

Universidad de Alcalá  
Escuela Politécnica Superior

Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación



**Trabajo Fin de Grado**

Estudio de la tecnología *Cellular Vehicle-To-Everything*

ESCUELA POLITECNICA  
**Autor:** Sergio Fando Álamo  
SUPERIOR

**Tutor/es:** Francisco Javier Escribano Aparicio

2021

UNIVERSIDAD DE ALCALÁ  
Escuela Politécnica Superior

**GRADO EN INGENIERÍA EN SISTEMAS DE  
TELECOMUNICACIÓN (GIST)**

**Trabajo Fin de Grado**

Estudio de la tecnología *Cellular-Vehicle-To-Everything*

**Autor:** Sergio Fando Álamo

**Tutor:** Francisco Javier Escribano Aparicio

**TRIBUNAL:**

**Presidente:** Jose Antonio Portilla Figueras

**Vocal 1º:** José Bienvenido Sáez Landete

**Vocal 2º:** Francisco Javier Escribano Aparicio

**FECHA:** 4 de octubre de 2021



## Resumen

El futuro de los coches pasa por estar conectados. La tecnología *Vehicular-To-Everything* permite la comunicación del vehículo con su entorno, lo que supondrá la disponibilidad de coches autónomos que abrirán un nuevo paradigma en la movilidad. Este paradigma traerá consigo una reducción de los accidentes mortales, así como de las emisiones de CO<sub>2</sub>, creando carreteras y ciudades más seguras y limpias. En el presente documento se ha estudiado la situación actual de dicha tecnología vehicular, así como su evolución para permitir más velocidad, fiabilidad y reducción de la latencia en las comunicaciones vehiculares en un futuro próximo.

Palabras clave: Comunicaciones vehiculares, DSRC, *Cellular-V2X*, 5G.

## **Abstract**

Connected cars are a must in the future. The Vehicular-To-Everything technology allows the communication between the car and its environment, which will enable the deployment of autonomous cars, and this will open a new paradigm in mobility terms. This paradigm will determine a decrease of deadly accidents, plus a decrease of CO<sub>2</sub> emissions, creating safer and cleaner cities and roads. In the present document, the current situation of this vehicular technology has been studied, along with its evolution towards higher speeds, reliability and a reduction of latency in vehicular communications in the near future.

Key words: Vehicular communications, DSRC, *Cellular-V2X*, 5G.

# Índice

<b>1. Introducción</b> .....	<b>1</b>
1.1. Contexto del trabajo. ....	1
1.2. Objetivos del trabajo.....	2
1.3. Estructura del trabajo.....	3
<b>2. Estado del arte</b> .....	<b>4</b>
2.1. Introducción .....	4
2.2. Redes Vehiculares .....	5
2.2.1. DSRC IEEE 802.11p .....	8
2.2.2. Cellular-V2X.....	9
<b>3. Tecnologías V2X</b> .....	<b>10</b>
3.1. Dedicated Short Range Communication (DSRC) .....	10
3.1.1. Introducción .....	10
3.1.2. Aplicación de DSRC: WAVE.....	12
3.1.3. Capa física.....	13
3.1.4. Capa MAC.....	14
3.1.5. Capa de red .....	14
3.1.6. Arquitectura de red WAVE.....	15
3.2. Cellular-V2X.....	16
3.2.1. Introducción .....	16
3.2.2. Modos de comunicación C-V2X en LTE .....	18
3.2.3. Modos de programación .....	30
3.2.4. Estandarización .....	32
3.3. Cellular-V2X en 5G.....	34
3.3.1. Introducción .....	34
3.3.2. Arquitectura de red 5G .....	36
3.3.3. Estructura de la Capa Física en NR V2X <i>Sidelink</i> .....	38
3.3.4. Asignación de recursos en 5G NR V2X <i>Sidelink</i> .....	40
<b>4. Estudio y ejemplificación del rendimiento del sistema en función de la distancia entre vehículos y la velocidad.</b> .....	<b>45</b>
4.1. Introducción .....	45
4.2. Contexto del sistema.....	45
4.2.1. Modelo del entorno .....	45
4.2.2. Modelo del despliegue:.....	46
4.2.3. Modelo de transmisión: .....	46

4.2.4.	Modelo del canal:.....	46
4.3.	Parametrización. ....	48
4.4.	Cálculo de los <i>User Equipments</i> .....	48
4.5.	Cálculo de la eficiencia espectral. ....	49
4.6.	Cálculo de las pérdidas de propagación y potencia recibida. ....	50
4.7.	Cálculo de la potencia de ruido.....	51
4.8.	Cálculo de la potencia interferente.....	51
4.9.	Cálculo de la relación señal a ruido e interferencias y BLER. ....	52
4.10.	Cálculo del <i>Packet Reception Rate</i> (PRR). ....	52
4.11.	Estudio para otras configuraciones.....	52
<b>5.</b>	<b>Conclusiones</b> .....	<b>55</b>
<b>6.</b>	<b>Bibliografía</b> .....	<b>57</b>

# 1. Introducción

## 1.1. Contexto del trabajo.

El presente trabajo se refiere al tema de las comunicaciones vehiculares, que pueden definirse como las comunicaciones donde un vehículo intercambia información con los elementos que se encuentran a su alrededor.

La característica principal de este tipo de comunicaciones es que se producen en entornos con una alta movilidad y cantidad de usuarios, donde se necesita una alta fiabilidad y baja latencia para garantizar la ausencia de accidentes mortales.

Estas comunicaciones son necesarias debido a dos factores importantes que necesitamos saber para comprender su importancia. El primero es el creciente número de vehículos, que generan un aumento de tráfico en carreteras y ciudades. Este aumento del tráfico enlaza directamente con el segundo factor, los accidentes. Al haber un mayor número de vehículos, las probabilidades de accidente crecen también, y con ello las probabilidades de que haya víctimas mortales. Se calcula que cada año fallecen en el mundo 1.35 millones de personas a causa de accidentes de tráfico, lo que supone una víctima cada 23 segundos [56].

Con el desarrollo de las comunicaciones vehiculares, se han creado aplicaciones enfocadas a mejorar la seguridad en las carreteras. Además, el desarrollo de las tecnologías de comunicación móvil, como 5G, abren la puerta al desarrollo de aplicaciones de conducción autónoma, necesarias para reducir el alcance de los accidentes. Además de una mejor gestión del tráfico, también traerá consigo una reducción de las emisiones contaminantes, teniendo espacios más seguros y más ecológicos en los que poder desplazarnos. Por último, entornos en los que los vehículos estén interconectados, hará que los viajes también sean más cortos.



## 1.2. Objetivos del trabajo.

El objetivo principal de este documento son el de realizar una revisión del estado del arte de la tecnología de comunicaciones vehicular *Vehicle-To-Everything (V2X)*, la cual se apoya en dos tecnologías diferentes. La primera de ellas es *Dedicated Short Range Communications (DSRC)*, la cual se basa en el estándar de comunicaciones inalámbricas IEEE 802.11p. La segunda se conoce como *Cellular-Vehicle-To-Everything (C-V2X)*, la cual se basa en las tecnologías de comunicaciones móviles celulares.

Además, se hará un diseño mediante simulaciones del funcionamiento de la tecnología Cellular-V2X.

Se pueden establecer unos objetivos parciales que nos servirá de hitos directores del trabajo:

1. Recopilar documentación e información acerca del estado actual del arte.
2. Descripción de las tecnologías DSRC y C-V2X, dado que son las más relevantes dentro de la tecnología V2X.
3. Análisis de cómo la velocidad de los vehículos y el número de usuarios puede afectar al porcentaje de receptores que reciben la información correctamente en un entorno C-V2X.

El proyecto propuesto se centra en un ámbito actualmente en constante desarrollo debido al creciente trabajo en temas como Internet de las Cosas (IoT) y conducción autónoma, por lo que es de gran interés la búsqueda de tecnologías que den mayor fiabilidad a la hora de ayudar al vehículo a evitar accidentes, mejorar el tráfico y reducir el impacto medioambiental.

Por lo tanto, el resultado de este proyecto puede ser utilizado en distintos proyectos más ambiciosos y con aplicación directa a la sociedad.

### **1.3. Estructura del trabajo.**

El documento está dividido en seis capítulos, resumidos en este apartado.

El primer capítulo contiene la introducción al trabajo, que engloba el contexto en el que desarrolla, los objetivos que se intentan alcanzar y la estructuración del proyecto.

El segundo capítulo contiene una breve descripción del estado del arte de las tecnologías que componen la tecnología vehicular V2X, las cuales son DSRC y C-V2X.

En el tercer capítulo se ahonda en las tecnologías DSRC y C-V2X, describiendo su funcionamiento, sobre qué otras tecnologías se apoyan y un breve repaso a su estandarización.

El cuarto capítulo contiene una aplicación simulada a un entorno real bajo la tecnología C-V2X. En ella, se analiza cómo la velocidad y la distancia intervehicular afecta a la densidad espectral de la modulación, el volumen de datos que se gestiona y el porcentaje de receptores que reciben esa comunicación bajo un umbral establecido.

El quinto capítulo contiene las conclusiones extraídas de la realización del trabajo, un análisis de los objetivos alcanzados y una breve descripción de líneas de trabajo futuras.

## 2. Estado del arte

### 2.1. Introducción

Las comunicaciones V2X (*Vehicle To Everything*) engloban a aquellas en las que el vehículo interacciona con los elementos que le rodean: V2V (*Vehicle To Vehicle*), V2I (*Vehicle To Infrastructure*), V2P (*Vehicle To Pedestrian*) e V2N (*Vehicle To Network*), formando un ecosistema donde el vehículo está en todo momento enviando y recibiendo información de su entorno. Estas tecnologías consisten en:

- *Vehicle To Vehicle*: adaptación del modelo Machine To Machine (M2M) a vehículos, donde intercambian información para conocer su posición y velocidad, y así mejorar la seguridad y la fluidez del tráfico [1].
- *Vehicle To Infrastructure*: se basa en el intercambio de información en sentido bidireccional entre el vehículo y la infraestructura vial (señales de tráfico y semáforos, por ejemplo), con el objetivo de mejorar la seguridad vial [1].
- *Vehicle To Pedestrian*: se trata de la comunicación que establece el vehículo con peatones o elementos vulnerables del tráfico (ciclistas o motoristas) cercanos entre sí, a fin de mejorar la seguridad permitiendo avisar con antelación sobre los riesgos que pueda haber en la carretera [1].
- *Vehicle To Network*: consiste en el intercambio de información entre el vehículo y la red celular, establecida sobre la tecnología LTE, con el fin tanto de proveer al vehículo de servicios orientados a Internet como para avisar sobre incidencias que hayan podido haber ocurrido en el trayecto [1].

En la Figura 1 se puede observar de forma esquemática cómo se relacionan las diferentes tecnologías, donde el vehículo interacciona con el resto de elementos a su alrededor.

x

Figura 1: Comunicaciones V2X [49].

Esto permite una mejora tanto de la seguridad vial como de la eficiencia de tráfico (mayor fluidez del tránsito), lo que permite reducir a su vez las emisiones de CO<sub>2</sub> de los vehículos y un ahorro de combustible para el consumidor. Además, el desarrollo de las tecnologías V2X permitirá crear aplicaciones de conducción autónoma más fiables y precisas.

Las redes V2X actuales están diseñadas a partir de dos estándares distintos: 802.11p/WAVE, basado en la adaptación de WiFi para comunicaciones vehiculares; y *Cellular V2X*, adaptación de LTE y más recientemente de 5G por el 3GPP (*Third Generation Partnership Project*) [2].

En resumen, V2X hace referencia al intercambio de información que un vehículo tenga con cualquier elemento que le rodea. Para ello, los sensores y otros elementos que permiten la comunicación necesitan enlaces con un ancho de banda grande, gran fiabilidad y baja latencia, para mejorar la comunicación en tiempo real.

## 2.2. Redes Vehiculares

Las redes vehiculares ad-hoc, conocidas por sus siglas inglesas VANET (Vehicular Ad-hoc Networks), son redes derivadas de las redes móviles ad-hoc MANET (Mobile Ad-hoc Networks), que tienen una alta capacidad de autoconfiguración y que están enfocadas para entornos de movilidad. Las redes VANET se concibieron en un principio con el fin de mejorar la seguridad vial, aunque los avances que se han ido llevando a cabo están permitiendo mejorar los servicios que son capaces de brindar. Los nodos de estas redes se encuentran en vehículos con equipos de comunicación a bordo, llamados OBU (*On Board Units*). Dichos nodos no necesitan de una infraestructura concreta para formarse, basta con que varios vehículos se conecten entre sí.

Las redes vehiculares son redes descentralizadas, donde no hay nodos centrales propiamente dichos, lo que permite una mayor flexibilidad que las redes tradicionales, pero como parte negativa, al no existir un nodo central que gestione la red, puede dar lugar a problemas en las transmisiones [4].

Dado que las redes VANET se caracterizan por la movilidad de nodos, donde estos se encuentran en constante entrada y salida de la red, el diseño de la red resulta difícil, ya que tendrá que ser de una topología dinámica. Otra de las dificultades que presentan estas redes es que, para garantizar la entrega de mensajes referentes a seguridad a la mayor cantidad de vehículos, se producen restricciones temporales, ya

que es de suma importancia que estos mensajes puedan llegar al mayor número de vehículos colindantes en el menor tiempo posible [4].

En la Figura 2 se muestra como es la topología de red VANET. En ella, los vehículos, equipados con un OBU (dispositivo radio de corto alcance), intercambian su información con los elementos de la infraestructura, RSU, como con el resto de OBUs.

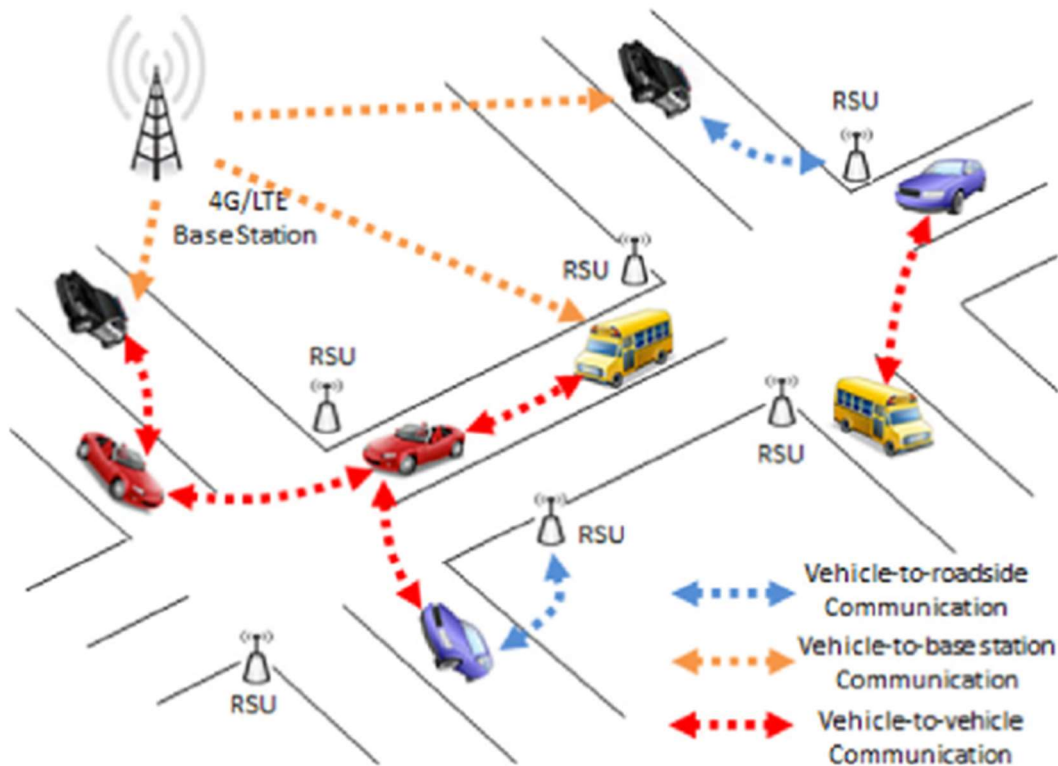


Figura 2: Esquema de una red VANET [3].

V2X es el nombre con el que se conoce a la tecnología que tiene en las redes VANET su topología de red. Nació bajo el estándar 802.11p, y fue concebido como un servicio que mejorara la seguridad vial, pero con unas capacidades limitadas. El 3GPP estableció en la *Release 14* una mejora de la tecnología 802.11p, donde se daba acceso a unas mejoras enfocadas en la seguridad, donde se podían usar aplicaciones con anchos de banda variables, y otras enfocadas al entretenimiento. Por último, la *Release 15* y *Release 16*, también de 3GPP, añadieron especificaciones referentes a aumentar el número de usuarios simultáneos, ampliar el alcance, mejorar la calidad y fiabilidad, y reducir la latencia de las comunicaciones [5].

En la Figura 3 se puede ver que los diferentes estándares de V2X no son excluyentes, sino que están enfocados en ir ampliando las funcionalidades de los estándares anteriores [6].



Figura 3: Evolución de la tecnología V2X [6].

En las Figuras 4 y 5, se puede ver cómo los diferentes estándares que se han ido desarrollando van siendo más competitivos que los anteriores, ya que podemos observar que, con la aparición de nuevas versiones, se introducen nuevas mejoras que posibilitan la aparición de nuevas aplicaciones, [7].

### Comparison: Technology operation

Technology operation	802.11p	C-V2X Rel-14/15	C-V2X Rel-16 (expected design)
<b>Specification completed</b>	Completed	Rel-14 completed in 2016. Rel-15 to be completed in 2018	2019
<b>Support for low latency direct communications</b>	✓	✓ (Rel-14 – 4ms)	✓ (≤ 1ms)
<b>Support for network communications</b>	Limited (via APs only)	✓	✓
<b>Can operate without network assistance</b>	✓	✓	✓
<b>Can operate in ITS 5.9 GHz spectrum</b>	✓	✓	✓
<b>SIM-less operation</b>	✓	✓	✓
<b>Security and privacy on V2V/V2I/V2P</b>	✓ (as per IEEE WAVE and ETSI-ITS security services)	✓ (as per IEEE WAVE and ETSI-ITS security services)	✓ (as per IEEE WAVE and ETSI-ITS security services)
<b>Security/Privacy on V2N</b>	N/A	✓	✓
<b>Coexistence in 5.9GHz</b>	✓ (Adjacent channel with 3GPP tech)	✓ (Adjacent channel with 11p; co-channel coexistence from R14 onwards)	✓ (Adjacent channel with 11p; co-channel coexistence from R14 onwards & WiFi)
<b>Evolution path</b>	✗	✓	✓ Compatible with Rel-14/15

Figura 4: Comparación entre los modos de operación de las tecnologías que engloba V2X [7].

