajes (CAM, CPM y MCM). La segunda interfaz de cada vehículo (por la cual solo recibirá) será la correspondiente al canal opuesto al que se encuentra conectado. Al tener 2 interfaces, todos los vehículos podrán recibir información por los 2 canales radio.

En este escenario, la CBR que se obtiene es la misma que en el escenario en el que tenemos 2 canales y una única interfaz radio. Esto es así porque los vehículos seleccionan de la misma forma el canal por el que transmitir. La diferencia la observaremos en la recepción, porque cuando tienen dos interfaces son capaces de recibir por dos canales. Sin embargo, no obtenemos beneficios en términos de reducción de CBR. Aun así, la CBR se reduce respecto al escenario en el que solo tenemos un único canal, como podemos comprobar en la Tabla 8.

Escenario	Densidad baja	Densidad media	Densidad alta
Un único canal	0.49	0.73	0.87
Dos canales	0.33	0.49	0.63

Tabla 8. CBR media por canal en el escenario con un canal y en el escenario con dos canales y dos interfaces radio por vehículo.

Como la CBR es aproximadamente la misma a la del escenario con dos canales y una interfaz, si medimos la PDR experimentada en cada canal veremos que se mantiene. Es decir, la PDR por canal de la Figura 22 es prácticamente igual a la de la Figura 20. Esto es así porque la carga en cada canal es la misma en cada escenario, y por lo tanto las pérdidas por interferencias o colisiones de paquetes son las mismas. Además, la PDR es la misma en cada uno de los dos canales por separado.

Sin embargo, la PDR global que un vehículo experimenta mejora significativamente cuando se tienen dos interfaces. Dicha PDR se observa en la Figura 23. Al poder recibir información por los dos canales (los vehículos conectados al canal 1 pueden recibir los mensajes de los conectados en el canal 2 y viceversa), los vehículos experimentan altos niveles de PDR a cortas distancias. Esto contrasta con el nivel de PDR cercano a 0.5 que se obtiene a distancias cortas cuando solo se tiene una interfaz radio (Figura 21).

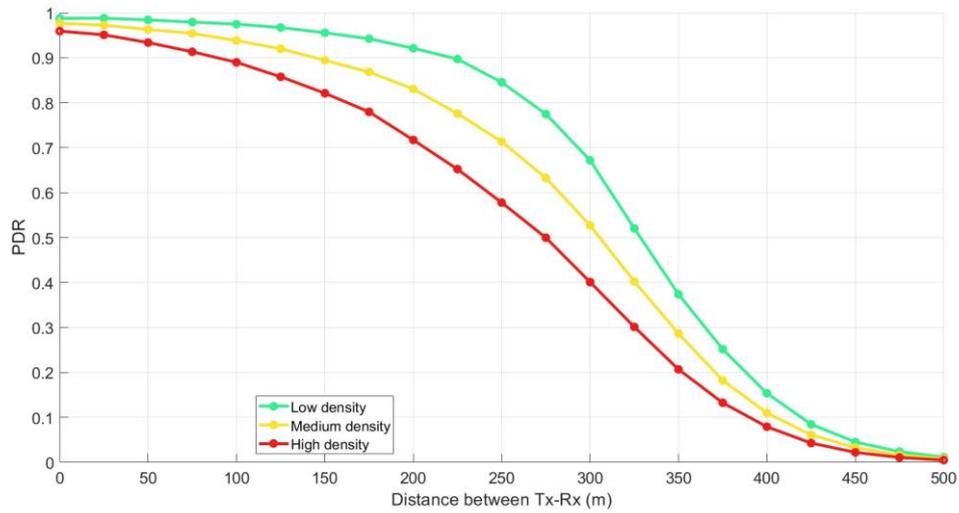


Figura 22. PDR experimentada en uno de los canales en el escenario con dos canales y dos interfaces radio por vehículo.

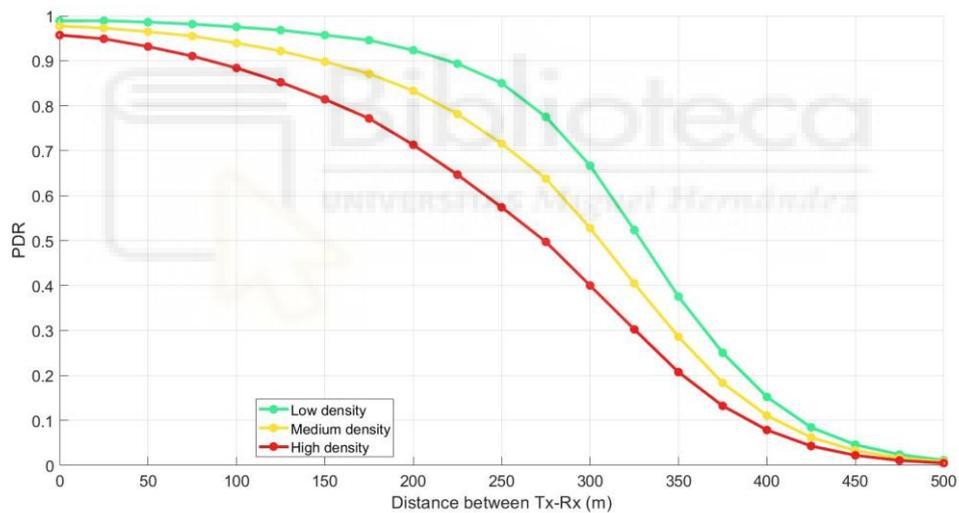


Figura 23. PDR global experimentada en el escenario con dos canales y dos interfaces radio por vehículo.

#### 4.3.2. Tres canales radio.

Este escenario considera el uso de 3 canales radio, triplicando en este caso el ancho de banda del sistema con respecto al escenario en el que solo disponíamos de un canal. Se emplean tres canales iguales y con el mismo ancho de banda (10 MHz) que los empleados en las simulaciones anteriores. Queremos comprobar si es posible extrapolar las conclusiones obtenidas en el escenario con dos canales a escenarios con un mayor número

de canales. De nuevo uno de los aspectos clave a estudiar para el aprovechamiento de los distintos canales será el número de interfaces radio que tendrá cada vehículo.

#### 4.3.2.1. Tres canales y una única interfaz radio.

En este escenario de nuevo consideramos el uso de 3 canales radio, con vehículos que tienen una única interfaz radio. Al inicio de la simulación, cada vehículo selecciona aleatoriamente uno de los canales radio, por el que transmitir y recibir mensajes, en el cual permanecerá durante toda la simulación. Por tanto, cada vehículo solo será capaz de recibir los mensajes transmitidos por vehículos de su mismo canal.

En esta simulación distribuimos todas las transmisiones en 3 canales distintos (un tercio de los vehículos conectado a cada canal), por lo que la CBR por canal disminuirá por supuesto respecto a la CBR obtenida en la simulación en la que teníamos un escenario con un único canal radio, pero también con respecto a la obtenida en el escenario con 2 canales radio, ya que hemos aumentado el ancho de banda con respecto a ambas simulaciones, para la misma densidad de vehículos. Este comportamiento podemos observarlo en Tabla 9, en la que comparamos la CBR media por canal en el escenario con un único canal, en el escenario con 2 canales (independientemente del número de interfaces, ya que hemos obtenido los mismos valores de CBR) y en el escenario con 3 canales y una interfaz radio por vehículo.

Escenario	Densidad baja	Densidad media	Densidad alta
Un único canal	0.49	0.73	0.87
Dos canales	0.33	0.49	0.63
Tres canales	0.27	0.39	0.48

Tabla 9. CBR media por canal en el escenario con un canal, en el escenario con dos canales y en el escenario con tres canales y una interfaz radio por vehículo.

Gracias al empleo de tres canales conseguimos disminuir el número de transmisiones en cada canal, reduciendo la CBR aún más que en el caso en el que hemos distribuido las transmisiones en dos canales. Si aumentásemos el número de canales aún más, la CBR seguiría disminuyendo al aumentar el ancho de banda disponible.

Además, la PDR experimentada en cada canal también mejora con respecto a los escenarios anteriores. Podemos observar este comportamiento en la Figura 24, la cual muestra la PDR de uno de los canales (para los vehículos que transmiten y reciben por

ese canal). La PDR de los otros dos canales no varía prácticamente respecto a la de la Figura 24 puesto que se trata de un escenario simétrico. La mejora con respecto a la PDR experimentada en la Figura 20 y la de la Figura 22 es notable. Por otro lado, también hemos medido la PDR global experimentada por cualquier vehículo del escenario, la cual podemos observar en la Figura 25. En esta figura vemos que la PDR global tiene un valor aproximado a 0.33 a distancias cortas, debido a que cuando un vehículo transmite y recibe por uno de los canales, no puede recibir información transmitida por los otros dos canales, al tener solo una interfaz radio. La pérdida de información será bastante grande, pues aproximadamente el 66% del total de los vehículos transmiten por los otros dos canales. Por tanto, un vehículo conectado en un determinado canal, será capaz de recibir de manera correcta como mucho un tercio del total de los mensajes transmitidos.

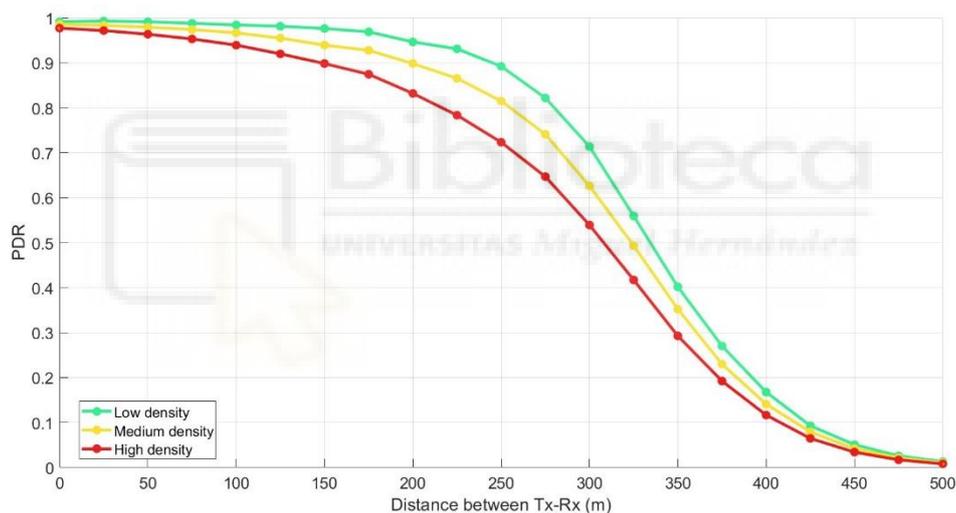


Figura 24. PDR experimentada en uno de los canales en el escenario con tres canales y una interfaz radio por vehículo.

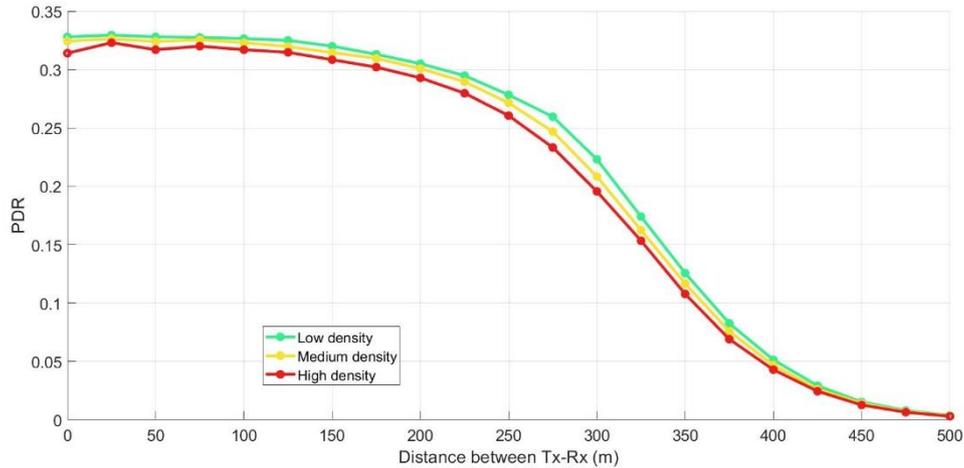


Figura 25. PDR global experimentada en el escenario con tres canales y una interfaz radio por vehículo.

