

TECNOLOGÍAS C-V2X Y DSRC PARA EL VEHÍCULO CONECTADO EN REDES DE NUEVA GENERACIÓN

Aida Rodríguez Saiz

Máster Universitario en Ingeniería de Telecomunicaciones UOC
Área de Sistemas de Comunicaciones

Consultor: Alberto Moleiro Naval

Profesor responsable: Carlos Monzo Sánchez

Fecha entrega: 11/06/2020



Esta obra está sujeta a una licencia de
Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada
[3.0 España de Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/es/)

FICHA DEL TRABAJO FINAL

Título del trabajo:	Tecnologías C-V2X y DSRC para el vehículo conectado en redes de nueva generación
Nombre del autor:	Aida Rodríguez Saiz
Nombre del consultor:	Alberto Moleiro Naval
Nombre del PRA:	Carlos Monzo Sánchez
Fecha de entrega (mm/aaaa):	11/06/2020
Titulación:	Máster Universitario en Ingeniería de Telecomunicaciones UOC
Área del Trabajo Final de Máster:	TFM – Telemática
Idioma del trabajo:	Castellano
Palabras clave:	V2X, C-V2X, DSRC, SmartCar, Coche Autónomo, Smart Mobility

Resumen del Trabajo (máximo 250 palabras): *Con la finalidad, contexto de aplicación, metodología, resultados i conclusiones del trabajo.*

La siniestralidad vial y la contaminación ambiental son un problema de salud pública a nivel mundial. Se pierden alrededor de 1.35 millones de vidas al año en todo el mundo como consecuencia de los accidentes de tráfico y cerca de 4.5 millones debido a la contaminación.

La conectividad y la seguridad son dos conceptos estrechamente ligados al vehículo conectado y a la conducción autónoma con un gran potencial para mejorar la seguridad vial y la eficiencia, reduciendo la siniestralidad en carreteras y la contaminación atmosférica, gracias a la información compartida entre vehículos e infraestructura.

Las tecnologías de vanguardia que permiten las comunicaciones entre vehículos son DSRC (802.11p) y C-V2X (LTE-V2X). Además, se está trabajando en la tecnología 5G NR-V2X para abordar nuevos escenarios y mejorar el rendimiento de las comunicaciones, así como en el IEEE 802.11 NGV para mejorar las prestaciones con el IEEE 802.11bd.

Estas tecnologías ofrecen experiencias de conducción más seguras al permitir que el vehículo se comunique con cualquier elemento (coches, peatones, señales, semáforos...) dentro de un ecosistema conectado que permitirá a los conductores anticiparse a los riesgos.

En el presente proyecto se ha realizado un estudio de las distintas tecnologías para el vehículo conectado, desde el estado del arte de cada una de ellas, la estandarización necesaria hasta la influencia geográfica de cada una y sus casos de uso. También se describen los sistemas de transporte inteligente (ITS) así como los

mensajes de seguridad que aplican para cada región (BSM y CAM). Adicionalmente, se describen brevemente las mejoras en prestaciones que presentaría una red 5G para este tipo de comunicaciones. Finalmente se presenta una parte experimental relacionada con las diferentes plataformas de V2X, características de cada una de ellas, parámetros de RF, un análisis de los mensajes de seguridad BSM y unas conclusiones con justificaciones tanto a nivel tecnológico como comercial de la tecnología escogida.

Abstract (in English, 250 words or less):

Road accidents and environmental pollution are a worldwide public health problem. Around 1.35 million lives are lost every year worldwide as a result of traffic accidents and about 4.5 million due to pollution.

Connectivity and safety are two concepts closely linked to the connected vehicle and autonomous driving with great potential to improve road safety and efficiency, reducing road accidents and air pollution, thanks to the information shared between vehicles and infrastructure.

The state-of-the-art technologies that enable communication between vehicles are DSRC (802.11p) and C-V2X (LTE-V2X). In addition, work is being done on 5G NR-V2X technology to address new scenarios and improve communications performance, as well as on IEEE 802.11 NGV to improve performance with IEEE 802.11bd.

These technologies offer safer driving experiences by allowing the vehicle to communicate with any element (cars, pedestrians, signs, traffic lights ...) within a connected ecosystem that will allow drivers to anticipate risks.

In the present project, a study has been made of the different technologies for the connected vehicle, from the state of the art of each one of them, the necessary standardization to the geographical influence of each one and its use cases. Intelligent Transport Systems (ITS) are also described, as well as the security messages that apply for each region (BSM and CAM). Additionally, the performance improvements that a 5G network would present for this type of communications are briefly described. Finally, an experimental part related to the different V2X platforms, characteristics of each of them, RF parameters, an analysis of the BSM security messages and conclusions with justifications at both technological and commercial level of the chosen technology are presented.

Índice

1. Introducción	1
1.1. Contexto y justificación del Trabajo.....	1
1.2. Objetivos del Trabajo	2
1.3. Enfoque y método seguido	3
1.4. Planificación del Trabajo	3
1.5. Capítulos de la memoria	5
2. Estado del arte.....	6
2.1. Introducción	6
2.2. Evolución comunicaciones V2X.....	8
2.3. Redes vehiculares	9
2.3.1. DSRC IEEE 802.11p.....	10
2.3.2. <i>Cellular Vehicle to Everything</i>	11
2.4. Modelos de negocio V2X	12
3. Tecnologías V2X	14
3.1. <i>Cellular-V2X (C-V2X)</i>	14
3.1.1. Introducción	14
3.1.2. Modos de comunicación C-V2X	16
3.1.2.1. Modo de comunicación directa – Interfaz PC5.....	16
3.1.2.2. Modo de comunicación a red – Interfaz Uu	17
3.1.3. Modos de programación	18
3.1.4. Estandarización	21
3.1.5. Infraestructura.....	22
3.1.6. Expansión geográfica.....	23
3.1.7. Aplicaciones.....	29
3.2. <i>Dedicated Short Range Communication (DSRC)</i>	29
3.2.1. Introducción	29
3.2.2. <i>Wireless Access Vehicular Environment – WAVE</i>	31
3.2.2.1. Capa física (WAVE PHY)	32
3.2.2.2. Capa WAVE MAC	32
3.2.2.3. Capa de red.....	33
3.2.3. Estandarización	33
3.2.4. Infraestructura.....	35
3.2.5. Expansión geográfica.....	36
3.2.6. Aplicaciones.....	37
4. Sistemas de transporte inteligente (ITS)	39
4.1. Introducción	39
4.2. Aplicaciones de seguridad	40
4.3. Mensajes de seguridad.....	42
4.3.1. BSM.....	42
4.3.2. CAM.....	43
4.3.3. Otros mensajes.....	44
5. Evolución redes celulares	45
5.1. Estado del arte	45
5.2. C-V2X sobre 4G LTE	46
5.2.1. Arquitectura 4G LTE	46

5.2.1.1. Comunicaciones LTE-D2D	48
5.2.1.2. Comunicaciones LTE-V2X.....	48
5.2.2. Métricas redes 4G LTE	49
5.2.3. Escenarios de uso	50
5.3. C-V2X sobre 5G NR	50
5.3.1. Arquitectura 5G NR.....	51
5.3.1.1. Comunicaciones 5G D2D	55
5.3.1.2. Comunicaciones 5G V2X.....	56
5.3.2. Métricas redes 5G NR.....	56
5.3.3. Escenarios de uso	57
5.4. Cumplimiento requisitos para V2X.....	58
6. Evaluación experimental tecnologías V2X	60
6.1. Análisis de mensajes de seguridad.....	60
6.1.1. Configuración entorno V2X	60
6.1.2. Utilización de señales de CAN	62
6.1.3. Procedimiento para capturar mensajes BSM	63
6.1.4. Pruebas escenario V2X	63
6.2. Valoración económica de la evaluación experimental.....	76
7. Conclusiones	77
8. Acrónimos.....	79
9. Bibliografía.....	82
10. Anexos.....	86
10.1. Anexo A – Contenido mensaje BSM	86
10.2. Anexo B – Relación señales de CAN y elementos BSM	88
10.3. Anexo C – Datasheets del entorno simulado	90

Índice de Figuras

Figura. 1 Ecosistema vehículo conectado. Fuente: Ficosa [39].....	1
Figura. 2 Planificación con desviaciones ocurridas	4
Figura. 3 Diagrama de Gantt planificación modificada I	4
Figura. 4 Diagrama de Gantt planificación modificada II	5
Figura. 5 Tipos de aplicaciones V2X según 3GPP (V2V, V2P, V2N y V2I). Fuente: ResearchGate [7].....	8
Figura. 6 Evolución V2X. Fuente: HPE [10]	10
Figura. 7 Tecnologías C-V2X y DSRC. Fuente: Autotalks [15].....	14
Figura. 8 Modos de comunicación C-V2X según 3GPP. Fuente: 3GPP [23].....	16
Figura. 9 LTE PC5 modo de cobertura y no cobertura. Fuente: 5GAA [19].....	16
Figura. 10 Evolución del modo de comunicación directa PC5. Fuente: Qualcomm [22]	17
Figura. 11 Interfaz LTE-Uu y NR-Uu. Fuente: 5GAA [19].....	17
Figura. 12 Modo 3 asignación de recursos dedicados. Fuente: UPC [21]	19
Figura. 13 LTE-V2X Modo 3 (izquierda) y Modo 4 (derecha). Fuente: ResearchGate [53]	20
Figura. 14 Selección de recursos Modo 4. Fuente: Qualcomm [22]	20
Figura. 15 C-V2X: Evolución Releases 3GPP. Fuente: 5GAA [30].....	21
Figura. 16 Arquitectura mejorada para comunicaciones V2X. Fuente: 5GAA [24].....	23
Figura. 17 Presencia global de C-V2X con demostraciones y pruebas. Fuente: Qualcomm [31]	23
Figura. 18 Vehículos conectados CDOT. Fuente: www.codot.gov [38]	25
Figura. 19 Pruebas C-V2X por áreas en China. Fuente: 5GAA [34].....	25
Figura. 20 Pruebas comunicación C-V2X Segovia. Fuente: Xataka [42].....	27
Figura. 21 Detección de un ciclista con comunicación C-V2X MWC 2019. Fuente: Ficosa [39]	27
Figura. 22 Caso de uso frenada de emergencia con C-V2X en Australia. Fuente: [45]28	
Figura. 23 Espectro DSRC EE. UU: bandas y canales. Fuente: ResearchGate [53]... 30	
Figura. 24 Asignación mundial de espectro DSRC. Fuente: ITU-R [75]	30
Figura. 25 Estándares DSRC y pila de comunicación. Fuente: ResearchGate [57]	32
Figura. 26 Escenario de redes vehiculares usando IEEE 802.11p. Fuente: Semantic scholar [80]	35
Figura. 27 Captura mercado DSRC año 2019. Fuente: Technology Informa [59].....	36
Figura. 28 Estrategia Europea sobre C-ITS. Fuente: www.ec.europa.eu [51]	40
Figura. 29 Estructura mensaje BSM. Fuente: Elaboración propia	43
Figura. 30 Estructura general de un mensaje CAM. Fuente: SAE [48].....	43
Figura. 31 Evolución redes celulares. Fuente: Mauritius Telecom [67].....	45
Figura. 32 Evolución 4G LTE. Fuente: www.semiconductores.com [50]	46
Figura. 33 Arquitectura sistema LTE. Fuente: www.intotally.com [52].....	47
Figura. 34 Red de acceso E-UTRAN. Fuente: www.intotally.com [52]	47
Figura. 35. Entorno comunicaciones LTE-V2X. Fuente: Nokia [61].....	48
Figura. 36 Modos de funcionamiento sistemas 5G. Fuente: [62].....	51
Figura. 37 Cambios y mejoras respecto con 4G. Fuente: ITU [75].....	52
Figura. 38 Arquitectura basada en servicios. Fuente: ITU [75].....	52
Figura. 39 Arquitectura de Network slicing. [62].....	53

Figura. 40 Ejemplo de V2X <i>network slicing</i> [62]	53
Figura. 41 Capacidades IMT-2020. Fuente: ITU [75]	57
Figura. 42 Escenarios de uso 5G. Fuente: ITU-R IMT 2020 [75].....	58
Figura. 43 Elementos escenario de pruebas V2X. Fuente: Elaboración propia	61
Figura. 44 <i>Workflow</i> señales de CAN a BSM. Fuente: Elaboración propia.....	63
Figura. 45 <i>Setup</i> evaluación experimental mensajes BSM. Fuente: Elaboración propia	64
Figura. 46 Diseño mensaje 308	66
Figura. 47 Herramienta para inyectar CAN	66
Figura. 48 Captura mensajes BSM enviados Carcom.....	68
Figura. 49 Protocolos aplicados a los mensajes BSM.....	69
Figura. 50 IEEE 1609.2 <i>SignedData</i>	70
Figura. 51 Contenido mensaje BSM	70
Figura. 52 BSM Parte I – <i>CoreData</i>	70
Figura. 53 BSM Parte II – <i>VehicleSafetyExtensions</i>	72
Figura. 54 BSM Part II – <i>SupplementalVehicleExtensions</i>	73
Figura. 55 BSM Part II – <i>SpecialVehicleExtensions</i>	74
Figura. 56 Mensajes CAM capturados	75
Figura. 57 Contenido mensaje CAM	75