Se puede observar que, con la llegada de C-V2X se introducen mejoras en la reducción de la latencia, pero posibilita la coexistencia con 802.11p gracias al uso del canal adyacente. En la versión de C-V2X *Release 16*, además de reducir nuevamente la latencia, se mantiene esa coexistencia en la banda de 5.9 GHz que permite la operabilidad tanto de la versión anterior de C-V2X como de 802.11p, además de permitir el uso de WiFi.

**Comparison: Use cases and performance**

Use Cases	802.11p	C-V2X Rel-14/15	C-V2X Rel-16(expected design)
<b>Target Use Cases</b>	Day 1 safety only	Day 1 safety & enhanced safety use cases	Advanced use cases to assist in autonomous driving including, ranging assisted positioning, high throughput sensor sharing & local 3D HD map updates
<b>Performance</b>			
<b>High density support</b>	Packet loss at high densities	Can guarantee no packet loss at high densities	Can guarantee no packet loss at high densities
<b>High mobility support</b>	Up to relative speeds of 500 km/hr with advanced receiver implementation	Up to relative speed of 500 km/hr as a minimum requirement.	Up to relative speed of 500 km/hr as a minimum requirement
<b>Transmission range @ 90% error, 280 km/hr relative speed</b>	Up to ~225m	-Over 450m using direct mode -Very large via cellular infrastructure	-Over 450m using direct mode -Very large via cellular infrastructure
<b>Typical transmission frequency for periodic traffic</b>	Once every 100msec (50ms is also possible)	Once every 100ms (20ms is also possible)	Supports packet periodicities of a few ms.

Figura 5: Casos de uso y rendimiento de las tecnologías V2X [7].

Con respecto a los casos de uso y rendimiento, C-V2X *Release 16* da soporte a aplicaciones de conducción autónoma, mientras que las aplicaciones de 802.11p y C-V2X *Release 14* están enfocadas principalmente a la seguridad. En el plano del alcance, tanto C-V2X como 5G pueden ofrecer un rango de hasta 450 metros, mientras que 802.11p tiene un alcance máximo de 225 metros.

### 2.2.1. DSRC IEEE 802.11p

Se trata de la versión europea de las tecnologías *Dedicated Short-Range Communications* [8], basadas en una versión de Wi-Fi orientada a vehículos. Mientras que Wi-Fi se usa principalmente para redes de área local inalámbricas, DSRC está enfocada en comunicaciones de alta velocidad y fiabilidad [9]. Es también conocida como *Wireless Access in Vehicle Environment (WAVE)* [10], ocupando la banda de 5.9 GHz establecida en 1999 en EEUU y en 2008 en Europa, para el uso de ITS (*Intelligent Transport Systems*). Es un estándar diseñado para permitir la comunicación en entornos móviles, por ejemplo, V2I y V2V.



La capa física de 802.11p es similar a la de 802.11a, que es la tecnología usada en la mayoría de los hogares. Para hacer frente a la naturaleza cambiante de un entorno móvil, el ancho de banda de 802.11p es la mitad que el de 802.11a, esto es, canales de 10MHz de ancho de banda en la banda de 5.9GHz (5.850GHz-5.925GHz). En cuanto a su protocolo de Control de Acceso al Medio (MAC en inglés), está basado en el estándar de 802.11e [11], como puede ser el uso de 4 Categorías de Acceso en lugar de las 8 que usa 802.11a.

En lo referente a características funcionales, 802.11p ofrece un alcance de corto rango en torno a 1 Km, una baja latencia que ronda los 2 milisegundos y una alta fiabilidad que facilita la interoperabilidad. Permite usar en entornos dinámicos y con condiciones climáticas adversas.

### 2.2.2. Cellular-V2X

Cellular-V2X (C-V2X) se trata de la alternativa LTE a 802.11p y su desarrollo se llevó a cabo como parte del *Third Generation Partnership Project*. Se incluyó en la *Release 14* del 3GPP para ofrecer una alternativa a las tecnologías DSRC de EEUU y las tecnologías de Sistemas de Transporte Inteligentes Cooperativos (C-IST) de Europa.

C-V2X opera bajo dos modos que permiten cubrir un amplio abanico de aplicaciones. El primero se basa en una comunicación directa de baja latencia mediante el interfaz PC5, establecido en la banda libre de 5.9 GHz. El segundo modo trata de comunicaciones que usan el interfaz Uu, establecido en la banda de comunicaciones móviles licenciadas. Dado que 802.11p no utiliza red celular, pueden coexistir sin entrar en conflicto, salvo en las ocasiones donde se requiera realizar comunicaciones ad-hoc con estaciones base ubicadas en la carretera [12]. En la Figura 5 se pueden observar las tecnologías que engloba C-V2X, dependiendo de qué elementos participen en la comunicación.



Figura 5: Cellular-V2X [12].



## **3. Tecnologías V2X**

Como se ha mencionado anteriormente, en la actualidad las dos tecnologías predominantes en el campo de las comunicaciones vehiculares son DSRC y Cellular-V2X.

### **3.1. Dedicated Short Range Communication (DSRC)**

#### **3.1.1. Introducción**

DSRC hace referencia a un grupo de tecnologías inalámbricas orientada a comunicaciones entre vehículos e infraestructura con una alta velocidad y seguridad de transmisión, sin necesidad de hacer intervenir en la red celular, basada en el estándar 802.11p. Se trata de una versión del estándar IEEE 802.11 enfocado, en proveer servicio para aplicaciones en el marco de los Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS).

Este sistema se basa en una comunicación entre estaciones situadas en vehículos ad-hoc, formando una red VANET, por lo que no existen puntos de acceso. Para suplir la falta de los mismos, se plantea que puedan existir estaciones fijas en la infraestructura que actúen como puntos de acceso para las estaciones móviles.

Las comunicaciones se desarrollan en la banda libre de 5.9 GHz. Sus comienzos se remontan a 1999, cuando la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC) de EEUU estableció un ancho de banda de 75 MHz en la banda de 5.9 GHz dedicado a aplicaciones basadas en DSRC. Cuatro años después, en 2003, la FCC amplió el uso de ese ancho de banda para los Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS), además de otros servicios ajenos a las comunicaciones vehiculares.

La banda de 5.9 GHz se encuentra dividida en siete canales con un ancho de banda individual de 10 MHz, y otros 5 MHz reservados a banda de seguridad, que juntos componen los 75 MHz reservados a DSRC. La nomenclatura de dichos canales comienza en el canal 172 y van de dos en dos hasta finalizar en el canal 184. La funcionalidad de estos canales es diferente, siendo el canal 172 el utilizado para las comunicaciones directas entre los vehículos, el 178 para tareas de control, el 184 para comunicaciones que requieran alta potencia y distancia, y los canales restantes para proveer servicios orientados a aplicaciones que requieran comunicación V2X [9] ,[13]. Esta división del espectro se puede observar en la Figura 6.

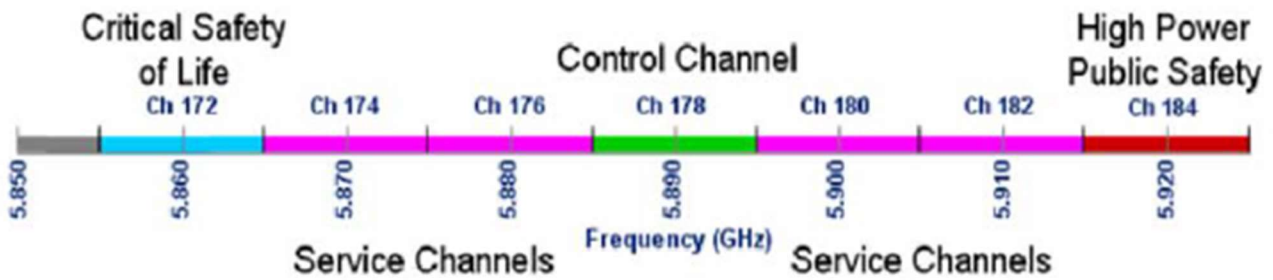


Figura 6: Asignación del espectro destinado a DSRC, dividido en bandas y canales [25].

DSRC no es utilizado exclusivamente en EEUU. En Europa, esta tecnología también es usada para aplicaciones de seguridad, aunque el espectro que ha sido asignado es diferente al de EEUU, pues hay diferentes entidades involucradas. El Instituto Europeo de Normas de Telecomunicaciones (ETSI), estableció en 2008 unas bandas de 20 y 30 MHz, respectivamente, dentro de la banda de 5.9 GHz, como bandas de seguridad. A diferencia de EEUU, en Europa la división de la banda se compone de 5 canales de 10 MHz entre 5.875 y 5.925 GHz. Esta distribución del espectro es única para todos los países miembros de la Unión Europea, que pueden destinar esta banda para aplicaciones enfocadas en seguridad vial sin limitar otros servicios que operen en dicha banda [9], [13].

DSRC provee una alta seguridad en el canal de comunicación. El vehículo receptor valida la autenticidad de los mensajes recibidos y éstos no pueden ser vinculados al vehículo, por lo que el conductor mantiene la privacidad. Cada vehículo emite su localización, rumbo y velocidad 10 veces por segundo de forma segura y anónima. Los vehículos de alrededor reciben el mensaje, y estiman el riesgo que supone el vehículo emisor, antes de que pueda ser detectado de manera visual. Esto, aparte de garantizar seguridad, permite mejorar el flujo de tráfico [14].

DSRC opera bajo dos modos [14], [15]:

- Vehículo a Vehículo (V2V): Los vehículos usan DSRC para comunicarse entre ellos por medio de Unidades de Comunicación A Bordo (OBUs).
- Vehículo a Infraestructura (V2I): Un OBU ubicado en el vehículo se comunica con la infraestructura adyacente equipadas con Unidades de Arcén (Roadside Units-RSU).

Las claves que hacen fuerte a DSRC son las siguientes [16]:

- **Baja latencia:** Los retrasos involucrados en la apertura y clausura de la comunicación son muy bajos, del orden de los 20 milisegundos.
- **Interferencia limitada:** DSRC es una tecnología robusta a la hora de enfrentarse a interferencias de radio. Esto se debe a que su alcance, al ser como máximo de 1 Km, limita las posibilidades de que haya interferencias de fuentes lejanas.
- **Alto rendimiento frente a condiciones climáticas adversas.**
- **Privacidad:** Las comunicaciones entre vehículos se llevan de forma anónima, permitiendo la privacidad de los conductores.
- **Protección gubernamental:** DSRC trabaja en bandas licenciadas que se han establecido para aplicaciones V2X. Aunque esta banda pueda usarse para otras aplicaciones, las que usan DSRC tienen prioridad.
- **Interoperabilidad:** DSRC permite comunicaciones tanto entre vehículos (V2V), como entre vehículos e infraestructura (V2I).

### **3.1.2. Aplicación de DSRC: WAVE**

La comunicación DSRC se basa en el estándar inalámbrico 802.11p [17]. La aplicación de dicha tecnología al campo de las comunicaciones vehiculares se conoce como *Wireless Access For Vehicular Environments* (WAVE). Comenzó siendo desarrollado por el Departamento de Transportes del Gobierno de los Estados Unidos, como protocolo enfocado a comunicaciones entre vehículos e infraestructura.

El protocolo WAVE proporciona un canal de control común para la señalización donde se utilizan unos mensajes concretos, denominados WSM (Wave Short Message), orientado a servicios de alta prioridad (aplicaciones de seguridad) y mensajes de control y otros canales para soportar tráfico IPv6 de menor prioridad (resto de aplicaciones).

En la Figura 7, se representan los elementos que componen la arquitectura WAVE, que se detallan a continuación.

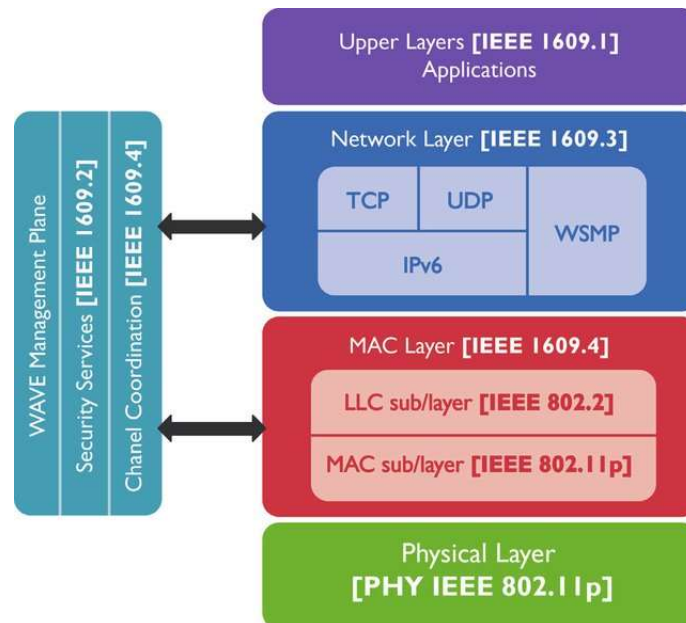


Figura 7: Protocolos de la arquitectura WAVE en los estándares IEEE 802.11p e IEEE 1609 [17].

### 3.1.3. Capa física

El estándar IEEE 802.11p define las características de las capas física (PHY) y MAC para poder operar en entornos de comunicaciones vehiculares. La capa física utiliza OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) como técnica de transmisión.

Las características del canal físico se muestran en la Figura 8, que aparece a continuación:

Características enlace físico	WAVE 802.11p
Alcance	1000 m
Tasa de transmisión	3 – 27 Mbps
Potencia transmitida	EE. UU: 760 mW, EU: 2W
Ancho de banda	10 MHz, 20 MHz
Movilidad	Alta
Banda de uso	5.86 GHz – 5.92 GHz
Espectro asignado	EE. UU: 75 MHz EU: 30 MHz
Estándares	IEEE, ISO, ETSI

Figura 8: Características de la capa física WAVE [14].

Como se ha descrito anteriormente, la banda de trabajo de WAVE es 5.9 GHz, con unas tasas de transmisión de datos que oscilan de entre los 3 a 27 Mbps (Megabits por segundo). Los anchos de banda utilizados son de 10 y 20 MHz, enfocado en entornos con una alta movilidad de los usuarios.

### 3.1.4. Capa MAC

La capa MAC tiene como objetivo poder establecer los mecanismos necesarios de acceso al canal de comunicación, a fin de que todos los sistemas en su conjunto puedan compartir el medio inalámbrico de una forma eficiente. El estándar WAVE define el uso del protocolo de acceso al medio CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance*).

Por otra parte, la capa MAC se encarga de establecer prioridad en los mensajes generados por las aplicaciones de seguridad, ya que son las más sensibles a posibles retardos. Para ello, 802.11p define un modelo de acceso al canal mejorado, denominado EDCA (*Enhanced Distributed Channel Access*), cuyo cometido es el de especificar las distintas categorías de acceso, cuatro en este caso, cada una asociada a un canal y con un nivel de prioridad distinto. Existen dos tipos de canal asociados a las comunicaciones V2X basadas en DSRC, mostradas a continuación [14],[18]:

- *Control Channel (CCH)*: reservado para las aplicaciones que requieren el menor retardo posible, como son las aplicaciones de seguridad. Se trata de un canal de emisión (*broadcast*) reservado para mensajes WSM (*WAVE Short Message*) con una baja latencia.
- *Service Channel (SCH)*: utilizado por aplicaciones específicas que pueden ejecutarse simultáneamente en otros canales de servicio. Este tipo de canal es utilizado para establecer una comunicación bidireccional entre las OBU y las RSU. Para poder operar correctamente, existen unos mensajes denominados WBSS (*WAVE Basic Service Set*), que están destinados a establecer unos determinados servicios que habiliten esas comunicaciones entre OBUs y RSU.

Como consecuencia de poder disponer de dos tipos de canales bien diferenciados, se puede realizar una gestión del espectro más eficiente, lo que permite simultanear servicios una vez coordinados por el canal de control.

### 3.1.5. Capa de red

Se trata de la capa superior a la capa MAC, estandarizada bajo el IEEE 1609.3. Está formada por dos planos denominados plano de datos y de gestión:

- Plano de datos: se compone de aquellos protocolos, software y hardware, dedicados a la transmisión de datos. Su función es,

principalmente controlar el tráfico generado por las aplicaciones, así como el generado hacia ellas, aunque, además, puede realizar tareas de gestión de tráfico entre los distintos planos.

- Plano de gestión: tiene como función la configuración y mantenimiento del sistema. Para ello, utiliza servicios del plano de datos a fin de intercambiar tráfico de administración entre los diversos dispositivos.

En la capa de red encontramos dos protocolos principales de comunicación; WSMP (*WAVE Short Message Protocol*), desarrollado específicamente para comunicaciones vehiculares con alta eficiencia en términos de uso de canal; y el protocolo de red IPv6 [14],[19].

### 3.1.6. Arquitectura de red WAVE

WAVE es una tecnología enfocada principalmente a brindar comunicaciones del tipo V2V y V2I. Como se ha indicado, la arquitectura de red está formada fundamentalmente por dos elementos: OBUs y RSUs. Esto se puede observar en la Figura 9.

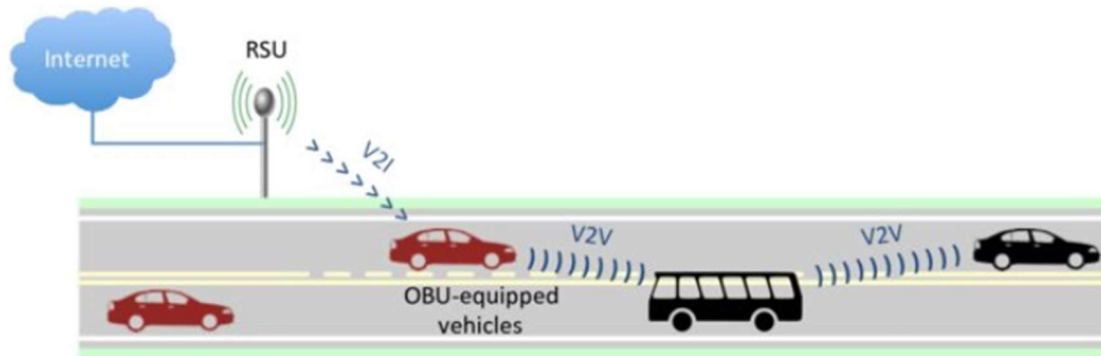


Figura 9: Comunicaciones basadas en DSRC [48].