#### 4.3.2.2. Tres canales y dos interfaces radio.

En este escenario se consideran 3 canales y que cada vehículo está equipado con 2 interfaces radio para tratar de resolver las limitaciones obtenidas al emplear una única interfaz radio. Cada vehículo selecciona al inicio de la simulación de manera aleatoria el canal por el cual transmitirá todos sus mensajes (CAM, CPM y MCM). De esta forma, aproximadamente un tercio de los vehículos transmitirán mensajes en cada canal. Igualmente, al inicio de la simulación, se sintonizará la segunda interfaz de cada vehículo (por la que sólo recibirá mensajes) a uno de los dos canales restantes. La selección del canal de la segunda interfaz se realiza de manera proporcional, es decir, un tercio de los vehículos tendrá sintonizada su segunda interfaz en el canal 1, otro tercio la tendrá en el canal 2, y el otro tercio la tendrá en el canal 3. El canal de la segunda interfaz no coincidirá en ningún caso con el canal asignado a la interfaz de transmisión. De esta manera, todos los vehículos serán capaces de recibir información transmitida por dos de los canales.

La CBR obtenida en esta simulación coincidirá con la obtenida en el escenario con tres canales y una única interfaz radio, ya que la selección del canal por el que se transmite se realiza de la misma manera. Como consecuencia, no conseguimos una reducción en la CBR respecto al escenario con tres canales y una única interfaz radio. Sin embargo, sí conseguimos una mejora con respecto al escenario de dos canales (ya sea con una o dos interfaces). Esto lo podemos observar en la Tabla 10. Además, sí podremos notar una mejora en la recepción con respecto al escenario de tres canales y una sola interfaz, pues los vehículos son capaces de recibir una mayor cantidad de información.

Escenario	Densidad baja	Densidad media	Densidad alta
Un único canal	0.49	0.73	0.87
Dos canales	0.33	0.49	0.63
Tres canales	0.27	0.39	0.48

Tabla 10. CBR media por canal en el escenario con un canal, en el escenario con dos canales y en el escenario con tres canales y dos interfaces radio por vehículo.

Como la CBR es igual que la del escenario con tres canales y una interfaz, la PDR experimentada en cada canal también coincidirá. Es decir, la PDR en uno de los canales de este escenario, la cual observamos en la Figura 26, coincidirá con la reportada en la Figura 24. Esto sucede porque la carga en cada uno de los tres canales es la misma en ambos escenarios independientemente del número de interfaces, y por tanto las pérdidas debidas a colisiones de paquetes o interferencias serán las mismas. De nuevo, la PDR será la misma para cada uno de los canales por separado.

La diferencia con la simulación de tres canales y una sola interfaz podemos observarla en la PDR global que experimenta un vehículo con dos interfaces, la cual podemos observar en la Figura 27. Como cada vehículo dispone de dos interfaces, puede recibir información por dos de los canales y habrá una menor pérdida de información que teniendo tres canales y una sola interfaz, por lo que el nivel de PDR a distancias cortas aumenta. Obtenemos un nivel de PDR próximo a 0.6 frente al nivel de PDR cercano a 0.33 obtenido con una sola interfaz radio (Figura 25).

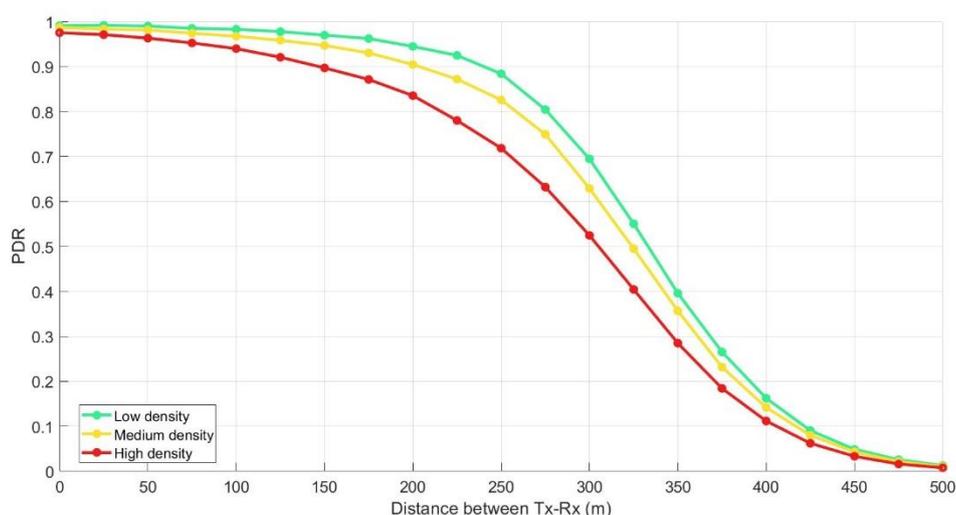


Figura 26. PDR experimentada en uno de los canales en el escenario con tres canales y dos interfaces radio por vehículo.

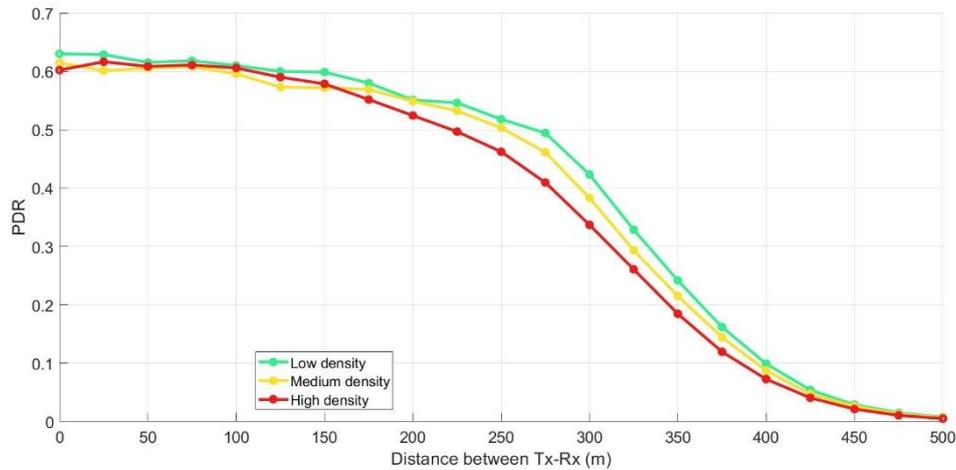


Figura 27. PDR global experimentada en el escenario con tres canales y dos interfaces radio por vehículo.

#### 4.3.2.3. Tres canales y tres interfaces radio.

Finalmente, en este escenario se ha considerado el empleo de 3 canales radio, y cada vehículo dispone de 3 interfaces radio para mejorar los valores obtenidos en la PDR global que hemos observado en los escenarios con 3 canales, pero con una y dos interfaces. Al comienzo de la simulación, cada vehículo escoge de forma aleatoria el canal por el cual transmitirá todos sus mensajes, al igual que en el resto de simulaciones. Al tener 3 interfaces radio, todos los vehículos podrán recibir información de los tres canales radio, por lo que todos podrán comunicarse entre sí.

La CBR en este escenario será la misma que la que hemos obtenido en los dos escenarios anteriores en los que disponíamos de 3 canales, pero una o dos interfaces radio, y podemos comprobarlo en la Tabla 11. Por tanto, el aumento de interfaces no determinará una mejora en términos de CBR, pero como hemos comentado si conseguimos una mejora en la CBR respecto a los escenarios con uno y dos canales.

Escenario	Densidad baja	Densidad media	Densidad alta
Un único canal	0.49	0.73	0.87
Dos canales	0.33	0.49	0.63
Tres canales	0.27	0.39	0.48

Tabla 11. CBR media por canal en el escenario con un canal, en el escenario con dos canales y en el escenario con tres canales y tres interfaces radio por vehículo.

Al tener la misma CBR que en las simulaciones con tres canales y 1 interfaz radio, o dos interfaces radio, la PDR en cada canal también será la misma, puesto que la asignación de los vehículos en cada canal se realiza de la misma manera. En la Figura 28 podemos observar la PDR experimentada en uno de los canales para los tres escenarios en los que disponemos de tres canales pero un distinto número de interfaces: podemos ver que la PDR de cada canal en el escenario con tres canales y tres interfaces, coincide con la PDR de cada canal en el escenario con tres canales y una interfaz radio (Figura 24) y con la PDR del escenario con tres canales y dos interfaces radio (Figura 26).

En este caso podemos notar la diferencia que supone emplear un número distinto de interfaces con el mismo número de canales en la Figura 29. En esta figura podemos ver la PDR global experimentada en el escenario con tres canales y tres interfaces radio por vehículo, en la cual observamos un nivel de PDR de prácticamente uno a distancias cortas. Esta mejora en la PDR global se debe a que al tener 3 interfaces radio, los vehículos son capaces de recibir información por los tres canales de los que disponemos. De esta manera, serán capaces de recibir toda la información transmitida, excepto los paquetes que se pierdan debido a colisiones o interferencias, o los perdidos por los efectos de la propagación radio.

Por tanto, de los escenarios estudiados hasta ahora, este es el que mejor rendimiento proporciona. Al tener tres canales disponemos de un mayor ancho de banda que en las simulaciones con uno y dos canales. Y al tener tres interfaces, dentro de los escenarios con 3 canales, tenemos los mejores niveles de PDR y perderemos menos información. El principal inconveniente desde el punto de vista del fabricante de vehículos o equipos de comunicación, es la necesidad de implementar esas 3 interfaces, lo cual repercute en un mayor coste.

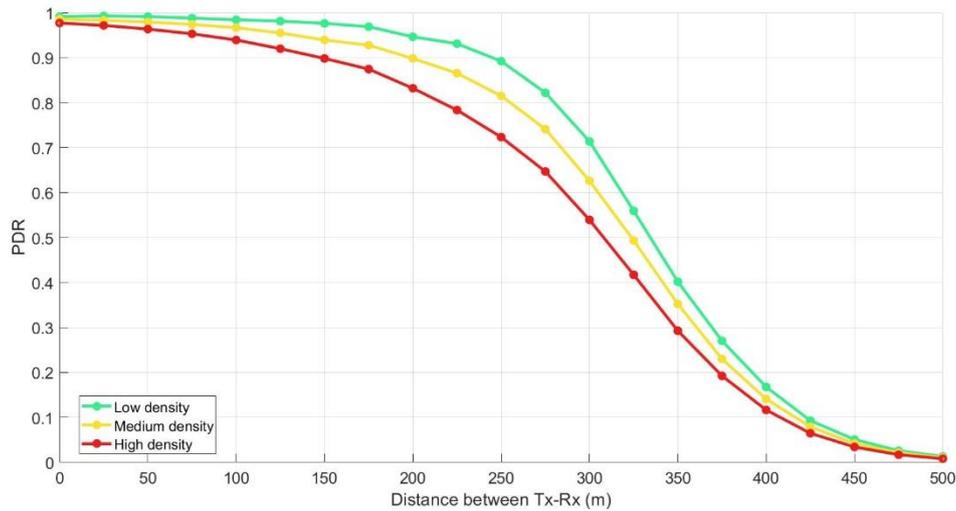


Figura 28. PDR experimentada en uno de los canales en el escenario con tres canales y tres interfaces radio, en el escenario con tres canales y dos interfaces radio, y en el escenario con tres canales y una interfaz radio.