Índice de Tablas

Tabla. 1 Comparativa 802.11p, C-V2X Rel-14/15 y C-V2X Rel-16. Fuente: Qualcomm [18]	10
Tabla. 2 Características principales modos de comunicación V2X. Fuente: Future Internet [20]	16
Tabla. 3 Resumen modos de programación: Fuente: Elaboración propia	18
Tabla. 4 Interfaces V2X. Fuente: 5GAA [24]	23
Tabla. 5 Características WAVE PHY. [14].....	32
Tabla. 6 KPIs redes 4G LTE. Fuente: 5GAA [74].....	49
Tabla. 7 KPIs 5G NR. Fuente: 5GAA [74].....	57
Tabla. 8 Requisitos de red de las tres categorías de servicios 5G. Fuente: Introducción 5G [63].....	58
Tabla. 9 Requisitos aplicaciones V2X. Fuente: 5GAA [74].....	59
Tabla. 10 Relación señales de CAN y elementos mensaje BSM	65
Tabla. 11 Agrupación señales de CAN por mensajes	66
Tabla. 12 Valores señales de CAN inyectadas	67
Tabla. 13 BSM Core Data – Elementos identificación de mensajes BSM	71
Tabla. 14 BSM Core Data – Elementos BSM con información GNSS.....	71
Tabla. 15 BSM Core Data – Elementos BSM con información de señales CAN	71
Tabla. 16 BSM Parte II – Elementos BSM para la clasificación de vehículos.....	73
Tabla. 17 BSM Parte II – Elementos BSM con los datos del vehículo.....	73
Tabla. 18 BSM Parte II – Elementos BSM con información meteorológica	74
Tabla. 19 BSM Parte II – Elementos BSM con información de detección de obstáculos en carretera	74

Tabla. 20 BSM Parte II – Elementos BSM con información de vehículos de emergencia	75
Tabla. 21 Presupuesto para la realización de las pruebas	76
Tabla. 22 Contenido mensajes BSM (Part I & Part II) [47]	87
Tabla. 23 Relación señales de CAN y elementos BSM.....	90

1. Introducción

1.1. Contexto y justificación del Trabajo

El crecimiento del número de vehículos en las carreteras está colapsando los sistemas de transporte aumentando así la inseguridad y los accidentes. Como consecuencia, la infraestructura de transporte necesita actualizarse para aumentar la seguridad y la eficiencia del tráfico.

Para conseguir un aumento de seguridad y eficiencia de tráfico se han empezado a desarrollar aplicaciones de monitorización de tráfico y control de flujo, que forman parte de los Sistemas de Transporte Inteligente (ITS – *Intelligent Transportation Systems*).



Figura. 1 Ecosistema vehículo conectado. Fuente: Ficosa [39]

Las ITS son posibles gracias a las redes vehiculares que se consideran el entorno de red de estos sistemas.

A partir de esta necesidad, gobiernos, fabricantes de automóviles y las comunidades de investigación han dedicado esfuerzos en el desarrollo de una plataforma estandarizada para las comunicaciones móviles.

Para las comunicaciones de corto alcance licenciadas **DSRC** (*Dedicated Short Range Communication*) se ha reservado el espectro de 5.9 GHz y está definido por el estándar IEEE 802.11p. Es interesante para comunicaciones entre automóviles e infraestructura de transporte y es la base de las comunicaciones DSRC. Además, incorpora WAVE (*Wireless Access in Vehicular Environments*) como norma estadounidense y ITS-G5 como norma de la Unión Europea, como sistemas de comunicación vehicular utilizados para la implementación de ITS.

Como alternativa al DSRC, en 2016 el 3GPP publicó las especificaciones del **C-V2X** como sistema de comunicación basado en 4G LTE y compatible con el futuro 5G, que permitirá a los vehículos comunicarse con el entorno, incluyendo conexiones vehículo-a-vehículo (**V2V**), vehículo-a-infraestructura (**V2I**) y vehículo-a-peatón (**V2P**). Con las redes 4G LTE hay optimización de tráfico y una reducción de las emisiones y con las redes 5G se pretende disponer de comunicaciones de alta velocidad de baja latencia.

En 2017 un fabricante de vehículos europeo publicó la intención de implantar la tecnología V2X basada en DSRC a partir de 2019, sin embargo, la Asociación

Automotriz 5G (5GAA) desarrolla y apoya la tecnología C-V2X ya que argumenta que es superior al DSRC en aspectos como rendimiento, rango de comunicación y confiabilidad.

El objetivo de este trabajo es valorar las prestaciones de las tecnologías **DSRC** y **C-V2X** y poder proponer mejoras sobre los sistemas actuales que se encuentran en desarrollo. Desde la adaptación del protocolo IEEE 802.11p en entornos vehiculares, las especificaciones de C-V2X sobre 4G hasta la evolución hacia las redes vehiculares sobre 5G y los casos de uso de cada una de las tecnologías, teniendo en cuenta despliegues reales existentes a nivel mundial de estas tecnologías.

No hay que restar importancia a que las comunicaciones vehiculares se enfrentan a retos relacionados con la seguridad y la integridad de la información, ya que cualquier intrusión en estas comunicaciones puede causar grandes problemas. Este tema no es el foco de este trabajo, pero se tendrá en cuenta durante el desarrollo de este [2].

1.2. Objetivos del Trabajo

El objetivo principal de este trabajo es analizar las características de las dos tecnologías principales que permiten las comunicaciones entre vehículos, C-V2X y DSRC.

A partir del objetivo principal se derivan los siguientes objetivos:

- Conocer el estado del arte de comunicaciones V2X y de las redes vehiculares.
- Descripción de las tecnologías C-V2X y DSRC y de las plataformas existentes, así como su expansión geográfica, así como su madurez tecnológica y profundización en la actualidad y su posible evolución hacia el coche autónomo.
- Descripción de la estandarización relacionada con cada una de las tecnologías.
- Introducción a los Sistemas de Transporte Inteligente (Intelligent Transportation Systems) y descripción de los mensajes de seguridad BSM (*Basic Safety Message*) (USA) y CAM (*Cooperative Awareness Message*) (EU).
- Descripción de LTE-V2X y la evolución hacia 5G NR-V2X destacando la mejora de prestaciones gracias a las redes 5G.
- Evaluación experimental de las tecnologías V2X comparando las plataformas C-V2X y DSRC. También se va a realizar un análisis de mensajes BSM.

1.3. Enfoque y método seguido

El enfoque se ha escogido en función de los objetivos del trabajo, teniendo en cuenta que se trata de un trabajo teórico-práctico.

Para la realización del análisis del estado del arte de las comunicaciones V2X y de las redes vehiculares se ha seguido la estrategia de consultar artículos y documentación científica existente.

Seguidamente en la fase de investigación sobre las diferentes tecnologías de V2X, DSRC y C-V2X, se ha realizado una contextualización del estado actual de cada una de ellas, se han consultado los estándares que aplican a cada una de ellas y se ha realizado una investigación de las zonas geográficas de uso potencial de cada una de las tecnologías.

Como parte de la fase de investigación también se han tratado los sistemas de transporte inteligente y se han descrito los mensajes de seguridad asociados, BSM y CAM, con el soporte de los estándares asociados. Además, se ha valorado la evolución hacia redes V2X sobre 5G y la mejoras en cuanto a prestaciones que estas redes aportarían.

Como parte de la fase analítica del proyecto, teniendo en cuenta las plataformas existentes para ambas tecnologías se ha evaluado la complejidad de una red V2X, y todas las implicaciones y limitaciones para cada una de ellas.

Finalmente, en la fase experimental del proyecto se ha realizado un análisis de los mensajes de seguridad BSM que se intercambian los vehículos con otros vehículos y con la infraestructura.

Finalmente, contrastando toda la información obtenida tanto en las fases teóricas como experimentales de este proyecto se han realizado una serie de conclusiones.

1.4. Planificación del Trabajo

En este apartado se incluye la planificación del trabajo según el cronograma original y un resumen de la planificación real teniendo en cuenta las desviaciones temporales sufridas durante la ejecución del proyecto.

La planificación prevista inicialmente para la realización del presente proyecto se ha cumplido según lo previsto hasta la entrega de la PEC2, a partir de este momento y debido a la situación excepcional vivida mundialmente derivada de la pandemia del COVID-19 algunos de los hitos se han visto alterados de la siguiente manera y con su asociada justificación:

- La evaluación experimental de las tecnologías V2V, concretamente la comparativa entre los parámetros de radiofrecuencia asociados a dos plataformas C-V2X y DSRC. Las medidas a realizar en laboratorio no se han

podido realizar por imposibilidad de acceso a los laboratorios previstos debido al estado de alarma y a la limitación de movilidad. Inicialmente se había previsto una duración de 15 días para esta tarea que se han reducido a 5 por lo comentado anteriormente.

- Los 10 días que se han visto forzosamente reducidos de la tarea del punto anterior se han imputado en otras tareas con tal de realizar un análisis más exhaustivo del previsto inicialmente. Las tareas en cuestión han sido:
 - *Cellular-V2X (C-V2X)*
 - *Dedicated Short Range Communication (DSRC)*
 - Análisis de mensajes de seguridad

La nueva planificación actualizada corresponde con las figuras que aparecen a continuación:

Icono	Nombre	Duración	Inicio	Terminado
	Hito 0 - Decisión proyecto	7 days	19/02/20 8:00	27/02/20 17:00
	INICIO - TFM Aida Rodriguez	89 days?	20/02/20 8:00	23/06/20 17:00
	Plan de proyecto	8 days	20/02/20 8:00	2/03/20 17:00
	Contexto y enfoque	8 days	20/02/20 8:00	2/03/20 17:00
	Planificación	1 day	29/02/20 8:00	2/03/20 17:00
	Hito 1 - Entrega PEC1	0 days	2/03/20 17:00	2/03/20 17:00
	Corrección PEC1	6 days	4/03/20 9:00	12/03/20 9:00
	Desarrollo estado del arte	9 days	4/03/20 8:00	16/03/20 17:00
	Investigación tecnologías V2X	7 days?	6/03/20 8:00	16/03/20 17:00
	Investigación redes vehiculares	6 days?	8/03/20 8:00	16/03/20 17:00
	Modelos de negocio V2X	6 days?	8/03/20 8:00	16/03/20 17:00
	Inicio estado de alarma COVID-19	0 days	13/03/20 8:00	13/03/20 8:00
	Duración estado de alarma COVID-19	67 days?	13/03/20 8:00	15/06/20 17:00
	Hito 2 - Entrega PEC2	0 days	16/03/20 17:00	16/03/20 17:00
	Corrección PEC2	5 days	17/03/20 8:00	23/03/20 17:00
	Investigación i análisis C-V2X	17 days	17/03/20 8:00	8/04/20 17:00
	Investigación i análisis DSRC	17 days	17/03/20 8:00	8/04/20 17:00
	Detalle estandarizaciones C-V2X y DSRC	6 days	22/03/20 8:00	30/03/20 17:00
	Investigación Sistemas de Transporte Inteligente (ITS)	13 days	30/03/20 8:00	15/04/20 17:00
	Evolución redes oelulares: 4G LTE hacia 5G NR	10 days	15/04/20 8:00	28/04/20 17:00
	Explicación técnica comparativa experimental DSRC C-V2X	5 days	22/04/20 8:00	28/04/20 17:00
	Analisis mensajes BSM	7 days	10/05/20 8:00	19/05/20 17:00
	Hito 3 - Entrega PEC3	0 days?	17/05/20 17:00	18/05/20 17:00
	Corrección PEC3	8 days	20/05/20 8:00	29/05/20 17:00
	Realización de las conclusiones	8 days	29/05/20 8:00	9/06/20 17:00
	Hito 4 - Entrega PEC4	0 days	11/06/20 17:00	11/06/20 17:00
	Realización presentación	4 days	13/06/20 8:00	18/06/20 17:00
	Hito 5 - Entrega PEC5	0 days	21/06/20 8:00	22/06/20 17:00
	Hito 6 - Tribunal	0 days	21/06/20 8:00	22/06/20 17:00
	Respuestas consultas tribunal	2 days	22/06/20 8:00	23/06/20 17:00
	Hito 7 - Fin del Tribunal	0 days	23/06/20 8:00	23/06/20 8:00
	FINAL TFM Aida Rodriguez	0 days	23/06/20 8:00	23/06/20 8:00