Los OBUs realizan la función de nodo, y están situados en los vehículos. Su objetivo es poder realizar el intercambio de información entre vehículos y elementos que conforman la vía (RSU). Dadas las limitaciones de DSRC, los mensajes intercambiados están relacionados con aplicaciones de seguridad, aunque también pueden intercambiar información referente a su posición, gracias a los sistemas de navegación.

Las RSU están situadas en los elementos aledaños a la calzada (semáforos, señales o paneles informativos), y sirven de interfaz radio para la comunicación entre vehículos cuando se encuentran cerca de los mismos. Tienen equipos de radio más simples que los OBUs, preparados para comunicaciones WAVE (dependiendo de la zona geográfica donde se encuentren). Además, los RSU también realizan tareas de priorización de mensajes entre los vehículos [20].

## **3.2. Cellular-V2X**

### **3.2.1. Introducción**

*Cellular-Vehicle-To-Everything*, referida a partir de ahora como C-V2X, es una tecnología de comunicaciones que usa escenarios con comunicaciones celulares. Dichas redes se caracterizan en tener unos grandes flujos de información en tiempo real, pero manteniendo una alta fiabilidad, lo que lo hace idóneo para entornos con alta movilidad, como es el entorno de los vehículos. C-V2X está teniendo una mayor expansión que DSRC, ya que permite aumentar el alcance de las aplicaciones enfocadas a vehículos, como pueden ser aplicaciones de conducción autónoma.

El punto positivo de C-V2X es que no implica la eliminación de otras tecnologías del entorno vehicular, como puede ser DSRC. Se definió por primera vez en 2017, con la aparición de la Release 14 de 3GPP, y fue definido como un protocolo enfocado en aplicaciones de comunicación entre el vehículo con todo el conjunto de elementos que forman parte de su ecosistema, como pueden ser otros vehículos, peatones, infraestructura e incluso la propia red de comunicaciones móviles.

Lo que se busca con esta tecnología es poder manejar grandes flujos de información en tiempo real, debido a la mejora de conectividad que permite la comunicación celular. Dicha mejora, permite la interconectividad de los elementos cooperativos que forman los sistemas de transporte inteligentes (ITS), debido a como se ha expuesto anteriormente, la flexibilidad de la red en términos de gestión del tráfico de la información en tiempo real y la reducción de los tiempos de respuesta. Como resultado, en un futuro cercano, podríamos disponer de ciudades cuyo tráfico será autogestionado, reduciendo atascos y permitiendo una mayor fluidez de los sistemas de transporte, así como una mejora de la eficiencia en términos de explotación de la infraestructura [22].

Podríamos definir *Cellular-Vehicle-To-Everything* como un conjunto de distintos sistemas de comunicaciones unificados, ya que podemos establecer cuatro subdivisiones coincidiendo con las cuatro tecnologías en las que se cimenta la red, estas son [5]:

- *Vehicle to Vehicle (V2V)*: engloba aquellas comunicaciones en las que los extremos de la comunicación son vehículos, y que no tiene que ser una comunicación con visibilidad directa necesariamente. Principalmente, el objetivo es el intercambio de información de posición y sensores de los vehículos a corto alcance.
- *Vehicle to Network (V2N)*: engloba aquellas comunicaciones establecidas entre el vehículo y la red móvil. Dicha tecnología está destinada a proveer al vehículo de aplicaciones enfocadas al contenido multimedia (aplicaciones de *streaming* principalmente) o aplicaciones de navegación.
- *Vehicle to Infrastructure (V2I)*: dicha tecnología tiene como fin poder otorgarle al vehículo mayor información sobre el medio en el que se está desplazando (la carretera, principalmente). Así, tenemos un vehículo capaz de poder conocer el estado de los semáforos que tiene más adelante, o cuáles son las señales a las que está sujeta su circulación en todo momento (limitación de velocidad, peligros, etc.).
- *Vehicle to Pedestrian (V2P)*: con esta tecnología, no sólo podemos proteger a los vehículos en cuestión, sino a otro elemento fundamental de la circulación como son los peatones o ciclistas, ya que el vehículo está dotado de la capacidad de comunicarse con nuestro dispositivo móvil para tener la capacidad de reaccionar ante una situación que suponga un peligro para el peatón.

Como podemos extraer de estas tecnologías, el fin de la tecnología C-V2X es la de dotar al vehículo de la capacidad de poder operar en un entorno colaborativo, que le pueda dotar tanto de la capacidad de ser autónomo como de moverse con el resto de vehículos en forma de enjambre. Para ello, tanto los demás elementos que circulen por la calzada, así como infraestructura o peatones, tendrían la capacidad de recopilar información de la totalidad de elementos externos a ellos (esto es, resto de vehículos, infraestructura, otros peatones, etc.), procesarla y compartirla con la red, haciendo que el vehículo pueda tener acceso a información de un punto de la red de transporte o de una situación a la que todavía no ha llegado, haciendo que pueda tomar decisiones en consecuencia.



### 3.2.2. Modos de comunicación C-V2X en LTE

*Long Term Evolution* es un estándar inalámbrico de comunicaciones de alta velocidad para terminales móviles. Sus bases se asientan en las tecnologías de red GSM/Edge y UMTS/SHPA, con diferentes cambios en términos de incremento de capacidad y velocidad gracias a la simplificación del núcleo de la red y el uso de un interfaz de radio diferente [25].

La tecnología C-V2X usa dos tipos de comunicación que operan a la vez, diferenciados por los elementos que intervienen entre los extremos de la comunicación. Ambos tipos de comunicación operan tanto en LTE como en 5G.

Por un lado, tenemos la morfología **Sidelink**, que es una adaptación del núcleo del estándar LTE para permitir la comunicación directa entre dos dispositivos sin la necesidad de una estación base [57]. Este tipo de comunicación se da en las tecnologías V2I, V2V y V2P. Esto es posible gracias al uso del interfaz PC5, que opera en la banda de 5.9 GHz (banda usada por ITS).

Por otro lado, tenemos la morfología **Uplink/Downlink**, basada en comunicación a través de la red móvil, que usa la banda de estas comunicaciones para operar mediante el interfaz Uu.

A continuación, se describen dichos interfaces para caracterizar el comportamiento de las comunicaciones V2X sobre LTE.

#### **Interfaz LTE-Uu**

El interfaz LTE-Uu es el interfaz radio que conecta el UE con el eNodeB y viceversa. Maneja todos los mensajes de señalización entre el eNodeB y el MME, así como el tráfico de datos entre el UE y el S-GW.

La pila de protocolos tiene dos planos:

- Plano de usuario: porta el torrente de datos de interés al usuario y distingue qué flujo de datos viene o va a los dominios de paquetes conmutados, circuitos conmutados y el control de la difusión.

- Plano de control: Porta los mensajes de señalización de la red.

Las pilas de protocolos del plano de usuario del LTE-Uu son:

- PDCP (*Protocolo de Convergencia de Paquetes de Datos*)
- RLC (*Radio Link Control*)
- MAC (*Medium Access Control*)
- PHY (*Physical Layer*)

En el plano de control, ilustrado en la Figura 12, la pila de protocolos se compone de:

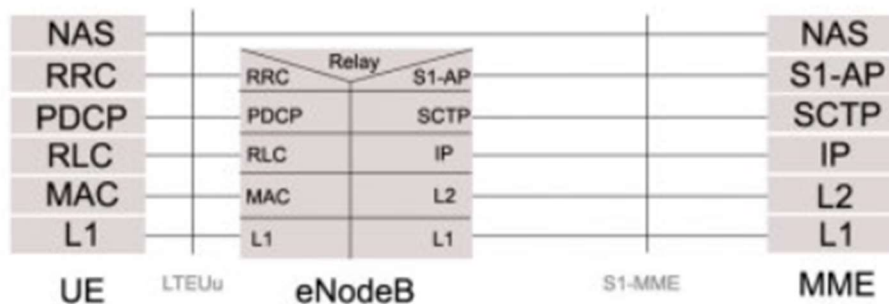


Figura 12: Plano de control EPS para el acceso E-UTRAN [27].

- NAS (*Non Access Stratum*): Conjunto de protocolos del EPC. El NAS se usa para transmitir la señalización no-radio entre el UE y la MME para accesos LTE/E-UTRAN [27].
- RRC (*Radio Resource Control*)
- RLC (*Radio Link Control*)
- MAC
- PHY

El interfaz S1 está recogido en la especificación TS 36.410 del 3GPP. Conecta el E-UTRAN y el EPC con los planos tanto de control como de usuario. Tiene dos partes: el S1-AP, perteneciente al plano de control y el S1-U, perteneciente al plano de usuario.

El S1-AP conecta el *eNodeB* con el MME y está basado en un protocolo de transmisión IP, donde se transmiten mensajes de señalización con la capa de radio de la red del E-UTRAN mediante SCTP (*Stream Control Transmission Protocol*) y la pila de protocolos IP, los cuales están representados en la Figura 13.

Después, cuando el *eNodeB* tiene que conectarse con el MME, lo hace a través del interfaz S1 buscando cada nodo MME en su correspondiente zona de influencia. El siguiente paso es establecer una Capa de Transporte de Red (*Transport Network Layer*). Un *eNodeB* y una MME pueden establecer una única conexión SCTP. Una vez que la Capa de Transporte de Red ha sido establecida, el *eNodeB* crea un interfaz S1, que tiene el propósito de controlar los datos de configuración para la operación de intercambio entre el *eNodeB* y el MME.

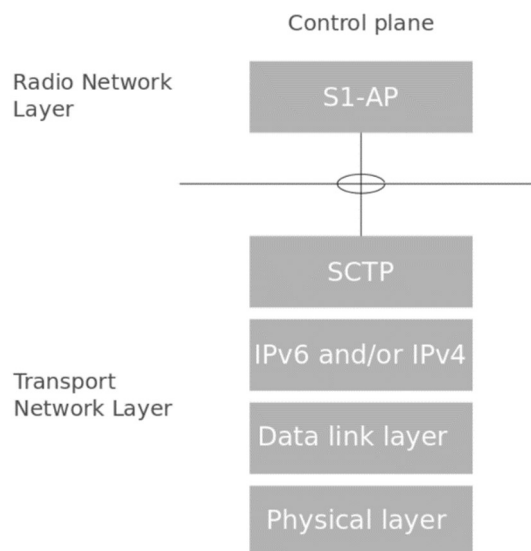


Figura 13: Pila de protocolos plano de control E-UTRAN [25].

Una vez visto cómo funciona el interfaz LTE-Uu y de qué está compuesta la arquitectura LTE, profundizaremos sobre su aplicación a la tecnología Celular-V2X. En general, la función de dicho interfaz es la de dotar al vehículo de la capacidad para conectarse a la red móvil, de forma que tenga acceso a un servidor en la nube donde los UE pueden proporcionar la información de sus sensores.

Al conectar el vehículo con la red móvil, este interfaz permite funciones de mayor alcance que las que ofrece únicamente PC5, que está más enfocado a funciones de posicionamiento y control de la velocidad entre dispositivos directamente. Gracias a la red, se pueden brindar funciones mucho más completas a los UE, como pueden ser

funciones de seguridad, funciones de información del tráfico, así como servicios comerciales (multimedia) ofrecidos por los operadores de telefonía. Además, LTE tiene un servicio de autenticación que permite a los usuarios tener total privacidad en sus comunicaciones, lo que garantiza la integridad de la información, al ser solo públicos los datos referentes al posicionamiento.

Los servicios en tiempo real que tengan una función crítica son operados mediante el sistema MEC (*Mobile Edge Computing*), que consiste en servidores en el borde de la red que tienen la función de analizar datos a gran velocidad.

Dentro del interfaz LTE-Uu, tenemos dos tipos de topología de comunicaciones:

- Comunicaciones *unicast*: es el tipo de comunicación que permite el intercambio de información entre el *eNodeB* y el UE directamente. Pueden ser de tipo bidireccional (tanto enlace ascendente como descendente). Los UE solicitan recursos radio a los *eNodeB* mediante programación dinámica, en la que permanecen conectados todo el tiempo para evitar los retardos asociados a un acceso aleatorio. En la fase de solicitud de registro (*Schedule Request*) el UE envía un mensaje al *eNodeB* para que éste realice las operaciones necesarias de asignación de recursos para que el UE pueda transmitir su información [28].
- Comunicaciones *multicast*: este tipo de comunicaciones está enfocado en el enlace descendente, donde un *eNodeB* transmite la información a varios UE. El servicio llevado a cabo es conocido como servicio *multicast* de difusión multimedia (eMBMS), recogido en la especificación 36.743 del 3GPP [4]. El Servidor de Aplicaciones (AS) de C-V2X es el encargado de recoger los datos *unicast* que se han transmitido en sentido ascendente, es decir, de los UE al *eNodeB*, además de la información que identifique el destino de dicha información, que pueden ser una o varias celdas de la red móvil [28].

## Componentes de la arquitectura LTE-Uu

El 3GPP desarrolló la arquitectura LTE-Uu en la *Release 8*. Las *Releases 9, 10 y 11* trajeron nuevas funciones y mejoras, como adición de portadoras, control de enlace descendente mejorado y técnicas de MIMO mejoradas. La *Release 12* trajo aún más mejoras, como fueron: unión de portadoras en modos TDD y FDD, *massive MIMO* y conformado del haz, redes heterogéneas o el refinamiento de las células más pequeñas [25].

LTE usa, al igual que PC5, tanto FDD como TDD. Mientras que FDD hace uso de bandas separadas para transmitir datos tanto en el enlace de subida como en el de bajada, TDD usa slots de tiempo en la misma frecuencia tanto para los enlaces ascendentes como descendentes.

Las principales ventajas de LTE, que se pueden usar en V2X, son:

- Capacidad de portadora aumentada para los usuarios y mejora de cobertura, dado que el esquema de transmisión permite trabajar muy cerca del límite de Shannon respecto de la capacidad del canal.
- Tasas de velocidad altas.
- Conexión fiable.
- Dado que la red LTE está ampliamente extendida por el mundo, reduce los costes de despliegue de la tecnología C-V2X.

El desempeño de LTE nos ha hecho alcanzar unas tasas de descarga de datos del orden de 300 Mbit/s y unas tasas de subida de datos del orden de 75 Mbit/s. La latencia RAN es menor a los 5 milisegundos para paquetes IP de pequeño tamaño en condiciones óptimas, y puede alcanzar una eficiencia espectral de entre 2 y 4 veces mejor que en tecnologías de comunicaciones anteriores.

LTE-Uu V2X usa los siguientes esquemas de modulación:

- Enlace descendente: QPSK, 16-QAM, 64-QAM (*Release 12*).
- Enlace ascendente: QPSK, 16-QAM, 64-QAM (dependiendo del UE).

Cuanto menor sea el número de símbolos de la QAM, más robusto es el sistema frente a ruido e interferencias, mientras que a mayor sea el número de símbolos de la QAM, tendremos una tasa de datos mayor.

La arquitectura de un sistema LTE consiste en una evolución de la arquitectura de red UMTS TRAN (*Terrestrial Radio Access Network*), conocida comúnmente como E-UTRAN, o SAE (*System Architecture Evolution*). El componente principal de SAE es el Evolve Packet Core (EPC).

El E-UTRAN, representado en la Figura 12 está formado por:

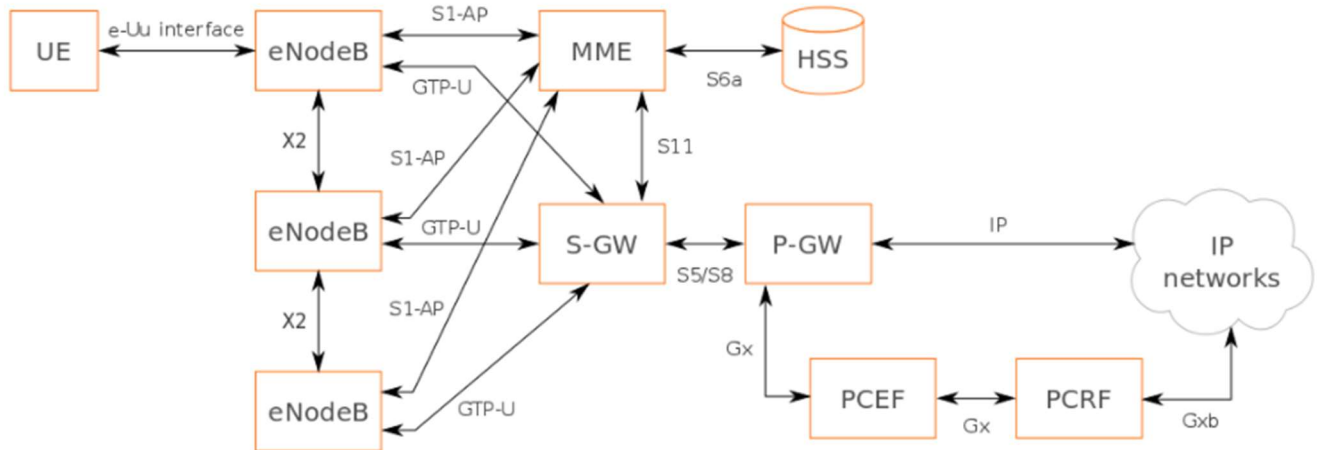


Figura 14: Arquitectura del interfaz LTE-Uu [25].

- *User Equipment (UE)*
- *evolved Node B basestation (eNodeBs)*
- *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA)*

El EPC consta de:

- Entidad de Gestión de Movilidad, o *Mobility Management Entity (MME)*.
- *Serving Gateway (SGW)*.
- *Packet Data Network Gateway (PGW)*.
- *Home Subscriber Server (HSS)*.

- Detección de Acceso a Red y Selección de Función, conocido en inglés como *Access Network Discovery and Selection Function* (ANDSF).
- *Evolved Packet Data Gateway* (ePDG).

A continuación, se describen algunos de los elementos más importantes.

El EPC es el núcleo de la red LTE. Se forma a partir de componentes que llevan a cabo funciones de gestión de movilidad, autenticación, calidad de servicio, enrutamiento de subida y descarga de paquetes IP, así como alojamiento de direcciones IP. Se basa en una arquitectura IP plana que permite a la red manejar una gran cantidad de tráfico de datos de forma eficiente y económica [25].