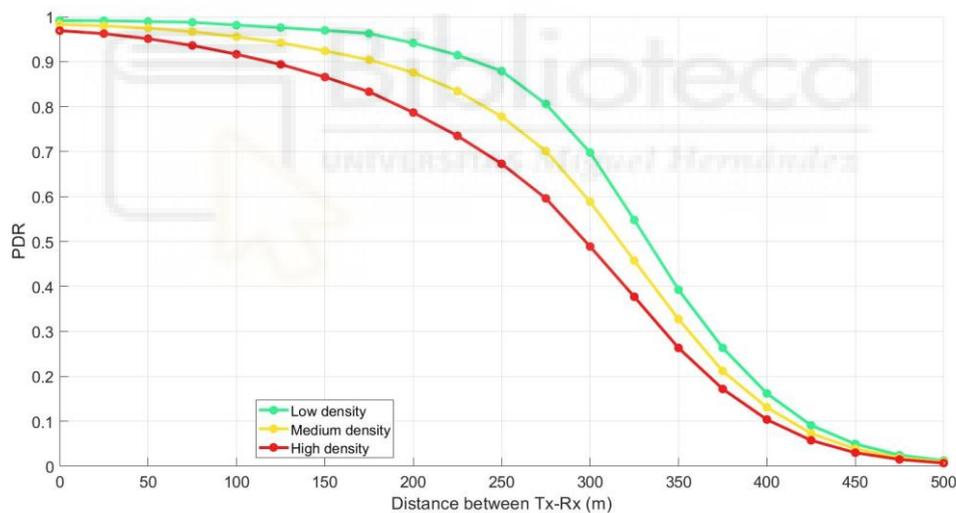


Figura 29. PDR global experimentada en el escenario con tres canales y tres interfaces radio por vehículo.

#### 4.4. Escenario multicanal con separación de servicios por canales.

En este escenario consideramos el uso de múltiples canales radio para la transmisión de los distintos servicios de los que disponemos, asociando uno o varios de estos servicios a un canal en concreto. Se ha decidido realizar este tipo de escenario, para poder estudiar cómo influye el separar los servicios en distintos canales, en la congestión del canal y en probabilidad de recibir un mensaje con éxito. Además, evaluaremos la coexistencia de

diferentes tipos de vehículos, clasificados en función del número de interfaces y servicios que implementen. Esta evaluación emula futuros escenarios en los que coexistan vehículos de diferentes fabricantes y gamas, o diferentes generaciones de vehículos conectados. Simularemos escenarios en los que plasmaremos esta realidad y veremos cómo afecta esto a cada servicio en particular.

#### 4.4.1. Dos canales radio.

En este escenario se ha considerado el uso de 2 canales radio, y se ha asociado cada servicio a un canal determinado. De esta forma, los vehículos que empleen el servicio CAM y CPM deberán utilizar el canal 1 (para transmitir y recibir dichos mensajes) y los que empleen el servicio MCM deberán utilizar el canal 2. Los canales son iguales entre sí y tienen el mismo ancho de banda que los canales disponibles en las simulaciones anteriores (10 MHz). En este caso es importante el estudio del número de interfaces de las que dispone cada vehículo, ya que, al separar la transmisión de los distintos tipos de mensajes en dos canales observaremos que, si solo se dispone de una interfaz no podremos disponer de todos los servicios (CAM, CPM y MCM). Este escenario permite intercambiar información asociada a un determinado servicio procedente de todos los vehículos que lo implementen. Por ejemplo, permite recibir información mediante CPMs procedente de todos los vehículos que implementen el servicio de percepción cooperativa. Esta es una diferencia fundamental con los escenarios anteriormente analizados, en los que un vehículo transmitiendo en un determinado canal podía no ser escuchado por los vehículos cercanos si estos no sintonizaban su canal.

##### 4.4.1.1. Coexistencia de vehículos con diferentes servicios.

Este escenario corresponde a un escenario de despliegue de la tecnología en el que coexisten vehículos con diferentes capacidades o funcionalidades. Esto puede corresponder a vehículos de diferentes gamas (baja, media y alta, por ejemplo) o vehículos que salen al mercado en diferentes momentos con la tecnología disponible en cada momento.

En este escenario coexisten vehículos que implementan sólo los servicios asociados a los CAM y CPM, con vehículos que implementan, además, el servicio de maniobras cooperativas basado en MCM. En concreto, hemos considerado que la mitad de los vehículos tienen 2 interfaces radio e implementan los 3 servicios analizados. Por tanto,

estos vehículos serán capaces de transmitir y recibir mensajes CAM y CPM por el canal 1, y de transmitir y recibir mensajes MCM en el canal 2. La otra mitad de los vehículos solo disponen de una interfaz radio, la del canal 1, y solo serán capaces de transmitir y recibir mensajes CAM y CPM en dicho canal.

En la Tabla 12 tenemos la CBR media del canal 1, por el que se transmiten los mensajes CAM y CPM. Podemos ver que el nivel de CBR para densidad baja es bueno, mientras que para densidad media ya es relativamente alto. Los valores de CBR de este canal casualmente son similares a los que hemos obtenido en los canales del escenario con dos canales y la mitad de los vehículos transmitiendo todos sus mensajes por uno de ellos y la otra mitad por el otro (independientemente del número de interfaces, estos valores también podemos observarlos en la Tabla 12). Los valores de CBR del canal 1 se aproximan debido a los factores que determinan la carga del canal: número de vehículos que genera carga en el canal y número de bytes por segundo transmitido por cada uno de estos vehículos. En el escenario con dos canales en el que distribuimos el número de vehículos conectados a cada uno de ellos, teníamos la mitad de vehículos en este canal que en el escenario con dos canales y separación de servicios. Por otro lado, mientras que, en el escenario con separación de vehículos por canales en el canal 1 transmitíamos mensajes CAM, CPM y MCM (7050 Bytes transmitidos por segundo por vehículo), en el escenario con separación de servicios por canales transmitíamos mensajes CAM y CPM (4050 Bytes transmitidos por segundo por vehículo). La diferencia entre el número de bytes/seg transmitidos en el canal compensa la diferencia en el número de vehículos transmitiendo en el canal, y en ambos escenarios se obtienen valores similares de CBR en el canal 1.

En la Tabla 12 también vemos la CBR del canal 2, por el que se transmiten los mensajes MCM, y observamos que tenemos valores bastante reducidos respecto a los obtenidos en el canal 1. Esto se debe a que por este canal solo transmitimos un tipo de mensaje, lo cual hace que la CBR disminuya drásticamente. Además, la disminución de la carga de vehículos en este canal también favorece a la disminución de la CBR. Por estos mismos motivos, en el canal 2 hemos conseguido valores de CBR más bajos que los obtenidos por canal en el escenario con dos canales y separación de vehículos por canales, e incluso más bajos que los que teníamos en el escenario con tres y separación de vehículos por canales, lo cual podemos comprobar en la Tabla 9, en la Tabla 10 o en la Tabla 11.

En términos de CBR, al transmitir únicamente los mensajes correspondientes a un solo servicio por un canal, conseguimos mejores valores que al transmitir mensajes de los tres servicios por el mismo canal, manteniendo la carga de vehículos. Esto podemos observarlo en los valores de CBR del canal 2 en el escenario con separación de servicios en dos canales en el que coexisten vehículos con distintos servicios, y en el escenario con separación de vehículos en dos canales.

Escenario	Canal	Densidad baja	Densidad media	Densidad alta
Dos canales con separación de servicios por canales	1	0.35	0.52	0.66
	2	0.23	0.32	0.39
Dos canales con separación de vehículos por canales	1 y 2	0.33	0.49	0.63

Tabla 12. CBR media de los dos canales en el escenario con separación de servicios en dos canales, en el que coexisten vehículos con distintos servicios y en el escenario con separación de vehículos en dos canales.

En la Figura 30 y la Figura 31 tenemos la PDR de los mensajes CAM y CPM en el canal 1. En estas figuras podemos ver que los valores de PDR obtenidos para ambos tipos de mensaje son buenos. Estos valores de PDR son válidos para todos los vehículos: vehículos con dos interfaces radio y vehículos con una sola interfaz radio, ya que esta es la correspondiente al canal 1 por donde se transmiten todos los mensajes CAM y CPM. Con estos resultados, podemos decir que el funcionamiento del canal 1 de manera aislada es relativamente bueno. También podemos observar que los vehículos con mayores funcionalidades son capaces de comunicar con los que tienen menor cantidad de servicios. En la Figura 32 podemos observar la PDR de los mensajes MCM en el canal 2. Al transmitir solamente un tipo de mensaje por este canal vemos que la PDR de los mensajes MCM mejora bastante con respecto a la PDR de los mensajes CAM y de los CPM transmitidos en el canal 1 (Figura 30 y Figura 31). Pero también hay que tener en cuenta que esta PDR no es válida para todos los vehículos, ya que solo los vehículos con dos interfaces serán capaces de transmitir y recibir mensajes MCM, por lo que al reducirse el número de vehículos que transmiten este tipo de mensaje a la mitad se reduce el número de vehículos en el canal y es normal que la PDR también aumente por este motivo. Los vehículos que no implementan este servicio solo tienen una interfaz radio. Aunque

tuvieran una segunda interfaz y pudieran recibir los mensajes MCM, no obtendrían beneficio de ello al no implementar dicho servicio (no implementan la coordinación de maniobras).

La PDR de mensajes MCM en el canal 1 será nula, ya que no se transmiten este tipo de mensajes en este canal. De la misma manera, la PDR de mensajes CAM y CPM en el canal 2 también será nula, pues en el canal 2 solo se transmiten mensajes MCM.

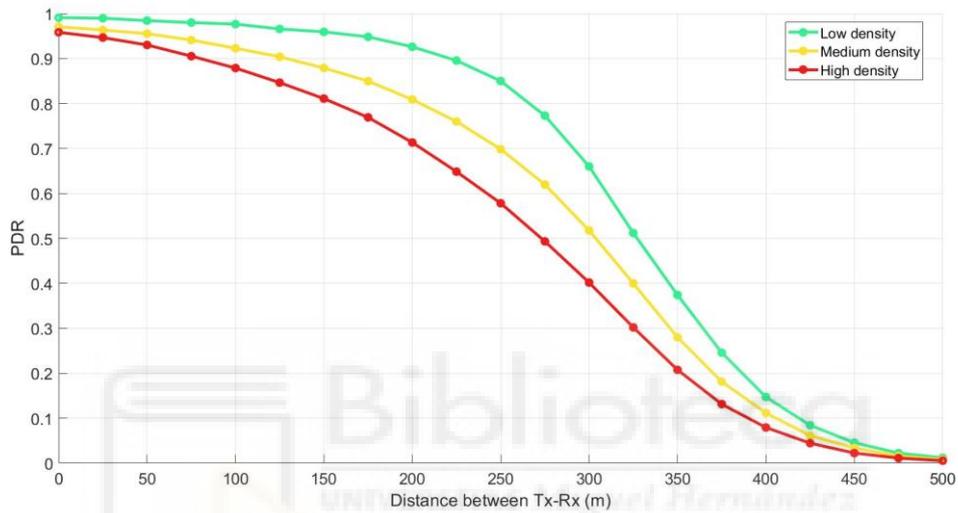


Figura 30. PDR de los mensajes CAM experimentada en el canal 1, en el escenario con separación de servicios en dos canales, en el que coexisten vehículos con distintos servicios.

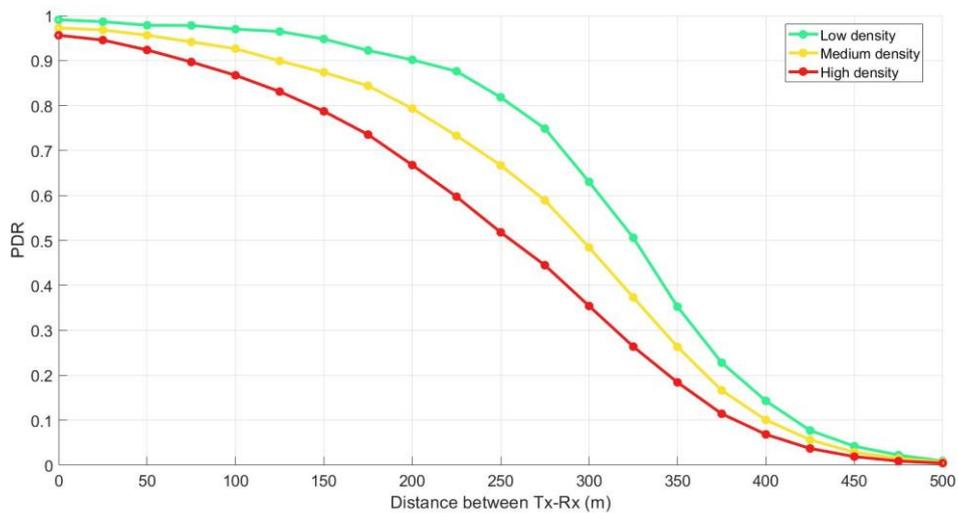


Figura 31. PDR de los mensajes CPM experimentada en el canal 1, en el escenario con separación de servicios en dos canales, en el que coexisten vehículos con distintos servicios.