Figura. 2 Planificación con desviaciones ocurridas

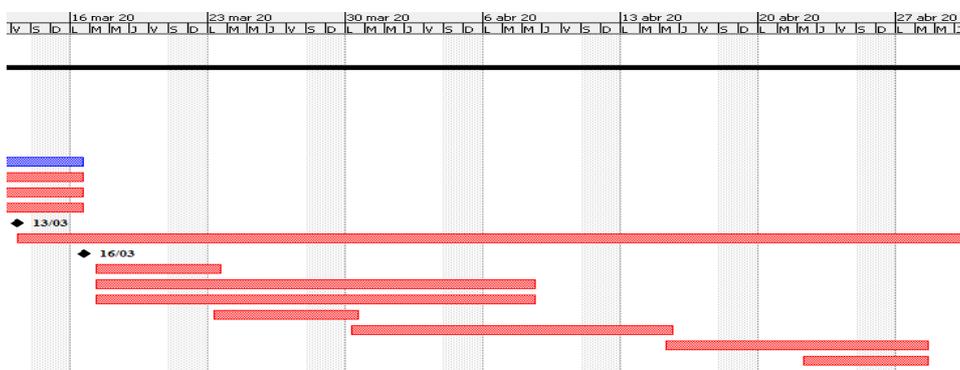


Figura. 3 Diagrama de Gantt planificación modificada I

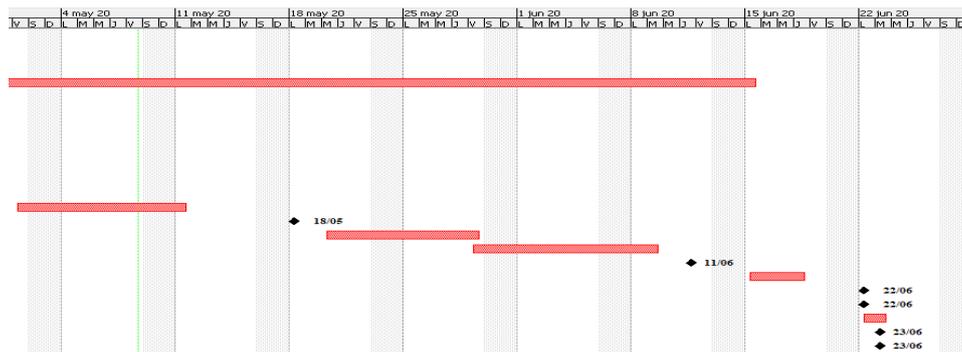


Figura. 4 Diagrama de Gantt planificación modificada II

1.5. Capítulos de la memoria

La presente memoria está dividida en siete capítulos los cuales se presentan brevemente resumidos en este apartado.

El **primer capítulo** contiene la introducción al proyecto, con una contextualización de la temática del proyecto y una justificación de este. También se plantean los objetivos a alcanzar por el proyecto, el enfoque y metodología se va a seguir para completarlo y la planificación y las posibles desviaciones aparecidas a lo largo del desarrollo.

El **segundo capítulo** describe el estado del arte de las comunicaciones vehiculares y de las redes vehiculares, mencionando las dos tecnologías clave para estas redes, C-V2X y DSRC. También se incluye en este capítulo un análisis de los modelos de negocio generados a partir de las comunicaciones vehiculares.

El **tercer capítulo** contiene una descripción de las tecnologías *Cellular V2X (C-V2X)* y *Direct Short Range Communications (DSRC)*, teniendo en cuenta la definición, la infraestructura necesaria, estandarización, expansión geográfica y aplicaciones de cada una de ellas.

El **cuarto capítulo** describe los Sistema de Transporte Inteligente (ITS), los mensajes de seguridad que tienen asociados estos sistemas y las diferentes aplicaciones de seguridad existentes relacionadas con los vehículos conectados.

El **quinto capítulo** describe la evolución de las redes celulares, la evolución de 4G LTE a 5G NR y que mejoras aporta esta evolución a las comunicaciones V2X.

El **sexto capítulo** contiene la evaluación experimental de dos plataformas existentes de las tecnologías C-V2X y DSRC, con una comparativa de alguno de sus parámetros. Además, se incluye el análisis de mensajes de seguridad BSM.

En el **séptimo capítulo** contiene las conclusiones derivadas de la realización del proyecto y un análisis de los objetivos alcanzados. También se incluyen posibles líneas de trabajo futuras.

2. Estado del arte

2.1. Introducción

Actualmente se están abordando avances significativos relacionados con las comunicaciones vehiculares (V2X) las cuales suponen un punto clave en la mejora de la seguridad vial y en la eficiencia del tráfico en el futuro. Con estos objetivos en común, nuevas tecnologías están avanzando en el sector automovilístico.

Entre las nuevas herramientas están las comunicaciones vehiculares V2X (*Vehicle-to-everything*) que permiten el intercambio de información tanto entre vehículos (V2V como con la infraestructura (V2I), con los peatones (V2P) o con los servidores de red (V2N). Este intercambio de información, procedente tanto de los sistemas de asistencia como de sensores, permite conocer más detalles (velocidad, dirección, posición...) de los vehículos de alrededor y de la infraestructura existente.

La utilización de estos sistemas aporta beneficios en cuanto a la mejora en la seguridad vial y en la eficiencia del tráfico, permitiendo también reducir las emisiones contaminantes y el consumo energético de los automóviles. Además, los sistemas de comunicaciones V2X son una fuente de información muy útil de cara a la aparición de la conducción autónoma, la cual se encuentra actualmente en desarrollo.

Los sistemas de comunicaciones V2X funcionan sobre las redes vehiculares, para las que hay dos estándares claramente competitivos, el IEEE802.11p/WAVE basado en la adaptación del Wifi para requisitos de las comunicaciones vehiculares y el C-V2X basado en LTE estandarizado por el 3GPP (*Third Generation Partnership Project*) para comunicaciones móviles celulares sobre 4G y en su próxima evolución sobre 5G [1].

El vehículo conectado añadirá valor a la industria del automóvil y traerá múltiples beneficios en términos de movilidad y seguridad, sin pasar por alto los retos tecnológicos y de tiempo de producción que deberá superar para su desarrollo e implantación.

La implantación del vehículo conectado parece inmediata, por lo que ya es posible valorar sus ventajas y los puntos pendientes que quedan por trabajar. Actualmente hay diferentes fronteras que superar [2]:

- **Intuición del vehículo** para que los vehículos sean capaces de conocer las necesidades del consumidor y disponer de la información del entorno necesaria.
- **Desarrollo tecnológico e industrial** para explorar nuevas soluciones que permitan que los conductores estén conectados con el exterior de manera intuitiva. Un elemento crucial para este desarrollo será el sistema de infoentretenimiento.

La preposición principal del entorno del vehículo conectado se encuentra en el poder de conectividad inalámbrica con otros vehículos, las conocidas comunicaciones V2V, con la infraestructura, comunicaciones V2I y las comunicaciones para la prevención de accidentes, ayudando a mejorar la movilidad y la sostenibilidad.

Ventajas del vehículo conectado:

- **Seguridad vial:** desplegar el vehículo conectado con comunicaciones V2V y V2I ayudará a reducir la accidentalidad en las carreteras, ya que cada vehículo podría utilizar las comunicaciones V2X para transmitir su identidad, posición y velocidad y analizar los datos recibidos de los vehículos e infraestructura de su entorno y tomar decisiones consecuentes, como reducir la velocidad al aproximarse a un paso de peatones o respetar la distancia de seguridad con los vehículos de delante. Con el análisis de la información los vehículos podrían ser capaces de construir su propio mapa en tiempo real con información de los alrededores y podrían recibir alertas de posibles colisiones o incidentes, además de permitir a los conductores tomar decisiones inteligentes durante los trayectos en coche, pudiendo así redirigir las rutas en coche para evitar zonas de atascos, zonas restringidas o de bajas emisiones [3][4].
- **Detección de averías:** la detección proactiva de averías representa una ventaja tanto para los usuarios como para los talleres de vehículos. El software presente en los vehículos conectados realiza una monitorización constante del estado del vehículo, facilitando así la detección de averías, el origen o la necesidad de mantenimiento o desgaste de algunos componentes [3][4].
- **Medioambiente:** la contaminación atmosférica afecta considerablemente en la salud de los ciudadanos, es responsable de unas 500.000 muertes prematuras al año en Europa. Las capacidades de control de congestión y gestión de carriles que permiten las aplicaciones V2X permiten reducir el consumo de combustible y las emisiones. Así mismo, los vehículos generarán datos en tiempo real que permitirán a los conductores y a los agentes de transporte tomar decisiones más ecológicas [3][4].
 - Las operaciones de señalización y las aplicaciones de administración de carriles para la optimización medioambiental de las carreteras podrían generar ahorros de combustible de hasta el 22% [3].
 - La aplicación de zonas de bajas emisiones puede aportar una reducción de hasta un 20% los recorridos de los vehículos, implicando así una reducción asociada de las emisiones y el consumo de combustible de los vehículos. Como ejemplo de ciudades que ya están implantando zonas de bajas emisiones tenemos Barcelona, con la ZBE Rondas de Barcelona, Londres con la *Low Emission Zone*, París con la *Zone à circulation restreinte*, Berlín con la *Umweltzone Berlin*, Bruselas con la *Low Emission Zone*, Roma con la Zona de Tráfico Limitado y en Amsterdam quieren prohibir el acceso a la ciudad a coches o motos diésel o gasolina [5].

Retos vehículo conectado:

- **Tiempo de fabricación:** los ciclos de vida de los vehículos y de los móviles difieren bastante, lo que supone un reto para el vehículo conectado. Los fabricantes de vehículos trabajan con ciclos de actualización sobre los 5 años, mientras que la industria móvil presenta actualizaciones de manera constante [6].

- **Acuerdos con empresas tecnológicas:** la industria del automóvil y la móvil tienen que empezar a colaborar para cubrir las necesidades de conectividad del vehículo conectado para los consumidores [6].
- **Transformación de los concesionarios:** los vendedores deberán invertir más tiempo en enseñar las funciones de conectividad disponibles en los vehículos [6].
- **Aumento del coste de los servicios asociados al vehículo conectado:** a diferencia del concepto de pago único en el momento de la compra del vehículo, el vehículo conectado tendrá asociados costes a modo de pago por uso relacionados con la conectividad de este [6].

2.2. Evolución comunicaciones V2X

Las comunicaciones V2X serán un factor clave para el éxito de los vehículos conectados. Los fabricantes se afrontan al reto de mejorar la confianza en la información que se intercambian los diferentes vehículos conectados. DSRC (Wi-Fi), LTE-4G y 5G NR forman parte de la columna vertebral de V2X.

El concepto V2X hace referencia al intercambio de información de un vehículo a cualquier sujeto que pueda estar en contacto o afectarlo y viceversa. La información de los sensores y otras fuentes viaja a través de enlaces de gran ancho de banda, baja latencia y alta confiabilidad.

Hay diferentes componentes que forman parte de V2X, incluyendo las comunicaciones vehículo a vehículo (V2V), vehículo a infraestructura (V2I), vehículo a peatón (V2P) y vehículo a red (V2N). Todos los componentes citados forman un ecosistema multidisciplinario en el que los vehículos se comunicarán con otros automóviles, infraestructura, semáforos, peatones con teléfonos inteligentes o con centros de datos.

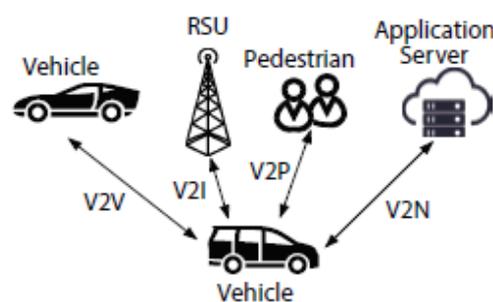


Figura. 5 Tipos de aplicaciones V2X según 3GPP (V2V, V2P, V2N y V2I). Fuente: ResearchGate [7]

- **Vehículo a vehículo (V2V):** consiste en el intercambio de información entre vehículos con el objetivo de mejorar el tráfico y evitar accidentes. Aplica el mismo concepto que la comunicación M2M (*Machine to Machine*) pero con los vehículos [7].

- **Vehículo a Infraestructura (V2I):** es el intercambio bidireccional de información entre automóviles y señales de tráfico e infraestructura vial inteligente a través de una conexión inalámbrica. Tiene como objetivo mejorar la seguridad vial y reducir las colisiones. Para sacar el máximo partido a estas comunicaciones es necesario disponer de una infraestructura equipada, que pueda transportar y compartir información relevante [7].
- **Vehículo a peatón (V2P):** incluye las comunicaciones directas entre los vehículos y los peatones que se encuentran próximos entre sí. También tienen en cuenta las comunicaciones con otros usuarios vulnerables de la carretera (VRU), como pueden ser los ciclistas. Tiene como objetivo mejorar las advertencias entre vehículos y VRUs y reducir la accidentalidad en las carreteras [7].
- **Vehículo a red (V2N):** estas comunicaciones conectan los vehículos a la infraestructura celular y a la nube, para que los conductores puedan disfrutar de los servicios dentro del vehículo. Estas comunicaciones son posibles gracias a la infraestructura de red LTE. Los vehículos son capaces de recibir alertas sobre accidentes o advertencias de congestión en la ruta planificada [7].