La Entidad de Gestión de Movilidad (MME) gestiona todos los intercambios de señalización entre los UEs y el EPC, además de los existentes entre el eNodeB y el EPC. La señalización realizada por la MME también es conocida como señalización NAS (*Non-Access Stratum*) [27], y es llevada a cabo por el protocolo homónimo NAS. La MME conecta el eNodeB a través del interfaz S1-AP y realiza la autenticación. Una vez autenticado, se conecta con el HSS y solicita la información de autenticación del usuario que intenta conectarse a la red [25].

La MME tiene las siguientes funciones:

- Autenticación: permite al UE autenticarse a la red a través del intercambio de información entre el UE y la HSS.
- Gestión de movilidad: permite la movilidad del usuario entre la red (distintos nodos de la misma red) o entre diferentes redes.
- Actualización de localización: se mantiene un rastreo de la localización del usuario a lo largo de la red, además de registrar su estado.
- Establecimiento del portador: establece al portador de UE mediante la decisión de a qué puerta de enlace (*Gateway*) del *router* conectar para mejorar la eficiencia del tráfico, siempre y cuando haya más de una puerta de enlace de Internet disponible.

- Soporte de entrega: establece un soporte de entrega entre las estaciones base (eNodeBs) en la interfaz S1. Esto se debe a que a pesar de que los eNodeBs tienen capacidad de entrega por sí mismos, la MME transmite mensajes de entrega entre los eNodeBs cuando el interfaz X2 no está disponible.

La señalización NAS concluye en el MME y es a su vez la responsable de generar y alojar identidades temporales que sean asignadas a los UEs. Coteja la autorización del UE que quiere hacer uso del servicio proveedor del PLMN y aplica las restricciones de desplazamiento del UE. El MME es el nexo de la red donde se asegura el cifrado de la señalización NAS y se gestionan las funciones de las claves de seguridad [25]. El MME otorga al plano de control la función de movilidad entre redes LTE y accesos 2G/3G mediante el interfaz S3.

El SGW, *Serving Gateway* (puerta de enlace de servicio), actúa como la unión para la entrega de los paquetes de datos del usuario entre los distintos *eNodeBs* que componen la red, con sus respectivas rutas de encaminamiento. El S-GW también gestiona la movilidad entre la red LTE y otras redes con CS (*Circuit Switching*).

Cuando el UE permanece ausente, el SGW mantiene las características de la última conexión del UE, y genera solicitudes de *paging*, el cual es el mecanismo por el que la red le notifica al UE que tiene paquetes que mandarle, en sentido descendente. El S-GW realiza además la replicación del tráfico de usuario en el caso de que las autoridades realizaran una intervención legal en el MME [25].

La P-GW (puerta de enlace de paquetes de datos de la red) asegura la conectividad del UE con paquetes de datos de la red externos, actuando de punto de salida y entrada de tráfico para el UE. Un UE puede estar conectado a más de una P-GW mientras accede a múltiples PDNs (*Packet Data Network*) [25].

El P-GW maneja la política de refuerzo, el filtrado de paquetes usuario a usuario, soporte de carga, interceptación de red legal y el cribado de paquetes. Otra característica clave del funcionamiento de la P-GW es actuar como unión para permitir la movilidad entre tecnologías pertenecientes a 3GPP y aquellas que no lo son, como por ejemplo WiMAX y 3GPP2 (en su versión CDMA 1X y EvDO) [25].

El HSS (*Home Subscriber Server*) es una base de datos central que contiene información relacionada con el usuario, así como información relacionada con la suscripción de dicho usuario a la red. Las funciones del HSS incluyen la gestión de la



movilidad, establecimiento y soporte de la llamada (o conexión a la red en el caso de la transmisión de datos), autenticación del usuario y del acceso. El HSS se basa en el registro de localización local (*Home Location Register*) y el centro de autenticación (*Authentication Center*) de las redes 2G y 3G [25].

Las PCRF (función de normas y reglas de cargo), es una combinación de CRF (reglas de cargo) y PDF (funciones de decisión de normas), y asegura la política del servicio, así como mandar información relacionada con la calidad del servicio (QoS) cuando comienza una sesión. Estas políticas de uso se garantizan en el eNodeB [25].

Las PCEF (Funciones de Garantía de Políticas y Cargos) realiza la garantía y servicio del flujo de detección de datos, permitiendo a los datos fluir a través de la P-GW implementada. A su vez, también es responsable de la QoS y de los paquetes IP en la P-GW. Las PCEF asegura las normas que permiten a los paquetes de datos pasar a través de la puerta de enlace [25].

### Interfaz PC5 (LTE Direct)

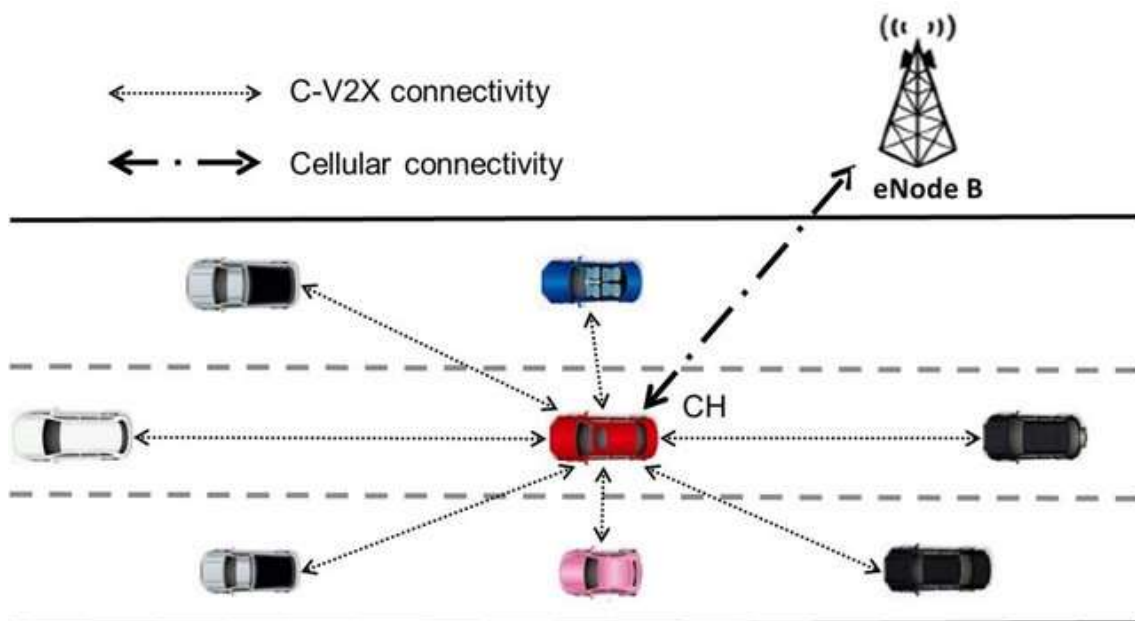


Figura 10: Interfaz PC5 para el intercambio de mensajes de Cellular-V2X [23].

Se trata de un interfaz simple basado en LTE, que tiene como objetivo la comunicación entre vehículos en comunicaciones de corto alcance (distancias menores a 1 km), en la que se transmiten mensajes enfocados a la localización y velocidad del vehículo. Además, tiene definidos dos modos de trabajo, dependiendo de si el vehículo

se encuentra en una zona con cobertura de red móvil o no. En la Figura 10, podemos observar un esquema del funcionamiento de dicho interfaz.

Como se ha mencionado, PC5 opera en la banda libre destinada a ITS de 5.9 GHz y de forma ajena a la red móvil. Dado que este interfaz tiene como función el intercambio de información referente a la posición y velocidad, es necesario un receptor GNSS (*Global Navigation Satellite System*).

PC5 se desarrolló a partir de la *Release* 12 de 3GPP, que recogió un modo de comunicación llamado LTE Direct, que es un protocolo de comunicaciones autónomo de larga distancia D2D (*Device to Device*), que establece comunicaciones directas entre dispositivos LTE cercanos.

El mayor beneficio que otorga dicho protocolo, es una menor utilización del espectro, un menor consumo energético y un mayor rendimiento. A su vez, D2D establece aplicaciones y servicios *peer-to-peer* basados en la localización.

Teóricamente, *LTE Direct* puede conectar simultáneamente hasta 1000 dispositivos en un rango de 500 metros. El carácter público de las señales (aunque manteniendo el anonimato del usuario) permiten a los usuarios transmitir información (como se ha estado exponiendo, posición y velocidad), usando este protocolo de detección, de una forma parecida a como lo hace *Bluetooth* [24].

Cuando se establece un *l* pueden comunicarse directamente sin necesidad de ningún *eNodeB* de la red.

Algunos aspectos técnicos de LTE Direct son:

- Detección D2D: pueden operar hasta 1000 dispositivos en un rango de 500 metros.
- Eficiencia de durabilidad de batería: a nivel de implementación D2D, al no haber necesidad de usar aplicaciones específicas, se consigue un mayor rendimiento de la batería, lo que se traduce en un mayor tiempo de uso.

- Interoperabilidad: aplicaciones, sistemas operativos y plataformas pueden usar la comunicación D2D simultáneamente entre ellas.

*LTE Direct* es una prestación que posibilita la detección de servicios de aplicaciones móviles. Estas aplicaciones usan *LTE Direct* como medio para monitorizar aplicaciones móviles de otros dispositivos LTE y al mismo tiempo, poder transmitir sus propios servicios.

Todos los dispositivos *LTE Direct* pueden transmitir sus requisitos y servicios usando guías. Estas guías son llamadas "*Expressions*" en la terminología LTE.

Los *Expressions* son identificadores de 128 bits de la capa de servicio que representan diferentes elementos, como pueden ser identidad, servicio prestado o localización. Dichas *Expressions* pueden ser públicas o privadas.

*LTE Direct* está optimizado tanto para sistemas LTE-FDD (*Frequency Division Duplex*) como para LTE-TDD (*Time Division Duplex*). En FDD, *LTE Direct* usa recursos del enlace de subida y en TDD usa tramas dedicadas. Puede además usar la red LTE para conseguir autenticación de usuario, gestión de recursos y temporización.

Un dispositivo habilitado para *LTE Direct* permanece activo durante un tiempo específico, ya sea para prestar servicios de transmisión como servicios de escucha. Esto hace que una de las mayores ventajas de *LTE Direct* use menos del 1% de recursos del enlace de subida de LTE.

## **Arquitectura LTE D2D**

A continuación, se describen los elementos principales que componen la arquitectura de red LTE D2D [24], la cual está representada de forma esquemática en la Figura 11:

- ProSe: *Proximity-based Services*.
- PC1: interfaz entre la aplicación ProSe y el UE y servidor de la aplicación ProSe.
- PC2: punto de referencia entre el servidor de la aplicación ProSe y la función ProSe.

- PC3: punto de referencia entre el UE y la función ProSe. Usando el interfaz PC3, el UE contacta con la función ProSe. La dirección IP de la función ProSe puede ser preconfigurada (codificación dura). Alternativamente, el UE de LTE identifica la dirección IP de la función ProSe vía DNS look-up.
- PC4: interfaz entre la EPC y la función ProSe.
- PC5: se trata de un interfaz entre dos usuarios LTE directos, basado en una comunicación punto a multipunto.

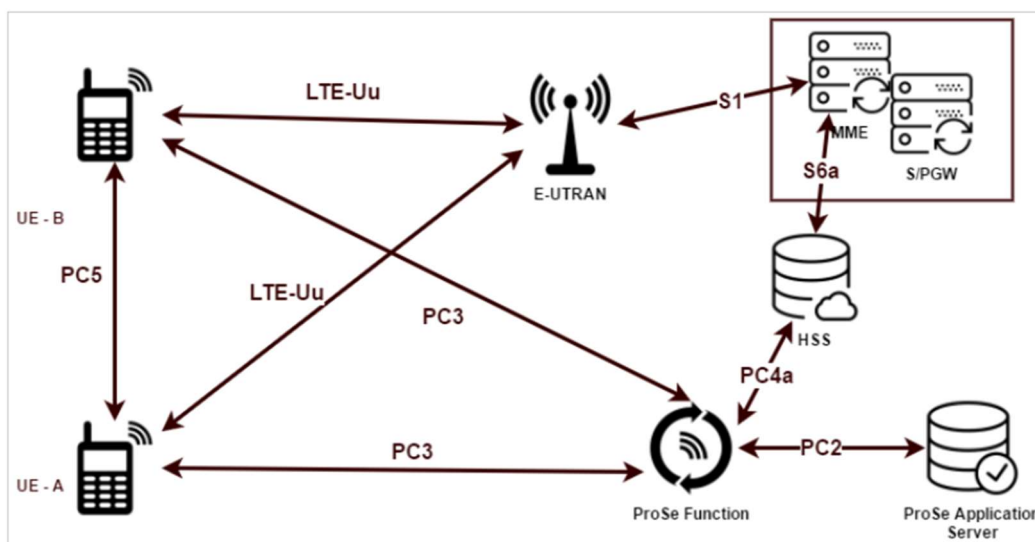


Figura 11: Arquitectura LTE D2D [24].

El usuario necesita estar en estado *RCC\_CONNECTED* para contactar con la función ProSe. Los estados RCC están asociados con el protocolo de Control de Recursos Radio (*Radio Resource Control*), que es un protocolo orientado a la señalización intercambiada entre el dispositivo y el eNodeB [58]. La autorización ProSe siempre se hace mediante la base PLMN (*Public Land Mobile Network*), la cual es una red que proporciona servicios de telecomunicaciones móviles terrestres al público [24]. Sin embargo, el UE no requiere estar registrado en la PLMN donde se requiere la comunicación ProSe. En este caso, el UE necesita contactar con la función ProSe en su HPLMN (*Home Public Land Mobile Network*), que es lo mismo que la PLMN, pero a un nivel más local. Esto se conoce como *roaming*.

La función ProSe manda los siguientes parámetros al UE:

- Parámetros de seguridad.
- Identificación del grupo.
- Direcciones *multicast* del grupo.
- Parámetros de los recursos radio para usar en un escenario OOS.

Para concluir, la plataforma ProSe (así se conoce comúnmente a la plataforma LTE Direct), ha sufrido una fase de expansión con la publicación de la *Release* 13 y posteriores, permitiendo una mejora de la capacidad de detección y comunicación D2D, incluyendo la capacidad de rebotar la señal en otros equipos de usuario usando más saltos para ampliar el alcance de la red [12].

### **3.2.3. Modos de programación**

En total tenemos cuatro modos de programación diferentes. Los modos 1 y 2 están operados en enlaces en los que opera el interfaz D2D (PC5), mientras que los modos 3 y 4 están operados por LTE-Uu.

La diferencia principal que existe entre los modos 1 y 2 es la asignación de recursos. En el modo 1, al estar los UE conectados a la red, es esta quien realiza la asignación de los recursos. Esta asignación está programada por la propia red. En el modo 2, sin embargo, son los propios UE los que seleccionan sus propios recursos, al no estar conectados a la red.

Con la llegada de la *Release* 14, en la que se definió por primera vez la tecnología V2X, se introdujeron otros dos modelos, cuyo funcionamiento es análogo al de los modos 1 y 2, pero actualizado a la topología de red V2X, dado que en los dos primeros modos la topología de red está basada en comunicaciones D2D.

Los modos 1 y 2, referentes a LTE-D2D, son:

- Modo 1 (*eNB controlled*) [27]: El eNodeB utiliza el interfaz radio PC5 (interfaz LTE Direct) para monitorizar y asignar los recursos necesarios para la comunicación entre los vehículos. Es el Operador de Red Móvil (*Mobile Network Operator-MNO*) quien realiza esa gestión del servicio de la aplicación V2X.
- Modo 2 (*Standalone*) [27]: A diferencia del modo 1, el modo 2, al trabajar de forma autónoma, no necesita de un MNO que realice esa gestión del servicio, sino que son los propios vehículos quienes mediante el interfaz PC5 negocian la asignación de recursos. Los parámetros referidos a la comunicación mediante el interfaz PC5, como son la potencia máxima transmitida y cantidad de recursos de red, son fijados legislativamente, mediante especificaciones, firmware preinstalado en los UE o una potencial configuración del servidor. Como se puede observar, este modo de trabajo es parecido al desarrollado por la tecnología 802.11p [27].

Los modos 3 y 4, referentes al interfaz LTE-V2X, son:

- Modo 3: en este modo, el eNodeB se encarga de transmitir de forma periódica mensajes llamados *System Information Blocks (SIB)* por el Canal Compartido de Enlace Descendente Físico (*Physical Downlink Shared Channel-PDSCH*). Los SIB son mensajes que contienen información referida a los procedimientos que tiene que llevar a cabo el UE para tener acceso a la celda de la red, y que necesariamente tiene que estar en el rango de cobertura del eNodeB. Dentro de todos los tipos de mensajes SIB que están presentes en LTE, en el caso de V2X se usan los SIB de tipo 21 [62]. Estos mensajes poseen información referente a la comunicación *Sidelink* enviando un mensaje del tipo *SidelinkUEInformation* al eNodeB. El UE también puede ayudar a la gestión de recursos gracias a los mensajes *SidelinkUEInformation*, ya que también son mandados al E-UTRAN para que así se liberen recursos [19].

El modo 3 de *Sidelink* de C-V2X tiene tres mecanismos fundamentales [46]:

- a) Planificación semipersistente.
- b) Planificación basada en reportes del UE: los UE pueden reportar sus indicaciones de estado en entornos radio para ayudar al eNodeB a gestionar de una forma más eficiente la asignación de recursos *Sidelink*.

c) Planificación de portadora cruzada: Si el operador de red tiene dos o más portadoras a su disposición, el eNodeB puede planificar los recursos en una de las portadoras para la transmisión Sidelink, en detrimento de las otras portadoras.

- Modo 4: De forma análoga al modo 2 de Sidelink, los UE son quienes negocian la asignación de recursos sin la necesidad de estar en rango de la cobertura de red. Cuando los UE se encuentran en la zona de cobertura de red móvil, reciben de ésta parámetros configurables Sidelink V2X, como pueden ser la frecuencia de trabajo de las portadoras, cómo negociar la asignación de recursos, cuáles de los recursos pueden usar, la señal de referencia para la sincronización de envío de tramas, el esquema de subcanalización, número de subcanales por trama y el número de bloques de recurso (*Resource Blocks-RB*) por canal [12].