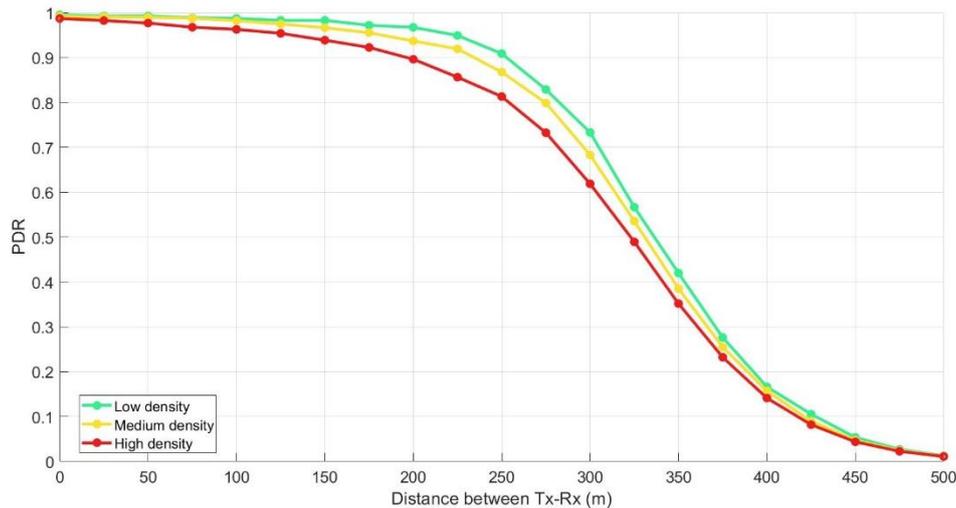


Figura 32. PDR de los mensajes MCM experimentada en el canal 2, en el escenario con separación de servicios en dos canales, en el que coexisten vehículos con distintos servicios.

A continuación, vamos a estudiar las PDR globales en función del número de interfaces de cada vehículo. La PDR global de los mensajes CAM y la de los CPM para los nodos que solo tienen una interfaz, coinciden con la PDR de mensajes CAM y la de CPM en el canal 1, y además estas son las mismas para los vehículos con dos interfaces. Esto es así debido a que todos los mensajes CAM y CPM se transmiten por el canal 1, y todos los vehículos tienen la interfaz correspondiente a este canal. Sin embargo, los vehículos que solo poseen una interfaz, tienen una PDR de mensajes MCM nula como podemos observar en la Figura 33. Este comportamiento se debe a que como hemos comentado anteriormente, la interfaz de la que disponen es la interfaz en la que se transmiten los mensajes CAM y CPM, por lo que estos nodos no serán capaces de recibir ningún mensaje de tipo MCM. Estos vehículos no pueden implementar el servicio basado en MCM, pero sí pueden implementar los servicios basados en CAM y CPM. En la Figura 34 vemos la PDR global y total (sin filtrar el tipo de mensaje) de los vehículos con una sola interfaz, y podemos observar que el valor máximo es aproximadamente 0.6 a distancias cortas. Tenemos una PDR baja, ya que estos vehículos solo serán capaces de recibir como mucho  $\frac{2}{3}$  de los mensajes transmitidos en total (los CAM y CPM), puesto que solo reciben por el canal 1 al tener una sola interfaz.

Los vehículos que poseen dos interfaces, a diferencia de los anteriores, tienen una PDR global de mensajes MCM no nula, la cual coincide con la PDR de mensajes MCM en el

canal 2 (Figura 32). Esto es así, porque estos vehículos son los que transmiten y reciben el 100% de los mensajes MCM, y todos ellos son transmitidos y recibidos por el canal 2. Además, en la Figura 35 en la que podemos observar la PDR global de los vehículos con dos interfaces, también podemos comprobar el resultado esperado: la PDR global total ha aumentado puesto que ahora todos los nodos pueden recibir todos los tipos de mensaje al recibir también por el canal 2.

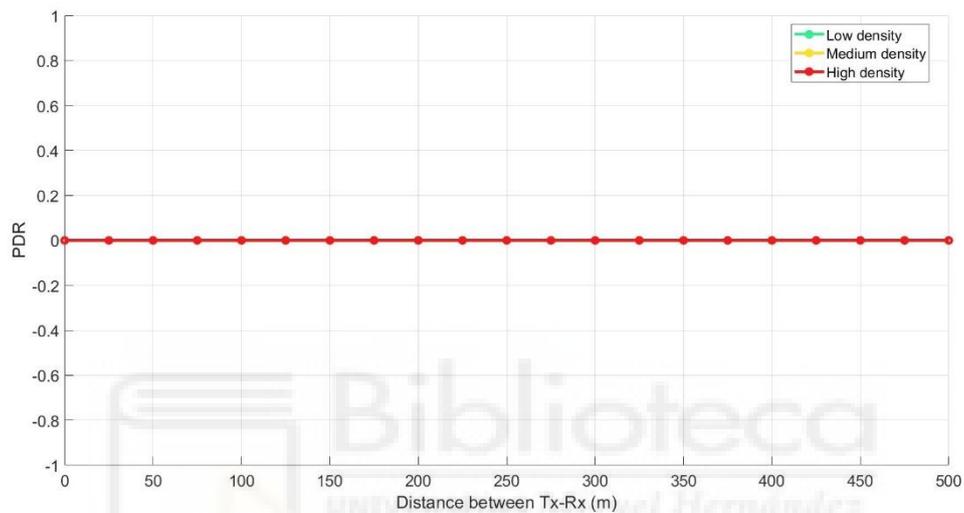


Figura 33. PDR global de los mensajes MCM experimentada por los vehículos con una sola interfaz, en el escenario con separación de servicios en dos canales, en el que coexisten vehículos con distintos servicios.

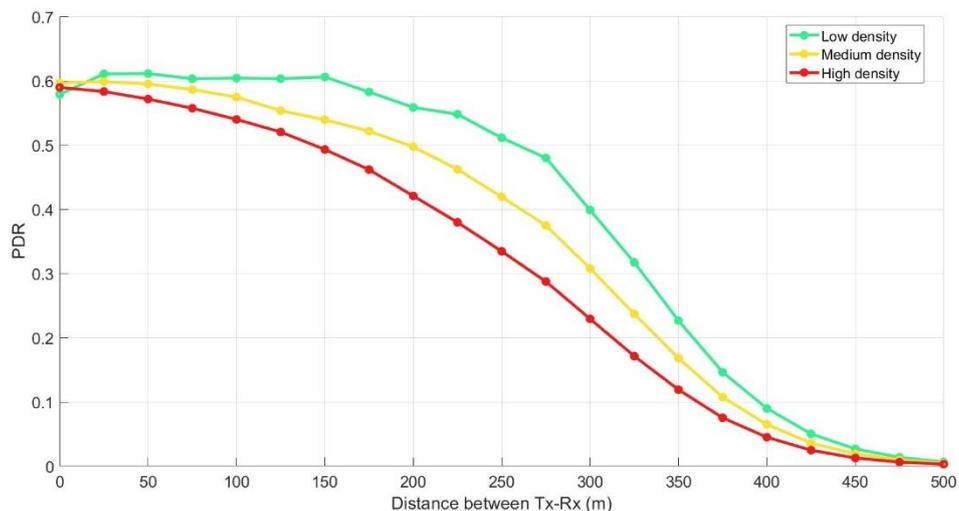


Figura 34. PDR global experimentada por los vehículos con una sola interfaz, en el escenario con separación de servicios en dos canales, en el que coexisten vehículos con distintos servicios.

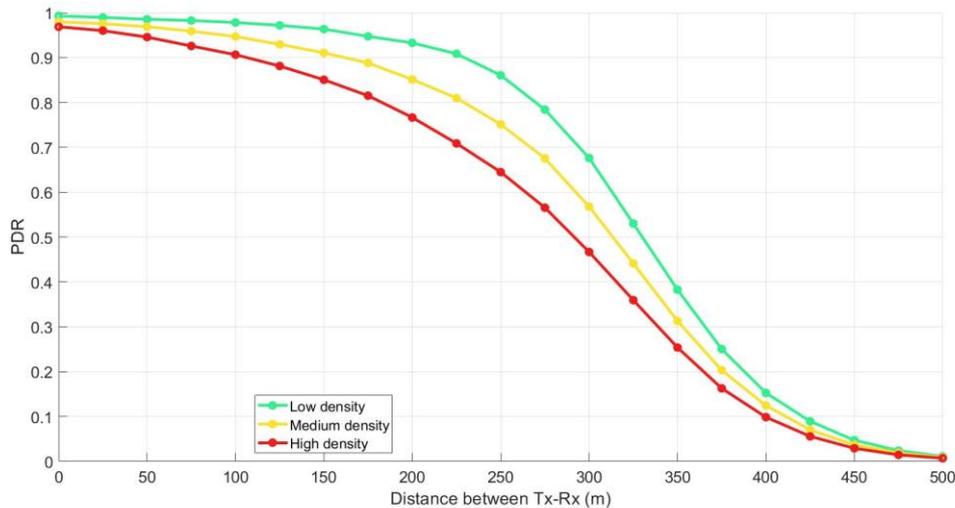


Figura 35. PDR global experimentada por los vehículos con dos interfaces, en el escenario con separación de servicios en dos canales, en el que coexisten vehículos con distintos servicios.

#### 4.4.1.2. Todos los vehículos implementan todos los servicios.

Este escenario es muy similar al anterior, pero en este todos los vehículos implementan los servicios basados en CAM, CPM y MCM. De nuevo se ha considerado el uso de dos canales radio. El canal uno para la transmisión de mensajes CAM y CPM, y el segundo para los mensajes tipo MCM. En este caso todos los vehículos disponen de dos interfaces radio, por lo que todos podrán transmitir y recibir tanto por el canal 1 como por el 2. De esta manera todos los vehículos van a ser capaces de transmitir y recibir todos los tipos de mensajes.

En la Tabla 13 tenemos la comparativa de la CBR del canal 1 para este escenario en el que todos los vehículos disponen de dos interfaces y para el escenario anterior, en el que la mitad de los vehículos disponen de una interfaz y la otra mitad disponen de dos interfaces. Podemos observar que la CBR de este canal no varía prácticamente respecto a la del escenario anterior, debido a que el número de vehículos transmitiendo en este canal no varía de una simulación a otra, pues en ambas simulaciones todos tienen al menos una interfaz, y es la correspondiente a este canal. En la Tabla 14 tenemos la CBR del canal 2, en la que podemos observar que la CBR es mayor en el escenario en el que todos los vehículos disponen de dos interfaces, puesto que en el escenario anterior este canal solo era usado por la mitad de los vehículos (los que disponían de dos interfaces) mientras que ahora este canal es utilizado por todos los vehículos.

Escenario	Densidad baja	Densidad media	Densidad alta
Vehículos con distintos servicios	0.35	0.52	0.66
Vehículos con todos los servicios	0.35	0.52	0.66

Tabla 13. CBR media del canal 1, en el escenario con separación de servicios en dos canales en el que coexisten vehículos con distintos servicios, y en el escenario con separación de servicios en dos canales en el que todos los vehículos implementan todos los servicios.

Escenario	Densidad baja	Densidad media	Densidad alta
Vehículos con distintos servicios	0.27	0.32	0.39
Vehículos con todos los servicios	0.31	0.46	0.59

Tabla 14. CBR media del canal 2, en el escenario con separación de servicios en dos canales en el que coexisten vehículos con distintos servicios, y en el escenario con separación de servicios en dos canales en el que todos los vehículos implementan todos los servicios.