2.3. Redes vehiculares

Las redes vehiculares ad-hoc, también conocidas como VANET (*Vehicular Ad-hoc Network*), son un tipo de redes móviles derivadas de las redes móviles MANET (*Mobile Ad hoc Network*) originalmente diseñadas para mejorar la seguridad vial, aunque actualmente hay una gran variedad de aplicaciones donde las redes VANET pueden ser de gran utilidad. Los nodos de estas redes que participan en la comunicación son vehículos equipados con unidades de comunicación a bordo (OBU - *On Board Unit*) y se crean cuando varios vehículos se interconectan entre sí sin necesidad de una infraestructura.

Las redes vehiculares son redes móviles distribuidas en las que desaparece la figura del nodo central que tradicionalmente se encargaba de las labores de coordinación de los diferentes componentes de la red. Uno de los principales problemas derivados de la falta de coordinador es que la calidad de las transmisiones se puede ver comprometida [8].

Las redes VANET son un componente esencial para los Sistemas de Transporte Inteligente (ITS), los cuales son una tecnología clave para la mejora de la seguridad vial y la eficiencia en el tráfico.

Las redes VANET presentan una diferencia importante con respecto a las redes móviles convencionales, la movilidad de sus nodos de red, los vehículos, lo que obliga a tener una topología de red dinámica y que se adapte rápidamente a la entrada y salida de nodos en la red. Además, estas presentan restricciones temporales ya que es necesario que los mensajes de seguridad lleguen al máximo de dispositivos posible en el menor tiempo posible [9].

El concepto de vehículo a todo (V2X) se introdujo con el estándar 802.11p con un conjunto limitado de servicios básicos de seguridad. Con la *Release 14* del 3GPP, se amplió la gama de servicios para V2X, aceptando tanto aplicaciones de seguridad de bajo y alto ancho de banda, así como aplicaciones de infoentretenimiento. Las *Releases 15* y *16* proporcionaban mayor alcance, mayor densidad de usuarios, alto rendimiento y confiabilidad, posicionamiento de alta precisión y muy baja latencia [24]. La Figura. 6 resume estas características y muestra cómo pueden coexistir 802.11p, LTE y próximamente 5G.



Figura. 6 Evolución V2X. Fuente: HPE [10]

Como en cualquier nuevo campo de la tecnología, hay estándares que se posicionan como competitivos para V2X.

	802.11p	C-V2X Rel-14/15	C-V2X Rel-16
Especificación completada	Completa	Rel-14 2016 Rel-15 2018	2019
Comunicaciones directas de baja latencia	Si	Rel-14- 4ms	< 1ms
Comunicaciones de red	Solo vía AP	Si	Si
Opera sin asistencia de red	Si	SI	Si
Opera en ITS 5.9 GHz	Si	Si	Si
Operativa sin SIM	Si	Si	Si
Seguridad para V2V/V2I/V2P	IEEE WAVE y ETSI ITS	IEEE WAVE y ETSI ITS	IEEE WAVE y ETSI ITS
Seguridad V2N	N/A	SI	SI
Coexistencia con 5.9GHz	Canales adyacentes con tecnología 3GPP	Canal adyacente con 802.11p. Coexistencia con cocanal R14	Canal adyacente con 802.11p. Coexistencia con cocanal R14 y Wifi
Evolución	No	Si	Si, compatible con Rel-14/15

Tabla. 1 Comparativa 802.11p, C-V2X Rel-14/15 y C-V2X Rel-16. Fuente: Qualcomm [18]

2.3.1. DSRC IEEE 802.11p

IEEE 802.11p es el estándar original de V2X basado en una conexión Wifi que parte de la base del programa IEEE *Wave* o *Wireless Access* para vehículos y trabaja en la banda de 5.9 GHz. El estándar IEEE 802.11p se acabó de desarrollar en 2012 en EE. UU., donde respaldan las Comunicaciones Dedicadas de Corto Alcance (DSRC) e ITS-G5 como iniciativa de Sistemas de Transporte Inteligente cooperativo (C-ITS). En el espectro de frecuencias de 5.9 GHz, el IEEE 802.11 define el uso de las capas física y

de enlace de datos, especificando las normas de una red de área local inalámbrica (WLAN). Adicionalmente agrega como sistema vehicular el WAVE o *Wireless Access in Vehicular Environments*, muy utilizado en la implementación de los ITS [14].

Las comunicaciones V2X mediante DSRC van más allá de los sensores limitados por la línea de visión, como cámaras, radar y lidar (*Light Detection and Ranging*) y cubren casos de uso de V2V y V2I, como advertencias de colisión, alertas de límite de velocidad y pagos electrónicos de peaje y estacionamiento.

Las características funcionales de 802.11p incluyen comunicaciones de corto alcance, menos de 1km, baja latencia, sobre los 2 milisegundos y alta confiabilidad lo que facilita la interoperabilidad. Puede funcionar en condiciones de movilidad alta y ofrece un rendimiento resistente a las condiciones climáticas extremas. Actualmente existen soluciones de unidades a bordo (OBU) y unidades de carretera (RSU - *Road Side Unit*) disponibles por proveedores como NXP, Ficosa, Kapsch Marvell, Renesas Electronics y Redpine Signals [12].

2.3.2. Cellular Vehicle to Everything

Cellular-V2X (C-V2X) se postula como una alternativa al estándar IEEE 802.11p, cuyos principales defensores son la Asociación Automotriz 5G (5GAA) y el fabricante de chips Qualcomm.

C-V2X se desarrolló dentro del Proyecto de Asociación de Tercera Generación (3GPP), En 2014 el 3GPP incorporó en la *Release 13* las pruebas de uso de los estándares actuales de V2X, para reemplazar las comunicaciones DSRC suscitadas por los EEUU y los Sistemas de Transporte Inteligente Cooperativo (C-ITS) originados en Europa, ya que los dos estándares son pasos decisivos hacia el objetivo de conducción autónoma y aporta pistas sobre la influencia del mercado, ya que la Administración Nacional de Seguridad del Tráfico de las Carreteras (NHTSA) propone la implantación obligatoria de la tecnología V2X a partir de 2020 a todos los vehículos de EEUU.

En Europa, a mediados del 2019 se estaba optando por un enfoque tecnológico neutral para las **C-ITS**, dejando el camino a seguir para que tanto LTE 4G, 5G NR como otras tecnologías puedan formar parte del ecosistema V2X.

Una ventaja clave de C-V2X es que permite dos modos operativos que son capaces de cubrir la gran mayoría de los eventos. El primero de ellos, son las comunicaciones directas C-V2X de baja latencia a través de la interfaz PC5 en la banda sin licencia de 5.9 GHz y está muy relacionado con las características que ofrece la tecnología IEEE 802.11p que también utiliza la banda de 5.9 GHz. El segundo modo hace referencia a las comunicaciones a través de la interfaz Uu en la banda licenciada de móvil. Debido a que IEEE 802.11p no utiliza conectividad celular, solo puede coincidir con C-V2X en conexiones ad hoc a estaciones base en carretera [22].

2.4. Modelos de negocio V2X

Aunque las tecnologías heredadas vehículo-infraestructura V2I están actualmente operativas en todo el mundo para casos como el cobro electrónico de peajes, otras aplicaciones V2I simples, sistemas avanzados V2X capaces de soportar V2V y V2I y otras formas de comunicaciones están empezando a ganar aceptación comercial con dos tecnologías competidoras, compitiendo por la atención de los fabricantes de vehículos y las entidades reguladoras.

A pesar del debate entre 802.11p/DSRC y C-V2X, la incertidumbre regulatoria y otros desafíos, el gasto global en tecnología de comunicaciones V2X se espera que crezca un 170% entre 2019 y 2022. Según algunas investigaciones se prevé que para finales de 2022 el ecosistema V2X represente un mercado con un valor de 1.2 billones de dólares, con una base de cerca de 6 millones de vehículos equipados con V2X en todo el mundo.

Ante el aumento de costes necesario para inversión en tecnología que requiere el ecosistema V2X y las exigencias de regulación el sector se ha volcado en desarrollar modelos de negocio nuevos y aprovechar las oportunidades de las formas alternativas de propiedad y movilidad [11].

“El auge de los coches autónomos, compartidos y eléctricos va a transformar la industria. Entre tanto, el desafío pasa por sobrevivir.” Fuente: ideas.pwc.es [28]

“El impacto del transporte compartido y del desarrollo tecnológico habrá cambiado el mercado de la automoción drásticamente para 2030.” Fuente: ideas.pwc.es [28]

Los nichos de mercado tradicionales no son suficientes para la inversión tecnológica necesaria por lo que aparecen nuevos modelos para tener éxito en el futuro del sector [11]:

- El parque automotor en Europa alcanzará su máximo en 2025 y posteriormente empezará a disminuir debido al fortalecimiento del vehículo compartido e integrado.
- El coste de los componentes necesarios en los automóviles va en aumento debido a las necesidades regulatorias y de innovación que requieren y podrían aumentar los costes de los materiales entre un 20% y un 40% en 2030. Este punto favorece la aparición de empresas tecnológicas dedicadas a la fabricación de componentes telemáticos para los vehículos.
- Nuevos modelos de movilidad están emergiendo en el mercado. Los modelos de propiedad alternativos, como por ejemplo el compartido, presentan una oportunidad de ingresos para los fabricantes. Los usuarios estarían dispuestos a compartir su vehículo a través de una plataforma de intercambio de dinero, o a pagar una cuota mensual para disfrutar de trayectos ilimitados.
- Aparición de fabricantes de equipos (OEM - *Original Equipment Manufacturer*) no tradicionales con nuevos modelos de negocio, OEMs de automoción y proveedores de soluciones y tecnología V2X. Pueden aumentar hasta un 25% de cara a 2030.
- Mercado de servicios conectados debido al aumento en las funcionalidades del vehículo conectado y el paso al 5G, que permitirá desarrollar nuevas

funcionalidades en los vehículos y favorecerá la conectividad al *cloud* del vehículo y todos sus servicios.

- Aparición de modelos comerciales para monetizar las aplicaciones V2X.
- Subasta del espectro para V2X a nivel mundial, regional y dominios reguladores nacionales. Normalización, iniciativas regulatorias y colaborativas.
- Tecnologías complementarias que incluyen ADAS (*Advanced Driver Assistance Systems*), posicionamiento de precisión, *Edge Computing*, segmentación de redes, IA, aprendizaje automático, *Big Data* y análisis avanzado.

3. Tecnologías V2X

La forma en que los vehículos conectados se comunican se ha convertido de manera repentina e inesperadamente en un problema político en Europa. Se ha desatado una discusión entre los fabricantes de automóviles y los proveedores de tecnología celular sobre que tecnología usar para la conectividad de vehículo a vehículo y de vehículo a red.



Figura. 7 Tecnologías C-V2X y DSRC. Fuente: Autotalks [15]

El sector de la automoción globalmente durante los primeros años ha tenido un único sistema V2X viable para trabajar, el de las comunicaciones dedicadas de corto alcance, DSRC basado en el estándar 802.11p del IEEE.

En el último tiempo se ha presentado una alternativa potencial a DSRC basada en la utilización de redes móviles para la conectividad vehicular. El 3GPP, organización que define los estándares globales de red inalámbrica, creó el *Cellular V2X (C-V2X)*, inicialmente basado en redes 4G-LTE, pero con previsión de agregar soporte para las futuras redes 5G-NR [16].

3.1. Cellular-V2X (C-V2X)

3.1.1. Introducción

Cellular-Vehicle-to-Everything (C-V2X) es un concepto de tecnología que implica el desarrollo de estándares celulares para una amplia gama de casos y aplicaciones de conectividad entre vehículos. La tecnología C-V2X revolucionará el ecosistema de movilidad y la forma en que los conductores interactúan con el mundo. El hecho de disponer de flujos de información en tiempo real, altamente confiables que permitan aplicaciones de seguridad, movilidad y medio ambiente implicará una redefinición del concepto de transporte.

El mercado de conectividad y seguridad del vehículo es complejo, el estándar C-V2X compite y en ocasiones complementa a otras tecnologías, incluyendo la radio dedicada de corto alcance, DSRC.

C-V2X se estandarizó en junio de 2017 con la *Release 14* del 3GPP como el nuevo protocolo que permite la comunicación entre vehículos conectados, otros usuarios, como peatones o ciclistas y con elementos de la infraestructura.

En comparación con las tecnologías de conectividad anteriores, el estándar C-V2X se posiciona como una tecnología disruptiva para transformar la industria automotriz y el transporte con algunas ventajas destacables [17]:

- Basado en redes LTE ya establecidas ofreciendo así gran seguridad y una amplia cobertura.
- Permite comunicaciones fiables, en tiempo real y de baja latencia entre diferentes usuarios de la red. Con la evolución del estándar de C-V2X y la llegada de las redes 5G, en la *Release* 15 se introdujo soporte 5G para comunicaciones V2N y se espera que la *Release* 16 contemple comunicaciones directas sobre 5G NR para V2V y V2I, con mejoras en cuanto a velocidad, latencia y calidad de las transmisiones de datos.