En el caso en que los UE se encuentren dentro de la red, para realizar la asignación de recursos, se estudia el nivel de RSSI (*Received Signal Strength Indicator*), y se ordenan y se escogen los recursos con menor nivel de energía. Los recursos se pueden asignar de manera semipersistente o, si va a ser una transmisión corta de información, directamente se asignan los recursos con mayor disponibilidad y calidad de señal. En este proceso de asignación se tiene en cuenta la energía de la señal, así como la decodificación del PSCCH (*Physical Sidelink Control Channel*) [12].

Si los vehículos se encuentran fuera de la red, ocurre lo mismo que en LTE-D2D, es decir, se usan parámetros preconfigurados, mediante un algoritmo de reserva de recursos [46]. El algoritmo de reserva de recursos requiere que cada UE disponga del canal durante 1 segundo para procesar los resultados de los sensores para así asegurarse de que los UE cercanos reserven recursos ortogonales (en tiempo, frecuencia, o ambos) de forma semi-persistente. De este modo, se minimiza la colisión de paquetes.

En cuanto a seguridad, C-V2X tiene que garantizar las mismas funciones que DSRC, es decir, proteger el anonimato del usuario, aunque se utilice algún indicador para reconocerle en la red. A nivel de portadora PC5, no se garantiza la seguridad, sino que se delega en capas superiores de la red [12].

### **3.2.4. Estandarización**

Los estándares referidos a C-V2X han sido diseñados para brindar una mayor QoS, cobertura, velocidad de transmisión de datos, así como mayor eficiencia de la red y gestión de recursos, en comparación con las que ofrece DSRC. Además, se hace uso de

comunicaciones LTE-D2D para aumentar la fiabilidad de la comunicación y disminuir la latencia.

C-V2X ha sufrido un importante crecimiento respaldado por la organización 5GAA (*5G Automotive Association*), organización constituida por diferentes compañías del sector de las telecomunicaciones (Qualcomm y Ericsson) y de la automoción (Audi) [5].

En Europa, se ha definido un Estándar Europeo (EN), aprobado por el Instituto Europeo de Normalización de las Telecomunicaciones (ETSI), que define a C-V2X como la tecnología que brinda acceso a los sistemas basados en ITS.

Con respecto a la tecnología LTE, en la *Release 13* del 3GPP es donde aparece mencionada por primera vez su aplicación a la tecnología V2X, aunque de una forma muy limitada y enfocada principalmente en aplicaciones V2N. En esta *Release* no se consiguió poder establecer unas bases correctas de operabilidad, ya que no se podía garantizar la baja latencia y alta velocidad en las comunicaciones requeridas por las aplicaciones V2X. Otro de los principales inconvenientes presentados era la incapacidad de poder operar en entornos de poca cobertura de red móvil [30].

Más tarde, *Release 14* se incluyen requisitos que permiten la operabilidad de aplicaciones V2X, permitiendo así el uso de la tecnología LTE. Adicionalmente, se recogen especificaciones en las comunicaciones D2D. Al contrario que la *Release* anterior, aquí sí se puede establecer un límite operacional aceptable en términos de reducción de latencia, además de poder usar aplicaciones V2X en zonas sin cobertura de red. Dado que se basa en la tecnología LTE, esto significa que para el despliegue de C-V2X se puede usar la red móvil celular existente, lo que reduce los costes significativamente [31].

La *Release 15* se centra en *5G Standalone*, en la que se simplifica la arquitectura RAN (*Radio Access Networks*). Esta arquitectura tiene como punto diferencial el que no se apoya en ninguna otra arquitectura, por lo que la red radio tiene que ser nueva, y es el punto de origen de la aplicación de C-V2X en 5G. En cuanto a LTE, se introducen mejoras enfocadas en el EPC, ya descritas anteriormente [32].

En la *Release 16* se definen los requerimientos relacionados con la QoS en aplicaciones C-V2X, soportadas por la tecnología NR de 5G. El objetivo es poder notificar o anticipar un cambio repentino en la calidad del servicio, como puede ser debido a una pérdida de paquetes. En esta *Release* se establece la creación de un interfaz V2X estandarizado, en el que las aplicaciones V2X puedan exigir unos requisitos de QoS específicos, además de notificar cuándo dichos requisitos de QoS pueden dejar de estar



asegurados. Asimismo, se establece una capa de aplicación C-V2X. Además de 5G NR, también se introduce la tecnología 5G Sidelink, para garantizar los requerimientos de baja latencia y QoS en topologías D2D [33].

### 3.3. Cellular-V2X en 5G

#### 3.3.1. Introducción

En la actualidad tenemos dos configuraciones de redes 5G: *Stand Alone (SA)* y *Non Stand Alone (NSA)* [34]. La diferencia entre SA y NSA radica en que en la primera configuración la red 5G tiene una tecnología de acceso radio propia llamada *New Radio (NR)*, además de un núcleo de red 5G, mientras que en NSA coexisten nodos 4G y 5G que usan tanto LTE como NR, conectadas a un EPC de la red LTE. Estas configuraciones están representadas en la Figura 15.

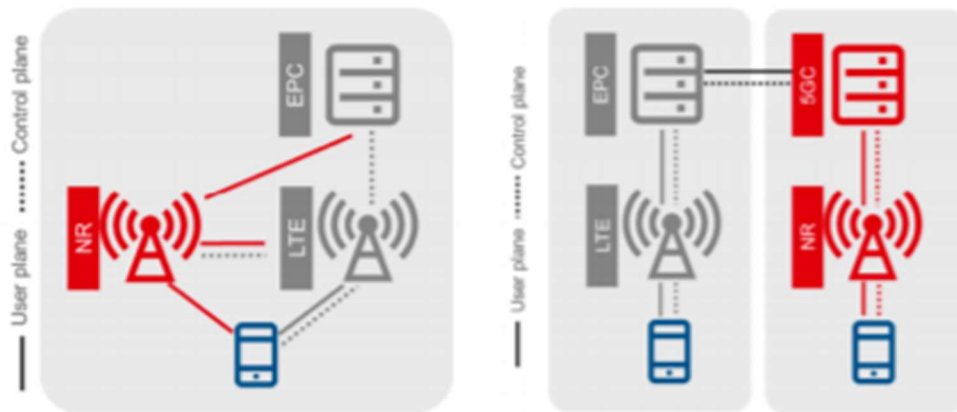


Figura 15: Planos de control y usuario en NSA y SA de 5G [34].

En NSA, también llamado EN-DC (E-UTRAN – *NR Dual Connectivity*), la RAN se compone de una eNB, que controla el tráfico del plano de control (señalización entre núcleo de red y UE), y una gNB, que gestiona el tráfico en el plano de usuario.

En el caso de SA, se tiene una única RAN compuesta por las gNB que se comunican con el núcleo de red 5G, y que gestionan tanto el tráfico del plano de usuario como el de control. En este caso, las comunicaciones entre las redes 4G y 5G se llevan a cabo en los núcleos de red.

5G tiene tres casos de uso ilustrados en la Figura 16:

- Banda ancha móvil mejorada (*enhanced Mobile BroadBand - eMBB*).
- Comunicaciones de altísima fiabilidad y baja latencia (*Ultra Reliable Low Latency Communications - uRLLC*).
- Comunicaciones masivas de máquinas (*massive Machine Type Communications - mMTC*).

El despliegue inicial de 5G traerá consigo la implementación de eMBB, que provee de un mayor ancho de banda de datos a las comunicaciones, junto con unas mejoras moderadas de latencia. mMTC ya ha sido desarrollado dentro de las *Releases 13 y 14* de 3GPP como parte de las tecnologías *Low Power Wide Area (LPWA)*. uRLLC requiere un mayor desarrollo del núcleo 5G para reducir drásticamente la latencia extremo a extremo, por lo que todavía no puede ser implementado [35].

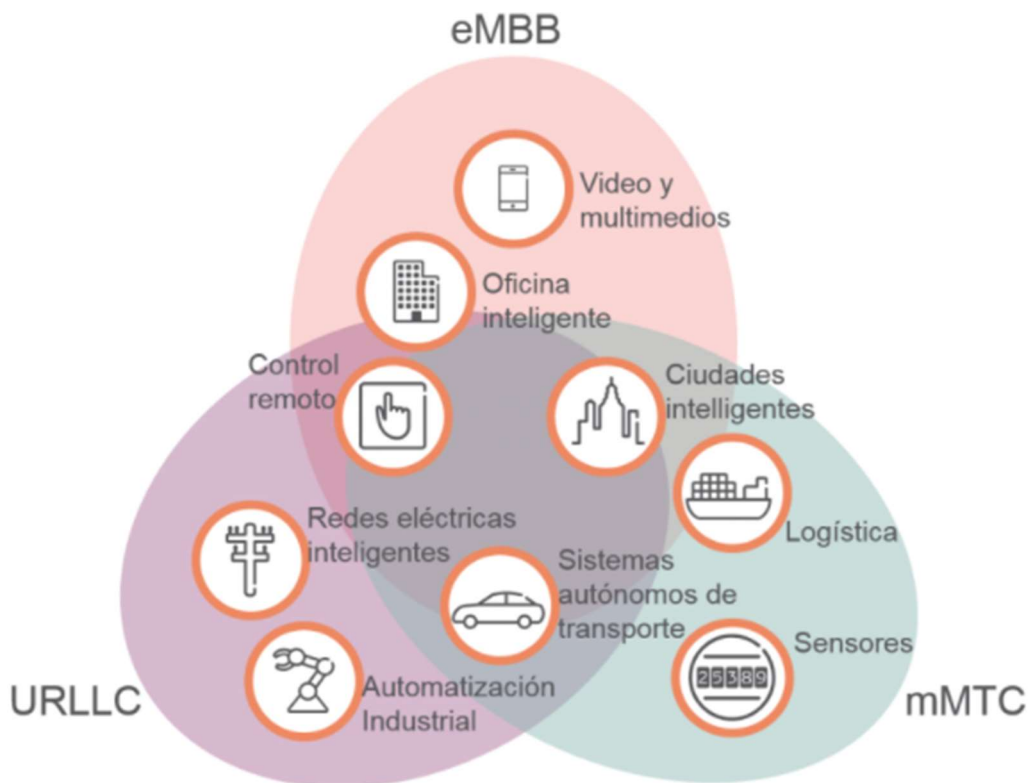


Figura 16: Casos de uso 5G [36].

### 3.3.2. Arquitectura de red 5G

La arquitectura del sistema 5G, mostrada en la Figura 15, soporta dos modos de comunicación para V2X, análogos a los existentes en LTE: se denominan comunicación sobre el interfaz PC5 y comunicación sobre el interfaz Uu. El interfaz PC5 soporta comunicaciones *Sidelink* para NR y LTE. Las comunicaciones V2X sobre Uu son posibles bajo NR NSA (se necesita una estación base) y SA (sin necesidad de estación base). En la *Release 16*, se detalla que las comunicaciones V2X solo están diseñadas para comunicaciones *unicast*. Sin embargo, en la *Release 17*, se discute la posibilidad de mejorar la capacidad del sistema para permitir comunicaciones *multicast* en las transmisiones 5G [38].

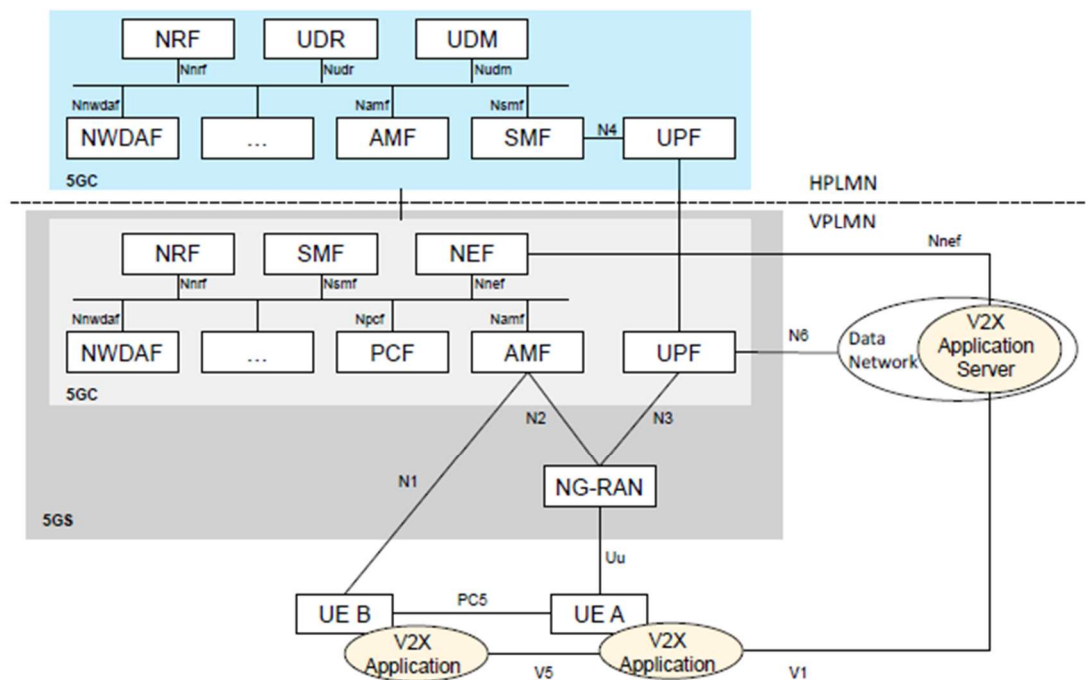


Figura 17: Arquitectura 5G en comunicaciones V2X sobre los interfaces PC5 y Uu [37].

En la Figura 17 se muestra una vista de alto nivel de la arquitectura 5G en comunicaciones V2X sobre los interfaces PC5 y Uu, concretamente en la arquitectura de desplazamiento con breakout local. El *breakout* local permite al *Mobile Network Operator* (MNO) establecer conexiones con la red a la que está adscrito el usuario, conocida como *Home Public Land Mobile Network* (HPLMN), para así solicitar datos, provistos por la red visitada, llamada *Visited Public Land Mobile Network* (VPLMN). Cuando un UE se desplaza, los servicios provistos por la HPLMN se usan para proporcionar parámetros relacionados con servicios V2X en la VPLMN. El *breakout* local es crítico a la hora de reducir la latencia. Las comunicaciones V2X sobre PC5 soportan operaciones de desplazamiento e inter-PLMN. En el caso de comunicaciones PC5 sobre V2X inter-PLMN, los parámetros PC5 deben ser configurados consistentemente entre los UE que están dentro de una cierta área geográfica.

El Sistema 5G consiste en los dominios de Red de Acceso Radio de Nueva Generación (*Next-Generation Radio Access Network*—NG-RAN) y núcleo de red 5G (5G

Core, 5GC). EL5GC consiste en una serie de funciones de red, como son la función de gestión de acceso y movilidad (AMF), función de análisis de datos de red (NWDAF), la política de función de control (PCF), función de repositorio de datos (NRF), función de exposición de red (NEF), repositorio unificado de datos (UDR), gestión de datos unificados (UDM), UPF y SMF, entre otros. Se puede observar en la Figura 17 que los NFs dentro del Plano de Control 5GC usa interfaces basados en el servicio para sus interacciones. También se muestran los interfaces de la capa de aplicación entre las aplicaciones V2X del UE y el Servidor de Aplicación V2X (AS). Los interfaces de la capa de aplicación se pueden usar para intercambiar información de la capa de aplicación y parámetros de configuración útiles para el UE, con el fin de configurar y establecer una comunicación V2X. La arquitectura 5G System (5GS) especificada en [47] no introduce nuevos NFs para soportar comunicaciones V2X. En su lugar, los NFs existentes han sido ampliados para incorporar funcionalidades relacionadas con V2X.

El UE puede reportar la capacidad V2X y la capacidad de información V2X PC5 al 5GC, además de poder recibir parámetros de éste, sobre el punto de referencia N1 y/o desde un V2X AS sobre el punto de referencia V1 (ver Figura 17). El UE incluye los procesos para la comunicación V2X sobre PC5 y para establecer la configuración de parámetros, como pueden ser: IDs de destino de la capa de enlace, parámetros de recursos radio, información de las direcciones de los AS, mapeo entre los tipos de servicio V2X y las frecuencias V2X). Un UE puede recibir los parámetros para sus comunicaciones V2X sobre PC5 o Uu de diferentes fuentes. En este caso, el UE debe considerarlas siguiendo el siguiente orden de prioridad [37]:

- a) Si los parámetros le han sido otorgados por el PCF a través del AMF usando señalización de tipo NAS.
- b) Si le han sido otorgados por el AS V2X vía punto de referencia V1.
- c) Si han sido preconfigurados en la Tarjeta de Circuitos Integrados Universal (*Universal Integrated Circuit Card-UICC*).

Preconfigurados en el UE.

El PCF puede proveer al UE con la autorización y los parámetros de la política de uso necesarios para la comunicación V2X sobre PC5 o Uu, como son, por ejemplo, parámetros radio cuando el UE no se encuentra bajo cobertura de red 5G. El PCF además provee al AMF con los parámetros necesarios que son parte del contexto del UE en tareas referentes a configurar y gestionar comunicaciones V2X. Esto incluye parámetros relacionados con perfiles o flujos de QoS PC5. Estos parámetros son recuperados desde la UDR. El NRF ayuda a otros NFs a detectar y seleccionar un PCF apropiado teniendo en cuenta las capacidades V2X.

El 5GS otorga servicios NEF para permitir la comunicación entre NFs en el PLMN y el AS V2X. Adicionalmente, el NEF almacena los parámetros de servicio V2X en el UDR. El AS V2X incluye funcionalidades AF (*Application Functions* - funciones de aplicación) del tipo: petición de servicios 5GC, suministro al UE y/o el 5GC con parámetros para comunicaciones tanto sobre PC5 como sobre Uu.

La interconexión de red entre 5GS V2X y 4G *Evolved Packet System* (EPS) V2X no requiere de nuevos interfaces a nivel de arquitectura de red y no tiene impacto sobre las entidades de red existentes 5GC y 4G EPS. Cuando el UE se encuentra en la red 5G o EPS, es aprovisionado por el PCF en 5GC o por el Control de Función V2X en EPC en comunicaciones V2X.