En la Figura 36 podemos ver la PDR global de los mensajes CAM experimentada por los vehículos del escenario con dos canales en el que todos los vehículos disponen de dos interfaces: las correspondientes al canal 1 por el que transmitíamos los mensajes CAM y los CPM, y al canal 2 por el que transmitíamos los mensajes MCM. Esta PDR coincide con la PDR de los mensajes CAM en el canal 1 (todos los mensajes CAM se transmiten por este), y es la misma que teníamos en el escenario anterior (Figura 30), en el que la mitad de los vehículos tenían solamente una interfaz y la otra mitad dos interfaces. Estas dos PDR coinciden ya que en ambos escenarios tenemos el mismo número de vehículos y todos ellos tienen la interfaz correspondiente al canal 1, por el que transmitimos los mensajes CAM y los CPM. La PDR global de los mensajes CPM, la cual podemos observar en la Figura 37, también coincide con la PDR de los mensajes CPM del escenario anterior (Figura 31) por el mismo motivo. Y además coincide con la PDR de los mensajes CPM en el canal 1, ya que al igual que los CAM, todos los CPM se transmiten por dicho canal.

En la Figura 38 tenemos la PDR global de los mensajes MCM experimentada en el escenario actual, la cual coincide con la PDR de los mensajes MCM en el canal 2, por el cual transmitimos todos los MCM de la simulación. Esta PDR no coincide con la PDR de los mensajes MCM que hemos obtenido en el escenario anterior (Figura 32), ya que en el escenario actual todos los vehículos poseen dos interfaces pudiendo usar la correspondiente al canal 2 por el que transmitimos este tipo de mensaje, mientras que en

el anterior solo la mitad de vehículos tenían dos interfaces, y la otra mitad no podía transmitir ni recibir por este canal. Por tanto, la PDR disminuye ya que se están transmitiendo una mayor cantidad de mensajes MCM en el mismo ancho de banda y por tanto existe una mayor probabilidad de pérdida de paquetes por interferencia.

Por último, en la Figura 39 podemos ver la PDR global de todos los mensajes observando una mejora significativa respecto a la PDR global de los vehículos que solo tenían una interfaz en el escenario anterior (Figura 34). Por el contrario, esta PDR empeora levemente con respecto a la PDR global de los vehículos con dos interfaces del escenario anterior, la cual podemos observar en la Figura 35, debido a que tenemos una peor CBR en el canal 2 debido al aumento de vehículos en este.

Mantener el número de vehículos en el canal 1 y duplicar el número de vehículos en el canal 2 respecto a la simulación anterior, nos ha supuesto un empeoramiento en la CBR del canal 2 (Tabla 14) y en la PDR global y de los MCM. Este deterioro no es muy significativo teniendo en cuenta que los valores que hemos obtenidos en los parámetros mencionados siguen siendo buenos, y todos los vehículos de esta simulación tienen dos interfaces siendo capaces de transmitir mensajes CAM, CPM y MCM.

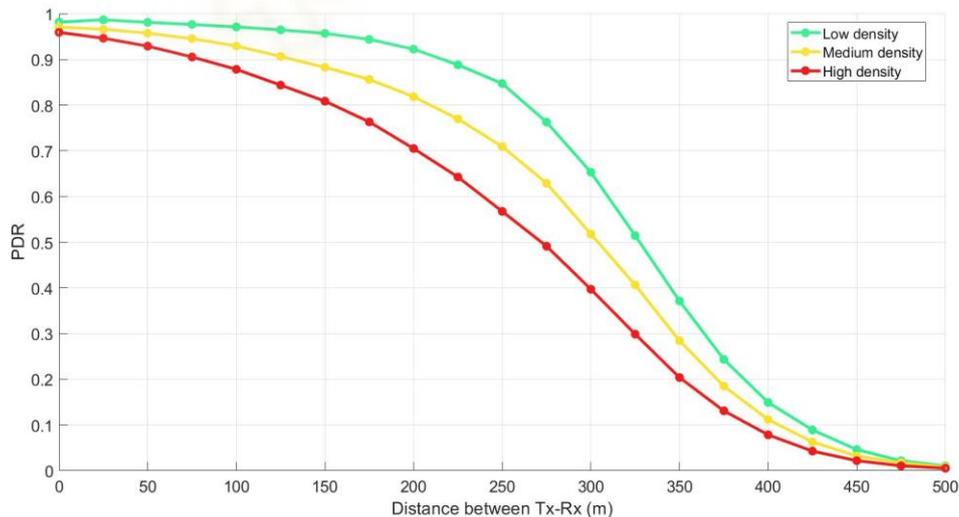


Figura 36. PDR global de los mensajes CAM experimentada en el escenario con separación de servicios en dos canales en el que todos los vehículos implementan todos los servicios.

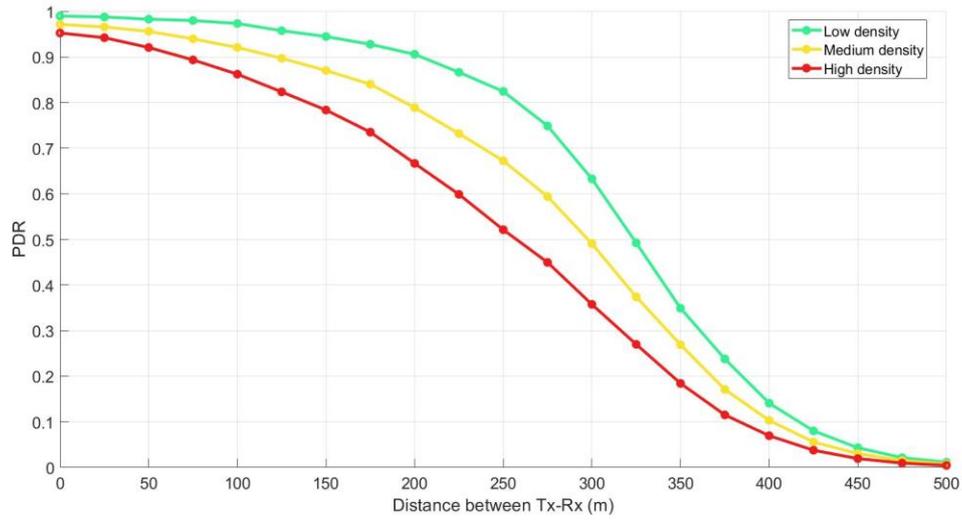


Figura 37. PDR global de los mensajes CPM experimentada en el escenario con separación de servicios en dos canales en el que todos los vehículos implementan todos los servicios.

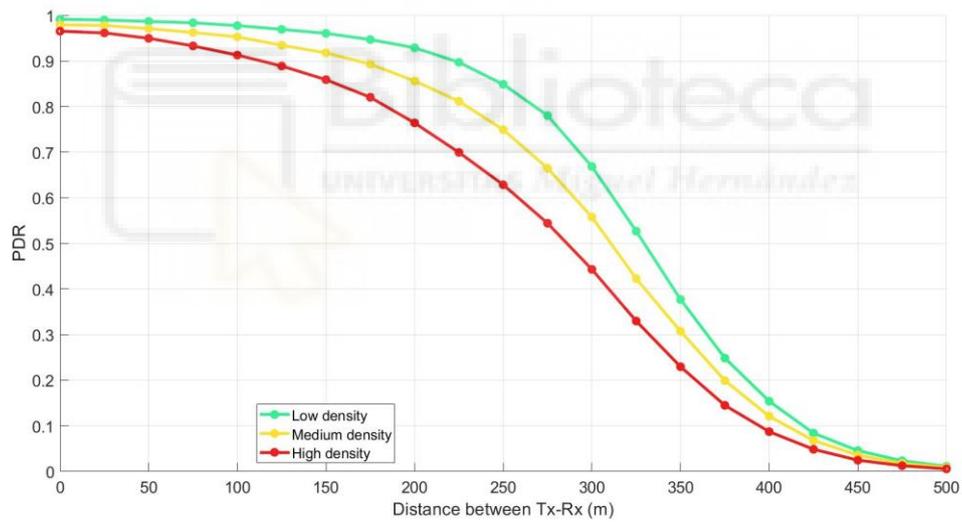


Figura 38. PDR global de los mensajes MCM experimentada en el escenario con separación de servicios en dos canales en el que todos los vehículos implementan todos los servicios.

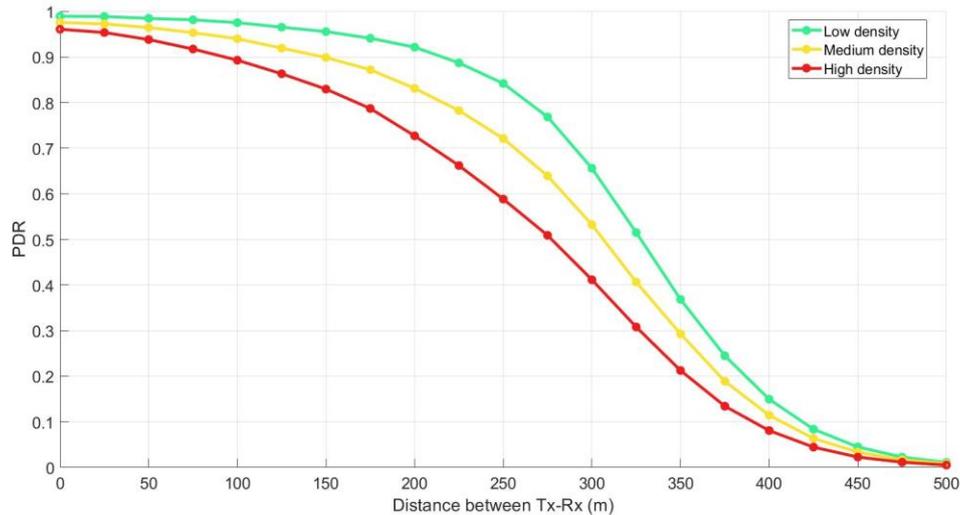


Figura 39. PDR global experimentada en el escenario con separación de servicios en dos canales en el que todos los vehículos implementan todos los servicios.

#### 4.4.2. Tres canales radio.

En este escenario hemos considerado el uso de 3 canales radio, empleando cada uno de ellos para transmitir un tipo de mensaje distinto. Por el primer canal (canal 1) se transmitirán los mensajes CAM, los mensajes CPM serán transmitidos por el canal 2 y el canal 3 será empleado para transmitir los mensajes MCM. Los tres canales son iguales entre sí y tienen un ancho de banda de 10 MHz, al igual que todos los canales de las simulaciones anteriores. Al transmitir un tipo de mensaje por cada canal, es interesante realizar un estudio en función del número de interfaces de las que dispone cada vehículo ya que solo los vehículos con tres interfaces serán capaces de recibir mensajes de todos los tipos.

##### 4.4.2.1. Coexistencia de vehículos con diferentes servicios.

En este escenario hemos considerado que un tercio de los vehículos tiene solo una interfaz radio, por la que se transmiten y reciben los mensajes CAM (canal 1), otro tercio tiene las dos interfaces radio correspondientes a los mensajes CAM (canal 1) y CPM (canal 2), y el último tercio de los vehículos dispone de las tres interfaces radio, por lo que serán capaces de transmitir y recibir mensajes CAM (canal 1), CPM (canal 2) y MCM (canal 3).

En la Tabla 15 tenemos la CBR media de los canales 1, 2 y 3 del escenario actual, en el que coexisten tres tipos de vehículos: con una, dos y tres interfaces radio. En esta tabla podemos observar que los valores de CBR obtenidos en los tres canales son bastante buenos, al transmitir solo un tipo de servicio en cada canal. La CBR de los canales 1 y 3 es muy similar, y presentan mejores valores que la CBR del canal 2. Esto es así, porque si tenemos en cuenta el tamaño y el intervalo de transmisión de los paquetes de cada canal, a la vez que el número de vehículos que tenemos en cada canal, la carga transmitida por los canales 1 (mensajes CAM) y 3 (mensajes MCM) es muy similar, mientras que la del canal 2 es mayor que en estos.

	Densidad baja	Densidad media	Densidad alta
Canal 1 (mensajes CAM)	0.20	0.26	0.32
Canal 2 (mensajes CPM)	0.25	0.34	0.43
Canal 3 (mensajes MCM)	0.22	0.27	0.32

Tabla 15. CBR media de los tres canales en el escenario con separación de servicios en tres canales, en el que coexisten vehículos con distintos servicios.