La mejora en la conectividad que aporta el estándar C-V2X implica que los vehículos podrán conectarse a los sistemas cooperativos de transporte (C-ITS), gobernando los flujos de tráfico y reduciendo la congestión, además de aportar inteligencia a las ciudades en términos de explotación de la infraestructura y administración de los sistemas de transporte [17].

Mediante la conectividad C-V2X las tecnologías y redes móviles son el motor de muchos avances tecnológicos y son el cimiento de los cuatro principales casos de uso de C-V2X [24]:

- **Vehicle-to-Network (V2N):** conexión entre los vehículos y la red móvil para las categorías de servicios como el *streaming* de medios, conectividad para la gestión dinámica de rutas, etc.
- **Vehicle-to-Vehicle (V2V):** conexión directa entre vehículos, tanto con visibilidad directa como sin ella, aumentando así el corto alcance de los sensores.
- **Vehicle-to-infrastructure (V2I):** conexión directa del vehículo con la infraestructura disponible en las carreteras, como semáforos o señales, los que también pueden estar conectados a la red móvil.
- **Vehicle-to-pedestrian (V2P):** conexión directa entre vehículos y peatones que disponen de un terminal móvil con disponibilidad de emisión de alertas sobre peligros próximos.

Estos tipos de comunicación pueden usar la “conciencia cooperativa” para proporcionar servicios más inteligentes para los usuarios finales. Esto implica que las entidades de transporte, como vehículos, infraestructura o peatones puedan recopilar la información recibida de otros vehículos o sensores y procesarla y compartirla para conocer el entorno local.

3.1.2. Modos de comunicación C-V2X

La tecnología C-V2X define dos modos de transmisión complementarios:

- **Comunicaciones directas (Sidelink)** (V2V, V2I y V2P) a través de la interfaz PC5 operando en las bandas ITS (5.9 GHz) con independencia de la red móvil.
- **Comunicaciones de red (Uplink/Downlink)** (V2N) a través de la interfaz Uu en modo tradicional en el espectro licenciado de la banda móvil.

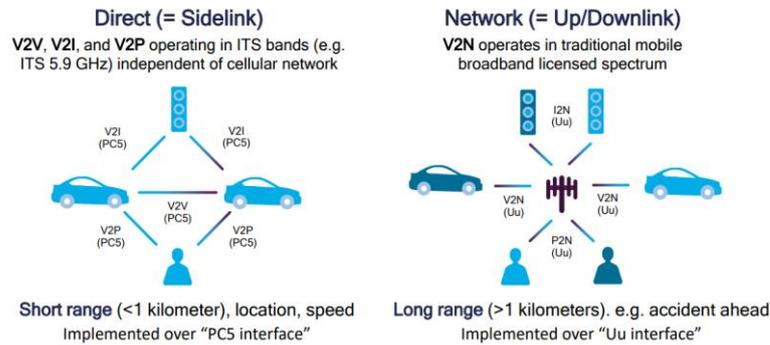


Figura. 8 Modos de comunicación C-V2X según 3GPP. Fuente: 3GPP [23]

Modos de comunicación	V2V, V2P, V2I	V2N
Interfaz radio	PC5	LTE-Uu
Espectro	5.9 GHz	3.5 GHz
Trafico	Multicas/Broadcast	Unicast/Multicast (eMBMS)
Tipo de tráfico	IPv6, non-IP	IPv6
Modo de acceso	Modos programados y autónomos agregados	Modo heredado

Tabla. 2 Características principales modos de comunicación V2X. Fuente: Future Internet [20]

3.1.2.1. Modo de comunicación directa – Interfaz PC5

LTE PC5 es una interfaz para comunicaciones directas entre dispositivos de corto alcance definida por el 3GPP y tiene especificados dos modos: modo de cobertura y modo sin cobertura (Figura. 9).

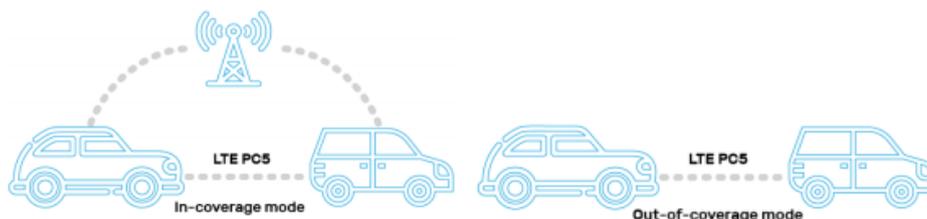


Figura. 9 LTE PC5 modo de cobertura y no cobertura. Fuente: 5GAA [19]

V2V, V2I, y V2P operan en las bandas ITS (ITS 5.9 GHz) independientemente de la red móvil. Las comunicaciones directas no requieren de SIM telefónica, sin embargo, las tecnologías V2X requieren GNSS para el posicionamiento y para la sincronización en tiempo.

Este modo de comunicación está basado en LTE *Direct*, una nueva interfaz aérea para el descubrimiento y las comunicaciones de dispositivo a dispositivo (D2D) que fue introducido en la *Release 12* del 3GPP y permite que los servicios D2D gestionados por el operador aprovechen la infraestructura y el espectro LTE. La plataforma LTE *Direct*, comúnmente conocida como ProSe, se ha expandido a partir de la *Release 13*, mejorando las capacidades de descubrimiento y comunicación D2D, incluyendo la comunicación con múltiples saltos para ampliar el alcance de la red [22].



Figura. 10 Evolución del modo de comunicación directa PC5. Fuente: Qualcomm [22]

3.1.2.2. Modo de comunicación a red – Interfaz Uu

LTE Uu y **NR Uu** son interfaces para comunicaciones celulares entre dispositivos y estaciones base definida por el 3GPP. LTE Uu y NR Uu soportan comunicaciones *unicast* en el enlace de subida, entre dispositivo y estación base y *unicast* o *multicast* en el enlace de bajada, entre estación base y dispositivo.

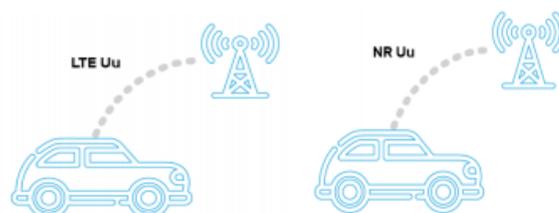


Figura. 11 Interfaz LTE-Uu y NR-Uu. Fuente: 5GAA [19]

En las comunicaciones a red a través de la interfaz Uu C-V2X emplea la red móvil convencional para permitir que un vehículo reciba información sobre las condiciones de la carretera y tráfico en la zona de largo alcance, con distancias mayores a 1 km. En este modo, C-V2X opera en el espectro licenciado a operadores móviles para proporcionar conectividad a sus clientes. La interfaz LTE-Uu también puede ser útil para interconectar un vehículo con un servidor en la nube.

Este modo también se puede usar para proporcionar asistencia de red para funciones relacionadas con la seguridad, así como servicios comerciales, que requieren la participación de un operador móvil, proporcionando acceso a datos o información basados en la nube. Este modo además permite que C-V2X aproveche la seguridad de los datos y la privacidad de las redes móviles. Los servicios de tiempo crítico pueden ser compatibles con la computación de borde (MEC – *Mobile Edge Computing*) que

consiste en la implementación de servidores informáticos y análisis de datos en el borde de la red.

El modo de comunicación a red permite los siguientes dos tipos de comunicaciones:

Comunicaciones *unicast*: permiten el intercambio de datos entre un UE (*User Equipment*) y el *eNodeB* en ambas direcciones del enlace (*uplink* y *downlink*). Los UE solicitan a los *eNodeB* recursos radio mediante programación dinámica y están en modo conectado para evitar el retraso del acceso inicial debido al acceso aleatorio. En su periodo de solicitud de planificación (SR – *Schedule Request*) envía el mensaje al *eNodeB* quien a partir de la solicitud programará los recursos asignados para que el UE transmita el paquete [20].

Comunicaciones *multicast*: los mensajes V2X se pueden difundir de manera eficiente a múltiples UE por el enlace DL a través del servicio *multicast* de difusión multimedia (eMBMS) desarrollado por 3GPP [9]. El V2X AS (*Application Server*) es responsable de la recepción de datos de unidifusión UL de los UE y de la identificación del área de recepción objetivo (una o varias celdas) que debe cubrir la transmisión eMBMS [20].

3.1.3. Modos de programación

Para las comunicaciones LTE-D2D existen dos modos de programación, Modo 1 y Modo 2. El Modo 1 utiliza la asignación de recursos programada, es decir, estos son seleccionados y asignados por la red. Sin embargo, en el Modo 2, el vehículo selecciona los recursos por sí mismo, sin necesidad de contar con conexión a la red.

Para poder cumplir con los estrictos requisitos de latencia y confiabilidad de V2X, en la *Release 14* se introdujeron dos nuevos modos diseñados específicamente para LTE-V2X, el Modo 3 y el Modo 4, los cuales son análogos al Modo 1 y Modo 2. La Tabla. 3 muestra los modos de programación utilizados en LTE-D2D y en LTE-V2X.

	Programado	Autónomo
LTE-D2D	Modo 1	Modo 2
LTE-V2X	Modo 3	Modo 4

Tabla. 3 Resumen modos de programación: Fuente: Elaboración propia

A continuación, se describen los cuatro modos de programación comentados anteriormente:

Modo 1 – *eNB-controlled* LTE-D2D PC5 [19]:

La provisión del servicio LTE-V2X la realiza el MNO quien también autoriza a los vehículos a utilizar la interfaz LTE PC5. El *eNB* realiza una programación de los recursos radio LTE PC5 en los vehículos y la configuración de los parámetros LTE PC5.

Modo 2 – *Standalone* LTE-D2D PC5 [19]:

La operación del servicio LTE PC5 V2X no depende de la provisión de parámetros del MNO, sino que los vehículos realizan una selección de recursos radio autónoma. Los parámetros de potencia máxima y pool de recursos están provistos por legislación, por

especificaciones, por firmware instalado o configuraciones de servidor. Este modo es un escenario similar al correspondiente escenario sobre IEEE 802.11p.

Modo 3:

En el modo de comunicación 3, el eNB transmite mensajes periódicos, los *System Information Blocks* (SIB) por el canal compartido de enlace descendente físico (PDSCH). Los SIB contienen información de los procedimientos para que el UE, que debe estar conectado a la red, pueda acceder a la celda. LTE dispone de varios tipos de SIB en función de su finalidad, pero en el caso de LTE-V2X el eNB emite SIB del tipo 21, con información de comunicación de enlace lateral V2X e información relacionada con la asignación de recursos. Posteriormente, el UE solicita la asignación de recursos de transmisión dedicados para la comunicación de enlace lateral V2X enviando un mensaje *SidelinkUEInformation* al eNB. El UE también puede informar a EUTRAN para liberar recursos de transmisión mediante el mensaje *SidelinkUEInformation*.

El eNB envía el mensaje con el indicador de control de enlace descendente (DCI) en formato 5A en el canal de control de enlace descendente físico (PDCCH). El DCI 5A contiene los campos del formato 1 del indicador de control de enlace lateral (SCI) utilizado para la programación del PSSCH, la frecuencia de ubicación de recursos de transmisión y retransmisión iniciales y el intervalo de tiempo entre la transmisión y retransmisión (Figura. 12) [21].

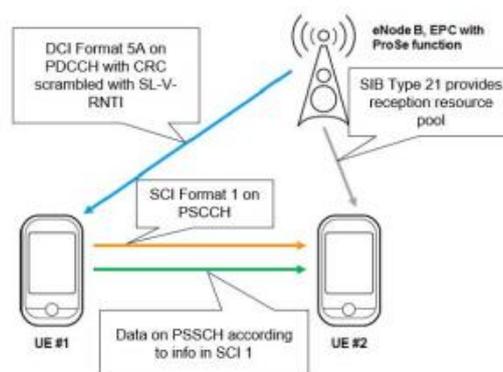


Figura. 12 Modo 3 asignación de recursos dedicados. Fuente: UPC [21]

Modo 4:

En el **modo 4** los UE seleccionan recursos de forma autónoma independientemente de su estado de conectividad, a diferencia del modo 3 que la conexión a la red era indispensable, es decir, los UE puede transmitir incluso cuando están en el estado de IDLE o fuera de cobertura. Para los escenarios en que el UE está en una zona de cobertura, el vehículo recibe de la red información de la configuración V2X mediante los parámetros configurables *Sidelink V2X*. Como parámetros configurables incluye la frecuencia de la portadora, el grupo de recursos, las referencias de sincronización, el esquema de sub-canalización, el número de sub-canales por subtrama y el número de RB por canal [22].