### **3.3.3. Estructura de la Capa Física en NR V2X *Sidelink***

V2X NR *Sidelink*, recogido en la *Release* 16, opera en las mismas frecuencias que NR Uu, según se recoge en la *Release* 15 [39], [40]. Estos rangos de frecuencias son [41], [42]:

- Rango de frecuencias 1 (FR1): 410 MHz-7.125 GHz.
- Rango de frecuencias 2 (FR2): 24.25 GHz-52.6 GHz.

Pese a que ambos rangos soportan NR V2X *Sidelink*, el diseño de ha sido enfocado principalmente en FR1 [39].

Las transmisiones en NR V2X *Sidelink* usan la forma de onda basada en Multiplexación de División Ortogonal de Frecuencias (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing-OFDM*). La estructura de la trama *Sidelink* está organizada en tramas radio, con duración de 10 ms. Una trama radio está a su vez dividida en 10 subtramas, con duración de 1 ms cada una. El número de slots por subtrama y el espaciado de subportadoras (*Subcarrier Spacing-SCS*) en la forma de onda OFDM puede flexibilizarse en NR V2X. Para soportar diversos requerimientos y diferentes frecuencias de uso en FR1 y FR2, se considera una numerología OFDM escalar para NR V2X, basada en la *Release* 15 NR Uu. Cada numerología OFDM se define por un SCS y un CP. NR V2X aguanta múltiplos de 15 kHz para el SCS de la forma de onda OFDM. El SCS es igual entonces a 15 kHz, 30 kHz, 60 kHz o 120 kHz. En FR1, 15 kHz, 30 kHz y 60 kHz son soportados por el SCS, mientras que 60 kHz y 120 kHz son soportados por el SCS en FR2. Cuanto mayor sea el SCS, mayor es la robustez de la forma de onda OFDM contra efectos adversos del medio y de los equipos como pueden ser el efecto Doppler, *offsets* de frecuencia de portadora o ruido de fase del hardware.

En NR V2X *Sidelink*, el número de slots en la subtrama es de 2 elevado al factor de configuración SCS. Como la subtrama tiene una duración de 1 ms, tenemos que, a mayor factor SCS, menor duración de slot. Cada slot consiste en 12 o 14 símbolos OFDM, dependiendo de si se quiere usar CP normal o CP extendido (Prefijo Cíclico-*Cyclic Prefix*).

En NR Uu el ancho de banda máximo de la portadora es de 200 MHz en FR1 y 400 MHz en FR2. Aunque las gNBs pueden soportar anchos de banda de ese tamaño, no puede ocurrir así con los UE. Es más, trabajar con unos anchos de banda tan amplios implica un consumo de potencia mayor en el UE, tanto por parte del equipamiento de radiofrecuencia (RF) como del equipamiento de procesamiento de la señal en banda base. Como apoyo a los UE que no pueden trabajar con anchos de banda de estas características, en la Release 15 NR Uu se introdujo el concepto de parte de ancho de banda (*Bandwidth part - BWP*) [43]. Un BWP consiste en una porción contigua del ancho de banda dentro del ancho de banda de la portadora donde se usa una sola numerología. Al definir un pequeño BWP, se reduce la complejidad computacional requerida en el UE. Estos BWP también se usan en NR V2X *Sidelink*.

Señales y Canales Físicos en NR V2X *Sidelink* [37], [40]:

- *Physical Sidelink Control Channel (PSCCH)*: porta información de control del *Sidelink*.
- *Physical Sidelink Shared Channel (PSSCH)*: porta carga útil de datos en el *Sidelink* e información de control adicional.
- *Physical Sidelink Broadcast Channel (PSBCH)*: porta información de apoyo a la sincronización en el *sidelink*. Se manda dentro del bloque de señal de sincronización *sidelink (Sidelink Synchronization Signal Block - S-SSB)*.
- *Physical Sidelink Broadcast Channel (PSFCH)*: porta feedback sobre si la transmisión *sidelink* ha tenido éxito o ha resultado fallida.

Además, tenemos las siguientes señales portadas o relacionadas con los canales anteriormente descritos, como se especifica en [40]:

- *Demodulation Reference Signal (DMRS)*: se usa en el receptor para decodificar la señal asociada al canal *Sidelink*. Se envía a través de un canal *Sidelink* físico asociado.
- *Sidelink primary synchronization signal (S-PSS)* y *Sidelink secondary synchronization signal (S-SSS)*: son usadas por el receptor para sincronizar al transmisor de dichas señales. S-PSS y S-SSS se mandan con un S-SSB.
- *Sidelink Channel state information reference signal (SL CSI-RS)*: se usan para medir la información del estado del canal (*Channel State Information - CSI*) en el transmisor que luego es retroalimentada al transmisor. El transmisor puede ajustar su transmisión basándose en la retroalimentación CSI. *SIDELINK* CSI-RS se envía dentro del tiempo del slot PSSCH.
- *Sidelink Phase-tracking reference signal (SIDELINK PT-RS)*: sirve para mitigar el efecto del ruido de fase (en particular a altas frecuencias) resultante de las imperfecciones del oscilador usado. SL PT-RS se manda en el tiempo del slot PSSCH.

En comparación con LTE V2X, que sólo soporta transmisiones broadcast en el Sidelink, NR V2X provee de soporte a la capa física para transmisiones *unicast*, *groupcast* y *broadcast* en el *Sidelink*.

### 3.3.4. Asignación de recursos en 5G NR V2X *Sidelink*

La *Release* 16 define dos modos nuevos para la selección de subcanales en comunicaciones NR V2X *Sidelink* que usan el interfaz NR V2X PC5. Estos dos modos son el equivalente de los modos 3 y 4 de LTE V2X, con la diferencia de que LTE V2X solo soporta comunicaciones *broadcast* Sidelink [37].

#### Modo 1

De forma similar a como actúa el modo 3 en LTE C-V2X, el gNB o el eNB asignan y gestionan los recursos radio de *Sidelink* para comunicaciones V2V en el modo 1, usando el interfaz Uu de NR (o LTE). El UE debe necesariamente estar dentro de la cobertura de la red para operar bajo el modo 1. Los recursos radio *Sidelink* pueden estar configurados de forma que el modo 1 y 2 usen conjuntos de recursos distintos. La



alternativa es que el modo 1 y 2 compartan el mismo conjunto de recursos. La compartición del conjunto de recursos da como resultado una mayor eficiencia, pero puede dar lugar a colisiones potenciales entre las transmisiones de los modos 1 y 2. Para solucionar esto, el modo 1 del UE notifica al modo 2 del UE los recursos dedicados para sus futuras transmisiones en la forma que se describirá más adelante.

El modo 1 usa una planificación de cesión dinámica (*Dynamic Grant-DG*) igual que la usada por el modo 3 de LTE, pero reemplaza la planificación semipersistente en el modo 3 de LTE con la planificación de cesión configurada [45]. Con DG, el modo 1 del UE debe solicitar recursos a la estación base para la transmisión de cada TB única [46]. Para alcanzar dicho objetivo, el UE debe mandar una solicitud de planificación (*Scheduling Request - SR*) al gNB usando el PUCCH, y el gNB responde con el DCI sobre el PDCCH. El DCI indica los recursos *Sidelink* asociados para la transmisión del TB y hasta 2 retransmisiones posibles del susodicho TB. El UE informa a otros UE acerca de los recursos que usará para transmitir el TB y hasta 2 posibles retransmisiones usando el primer escenario SCI. Este escenario es transportado en el PSCCH e indica: la disposición de recursos, esquemas de modulación y codificación y la prioridad asignada; el periodo de reserva de recursos; el patrón de tiempo y el número de puertos para PSSCH y DMRS; el tamaño y formato de otros escenarios SCI. Los UE cercanos que operan bajo el modo 2 en ese momento ya conocen qué recursos del UE en modo 1 se van a utilizar.

La solicitud de recursos para cada TB aumenta el retardo. El modo 1 incluye la opción de planificación de cesión configurada para reducir el retardo prealojando recursos radio *Sidelink*. Con este esquema, el gNB puede asignar un conjunto de recursos *Sidelink* al UE para transmitir diversos TBs. Este conjunto está referido a la cesión configurada (CG). El UE manda un primer mensaje con información de asistencia UE al gNB indicando la información acerca del tráfico *Sidelink* esperado, incluyendo: la periodicidad de los TBs, tamaño máximo del TB e información de la QoS. La información referente a la QoS incluye KPIs (*Key Performance Indicators*), indicadores claves de la calidad del servicio, como la latencia o la fidelidad requerida por los TBs y su prioridad. Esta información es usada por el gNB para crear, configurar y destinar una CG al UE que satisfaga los requisitos del tráfico *Sidelink*. La CG se configura usando un conjunto de parámetros que incluyen el índice CG, la reserva de tiempo-frecuencia y la periodicidad de los recursos radio *Sidelink* reservados. La reserva de tiempo-frecuencia indica los slots y subcanales que se asignan periódicamente al UE en la CG. A un UE se le pueden asignar un máximo de 3 recursos *Sidelink* durante cada periodo de la CG. El UE informa a otros vehículos de los recursos designados por el gNB para un periodo particular de la CG usando de nuevo el primer escenario SCI. El UE decide entonces cómo usar los recursos *Sidelink* designados. Sin embargo, sólo se puede transmitir un nuevo TB en cada periodo CG. Los recursos *Sidelink* de un periodo CG pueden también ser asignados para retransmitir el nuevo TB transmitido en el CG, o para retransmitir otros TBs inicialmente transmitidos en periodos CG previos. El número máximo de retransmisiones por TB en una CG está asociado con la prioridad del TB. Las retransmisiones HARQ (*Hybrid Automatic Repeat Request*, una combinación de mecanismos de corrección de errores) en una CG son solo posibles si el conjunto de recursos de la CG tiene un PSFCH



configurado por la gNB. Nótese que una gNB puede asignar múltiples *Sidelink* CGs al UE. La configuración de cada CG es adaptativa en función de las características o la demanda de diferentes aplicaciones V2X. Sin embargo, la transmisión y retransmisión de un TB debe siempre utilizar los recursos de una única CG [43].

El modo 1 define dos tipos de esquema CG para *Sidelink*: CG type 1 y CG type 2. Ambos están configurados usando señalización de RRC). CG type 1 puede ser utilizada por el UE inmediatamente hasta que sea liberado por la estación base. *Sidelink* CG type 2 sólo puede ser usada después de ser activada por la gNB y hasta que sea desactivada. Para ello, la gNB notifica la activación o desactivación usando señalización DCI. El DCI a su vez incluye el índice CG y la disposición de radiofrecuencia de CG type 2. CG type 2 puede configurar múltiples CGs para un UE y activar únicamente un subconjunto de esas CGs basado en las necesidades del UE. Los recursos en CGs inactivas pueden ser destinados para otros UEs. CG type 1 reduce la señalización y el tiempo necesario para iniciar la transmisión comparado con CG type 2. Por el contrario, si alguno de las CGs type 1 no está siendo usada por el UE, esos recursos quedan ociosos, sin la posibilidad de poder ser realojados para otros UEs.

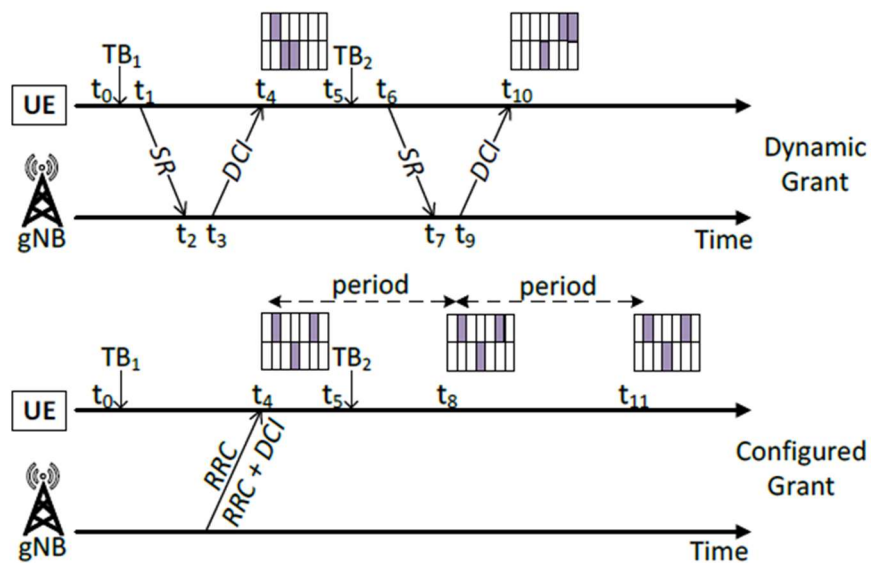


Figura 18: Esquemas de cesión dinámica y configurada del Modo 1 [70].

La Figura 18 muestra la comparación entre dos transmisiones en las cuales la primera usa el esquema DG y la segunda el esquema CG.

En el caso de DG, el UE envía un SR para solicitar recursos al gNB. Éste responde con un DCI haciéndole saber al UE qué recursos va a poder utilizar. Más tarde, se repite

el proceso para poder transmitir un TB<sub>2</sub> usando el siguiente conjunto de recursos asignados.

En cuanto al esquema CG, el UE no realiza ninguna petición para solicitar recurso, sino que es la propia gNB la que se los concede. Esta concesión incluye un conjunto de recursos asignados periódicamente. El periodo entre asignaciones se calcula en función de la información auxiliar entregada por el UE como información de asistencia.

Se puede concluir que, con un esquema CG, se reduce el tiempo que se necesita para transmitir los TBs, ya que se elimina el retardo entre peticiones y asignaciones de recursos. En cambio, con el esquema DG, se tiene un uso más eficiente de los recursos, ya que se usan exclusivamente cuando el UE va a transmitir un TB, mientras que en CG puede tener asignados recursos que quedan ociosos si el UE no tiene TBs que transmitir.

## Modo 2

De la misma forma que en LTE V2X, los UEs seleccionan automáticamente sus recursos *Sidelink* en base al conjunto de recursos. En este modo, los UEs operan sin cobertura de red móvil. Los recursos pueden ser preconfigurados por el gNB cuando el UE se encuentra en una zona de cobertura. La diferencia existente entre el modo 2 de NR y el modo 4 de LTE es el esquema de asignación de recursos. El modo 4 trabaja usando asignación semipersistente siguiendo la información de los sensores. Por el contrario, el modo 2 opera siguiendo unas asignaciones que pueden ser tanto semipersistentes como dinámicas. La asignación dinámica consiste en una asignación de recursos para la transmisión de un TB, en la que dicha asignación dura el tiempo que lo hagan las retransmisiones de ese TB concretamente. Esos recursos cambian con cada TB nuevo que haya que transmitir.

Un recurso seleccionado no es lo mismo que un recurso reservado. Los recursos reservados son aquellos seleccionados en los que el UE notifica a los UE aledaños que van a ser usados mediante el primer escenario SCI.

El modo 2 usa procesos muy parecidos para realizar la selección de recursos en los esquemas dinámicos como semipersistentes [44]. La diferencia reside en el hecho de que el esquema dinámico únicamente selecciona los recursos asociados al TB mientras que en el esquema semipersistente se seleccionan recursos para un número de *Reselection Counter* TBs, que es un contador mediante el que decrece en uno después de cada transmisión del vehículo. Si llega a cero, se tienen que seleccionar y reservar nuevos recursos [59]. El periodo entre los recursos seleccionados para la transmisión de TBs consecutivos en el esquema semipersistente está basado en el *Resource Reservation Interval* (RRI), y puede ir desde los 0 a los 1000 ms. De 1 a 99 ms se ofrece una mayor

flexibilidad en comparación con LTE V2X, donde solo se pueden usar periodos fijos de 20 o 50 ms. Estos RRI están preconfigurados [45].

Un UE puede seleccionar nuevos recursos *Sidelink* con la creación de un nuevo TB. También se puede activar una selección nueva cuando un nuevo TB no encaja con la reserva anterior de recursos [70]. Para seleccionar nuevos recursos *Sidelink*, el UE define al principio una ventana de selección donde busca recursos para transmitir ese TB.

Una vez que se ha definido la ventana de selección, el UE debe identificar los recursos candidatos en esa ventana de selección.

Podemos observar, que debido a la capacidad de evolución y las prestaciones que presenta la tecnología 5G, la convierte en la tecnología ideal para desarrollar el despliegue de la tecnología V2X, ya que gracias a la introducción de las comunicaciones ultrafiabiles de baja latencia, se podrá aumentar el alcance de las aplicaciones más allá de la seguridad, como pueden ser aplicaciones multimedia o la conducción autónoma.

El objetivo de 5G V2X establecer un diseño eficiente de *Sidelink* para poder otorgar un rendimiento óptimo en todas las velocidades que puede alcanzar un vehículo (está diseñado para velocidades de incluso 500 km/h) basado en una comunicación *multicast*, que tengan una alta fiabilidad basada en la distancia entre vehículos y en las prioridades de las aplicaciones. Estas mejoras que aporta 5G en la tecnología C-V2X da lugar a unas notables diferencias, como son: bajas latencias, una mayor eficiencia espectral y una mayor capacidad de canal. Además, el uso de *slots* permite mejorar la fiabilidad gracias a la adición de enlaces *Sidelink* con capacidad de retroalimentación (el terminal obtiene ciertos parámetros de la red para decidir cómo ajustar la potencia [60]), señales de referencia dinámica para distintas velocidades y una codificación de canal avanzada [2]. Estas mejoras se van a ejemplificar en el capítulo siguiente.

## **4. Estudio y ejemplificación del rendimiento del sistema en función de la distancia entre vehículos y la velocidad.**

### **4.1. Introducción**

En este apartado se va a realizar un estudio de cómo, en un entorno real, la distancia intervehicular y la velocidad pueden afectar al número de usuarios de una celda, el volumen de datos generado, la eficiencia espectral y el porcentaje de receptores que reciben satisfactoriamente la señal transmitida, con una tasa de *Block Error Rate* (BLER) preestablecida. El sistema funciona sobre la tecnología C-V2X en modo 3, sobre 5G V2X *Sidelink*.

Para reducir el riesgo de accidentes mortales, que es el objetivo fundamental de la tecnología V2X, tenemos que garantizar que, en entornos con alta movilidad y densidad de usuarios, podemos garantizar una gran efectividad en las comunicaciones, de ahí que se vaya a realizar este estudio. Una vez hayamos demostrado las diferencias en la tasa de recepción de paquetes en diferentes situaciones de velocidad y distancia entre vehículos, podremos concluir si la tecnología C-V2X es apta para garantizar la seguridad en entornos de alta densidad de vehículos, como es la M-30.