En la Figura 40 podemos ver la PDR del canal 1, que coincide con la PDR de mensajes CAM en este canal y con la PDR global de mensajes CAM, pues todos los mensajes CAM se transmiten exclusivamente por el canal 1 y todos los vehículos implementan el servicio basado en CAM. Esta PDR tiene valores muy buenos incluso para densidades medias y altas, llegando a tener una PDR de aproximadamente 0.9 a una distancia de 250 metros, para todas las densidades. Como todos los mensajes CPM y MCM también se transmiten únicamente en los canales 2 y 3 respectivamente, ocurre lo mismo con la PDR del canal 2 (Figura 41) y la PDR del canal 3 (Figura 42): la PDR del canal 2 coincide con la PDR de mensajes CPM del canal 2, y la PDR del canal 3 coincide con la PDR de mensajes MCM del canal 3. La PDR de los mensajes CPM o del canal 2 tiene valores buenos, aunque no tanto como la de los CAM, ya que tenemos valores de CBR mayores. Sin embargo, la PDR experimentada para los mensajes MCM (o en el canal 3) alcanza unos valores similares a los del canal 1, ya que ambos canales tienen valores de CBR muy similares, llegando a obtener de nuevo un valor de PDR de aproximadamente 0.9 a unos 250 metros incluso para densidades medias y altas.

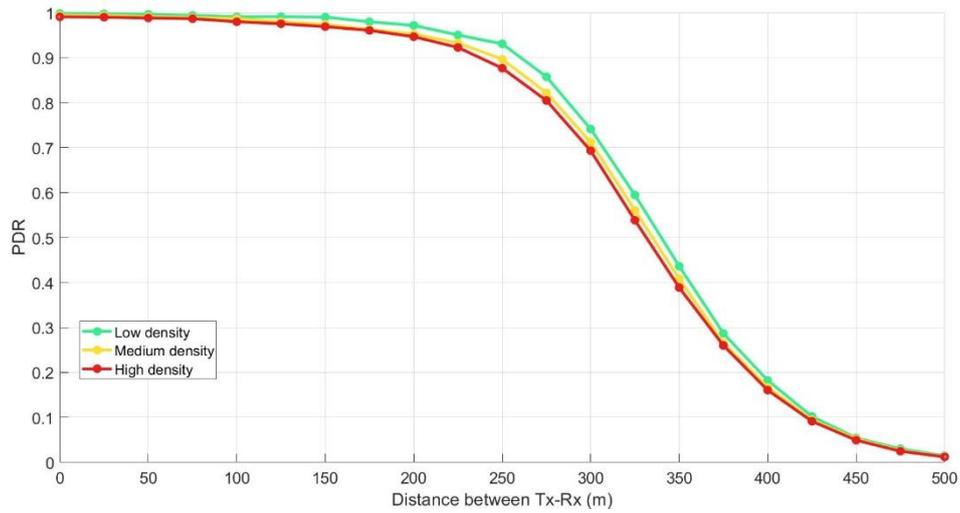


Figura 40. PDR de los mensajes CAM experimentada en el canal 1, en el escenario con separación de servicios en tres canales, en el que coexisten vehículos con distintos servicios.

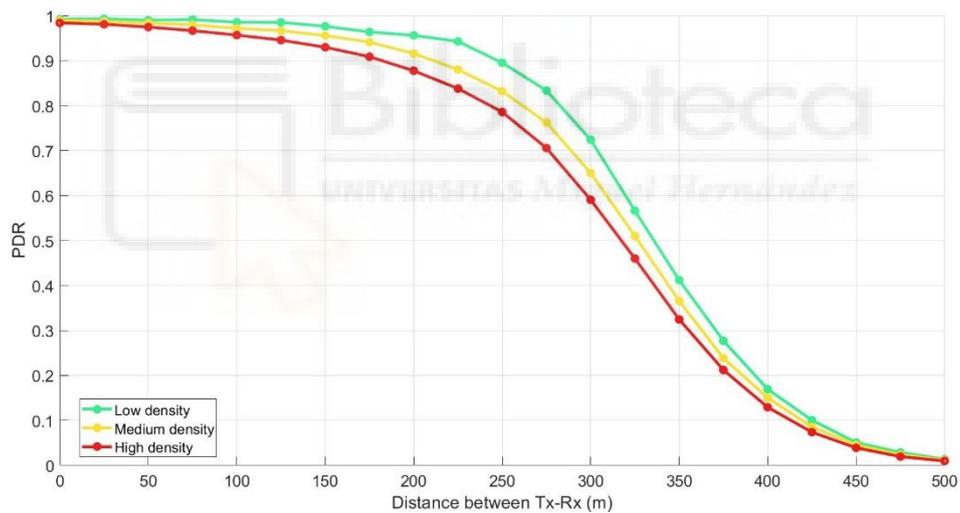


Figura 41. PDR de los mensajes CPM experimentada en el canal 2, en el escenario con separación de servicios en tres canales, en el que coexisten vehículos con distintos servicios.

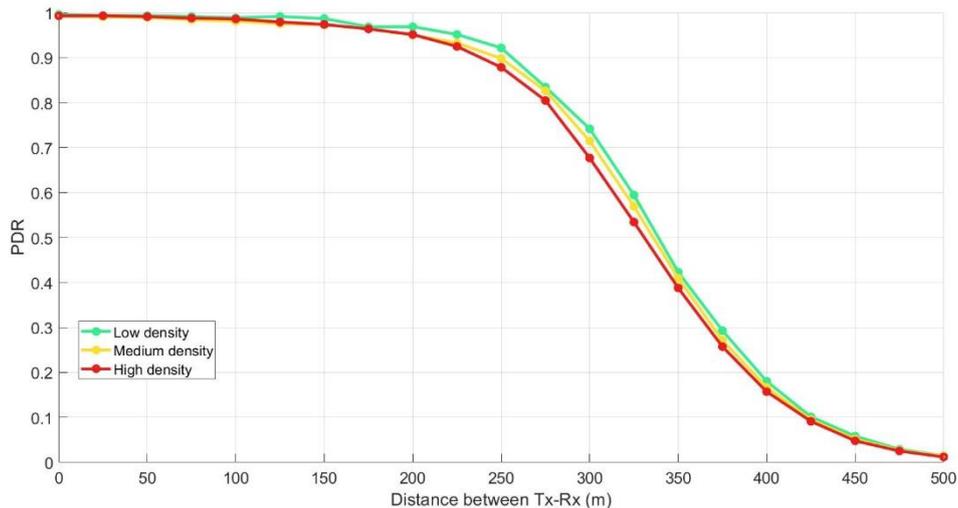


Figura 42. PDR de los mensajes MCM experimentada en el canal 3, en el escenario con separación de servicios en tres canales, en el que coexisten vehículos con distintos servicios.

A continuación, vamos a realizar un análisis de las PDR globales de los vehículos, en función de las interfaces radio establecidas en cada uno de ellos. En la Figura 43 tenemos la PDR global que experimentan los vehículos que solo tienen una interfaz habilitada, y que por lo tanto solo implementan el servicio basado en CAM. Esta PDR se aproxima a 0.35 a distancias cortas debido a que, al tener solo una interfaz, estos vehículos solo son capaces de recibir los mensajes CAM (transmitidos por el canal 1). En la Figura 44 podemos ver la PDR global experimentada por los vehículos que poseen dos interfaces, la cual se aproxima a 0.6. La PDR de los vehículos con dos interfaces aumenta respecto a la PDR de los vehículos con una, ya que son capaces de recibir tanto los mensajes CAM como los CPM. Por último, en la Figura 45 podemos observar la PDR global de los vehículos que tienen las tres interfaces disponibles habilitadas, comprobando que los valores de PDR son bastante buenos. Los valores de PDR de los vehículos con tres interfaces son buenos ya que estos vehículos son capaces de transmitir y recibir todos los servicios, y, además se producirán menos pérdidas de paquetes que en los otros escenarios, puesto que en este escenario hemos obtenido valores de CBR en cada canal más bajos.

Además, los vehículos con una sola interfaz tendrán una PDR de mensajes CPM y MCM nulas, ya que no son capaces de recibir ningún mensaje de estos tipos. Al igual que sucede con los vehículos de dos interfaces, los cuales no son capaces de recibir mensajes de tipo MCM, y por tanto tienen una PDR de mensajes MCM nula.

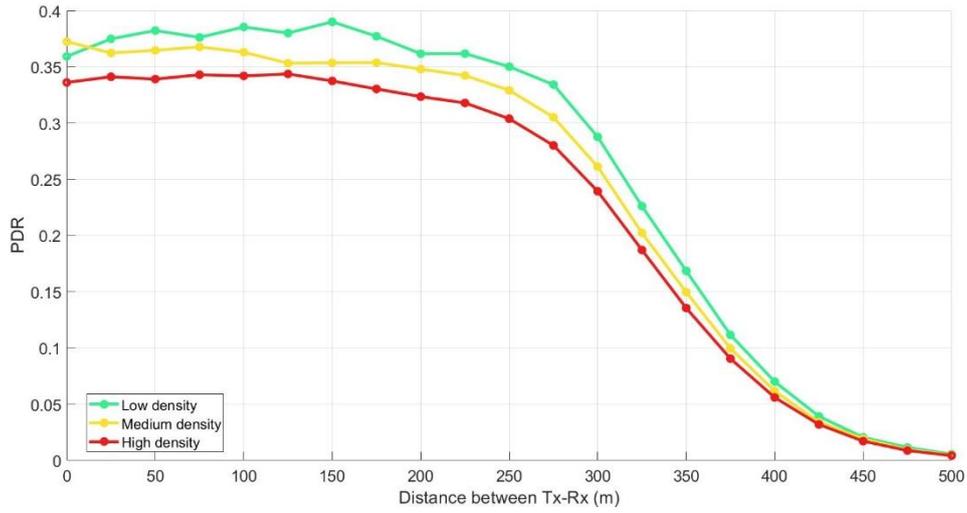


Figura 43. PDR global experimentada por los vehículos con una sola interfaz, en el escenario con separación de servicios en tres canales, en el que coexisten vehículos con distintos servicios.

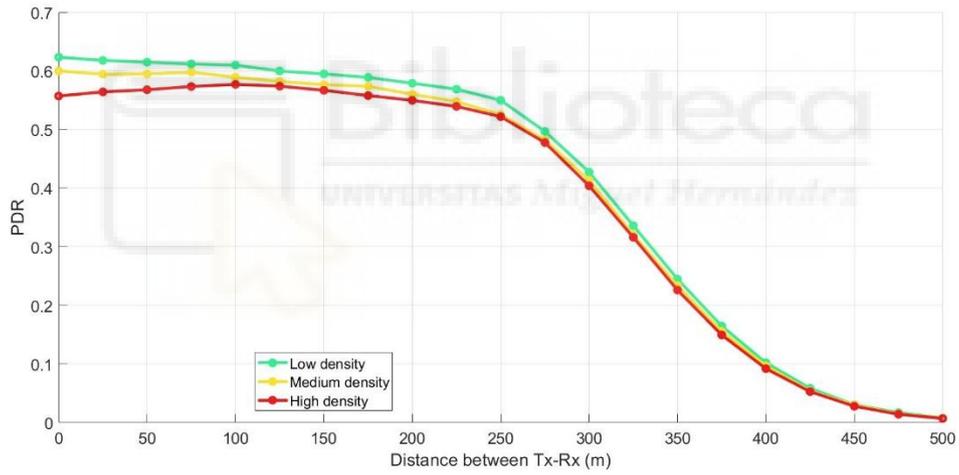


Figura 44. PDR global experimentada por los vehículos con dos interfaces, en el escenario con separación de servicios en tres canales, en el que coexisten vehículos con distintos servicios.