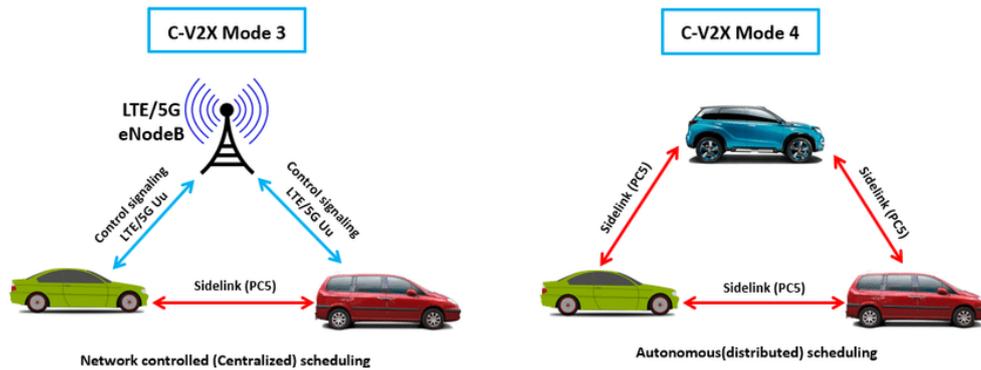


Figura. 13 LTE-V2X Modo 3 (izquierda) y Modo 4 (derecha). Fuente: ResearchGate [53]

La selección de recursos autónomos (Figura. 14) es un método para detectar canales con transmisión semipersistente. Es esencialmente que el dominio de frecuencia escucha antes de hablar y que los vehículos pueden predecir en el futuro qué recursos van a utilizar los UE contiguos y programar transmisiones basadas en eso.

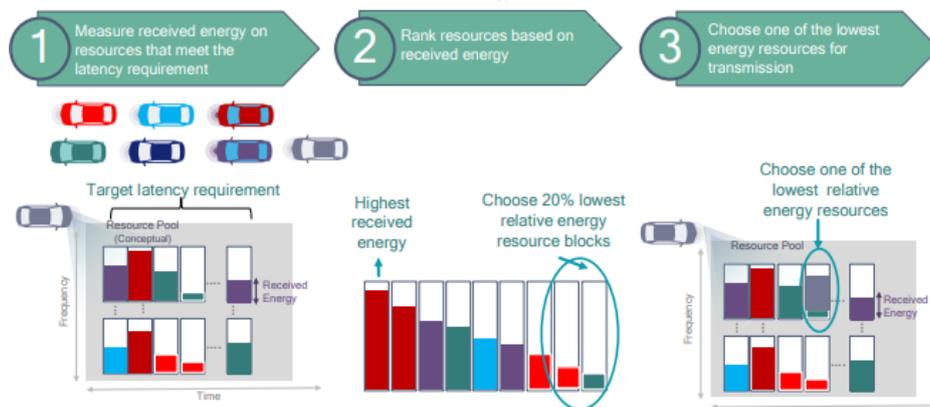


Figura. 14 Selección de recursos Modo 4. Fuente: Qualcomm [22]

La detección es un proceso de varios pasos que involucra una combinación de detección de energía, decodificación PSCCH e información prioritaria. Puede permitir que los recursos se asignen de manera semipersistente (SPS) o permitir que los mensajes controlados por eventos de disparo único se envíen a los mejores recursos. La selección de recursos mide la energía RSSI en los recursos disponibles, los ordena en orden descendente por niveles de energía y elige el 20% con recursos energéticos inferiores y escoge aleatoriamente recursos de estos para su transmisión.

En cambio, para los casos en los que el vehículo se encuentra en una zona sin cobertura, este utilizará parámetros preconfigurados.

En términos de seguridad, las consideraciones son las mismas que para DSRC, la privacidad está protegida, los identificadores de PC5 pueden cambiar junto con los identificadores de usuario. A nivel de portadora de PC5 no hay seguridad, confía en la seguridad de la capa superior. La certificación la almacena el UE o se realiza un aprovisionamiento desde fuera de banda [22].

3.1.4. Estandarización

La rápida comercialización de sistemas celulares y la evolución de la tecnología LTE, ha hecho útiles a los sistemas C-V2X para las comunicaciones vehiculares. El 3GPP ha estado desarrollando estándares para el vehículo a todo (V2X) basado en redes celulares, con el objetivo de ofrecer soluciones más efectivas para las comunicaciones vehiculares. En comparación con IEEE 802.11p, Celular V2X puede proporcionar un mejor soporte de QoS, mayor cobertura y velocidad de datos para vehículos en movimiento. Además, las comunicaciones subyacentes de dispositivo a dispositivo (D2D) en LTE se pueden aprovechar para aplicaciones C-V2X con alta confiabilidad y baja latencia.

La tecnología C-V2X cuenta con el respaldo de varios actores del ecosistema de la automoción y las telecomunicaciones, entre ellos el 5G *Automotive Association* (5GAA) de los que Audi, Ericsson y Qualcomm son cofundadores. EL 5GAA está compuesto por más de 85 miembros, contando tanto con fabricantes de automóviles, desarrolladores de software, operadores móviles, compañías de semiconductores, proveedores de equipos de prueba, proveedores de servicios de telecomunicaciones, de señales de tráfico y carreteras [24].

C-V2X se posiciona como una solución global de comunicaciones V2X, con mejoras en la seguridad automotriz, la conducción conectada y automatizada, la eficiencia de tráfico y es de momento la única tecnología V2X basada en las especificaciones del 3GPP (*Third Generation Partnership Project*), reconocidas a nivel mundial por su evolución continua, y diseñada para soportar compatibilidad con 5G y capaz de aprovechar protocolos de capa superior definidos por la industria automotriz, incluidos los del Instituto Europeo de Normas de Telecomunicaciones (ETSI) [25].

El Instituto Europeo de Normalización de las Telecomunicaciones (ETSI) aprobó un nuevo Estándar Europeo (EN) que define el uso de C-V2X como tecnología de capa de acceso para dispositivos con Sistemas de Transporte Inteligente (ITS). Adicionalmente, todos los estándares y especificaciones ETSI que definen otros protocolos ITS por encima de la capa de acceso se han visto actualizados para permitir el uso de C-V2X en la capa de acceso subyacente. Estos estándares han sido incluidos en el conjunto de las especificaciones ETSI ITS *Release 1* y suponen la base para el desarrollo e implementaciones de dispositivos C-V2X ITS interoperables de múltiples operadores [27][29].

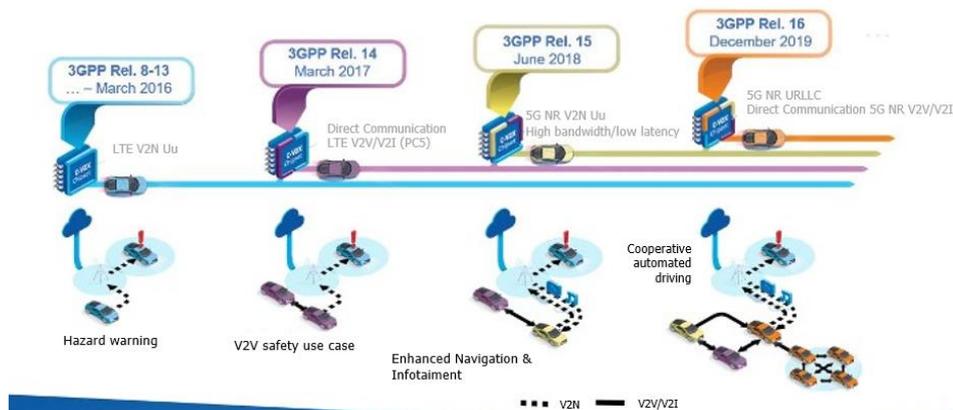


Figura. 15 C-V2X: Evolución Releases 3GPP. Fuente: 5GAA [30]

La tecnología móvil LTE está evolucionando rápidamente para satisfacer las necesidades de las comunicaciones V2X. La **Release 13** del 3GPP solo cumplía para casos de uso V2N poco estrictos, ya que no era capaz de cumplir con los requisitos de baja latencia y alta velocidad de las aplicaciones de seguridad V2X, además de que no soportaba comunicaciones en áreas con poca cobertura de red.

Sin embargo, la **Release 14** incluye soporte para casos de uso de C-V2X, permitiendo que la tecnología móvil LTE sea una opción adicional para la mayoría de las aplicaciones V2X. La *Release 14* contempla también la comunicación directa entre dispositivos, presenta mejoras en la latencia e incorpora la operación en áreas sin cobertura de red con altas velocidades relativas, mientras que las capacidades de transmisión de red pueden ayudar a cumplir con otros requisitos de V2X. Adicionalmente, las comunicaciones C-V2X tienen la capacidad de aprovechar la infraestructura celular existente, reduciendo así los costes de despliegue de infraestructura y acelerando el cumplimiento de los beneficios de seguridad y eficiencia de la comunicación V2X.

La **Release 15** se expande para cubrir 5G *Standalone* con un nuevo sistema radio con una red central de próxima generación e incluye mejoras en LTE concretamente en el EPC (*Evolved Packet Core*). Esta *release* cubre la fase dos de las comunicaciones V2X.

La **Release 16** será una versión importante ya que incorporará la presentación del IMT-2020 para un sistema completo inicial 3GPP 5G. Además, se prevé que incorpore servicios de capa de aplicación para comunicaciones V2X, el concepto de NR V2X para las comunicaciones V2X sobre la red 5G, acceso satelital 5G, soporte de red de área local en 5G, comunicaciones en dominios verticales y automatización de redes y nuevas técnicas radio [26].

3.1.5. Infraestructura

Teniendo en cuenta que los sistemas C-V2X utilizan la infraestructura de las redes móviles LTE, la Figura. 16 muestra la mejora general en la arquitectura de red en la *Release 16* para los servicios V2X. En ella aparecen dos nuevas entidades: el servidor de aplicaciones V2X y la función de control V2X para admitir los diferentes servicios. La función de control V2X es la función lógica que se utiliza para las acciones de red requeridas para V2X y los parámetros necesarios para las comunicaciones los proporciona el servidor de aplicaciones. También proporciona a los UE parámetros públicos específicos de la red terrestre. El servidor de aplicaciones es responsable de recibir datos del UL en modo *unicast*, proporcionando los parámetros para las comunicaciones V2X a través de un punto de referencia PC5 a la función de control V2X. Se han introducido nuevas interfaces en la arquitectura que están resumidos en la Tabla. 4 [24].

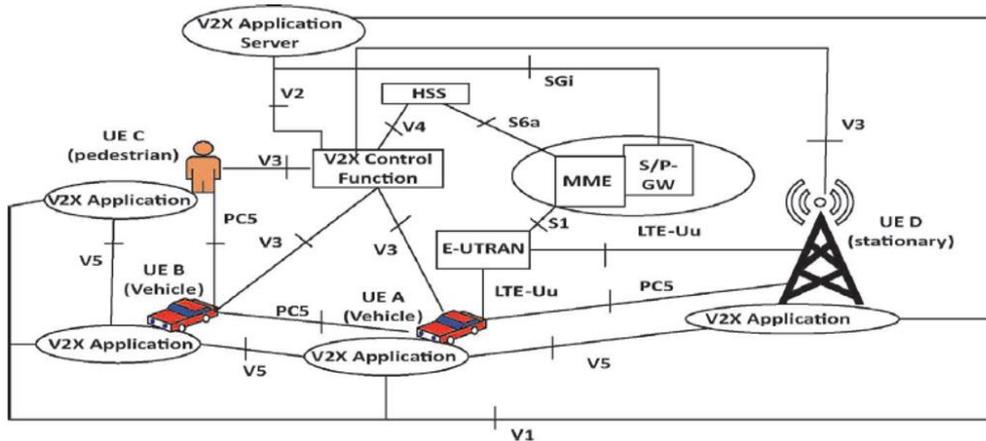


Figura. 16 Arquitectura mejorada para comunicaciones V2X. Fuente: 5GAA [24]

Interfaz	Funciones
V1	El servidor de aplicaciones V2X puede comunicarse hacia una aplicación V2X en el UE a través de la interfaz V1.
V2	El servidor de aplicaciones V2X puede comunicarse con la función de control V2X a través de la interfaz V2.
V3	La función de control V2X puede conectarse al UE a través de la interfaz V3.
V4	V4 La función de control V2X se conecta con la entidad <i>Home Subscriber Server</i> (HSS) en <i>Evolved Packet Core</i> (EPC) en la red 3GPP a través de la interfaz V4.
V5	Una aplicación V2X en UE puede comunicarse hacia una aplicación V2X en diferentes UE a través de la interfaz V5.
SGi	Un EPC puede conectarse al servidor de aplicaciones V2X a través de la interfaz SGi.