### **4.2. Contexto del sistema.**

#### **4.2.1. Modelo del entorno**

Se va a evaluar un tramo de 3 kilómetros con un despliegue de estaciones base cada 1700 metros, por lo que tendremos 2 estaciones base para cubrir el tramo en cuestión. La M-30 en su tramo Este, que se puede observar en la Figura 19, tiene unos 12 carriles en total (6 por sentido). Para la transmisión, vamos a establecer un alcance de 400 metros.

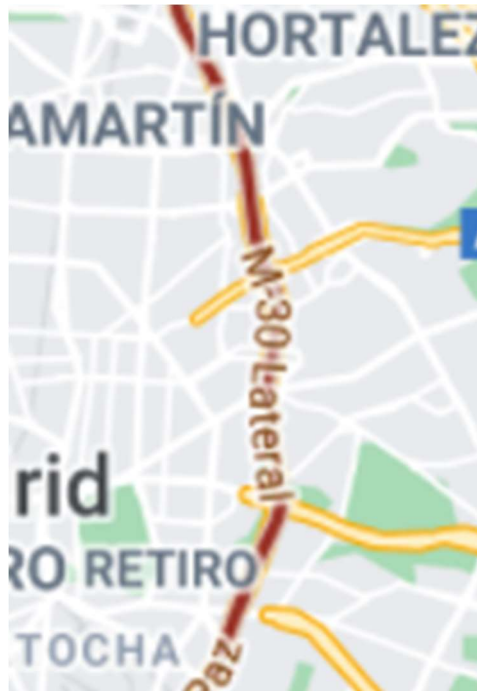


Figura 19: Tramo lateral Este de la M-30 [54].

#### 4.2.2. Modelo del despliegue:

Como se ha mencionado antes, tendremos 2 estaciones base con una altura de 35 metros. Las antenas que llevan los vehículos son isotrópicas con una altura media de 1,5 metros. La configuración de antenas es de 1x2, la más usada en comunicaciones *sidelink* de C-V2X. La potencia de transmisión será de 25 dBm de forma permanente. En cuanto a la parte de portadora, esta trabajará a 5.9 GHz, con un ancho de banda de 10 MHz.

#### 4.2.3. Modelo de transmisión:

Además de la información de usuario, los vehículos transmitirán mensajes de estado para mantener la comunicación de 256 bytes de tamaño con una periodicidad de 10 Hz [51].

#### 4.2.4. Modelo del canal:

Para la evaluar el rendimiento de comunicaciones C-V2X en enlaces *Sidelink*, se usa el modelo de propagación WINNER II, que son modelos de propagación usados para el cálculo de las pérdidas de propagación [52]. Los modelos usados son los siguientes:

$$PL_{LOS} = 21.5 \log_{10}(d) + 20 \log_{10} \left( \frac{fc}{5.0} \right), \sigma = 4 \text{ si } 10m < d < d_{BP} \quad (1)$$

$$PL_{NLOS} = 25.1 \log_{10}(d) + 55.4 - 0.13 \log_{10}(h_{BS} - 25) \log_{10} \left( \frac{d}{100} \right) - 0.9(h_{MS} - 1.5) + 21.3 \log_{10} \left( \frac{fc}{5.0} \right), \sigma = 8 \quad \text{si } 50m < d < 5 \text{ km} \quad (2)$$

Siendo  $fc$  la frecuencia central de la portadora (5.9 GHz) y  $d$ , la distancia del tramo (3000 metros).  $d_{BP}$  es la distancia donde se pierde la línea de visión (*line of sight*), y se calcula como:

$$d_{BP} = 4h_{BS}h_{MS}fc/c \quad (3)$$

Haciendo los cálculos, tenemos una  $d_{BP}$  de 4130 metros.

Para realizar la evaluación del sistema, se van a realizar los siguientes pasos:

- Parametrizar el sistema.
- Calcular los UEs en el rango de transmisión.
- Calcular la eficiencia espectral
- Calcular las pérdidas de propagación y la potencia recibida.
- Calcular la potencia del ruido.
- Calcular la interferencia.
- Obtener la SINR y la BLER.

### 4.3. Parametrización.

En la Tabla 1 se recogen los parámetros principales para la simulación del sistema:

Parámetros de simulación	Valores
Longitud del tramo de autopista	3000 metros
Número de carriles	6
Anchura del carril	4 metros
Altura de la antena BS	35 metros
Altura de la antena UE	1.5 metros
Ancho de banda del canal	10 MHz
Ancho de banda de la portadora	5.9 GHz
Modulación	MCS adaptativo
Periodicidad del tráfico de datos	10 Hz
Tamaño del paquete	256 bytes
Potencia del transmisor	24 dBm
Rango de cobertura requerido	400 metros
Velocidad media de los vehículos	60 km/h
Modelo del canal	WINNER II
Ganancia de antena transmisora	0 dB
Ganancia de antena receptora	3 dB
Figura de ruido	9 dB
Densidad espectral de potencia del ruido térmico a temperatura ambiente	-174 dBm/Hz

Tabla 1: Principales parámetros del sistema. Fuente: Elaboración propia.

### 4.4. Cálculo de los *User Equipments*

Para calcular el número total de usuarios en el tramo, tenemos que atender a la densidad de vehículos por kilómetro que podemos tener en un caso de alta ocupación de la vía. Para ello, consultando los datos de intensidad de tráfico del ayuntamiento de Madrid, tenemos que en el mes de mayo hubo una ocupación media diaria de 204013 desplazamientos [53], lo que supone aproximadamente unos 8500 desplazamientos por hora. Según la DGT, para calcular la densidad de vehículos por kilómetro de vía, tenemos que usar la siguiente ecuación (4) [50]:

$$I = V \times D \quad (4)$$

Donde I es la intensidad de circulación, en vehículos/h; V es la velocidad media del recorrido, en km/h; y D es la densidad, en vehículos/km. Teniendo 8500 vehículos/h

a una velocidad media de 60 km/h, la densidad que obtenemos es de 142,67 vehículos por kilómetro de vía, aproximadamente, por lo que tenemos una distancia entre vehículos (IVD) de 7 metros. En el rango de cobertura de una estación base tenemos 684 UEs. Dado que tenemos 2 estaciones base, el número total de UEs en el tramo es de 1368. Esta simulación se centrará en uno de los sentidos de la circulación, si se tuviera en cuenta ambos sentidos, sería el doble de UEs.

#### 4.5. Cálculo de la eficiencia espectral.

Para calcular la eficiencia espectral, necesitamos calcular primero el volumen de datos. Para ello, usamos la ecuación (5), [51]:

$$Volumen\ de\ datos = P \times UE \times TF \quad (5)$$

Donde P es el tamaño del paquete, UE el número de usuarios y TF la periodicidad de la transmisión. Con nuestros datos, tenemos un volumen de datos de 28 Mbps.

La eficiencia espectral se calcula atendiendo a la ecuación (6), [51]:

$$SE = Volumen\ de\ datos / BW \quad (6)$$

El ancho de banda es 10 MHz. Tenemos una eficiencia espectral de 2.8. La modulación que mejor se adapta a nuestras características es 64 QAM  $\frac{1}{2}$ , la cual tiene una eficiencia espectral de 3.3223. Las diferentes modulaciones con sus BLER en relación a su SINR se muestran en la Figura 19:



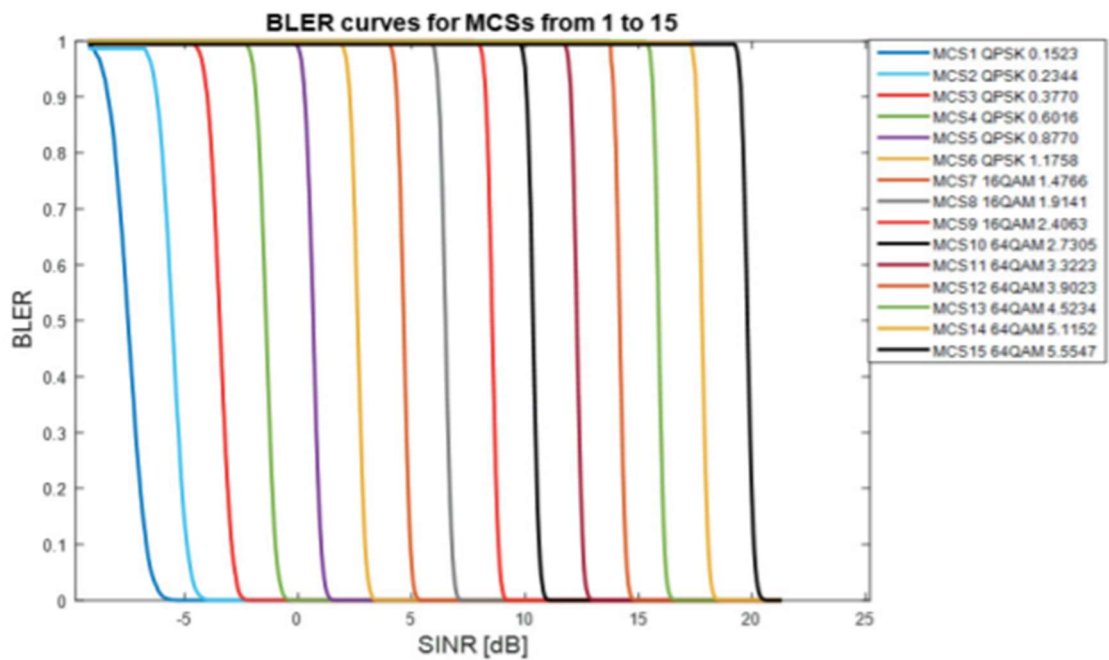


Figura 19: Relación SNIR a BLER [55].

#### 4.6. Cálculo de las pérdidas de propagación y potencia recibida.

Para calcular las pérdidas por espacio libre, usamos las ecuaciones (1)(2). Por lo que tenemos unas pérdidas de 76.1957 dB.

La potencia recibida se calcula como:

$$P_{rx} = P_{tx} + G_{rx} + G_{tx} - PL \quad (7)$$

Donde  $P_{tx}$  es la potencia transmitida,  $G_{rx}$  y  $G_{tx}$  son las ganancias de las antenas isotrópicas y  $PL$  las pérdidas por espacio libre, calculadas anteriormente.

## 4.7. Cálculo de la potencia de ruido.

La potencia del ruido se calcula como:

$$P_N = DSP_{\text{ruido térmico}} + FR + BW \quad (8)$$

Dados los datos de la Tabla, tenemos una  $P_N$  de -65 dBm.

## 4.8. Cálculo de la potencia interferente.

La potencia interferente recibida se debe a la generada en el otro nodo de la red que compone el tramo, que tiene las mismas características y en el mismo instante que la señal recibida en el propio nodo. Esta interferencia se puede ver esquematizada en la Figura 20.

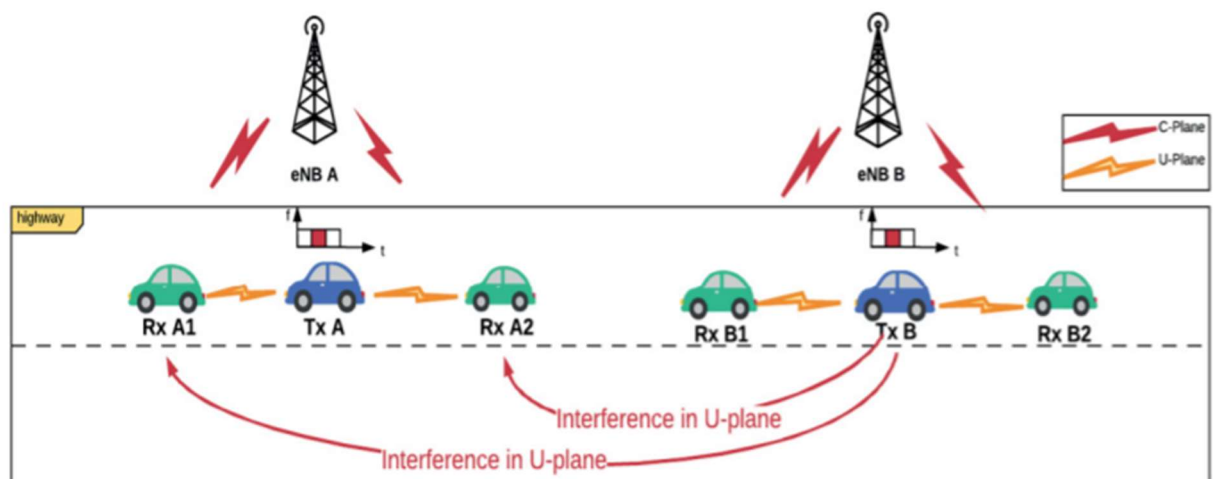


Figura 20: Interferencias en comunicaciones C-V2X directas [51].

La potencia interferente se calcula como:

$$potencia_{\text{interferente}} = \frac{p_{rx}}{N_{\text{portadoras}}} \quad (6)$$

Debido a que las características de las señales interferentes son iguales que la señal recibida. Esto nos hace tener una potencia interferente de alrededor de -60 dBm.

## 4.9. Cálculo de la relación señal a ruido e interferencias y BLER.

La relación señal a ruido e interferencias se calcula en base a la siguiente ecuación:

$$\text{sinr} = \frac{p_{rx}}{p_N + p_i} \quad (7)$$

Haciendo los cálculos en magnitudes lineales y realizando la conversión a magnitudes logarítmicas, tenemos una SINR de 10,79 dB. Si observamos la Figura 19, donde hemos seleccionado la modulación 64 QAM a partir de la eficiencia espectral calculada, vemos que, efectivamente, hemos seleccionado una modulación que satisface tanto nuestra eficiencia espectral como nuestra SINR. En la Figura 19 obtenemos, observando la gráfica, una BLER de 0,2.

## 4.10. Cálculo del *Packet Reception Rate* (PRR).

La tasa de recepción de paquetes hace referencia al porcentaje de nodos receptores que han recibido correctamente el paquete transmitido. Cuanto mayor sea esa tasa, más fiable es la comunicación.

Debido a la BLER de 0,2% calculada anteriormente y al volumen de datos, calculado también, tenemos una tasa de recepción de paquetes del 77,6%. Para calcular el PRR, se calcula el SINR de todos los usuarios en cobertura, y se cuentan aquellos cuyo BLER es inferior al umbral de 1%.

## 4.11. Estudio para otras configuraciones

Una vez visto un estudio para un tramo con alta ocupación de vehículos a una velocidad de 60 km/h, se procede a dar los resultados con diferentes distancias entre vehículos. Dichos resultados se muestran en la Tabla 2.

Distancia entre vehículos (metros)	Número de usuarios	Volumen de datos (Mbps)	Eficiencia espectral	Tasa de recepción de paquetes
7	1368	28	3,3223	77,6 %
14	684	14	1,4766	88,8%
28	342	7	0,877	94,4%
56	168	3,44	0,377	97,2%
112	72	1,74	0,2344	98.61%

Tabla 2: Variación de la distancia entre vehículos, número de usuarios, volumen de datos, eficiencia espectral y tasa de recepción de paquetes a 60 km/h. Fuente: Elaboración propia.

En lo siguiente, se repite el proceso, pero cuando el entorno resulta más favorable, y se puede circular a 90 km/h, que es la velocidad máxima permitida en la M-30. Esta modificación, nos afecta a la hora de la densidad vehicular y el número de usuarios. En estas condiciones, tenemos 94 vehículos por kilómetro, por lo que la distancia entre ellos será ahora de 11 metros. Con estos datos y las fórmulas aplicadas anteriormente, tenemos los resultados mostrados en la Tabla 3:

Distancia entre vehículos (metros)	Número de usuarios	Volumen de datos (Mbps)	Eficiencia espectral	Tasa de recepción de paquetes
11	864	17,7	1,9141	85,84 %
22	432	8,85	1,1758	92,9 %
44	216	4,4	0,877	94,4%
77	171	3,5	0,377	97,198 %
121	72	1,47	0,1523	98.82%

Tabla 3: Variación de la distancia entre vehículos, número de usuarios, volumen de datos, eficiencia espectral y tasa de recepción de paquetes a 90 km/h. Fuente: Elaboración propia.

Se puede concluir que la tasa de recepción de paquetes aumenta cuando aumenta la distancia intervehicular. Esto se debe a que, al aumentar dicha distancia, el número de vehículos se reduce. Como el número de usuarios se reduce, el tráfico de comunicaciones generado decrece también, generando menos interferencia, lo que nos lleva a poder elegir una modulación más robusta.

Si aumentamos la velocidad de los vehículos, se reduce la densidad de tráfico en el tramo, reduciendo así el número de usuarios nuevamente. Esto supone que se produce un aumento de la distancia inter vehicular, por lo que vemos que también aumenta la tasa de recepción de paquetes con el aumento de dicha distancia.

Debido a que la tasa de recepción de paquetes aumenta si la velocidad es mayor, el riesgo de pérdida de la comunicación es menor, por lo que es más fiable. Si la

comunicación es más fiable a altas velocidades, el riesgo de accidente grave es menor, por lo que, con la configuración establecida, el sistema resulta eficiente.

## 5. Conclusiones

Después de haber analizado las dos tecnologías más importantes en el campo de las comunicaciones vehiculares, *Cellular-V2X* y DSRC, podemos determinar qué tecnología está más contrastada y puede llegar a ser implantada a mayor escala.

Mientras que *Cellular-V2X* usa las tipologías de red destinadas a las comunicaciones móviles, DSRC necesita de infraestructura propia, lo que supone un desafío a la hora de su implantación, ya que se necesitan OBUs y RSUs dedicados exclusivamente a las comunicaciones vehiculares. Por el contrario, C-V2X puede desplegarse usando la infraestructura dedicada a las comunicaciones móviles, lo que reduce sus costes y garantiza una mayor cobertura.

En el apartado de viabilidad para la implantación de estas tecnologías, se ha visto que la red 4G LTE existente actualmente tiene la capacidad adecuada para poder soportar la primera fase de despliegue de C-V2X. Además, con el despliegue de la red 5G y las mejoras que ello conlleva, se van a poder brindar más aplicaciones a los usuarios. Gracias al aumento de la fiabilidad de las comunicaciones y la menor latencia, estaremos un paso más cerca de tener redes de tráfico autónomo.