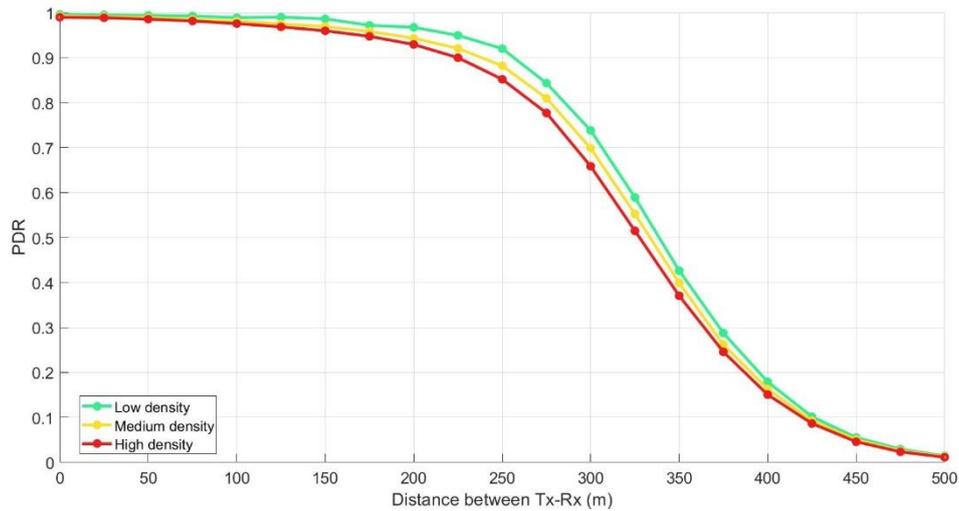


Figura 45. PDR global experimentada por los vehículos con tres interfaces, en el escenario con separación de servicios en tres canales, en el que coexisten vehículos con distintos servicios.

#### 4.4.2.2. Todos los vehículos implementan todos los servicios.

Este último escenario también considera el uso de tres canales radio, transmitiendo los mensajes CAM por el canal 1, los CPM por el 2 y los MCM por el 3. En este caso todos los vehículos disponen de tres interfaces radio, por lo que todos serán capaces de transmitir y recibir mensajes de todos los tipos. Este escenario corresponde a un despliegue futuro en el que la tecnología se haya estabilizado y todos los vehículos en circulación implementen todos los servicios y tengan todas las interfaces posibles.

En la Tabla 16, Tabla 17 y Tabla 18, tenemos una comparación entre la CBR experimentada respectivamente en los canales 1, 2 y 3, en el escenario con separación de servicios en tres canales en el que coexisten vehículos con distintos servicios (sección 4.4.2.1), y en el escenario con separación de servicios en tres canales en el que todos los vehículos implementan todos los servicios (actual sección). En la Tabla 16 vemos la comparación para el canal 1, en el que observamos que obtenemos valores iguales en los dos escenarios, ya que en ambos casos todos los vehículos tienen al menos una interfaz, que es la correspondiente a este canal. De esta manera tenemos la misma carga en el canal 1 para ambos escenarios, por lo que obtenemos valores de CBR muy parecidos. En la Tabla 17 vemos la comparación del canal 2, y en este caso podemos ver que la CBR es menor en el escenario en el que un tercio de los vehículos tiene una interfaz, otro tercio dos y otro tercio tres, puesto que sólo los vehículos con dos y tres interfaces serán capaces de transmitir y recibir por este canal (mensajes CPM). Los vehículos con dos y tres

interfaces suponen dos tercios del total de la simulación, mientras que en el escenario en el que todos los vehículos tienen tres interfaces, todos los vehículos transmiten y reciben por el canal 2, por lo que la CBR será mayor en el segundo caso. La comparación de las CBR del canal 3 podemos verla en la Tabla 18, en la que de nuevo la CBR es peor en el escenario en el que todos los vehículos tienen tres interfaces, ya que todos ellos usan el canal 3 para la transmisión y recepción de mensajes (MCM), mientras que en el otro escenario solo un tercio de los vehículos pueden utilizar el canal 3.

Escenario	Densidad baja	Densidad media	Densidad alta
Vehículos con distintos servicios	0.20	0.26	0.32
Vehículos con todos los servicios	0.21	0.27	0.33

Tabla 16. CBR media del canal 1 en el escenario con separación de servicios en tres canales en el que coexisten vehículos con distintos servicios, y en el escenario con separación de servicios en tres canales en el que todos los vehículos implementan todos los servicios.

Escenario	Densidad baja	Densidad media	Densidad alta
Vehículos con distintos servicios	0.25	0.34	0.43
Vehículos con todos los servicios	0.30	0.43	0.55

Tabla 17. CBR media del canal 2 en el escenario con tres canales, en el escenario con separación de servicios en tres canales en el que coexisten vehículos con distintos servicios, y en el escenario con separación de servicios en tres canales en el que todos los vehículos implementan todos los servicios.

Escenario	Densidad baja	Densidad media	Densidad alta
Vehículos con distintos servicios	0.22	0.27	0.32
Vehículos con todos los servicios	0.31	0.46	0.59

Tabla 18. CBR media del canal 3 en el escenario con tres canales, en el escenario con separación de servicios en tres canales en el que coexisten vehículos con distintos servicios, y en el escenario con separación de servicios en tres canales en el que todos los vehículos implementan todos los servicios.

En la Figura 46 podemos observar la PDR de los mensajes CAM en el canal 1, que coincide con la PDR total del canal 1, ya que en el canal 1 solo se transmiten mensajes de tipo CAM, y además coincide con la PDR global de mensajes CAM, ya que se transmiten únicamente por el canal 1 y todos implementan el servicio basado en CAM. Ocurre lo mismo con la PDR de mensajes CPM en el canal 2 y con la PDR de mensajes

MCM en el canal 3. Podemos observar la PDR de los mensajes CPM en la Figura 47 y la de los MCM en la Figura 48, y ambas tienen valores similares, pero peores que la PDR de los mensajes CAM (Figura 46), ya que también tienen peores valores de CBR y por lo tanto experimentan mayor nivel de interferencia. Además, las PDR de mensajes CPM y MCM del escenario actual (todos los vehículos tienen tres interfaces) son peores que las PDR de los mensajes CPM (Figura 41) y MCM (Figura 42) del escenario anterior en la que un tercio de los vehículos tenía una interfaz, un tercio dos interfaces y otro tercio tres. Esto es así porque al tener todos los vehículos de la simulación actual las interfaces correspondientes al canal 2 y 3 por los que se transmiten los mensajes CPM y MCM, se transmiten más mensajes de estos dos tipos. La PDR de mensajes CAM de la simulación anterior (Figura 40) es muy parecida a la PDR de mensajes CAM de la actual, pues también tienen valores de CBR muy parecidos, ya que en ambas simulaciones hay la misma carga de vehículos en el canal 1 por el que se transmiten los mensajes CAM.

Por último, en la Figura 49 tenemos la PDR global que experimentan todos los nodos de esta simulación, los cuales tienen tres interfaces. Esta PDR mejora respecto a las PDR globales que experimentaban los vehículos con una (Figura 43) y dos interfaces (Figura 44) de la simulación anterior. Sin embargo, esta PDR es peor que la que experimentaban los vehículos con tres interfaces de la simulación anterior (Figura 45), ya que tenemos peores valores de CBR en los canales 2 y 3, al tener más vehículos en estos.

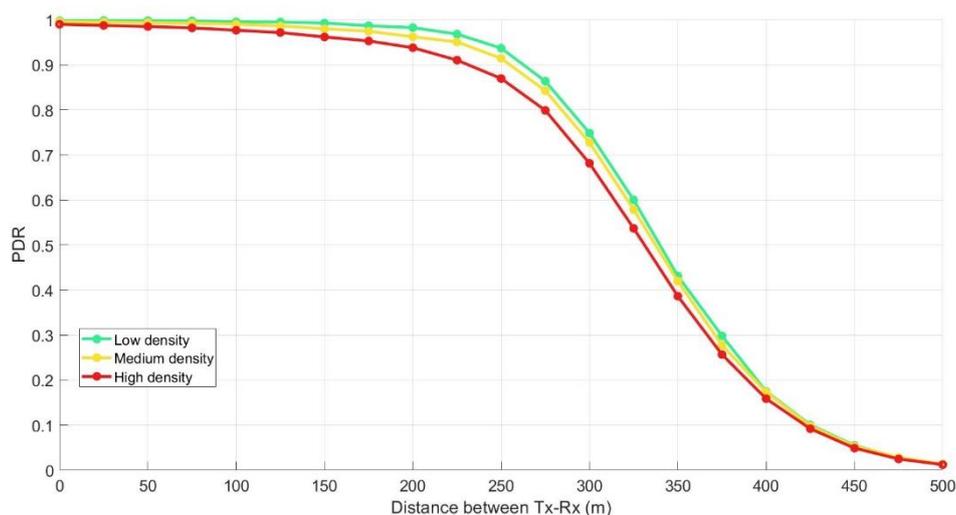


Figura 46. PDR de los mensajes CAM experimentada en el canal 1, en el escenario con separación de servicios en tres canales en el que todos los vehículos implementan todos los servicios.

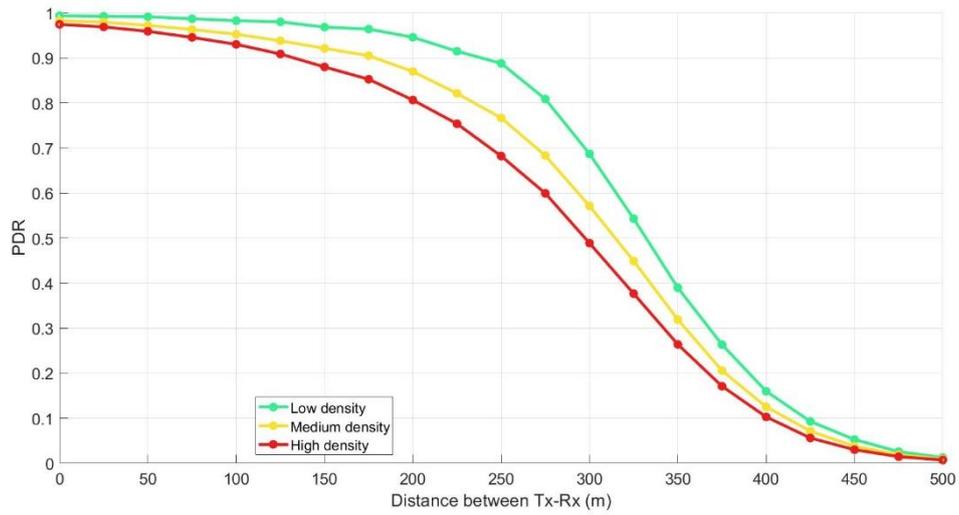


Figura 47. PDR de los mensajes CPM experimentada en el canal 2, en el escenario con separación de servicios en tres canales en el que todos los vehículos implementan todos los servicios.

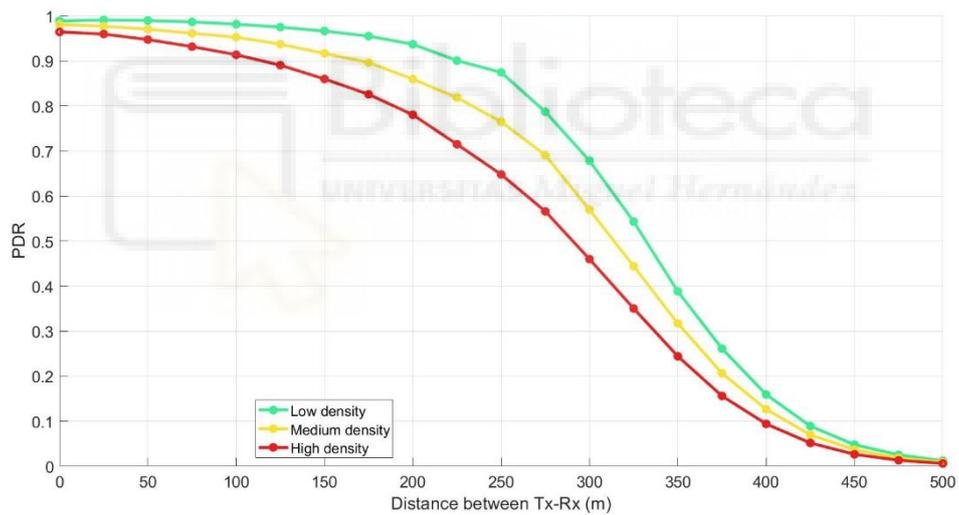


Figura 48. PDR de los mensajes MCM experimentada en el canal 3, en el escenario con separación de servicios en tres canales en el que todos los vehículos implementan todos los servicios.