Tabla. 4 Interfaces V2X. Fuente: 5GAA [24]

3.1.6. Expansión geográfica

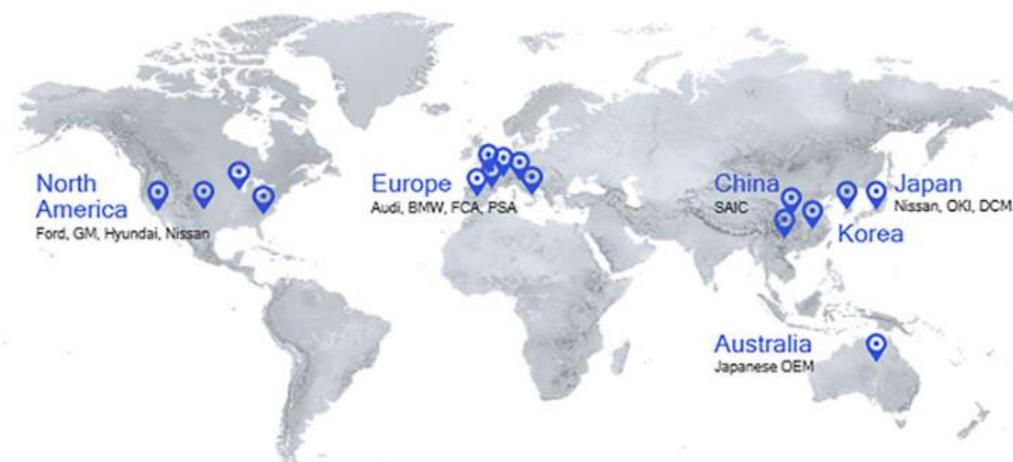


Figura. 17 Presencia global de C-V2X con demostraciones y pruebas. Fuente: Qualcomm [31]

Gracias al trabajo de diferentes compañías tecnológicas globales y fabricantes de automóviles para demostrar los beneficios de la comunicación directa C-V2X y la madurez tecnológica de C-V2X, hemos visto como esta tecnología ha ido ganando impulso en Estados Unidos, Europa, China, Japón, Corea, Australia y otros mercados.

Las empresas de automoción están siguiendo de cerca los beneficios de seguridad que aporta C-V2X con el objetivo de mejorar sustancialmente la seguridad vial.

Los grandes esfuerzos de colaboración han resultado en un impulso creciente en la implementación de vehículos e infraestructura C-V2X para la comunicación directa en China, así como algunas implementaciones iniciales en EE. UU, además de la suposición de apoyo formal por parte de la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC) para asignar espectro ITS de 5.9 GHz para C-V2X. Adicionalmente en Europa se están realizando desarrollos C-V2X incluyendo el nuevo estándar europeo (EN) que define C-V2X como la tecnología de la capa de acceso para los Sistemas de Transporte Inteligente Cooperativo (C-ITS) aprobado por la ETSI.

Los operadores de carreteras de los países nombrados anteriormente han empezado a desplegar unidades de carretera C-V2X (RSU – *Road Side Units*) y están alineando sus esfuerzos con el estándar básico de servicios de seguridad IEEE 1609.2 para los vehículos conectados [31][32][33].

Estados Unidos

El departamento de Transporte de EE. UU (USDOT) junto con la Administración Nacional de Seguridad de Tráfico en Carreteras (NHTSA) han mostrado una posición de neutralidad tecnológica y la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC) ha propuesto el espectro de 20 MHz para C-V2X en su reciente propuesta de reglamentación, despejando así el camino regulatorio para C-V2X [37].

- La Comisión Regional de Transporte del sur de **Nevada** (RTC) y la ciudad de las Vegas de la mano de **Qualcomm Technologies** implementarán la tecnología C-V2X en las Vegas. Con la colaboración de **Commsignia** se desplegarán RSUs habilitadas para C-V2X a lo largo de las carreteras del programa de prueba para demostrar los beneficios de la tecnología y el despliegue comercial avanzado de la tecnología. Además, esta acción también servirá para apoyar el objetivo de que el sur de Nevada sirva como centro de crecimiento de nuevas tecnologías para el transporte inteligente. Los vehículos estarán equipados con unidades de a bordo (OBU) con capacidades C-V2X para demostrar casos de uso de V2I [37].
- El Departamento de Transporte de **Virginia** junto con **Qualcomm** y **Audi** están planteando implementaciones de C-V2X en las carreteras de Virginia, aunque no se trataría de una implementación comercial ya que no está permitida por las normas actuales de la Comisión Federal de Comunicación (FCC). El planteamiento consiste en utilizar la misma banda de 5.9 GHz que la FCC ha propuesto asignar a C-V2X para demostrar cómo se puede usar esta tecnología para mejorar la seguridad vial. El despliegue inicial tendría lugar en las carreteras seleccionadas de Virginia a partir del tercer trimestre de 2020 [35][36].
- En la ciudad de **Colorado** se ha realizado el primer despliegue en Estados Unidos de la tecnología C-V2X de la mano de Qualcomm, Ford y Panasonic. Los asociados pretenden evaluar las capacidades de C-V2X en las carreteras seleccionadas a lo largo de la sede de CityNOW de Panasonic en Denver, que vendrá seguido del despliegue en áreas seleccionadas a lo largo del corredor I-70. (Figura. 18) [40].

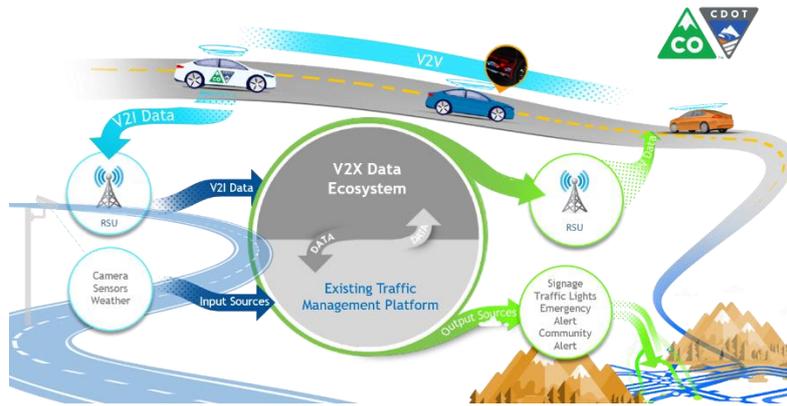


Figura. 18 Vehículos conectados CDOT. Fuente: www.codot.gov [38]

Para el proyecto en Colorado, Panasonic ha colaborado con Kapsch como proveedor de las unidades en carretera (RSU), con Ficosa como proveedor de unidades a bordo C-V2X (OBU) y con Ford como proveedor de una flota de vehículos utilitarios de la autoridad de tránsito, que estarán equipados con dispositivos C-V2X. Panasonic proporcionará una plataforma para recopilar y difundir datos C-V2X de modo que los operadores de carreteras tengan una mejor consciencia de la situación y la capacidad de enviar información crítica de seguridad directamente a los vehículos [38][39][40].

China

Cellular V2X es la tecnología escogida para los sistemas de transporte inteligente (ITS) y para los vehículos conectados (ICV) de **China**. Debido a los grandes problemas de movilidad que presenta China en sus ciudades centrales, en términos de congestión y accidentes, el gobierno quiere implementar C-V2X lo antes posible para resolver los desafíos de transporte y mejorar la seguridad vial y la eficiencia del tráfico [16].

Tras realizarse con éxito las primeras pruebas de campo con C-V2X entre Qualcomm Technologies y Datang, se pudo demostrar la interoperabilidad de la comunicación directa C-V2X. China consideró efectiva esta tecnología con la orientación del gobierno y la asignación de espectro y se han propuesto implementar LTE-V2X entre 2020 y 2021. Además, la **Comisión Nacional de Desarrollo y Reforma de China (NDRC)** identificó como una tasa objetivo del 90% de cobertura de red C-V2X para 2020 [16].

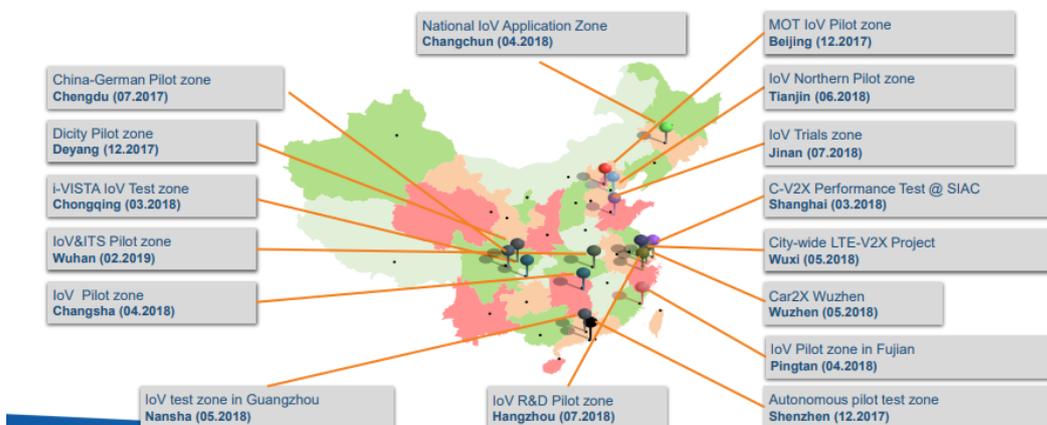


Figura. 19 Pruebas C-V2X por áreas en China. Fuente: 5GAA [34]

En el despliegue generalizado de infraestructura vial C-V2X China (Figura. 19) cuenta con el soporte de Qualcomm Technologies quienes están colaborando con los operadores de redes móviles, entre ellos China Mobile, quién anunció el desarrollo de una RSU para la comunicación directa LTE-V2X PC5 con la solución de *chipset* 9150 C-V2X de Qualcomm. El Ministerio de Industria y Tecnología de la Información, el Ministerio de Seguridad Pública de China y el Gobierno Provincial de Jiangsu apoyaron un proyecto piloto en Wuxi (Figura. 19) celebrado en septiembre de 2019. En la demostración participó el Grupo PSA quien mostró vehículos Peugeot y Citroën equipados con la última tecnología LTE-V2X. Además, *Qianxun SI* y *Quectel* participan para ofrecer soluciones de posicionamiento de alta precisión para maximizar los beneficios de V2X [32][33].

Europa

El impulso de la tecnología C-V2X también está ocurriendo en Europa, donde se están realizando pruebas de interoperabilidad de comunicación C-V2X entre múltiples fabricantes de automóviles.

- El Ministerio Federal de Transporte e Infraestructura Digital (BMVI) de **Alemania** ha financiado la primera demostración de interoperabilidad de comunicación directa C-V2X entre motocicletas, vehículos e infraestructura en Europa con el consorcio *Connected Vehicle to Everything of Tomorrow* (ConVeX) [33].
- El **UTAC CERAM** en **París** organizó una demostración de comunicación directa con vehículos BMW, grupo PSA y Ford, con motocicletas eléctricas BMW y con unidades de carretera (RSU) de Savari equipados con tecnología C-V2X. Francia también está trabajando con la compañía ferroviaria nacional francesa SNCF para apoyar aplicaciones de seguridad para el transporte ferroviario, en situaciones como cruces entre tren y ferrocarril y entre automóvil y ferrocarril [33].
- En octubre de 2018 se realizaron en **Segovia** (Figura. 20) pruebas de intercambio de información entre la infraestructura y un vehículo en un entorno de circulación real gracias al proyecto Ciudades Tecnológicas 5G de Telefónica. Estas pruebas se realizaron con la colaboración de Telefónica, Seat, Ficosa, Sice y Nokia. Se realizaron dos escenarios de pruebas basados en C-V2X, el primero consistía en que un semáforo comunica al vehículo la existencia de un peatón en su punto ciego y el segundo el semáforo comunica al vehículo su cambio de estado a rojo. Gracias a estas pruebas fue posible demostrar el potencial que tiene combinar el protocolo C-V2X con información proporcionada por los sensores [41][42].



Figura. 20 Pruebas comunicación C-V2X Segovia. Fuente: Xataka [42]

- Durante el *Mobile World Congress* (MWC) 2019 en Barcelona, dentro del **proyecto piloto 5G Connected Car de 5G Barcelona**, se mostraron tres casos de uso de coche conectado con 5G junto con la tecnología C-V2X de la mano del consorcio formado por Ficosa, Telefónica, Seat, *Mobile World Capital*, ETRA e i2Cat. Los tres casos de uso que se citan a continuación se realizaron en los alrededores de la Fira de Barcelona [39]:
 - **Detección de un peatón** en un paso de cebra mediante una cámara térmica instalada en el semáforo. La información enviada por el semáforo aparece en forma de alerta en el cuadro de mandos del vehículo.
 - **Detección de un ciclista** con una bicicleta dotada de conectividad y con una tecnología de localización de alta precisión. La bicicleta es capaz de comunicarse con su alrededor e indicar su ubicación para evitar así colisiones (Figura. 22).



Figura. 21 Detección de un ciclista con comunicación C-V2X MWC 2019. Fuente: Ficosa [39]

- **Detección de un coche detenido** en una zona de baja visibilidad. El vehículo parado activa las luces de emergencia y emite un aviso al resto de vehículos de su ubicación.
- En febrero de 2020 la organización de certificación, inspección y ensayos Dekra junto con Telefónica y con la participación de Seat han impulsado la creación del **laboratorio de I+D más avanzado del sur de Europa** para el desarrollo de la conducción conectada en el **Parque Tecnológico de Andalucía de Málaga** con infraestructura para probar soluciones 5G y tecnologías vehiculares V2X. El

centro estará a disposición de las entidades como un entorno de prueba completo y fiable para validar dispositivos, aplicaciones y servicios para el desarrollo de la conducción conectada.