En el apartado experimental, se ha comprobado que las comunicaciones C-V2X son seguras en entornos de alta velocidad, debido a que la tasa de usuarios que reciben de forma correcta la información aumenta conforme mayor es la velocidad de los vehículos del entorno. Además, la reducción de latencia que permite 5G, ayudará a reducir la frecuencia de transmisión de paquetes, por lo que se conseguirá aumentar la tasa PRR en entornos con una mayor densidad de usuarios y muy altas velocidades.

Si queremos ciudades y carreteras más seguras, limpias y que reduzcan los tiempos en los trayectos, la solución óptima, aprovechando el auge de las redes 5G y su aplicación al internet de las cosas (IoT), es la de implantar la tecnología C-V2X basada en 4G en un futuro inmediato, y en 5G en un futuro a corto/medio plazo. Esto permitiría mejorar las aplicaciones de conducción autónoma gracias a un intercambio de información más rápido entre los vehículos y su entorno.

De acuerdo con todo ello, el presente trabajo podría seguir algunas líneas futuras tales como:

- Aplicación del estudio de la tasa de recepción de paquetes para aplicaciones de conducción autónomas basadas en V2X.

- Debido a que en el comienzo del despliegue 5G no están implementadas las comunicaciones móviles de ultra baja latencia, sería conveniente estudiar su aplicación a V2X.
- Pruebas experimentales con el despliegue inicial de las redes 5G.
- Investigar más avances relacionados con las *Releases* 17 y posteriores.

## 6. Bibliografía

- [1] M. X. Gon, S. Mao, X. Wang. "An Overview of 3GPP Cellular Vehicle-To-Everything Standards", en *GetMobile*, vol. 21, Issue 3, pp. 16-25. Noviembre 2017.
- [2] A. Rodríguez Saiz, "Tecnologías C-V2X y DSRC para el vehículo conectado en redes de nueva generación", Trabajo Fin de Máster, Área de Sistemas de Comunicaciones, Universidad Oberta de Catalunya, 2020 [En línea]. Disponible en: <https://bit.ly/3isUIMK>. [Accedido en: 3 de octubre de 2020].
- [3] O. Orozco Sarasti, G. Llano Ramírez, "Aplicaciones para redes VANET. Estimación del exponente Hurst y dimesión fractal para el análisis de series de tiempo de absorbanza UV-Vís", en *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, vol. 24, no. 2, pp. 111-132, junio 2014.
- [4] P. Picazo Sánchez, "Cooperación en redes vehiculares. Estado de la cuestión y propuesta de mecanismo basado en incentivos", Trabajo Fin de Máster, Especialidad en sistemas distribuidos, multimedia y seguros, Universidad Carlos III de Madrid, 2011 [En línea]. Disponible en: <https://bit.ly/3FdBhRO>.
- [5] "Cellular-V2X communications towards 5G", *5G Americas*, 2018 [En línea]. Disponible en: <https://bit.ly/3B71OxJ>. [Accedido: 3 de octubre, 2021]
- [6] M.-P. Odiñi, "5G and V2X Automotive Slicing", en *5G Automotive Forum*, pp. 1-22 [En línea]. doi: 10.13140/RG.2.2.26715.82726. [Accedido en: 3 de octubre de 2021].
- [7] C. McLellan, "What is V2X communication? Creating connectivity for the autonomous car era", *ZDNet* [En línea]. Disponible en: <https://zd.net/2YdU0fr>. [Accedido: 3 de octubre de 2021].
- [8] *Dedicated Short-Range Communications (DSRC) Message Set Dictionary*, U.S. Department of Transportation, SAE J2735 [En línea]. Disponible en: <https://bit.ly/3isMjsD>. [Accedido: 3 de octubre de 2021].
- [9] Editorial Team, "What is DSRC (Dedicated Short-Range Communication)?", *Everything RF*, 2019 [En línea]. Disponible en: <https://bit.ly/3D7SvhA>. [Accedido: 3 de octubre de 2021].



- [10] A. Abdelgader y W. Lenan, "The Physical Layer of the IEEE 802.11p WAVE Communication Standard: The Specifications and Challenges", en *The World Congress on Engineering and Computer Science (WCECS)*, San Francisco, 2014, pp 1-8.
- [11] *IEEE Standard for Information Technology*, IEEE Standard 802.11e-2005 [En línea]. doi: 10.1109/IEEESTD.2005.97890. [Accedido en: 3 de octubre de 2021].
- [12] "Cellular-V2X Technology Overview. *Article 80-PE731-63*", *Qualcomm*, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://bit.ly/3itF97e>. [Accedido: 3 de octubre de 2021].
- [13] T. Lavery, "Dedicated Short-Range Communication (DSRC)", *Whats.com*, 2017. [En línea]. Disponible en: <https://bit.ly/3ivSI6d>. [Accedido en: 3 de octubre de 2021].
- [14] R. López-Romero Guijarro, "Análisis del protocolo IEEE 802.11p en sistemas de comunicación vehiculares V2X", Trabajo Fin de Máster, Universidad Oberta de Catalunya, 2019 [En línea]. Disponible en: <https://bit.ly/3D6rWt1>. [Accedido en: 3 de octubre de 2021]
- [15] "DSRC vs. C-V2X Safety Applications", *AutoTalks*, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://bit.ly/3iuiR5s>. [Accedido en: 3 de octubre de 2021]
- [16] J. Yoshida, "EU to debate DSRC vs. C-V2X", *Eetasia*, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://bit.ly/2YatJy0>. [Accedido en: 3 de octubre de 2021].
- [17] A.M. Orozco y Roger Michoud, "Routing Protocols Simulation for Efficiency Applications in Vehicular Environments", *Revista S&T*, vol. 11, no.27, pp. 27-42, 2013 [En línea]. DOI: 10.18046/syt.v11i27.1693. [Accedido: 3 de octubre de 2021].
- [18] N. Tassoult, A. Mourad y M. Hamouma, "A Survey on Vehicular Ad-Hoc Networks Routing Protocols: Classification and Challenges", *Journal of Digital Information Management*, vol. 17, no. 4, pp. 227-244, 2019 [En línea]. DOI: 10.6025/jdim/2019/17/4/227-244. [Accedido: 3 de octubre de 2021].

- [19] L. M. Wong López, "Performance of sensing-based semi-persistent scheduling (SPS) in LTE-V2X Release 14 Distributed Mode", Trabajo Fin de Máster, Universitat Politècnica de Catalunya, 2019 [En línea]. Disponible en: <https://bit.ly/3A4zw5t>. [Accedido en: 3 de octubre de 2021].
- [20] Péter G., Z. Szalay y S. Aradi, "Vehicle to Infrastructure interaction (V2I)", en *Highly Automated Vehicle Systems*, 2014, pp. 142-150. Disponible en: <https://bit.ly/3A6qo0e>. [Accedido en: 3 de octubre de 2021].
- [21] D. Jiang y L. Delgrossi, "IEEE 802.11p: Towards an International Standard for Wireless Access in Vehicular Environments," en *VTC Spring 2008 - IEEE Vehicular Technology Conference*, 2008, pp. 2036-2040 [En línea]. doi: 10.1109/VETECS.2008.458. [Accedido en: 3 de octubre de 2021].
- [22] Y. Vainblat, "C-V2X Technology: Revolutionizing Transportation and Empowering Smart Cities", *Infopulse*, 2020 [En línea]. Disponible en: <https://bit.ly/3Fcc3Dh>. [Accedido en: 3 de octubre de 2021].
- [23] T. Koshimizu, H. Wang, Z. Pan, J. Liu y S. Shimamoto, "Normalized multi-dimensional parameter-based affinity propagation clustering for celular V2X", en *2018 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, pp. 1-6 [En línea]. doi: 10.1109/WCNC.2018.8377275. [Accedido en: 3 de octubre de 2021].
- [24] P. Panigrahi, "What is LTE Direct- Device To Device", *3gInfo*, 2020 [En línea]. Disponible en: <https://bit.ly/3F8s1hL>. [Accedido en: 3 de octubre de 2021].
- [25] "LTE Concepts", *yatebts*, 2019 [En línea]. Disponible en: <https://bit.ly/3CZKueu>. [Accedido en: 3 de octubre de 2021].
- [26] L. Almansa López, "LTE para principiantes, Día 2: Breve descripción de la arquitectura de red de LTE", *Intotally*, 2013 [En línea]. Disponible en: <https://bit.ly/3I5xrSF>. [Accedido en: 3 de octubre de 2021].
- [27] F. Firmin, "NAS", *3GPP*, 2021 [En línea]. Disponible en: <https://bit.ly/3I3XZna>. [Accedido en: 3 de octubre de 2021].

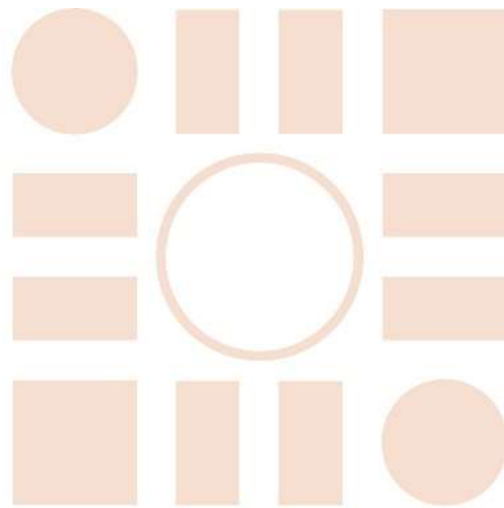
- [28] M. Amadeo *et al.*, “Enhancing the 3GPP V2X Architecture with Information-Centric Networking”, *future internet*, vol. 11, no. 199, pp. 1-19, octubre 2019 [En línea]. doi: 10.3390/fi11090199. [Accedido en: 3 de octubre de 2021].
- [29] “5GAA V2X Terms and Definitions”, 5G Automotive Association, Múnich, Alemania, TR A-170188, 2017 [En línea]. Disponible en: <https://bit.ly/2WCdUQI>. [Accedido en: 3 de octubre de 2021].
- [30] “3GPP Release 13 Description”, Third Generation Partnership, Sophia Antipolis, Francia, RP-151569, 2015 [En línea]. Disponible en: <https://bit.ly/3ouCr5I>. [Accedido en: 3 de octubre de 2021].
- [31] “3GPP Release 14 Description”, Third Generation Partnership Program, Sophia Antipolis, Francia, TR 21.914, 2018 [En línea]. Disponible en: <https://bit.ly/3FoT7kX>. [Accedido en: 3 de octubre de 2021].
- [32] “3GPP Release 15 Description”, Third Generation Partnership Program, Sophia Antipolis, Francia, TR 21.915, 2019 [En línea]. Disponible en: <https://bit.ly/3B8POvB>. [Accedido en: 3 de octubre de 2021].
- [33] “3GPP Release 16 Description”, Third Generation Partnership Program, Sophia Antipolis, Francia, TR 21.916, 2021 [En línea]. Disponible en: <https://bit.ly/3ouCGgL>. [Accedido en: 3 de octubre de 2021].
- [34] A. Ávila, “Lo que casi nadie te dice de la red 5G pero debes saber”, *Unocero*, 2020 [En línea]. Disponible en: <https://bit.ly/3I3sJ7W>. [Accedido en: 1 de octubre de 2021].
- [35] D. Delgado Dotor, “Evaluación de redes móviles 5G en entornos con aplicaciones IoT”, Trabajo Fin de Máster, Universidad Oberta de Catalunya, 2020 [En línea]. Disponible en: <https://bit.ly/3FhsNZA>. [Accedido en: 3 de octubre de 2021].
- [36] J. Muñoz, “Las comunicaciones 5G en el entorno de las cosas”, 14 de octubre de 2020. [Entrada de un blog]. Disponible en: <https://bit.ly/3I425vr>. [Accedido en: 3 de octubre de 2021].

- [37] M. H. C. Garcia *et al.*, "A Tutorial on 5G NR V2X Communications", en *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 23, no. 3, pp. 1972-2026, 2021 [En línea]. DOI: 10.1109/COMST.2021.3057017. [Accedido en: 3 de octubre de 2021].
- [38] "3GPP Releases 16 & 17 & beyond", *5G Americas*, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://bit.ly/3mkTSTb>. [Accedido en: 3 de octubre de 2021].
- [39] *New WID on 5G V2X with NR sidelink*, 3GPP RP-190766 [En línea]. Disponible en: <https://bit.ly/3a92TJb>. [Accedido en: 3 de octubre de 2021].
- [40] *Architecture enhancements for V2X services (v16.2.0, Release 16)*, 3GPP TS 23.285 [En línea]. Disponible en: <https://bit.ly/2Ymcp9J>. [Accedido en: 3 de octubre de 2021].
- [41] *User Equipment (UE) radio transmission and reception; Part 1: Range 1 Standalone (v16.3.0, Release 16)*, 3GPP TS 38.101-1 NR [En línea]. Disponible en: <https://bit.ly/3BaLdZU>. [Accedido en: 3 de octubre de 2021].
- [42] *User Equipment (UE) radio transmission and reception; Part 2: Range 2 Standalone (v16.3.1, Release 16)*, 3GPP TS 38.101-2 NR, 2020 [En línea]. Disponible en: <https://bit.ly/3A76v9d>. [Accedido en: 3 de octubre de 2021].
- [43] *Summary of RAN1 Agreements/Working assumptions in WI 5G V2X with NR sidelink*, 3GPP R1-1913601 [En línea]. Disponible en: <https://bit.ly/2YmO3MX>. [Accedido en: 3 de octubre de 2021].
- [44] "Overall description of Radio Access Network (RAN) aspects for Vehicle-to-Everything (V2X) based on LTE and NR (v-16.0.0, Release 16)", Third Generation Partnership Program, Sophia Antipolis, Francia, TR 37.985, 2020 [En línea]. Disponible en: <https://bit.ly/2YeLSv9>. [Accedido en: 3 de octubre de 2021].
- [45] *Radio Resource Control (RRC); Protocol specification (v.16.2.0, Release 16)*, 3GPP TS 38.331 NR [En línea]. Disponible en: <https://bit.ly/3A4CXt2>. [Accedido en: 3 de octubre de 2021].

- [46] G. Naik, B. Choudhury y J. Park, "IEEE 802.11bd & 5G NR V2X: Evolution of Radio Access Technologies for V2X Communications", *IEEE Access*, vol. 7, pp. 70169-70184, 2019 [En línea]. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2919489.
- [47] *System architecture for the 5G System (5GS); Stage 2 (v16.4.0, Release 16)*, 3GPP TS 23.501 [En línea]. Disponible en: <https://bit.ly/2YeM4KT>. [Accedido en: 3 de octubre de 2021].
- [48] A. Ligo, J. Peha, P. Ferreira y J. Barros, "Comparison between Benefits and Costs of Offload of Mobile Internet Traffic Via Vehicular Networks", en *43rd Telecommunications Policy Research Conference (TPRC)*, pp. 1-39 [En línea]. Disponible en: <https://bit.ly/2YfXZaV>. [Accedido en: 3 de octubre de 2021].
- [49] T. Alonso Cascallana, "Ciudades más inteligentes gracias a los datos que recopilan los coches conectados", *Hablemos de Empresas* [En línea]. Disponible en: <https://bit.ly/2Y7rk7f>. [Accedido en: 3 de octubre de 2021].
- [50] P. Tomás Martínez, "Densidad de tráfico", en *Parámetros fundamentales del tráfico I*, 2014, pp. 1-25. Disponible en: <https://bit.ly/3uCahWX>. [Accedido en: 3 de octubre de 2021].
- [51] D. Wang, R. R. Sattiraju, A. Weinand y H. D. Schotten, "System-Level Simulator of LTE Sidelink C-V2X Communication for 5G", en *Mobile Communication - Technologies and Applications; 24. ITG-Symposium*, 2019, pp. 1-5 [En línea]. Disponible en: <https://bit.ly/3uCaARB>. [Accedido en: 3 de octubre de 2021].
- [52] P. Kyösti *et al.* "WINNER II Channel Models.", Information Society Technologies, IST-4-027756 WINNER II D1.1.2 V1.2, 2008 [En línea]. Disponible en: <https://bit.ly/3uAdHK3>. [Accedido en: 3 de octubre de 2021].
- [53] "Tráfico. Intensidad media en días laborales", Portal de *Datos Abiertos del Ayuntamiento de Madrid* [En línea]. Disponible en: [bit.ly/3kTV7JK](https://bit.ly/3kTV7JK). [Accedido en: 3 de octubre de 2021].
- [54] Instituto Geográfico Nacional, 2021, *Mapa callejero del ramal Este de la M-30*, [Google Maps], escala 1:2000.

- [55] "Study on architecture enhancements for LTE support of C-V2X services", Third Generation Partnership Program, Sophia Antipolis, Francia, TR 23.785, 2016 [En línea]. Disponible en: <https://bit.ly/3uzvkcV>. [Accedido en: 3 de octubre de 2021].
- [56] "Cada 23 segundos muere una persona en el mundo por accidente de tráfico", *Solidaridad Digital*, 2020 [En línea]. Disponible en: <https://bit.ly/3a1jM8C>. [Accedido en: 3 de octubre de 2021].
- [57] Editorial Team, "What is LTE Sidelink?", *Everything RF*, 2018 [En línea]. Disponible en: <https://bit.ly/3D32nc8>. [Accedido en: 3 de octubre de 2021].
- [58] A. Perez, *Implementing IP and Ethernet on the 4G Mobile Network*, 2017, pp. 15-44. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-1-78548-238-0.50002-9>. [Accedido en: 3 de octubre de 2021].
- [59] R. Molina-Masegosa y J. Gozalvez, "LTE-V for Sidelink 5G V2X Vehicular Communications: A New 5G Technology for Short-Range Vehicle-to-Everything Communications," en *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 12, no. 4, pp. 30-39, 2017 [En línea]. doi: 10.1109/MVT.2017.2752798. [Accedido en: 3 de octubre de 2021].
- [60] C. Gómez Liberal, "Redes móviles 5G: Evolución New Radio", Trabajo Fin de Máster, Universidad Oberta de Catalunya, 2021 [En línea]. Disponible en: <https://bit.ly/2YbaDYz>. [Accedido en: 3 de octubre de 2021].
- [61] "Technical Specification Group Radio Access Network; Study on enhanced broadcast of system information", Third Generation Partnership Program, Sophia Antipolis, Francia, TR 25.704, 2017 [En línea]. Disponible en: [bit.ly/ 3onZIG2](https://bit.ly/3onZIG2). [Accedido en: 3 de octubre de 2021].

Universidad de Alcalá  
Escuela Politécnica Superior



ESCUELA POLITECNICA  
SUPERIOR



Universidad  
de Alcalá