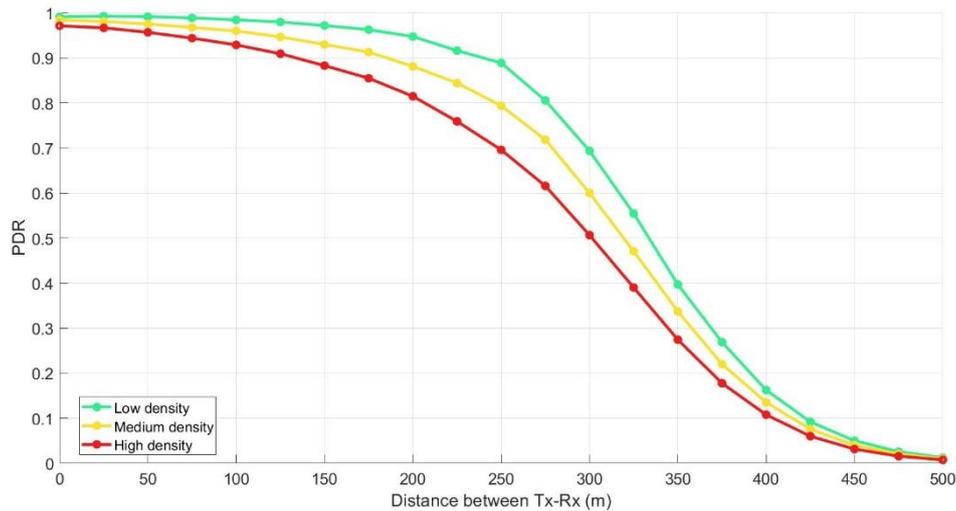


Figura 49. PDR global experimentada en el escenario con separación de servicios en tres canales en el que todos los vehículos implementan todos los servicios.

#### 4.5. Análisis.

Los resultados obtenidos han permitido analizar que a medida que aumentamos el número de canales en los escenarios multicanal con separación de vehículos por canales, mejora el rendimiento del sistema, ya que al aumentar el ancho de banda la carga de cada canal es menor y se pierden menos mensajes. La principal desventaja de estos escenarios es que si los vehículos no tienen tantas interfaces como canales por los que se transmita la información, se producirán problemas al perder toda la información de los vehículos que transmiten por los canales que no tenga establecidos en sus interfaces. Este tipo de configuraciones solo serían útiles en aquellos escenarios en los que sea posible segregar a los vehículos que no requieran comunicarse entre sí (por ejemplo, los que circulan por dos autopistas cercanas pero que no se cruzan). Sin embargo, la identificación de forma dinámica de estos grupos de vehículos no es trivial dado el alto dinamismo de las redes vehiculares y la complejidad de las redes de carreteras.

Por otro lado, aumentar el número de canales en los escenarios multicanal con separación de servicios por canales también mejora la comunicación, puesto que los canales están menos congestionados y se pierden menos paquetes. La principal ventaja de estos escenarios es que, al repartir los distintos servicios en distintos canales, aunque un determinado vehículo no tenga tantas interfaces como canales por los que se transmite la información, no perderá toda la información de ningún vehículo, si no solo la información

asociada al servicio (o servicios) transmitido por los canales que no tenga asociados a sus interfaces.

Por tanto, dada la complejidad de separar vehículos por canales en la práctica, el estudio realizado recomienda realizar una separación de servicios por canales, asignando los servicios más importantes o fundamentales al canal de la interfaz de la que disponen todos los vehículos, para que todos puedan disponer de estos. Dado que la aparición de vehículos con múltiples interfaces y con mayor número de servicios (más avanzados) será de manera gradual, todos los vehículos podrán implementar los servicios que proporcionen una mayor seguridad vial, mientras que los vehículos de más alta gama podrán implementar el resto de servicios.

La desventaja general del aumento del número de interfaces es que implementar estas interfaces supone un coste elevado para el fabricante, y por tanto también de los vehículos.



## 5. Conclusiones y líneas futuras de trabajo

En el presente estudio hemos descrito, implementado y analizado diversas configuraciones que consideran el empleo de múltiples canales en redes vehiculares. Estas configuraciones estudian la influencia del número de canales en el sistema, el número de interfaces radio por cada vehículo en el rendimiento, considerando dos grupos de escenarios bien diferenciados: separación de vehículos por canales, y separación por servicios. Mediante el análisis de los resultados hemos podido comprobar que el aumento del número de canales supone en general una mejora en el sistema, tanto en los escenarios multicanal con separación de vehículos por canales como en los escenarios multicanal con separación de servicios por canales, debido al empleo de un mayor ancho de banda.

La principal desventaja de los escenarios multicanal con separación de vehículos por canales es que, si los vehículos no disponen de tantas interfaces como canales disponibles, esto supone la pérdida total de la información de los vehículos que se encuentren transmitiendo en los canales que no tengan establecidos en sus interfaces. Este resultado nos permite concluir que este tipo de configuraciones resultarían útiles únicamente en escenarios en los que sea posible distinguir a los vehículos que no necesiten establecer una comunicación entre sí. Realizar esta identificación resulta complicado debido al poco tiempo que permanece un vehículo en un determinado tramo de carretera, al dinamismo de las redes vehiculares y a la complejidad general de las redes de carreteras.

Por otra parte, los escenarios multicanal con separación de servicios por canales tienen la ventaja de que, al repartir los servicios en distintos canales, ningún vehículo perderá toda la información perteneciente a un determinado vehículo. Esto es así porque, aunque un vehículo no tenga tantas interfaces como canales por los que se transmite la información, solo perderá la información asociada al servicio o servicios transmitidos por los canales que no tenga asociados a sus interfaces.

Así pues, debido a la complejidad que supone realizar una separación de vehículos por canales y teniendo en cuenta los resultados obtenidos en el estudio, a la hora de diseñar un futuro protocolo de comunicación multicanal, se recomienda realizar una separación de servicios por canales. Esta separación es ideal realizarla asignando los servicios más importantes o fundamentales al canal correspondiente a la interfaz de la que disponen todos los vehículos, para que todos puedan disponer de estos. De esta manera, todos los vehículos podrán implementar los servicios que proporcionen una mayor seguridad vial,

mientras que los vehículos de mayor gama podrán implementar el resto de servicios, al aumentar el número de interfaces disponibles.

El trabajo realizado abre diversas líneas de investigación futuras. En primer lugar, permite definir las líneas maestras sobre las cuales diseñar los nuevos protocolos de comunicación multicanal MCO para redes vehiculares. En el caso de que se pre-asignara cada mensaje a un canal concreto (separación de servicios por canales), deberán definirse diversos aspectos clave. Por ejemplo, qué mensajes se asignan a cada canal, teniendo en cuenta la carga estimada de cada uno de ellos, su prioridad, entre otros factores. Podría darse el caso, además, de que un canal quede sobrecargado mientras el resto de canales funcionen con una carga menor. Si los mensajes asociados a un determinado canal no pudieran transmitirse todos, habría que definir técnicas de control de congestión que los limiten o de *offloading* para transmitirlos por otros canales que sí tengan capacidad sobrante. Esta diferencia de carga entre diferentes canales sería una clara deficiencia del sistema porque los canales más cargados perderían una mayor cantidad de paquetes por colisión o interferencia, mientras otros canales menos cargados tienen capacidad de sobra. Por esta razón, sería interesante estudiar soluciones que permitan separar a vehículos por canales para balancear la carga. Estas soluciones podrían tener en cuenta el número de interfaces de los vehículos cercanos para hacer la separación de vehículos siguiendo el número más bajo. Por ejemplo, en un escenario donde la mayoría de vehículos tengan 3 interfaces, pero algunos de ellos tengan solo 2, podrían repartirse las transmisiones vehículos en 2 canales sin que ello produjera pérdidas de mensajes debido a no estar escuchando en el canal concreto. Este tipo de técnicas adaptativas en base al contexto son interesantes, pero también complejas de diseñar y analizar, debido al alto dinamismo de las redes vehiculares, pero sin duda convendría estudiar para compararlas con las técnicas estáticas basadas en separación de servicios.

También se considera trabajo futuro la posible implementación en equipos hardware de los protocolos multicanal diseñados. De esta forma podríamos validar experimentalmente el diseño de los protocolos y demostrar que es posible implementarlos en la práctica.

## Bibliografía

- [1] M. Sepulcre, J. Gozalvez, G. Thandavarayan, B. Coll-Perales, J. Schindler and M. Rondinone, "On the Potential of V2X Message Compression for Vehicular Networks," *IEEE Access*, vol. 8, December 2020.
- [2] Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Part 2: Specification of Cooperative Awareness Basic Service, Standard ETSI EN 302 637-2 V1.3.2, ETSI TC ITS, Nov. 2014.
- [3] Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Analysis of the Collective Perception Service (CPS), Standard ETSI TR 103 562 V2.1.1, ETSI TC ITS, Dec. 2019.
- [4] M. Sepulcre, G. Thandavarayan, R. Alms, J. Gozalvez, M. Rondinone, R. Blokpoel, L. Lücken and A. Correa, "Infrastructure Support for Cooperative Maneuvers in Connected and Automated Driving", *Proc. IEEE Intelligent Vehicle Symposium (IV)*, Paris (France), 9-12 June 2019.
- [5] Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Definitions, Standard ETSI TR 102 638 V1.1.1, ETSI TC ITS, Jun. 2009.
- [6] "IEEE Standard for Information technology-- Local and metropolitan area networks-- Specific requirements-- Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 6: Wireless Access in Vehicular Environments," in *IEEE Std 802.11p-2010*, July 2010.
- [7] A. Festag, "Cooperative intelligent transport systems standards in europe," *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, December 2014.
- [8] D. Jiang and L. Delgrossi, "IEEE 802.11p: Towards an International Standard for Wireless Access in Vehicular Environments", *Proc. IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, Singapore, 11-14 May 2008.
- [9] T. Leinmüller, P. Spaanderman and A. Festag, "Next steps for Multi-channel Operation in EU V2X Systems", *Proc. ITS World Congress, Melbourne (Australia)*, 10–14 October 2016.

- [10] “Intelligent Transport Systems (ITS); Multi-Channel Operation Study; Release 2”. ETSI TR 103 439 V0.0.3\_05. January 2021.
- [11] T. Leinmüller, P. Spaanderman, M. Boban, A. Brakemeier and R.K.Schmidt, “Multi-channel Usage in Day 2 and beyond EU V2X Systems”, *Proc. 22nd ITS World Congress*, Bordeaux (France), 5–9 October 2015.
- [12] Web oficial del simulador ns-3; estadísticas: <https://www.nsnam.org/about/statistics/> [Acceso: 20 de febrero de 2021]
- [13] Desarrollo del simulador ns-3: <https://nsnam.org/develop/maintainers/> [Acceso: 21 de febrero de 2021]
- [14] Web oficial del simulador ns-3: <https://www.nsnam.org/about/> [Acceso: 22 de enero de 2021]
- [15] Tutorial del simulador ns-3:  
<https://www.nsnam.org/docs/release/3.30/tutorial/singlehtml/index.html> [Acceso: 22 de enero de 2021]
- [16] User Documentation — Model Library [Internet]. Nsnam.org. [Acceso: 22 de enero de 2021]. Disponible en: <https://www.nsnam.org/docs/models/html/wifi-user.html>
- [17] ns-3: ns3::YansWifiPhy Class Reference [Internet]. Nsnam.org. [Acceso: 22 de enero de 2021]. Disponible en:  
[https://www.nsnam.org/doxygen/classns3\\_1\\_1\\_yans\\_wifi\\_phy.html](https://www.nsnam.org/doxygen/classns3_1_1_yans_wifi_phy.html)
- [18] M. Sepulcre, J. Gozalvez, “Heterogeneous V2V Communications in Multi-Link and Multi-RAT Vehicular Networks”, *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 20, issue 1, January 2021.
- [19] ETSI TC ITS, “Intelligent Transport Systems (ITS); Decentralized Congestion Control Mechanisms for Intelligent Transport Systems operating in the 5 GHz range; Access layer part”, ETSI TS 102 687 V1.2.1, Abril 2018.