En la zona exterior habilitada para fabricantes de componentes, dispositivos, infraestructuras o fabricantes de vehículos, ya han accedido los participantes del primer **PlugTest™ C-V2X** organizado por la ETSI, con la colaboración del 5GAA con un total de 17 proveedores de soluciones y dispositivos C-V2X, miembros de la ETSI y del 5GAA para verificar la interoperabilidad de las diferentes soluciones. En el **PlugTest™** se realizaron más de 300 pruebas con más de 38 casos de prueba con una tasa de éxito del 95% [43].

Japón

En diciembre de 2018 se realizaron en el **JARI Shirosato Test Center de Japón** pruebas conjuntas de C-V2X entre los fabricantes Ericsson, Nissan, NTT DOCOMO, OKI, Qualcomm Technologies y Continental. Se llevaron a cabo con éxito pruebas de C-V2X utilizando 5.8 GHz como frecuencia experimental para las comunicaciones directas. Las pruebas contaban con una combinación de comunicaciones directas (PC5) y basadas en red (uU) entre vehículos, infraestructura y peatones o ciclistas de la carretera y fueron capaces de mostrar las fortalezas de la tecnología C-V2X en términos de latencia y confiabilidad. Los ensayos de campo se centraron en el envío de mensajes a través de la interfaz PC5 de C-V2X en diferentes condiciones, con velocidades hasta los 110 km/h y con elementos como camiones o edificios bloqueando las comunicaciones. Se observaron latencias medias de 20 milisegundos para las comunicaciones directas y con una tasa de error muy baja, en distancias de hasta 1.2 km con condiciones de visión sin obstáculos. Para comunicaciones V2N de área amplia se observaron latencias extremo a extremo de 50 milisegundos con la red comercial[44].

Australia

En **Australia** empezaron a realizar las primeras pruebas de vehículos conectados con C-V2X a mediados de 2019 en las carreteras de Victoria como parte del programa de **Towards Zero** del gobierno estatal. El proyecto Victoria es una asociación liderada por Telstra, la compañía más potente de telecomunicaciones del país y Lexus Australia como fabricante de vehículos, administrada por la agencia de carreteras *VicRoads* y financiado por la Comisión de Accidentes de Transporte (TAC).



Figura. 22 Caso de uso frenada de emergencia con C-V2X en Australia. Fuente: [45]

Los ensayos se realizaron tanto con comunicaciones directas como a través de las redes móviles 4G optimizadas para conectividad entre vehículos y con centros de gestión de tráfico a través de servidores en la nube. Para las pruebas se utilizaron dos vehículos Lexus (Figura. 22) dotados con tecnología C-V2X en condiciones controladas, probando los sistemas de seguridad del vehículo conectado y casos de uso como alertas por frenado de emergencia, avisos de incumplimiento de los límites de velocidad o asistencia de giro a derecha o izquierda para usuarios vulnerables en la carretera [45].

3.1.7. Aplicaciones

La tecnología C-V2X permite nuevas aplicaciones que mejoran la conciencia cooperativa, la seguridad vial, eficiencia de tráfico y la experiencia del usuario.

El objetivo de las **aplicaciones de seguridad** es reducir la siniestralidad en las carreteras gracias a la información de las comunicaciones entre vehículos. Las aplicaciones de seguridad se explican en detalle en el capítulo 4.2 y las más comunes son:

- Alertas por frenadas de emergencia, recomendaciones de velocidad o señalización de intersecciones peligrosas

Las **aplicaciones de eficiencia de tráfico** tienen como objetivo el ahorro de recursos en la conducción, la reducción de emisiones contaminantes y la reducción del desgaste de los vehículos. Las más comunes son:

- **Platooning:** permite circular a un grupo de camiones de forma conjunta gracias a la compartición en tiempo real de los datos de los sensores.
- Control dinámico de semáforos

También existen otros tipos de aplicaciones como por ejemplo las relacionadas con la actualización de software remota, conocida como *Over-the-Air* (OTA) o *Firmware-Over-the-Air* (FOTA) [76].

3.2. *Dedicated Short Range Communication (DSRC)*

3.2.1. Introducción

Dedicated Short Range Communication (DSRC) es una tecnología de comunicación inalámbrica que permite comunicación directa entre vehículos e infraestructura de alta velocidad y seguridad sin involucrar la infraestructura celular, basada en el estándar 802.11p. IEEE 802.11p es una revisión del estándar IEEE 802.11 que incluye mejoras para admitir aplicaciones de seguridad de transporte inteligente (ITS).

Este protocolo de comunicación no se basa en puntos de acceso, sino que se basa en la comunicación directa entre estaciones formando una red vehicular ad hoc (VANET). Aunque no hay ningún punto de acceso en 802.11p, puede haber estaciones de infraestructura fija que ofrecen servicios a estaciones móviles.

DSRC trabaja en la banda de operación de 5.9 GHz y proporciona un intercambio de información de baja latencia entre vehículos e infraestructura. La Comisión Federal de

Comunicaciones (FCC) en EE. UU dedicó en 1999 un ancho de banda de 75 MHz en la banda 5.9 GHz para la tecnología DSRC. En diciembre de 2003, la FCC incluyó los Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS) en la banda de 5.850-5.925 GHz (5.9GHz) donde también se pueden encontrar una asignación co-primaria de radiolocalización del gobierno, una de satélite fijo tierra-espacio y el servicio de radioaficionados, pero con una asignación secundaria. La banda DSRC es un espectro licenciado pero la FCC no cobra ninguna tarifa por el uso del espectro.

El espectro de 5.9 GHz en EE. UU consta de siete canales de 10 MHz de ancho y una banda de seguridad de 5 MHz que son utilizados en su totalidad por DSRC. El canal 172 está destinado para las comunicaciones directas entre vehículos y el canal 184 para comunicaciones de alta potencia y larga distancia. El canal 178 se utiliza como canal de control y los cuatro restantes son canales de servicio para aplicaciones relacionadas de vehículo a todo (V2X) [53][54].

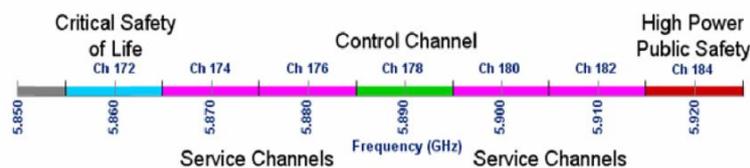


Figura. 23 Espectro DSRC EE. UU: bandas y canales. Fuente: *ResearchGate* [53]

Fuera de Estados Unidos la tecnología DSRC también es utilizada para aplicaciones de seguridad. En Europa la asignación de espectro no ha sido tan trivial ya que hay múltiples entidades involucradas, el Instituto Europeo de Normas de Telecomunicaciones (ETSI) asignó en 2008 una banda de 30 MHz y 20MHz adicionales de seguridad en la banda 5.9GHz única para toda la Unión Europea para las comunicaciones entre vehículos e infraestructura, divididos en 5 canales de 10MHz entre 5.875 y 5.925 GHz. Las autoridades nacionales de Europa pueden asignar esta banda a las aplicaciones de seguridad vial sin restringir otros servicios ya existentes (servicios de radioaficionados).

El objetivo es garantizar la compatibilidad con los EE. UU, aunque la asignación no sea exactamente la misma, las frecuencias tienen una separación entre ellas que permite el uso de las mismas antenas de radio para transmitir y recibir.

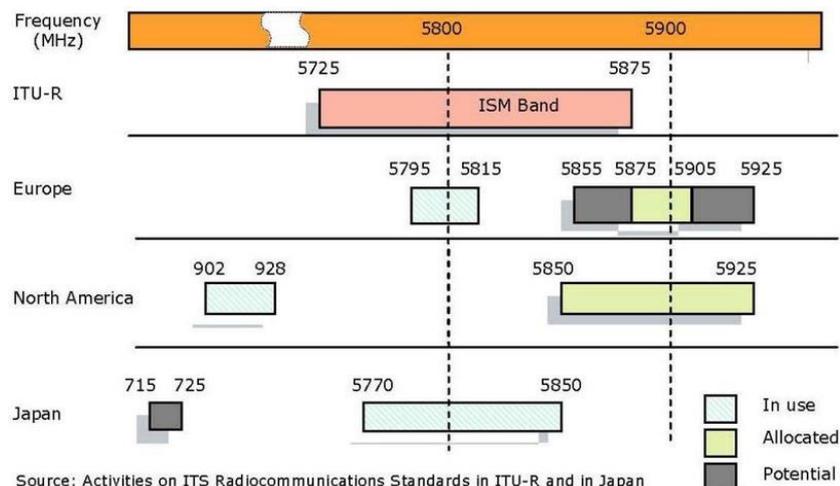


Figura. 24 Asignación mundial de espectro DSRC. Fuente: *ITU-R* [75]

DSRC proporciona un canal de comunicación altamente seguro, ya que el vehículo receptor valida la autenticidad de los mensajes recibidos y los mensajes no se pueden vincular al vehículo, protegiendo la privacidad del conductor. Cada vehículo transmite su ubicación, rumbo y velocidad diez veces por segundo, de manera segura y anónima y los vehículos que están dentro del rango de comunicación reciben el mensaje. Esto permite una percepción, detección y evaluación de situaciones peligrosas incluso antes de que puedan notarse visualmente. Además, DSRC puede garantizar un estándar de seguridad interoperable entre vehículos, para ayudar a evitar accidentes, optimizar el flujo de tráfico y a reducir la congestión [13].

Las comunicaciones dedicadas de corto alcance tienen dos modos de funcionamiento [13][12]:

- **Vehículo a vehículo (V2V):** los vehículos se comunican directamente entre sí a través de las unidades a bordo (OBU) generalmente por razones de seguridad.
- **Vehículo a infraestructura (V2I):** los vehículos se comunican a través de las OBUs con la infraestructura vial, como semáforos y señales de tráfico, equipada con unidades de carretera (RSU). Estas comunicaciones pueden utilizarse tanto por razones de seguridad como de pago por uso.

Los puntos fuertes de DSRC son los siguientes [56]:

- **Baja latencia:** el establecimiento de la conexión presenta latencias del orden de los 20 milisegundos.
- **Interferencia limitada:** la tecnología DSRC es muy robusta frente a las interferencias del canal radio, ya que presenta corto alcance, del orden de 1km, lo que limita la posibilidad de interferencias de fuentes lejanas.
- **Rendimiento:** presenta un alto rendimiento bajo condiciones climáticas adversas y puede trabajar en condiciones de velocidades altas.
- **Banda licenciada:** DSRC asegura la seguridad y confiabilidad en las comunicaciones al utilizar una banda licenciada.
- **Interoperabilidad:** DSRC garantiza la interoperabilidad para V2V y V2I, favoreciendo así el despliegue de aplicaciones de seguridad bajo estándares aceptados.
- **Seguridad y privacidad:** DSRC proporciona autenticación segura y privacidad de los mensajes.

3.2.2. Wireless Access Vehicular Environment – WAVE

Con el objetivo de definir un sistema de comunicación inalámbrica capacitado para proporcionar servicios a vehículos y a otras entidades de transporte, el Departamento de Transporte (DOT) de los Estados Unidos desarrolló el protocolo **WAVE** para soportar comunicaciones tanto entre vehículos como con la infraestructura. Además, se tienen que satisfacer los exigentes requisitos de las comunicaciones vehiculares en términos de tiempos bajos de conexión, cambios constantes en la topología, ultra baja latencia y seguridad [14].

El protocolo WAVE proporciona un canal de control común para la señalización donde se utilizan unos mensajes especializados, los **WSM (Wave Short Message)** para servicios de alta prioridad y mensajes de control del sistema y varios canales de servicio para soportar mensajes WSM y tráfico IPv6 de menor prioridad.

Los diferentes estándares de la arquitectura WAVE representados en la Figura. 25, estarán involucrados en la transmisión de mensajes y en los servicios ofrecidos [57].

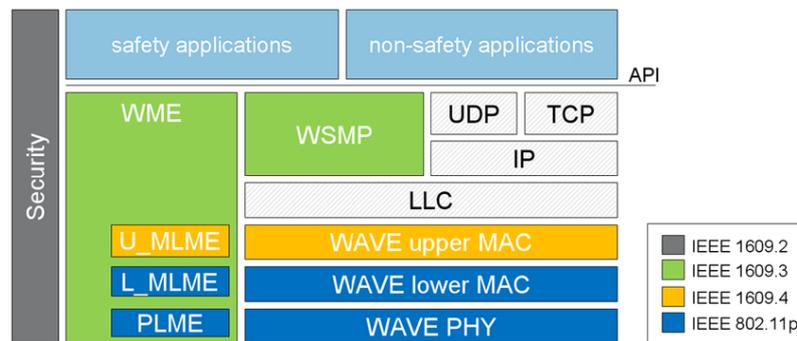


Figura. 25 Estándares DSRC y pila de comunicación. Fuente: ResearchGate [57]

3.2.2.1. Capa física (WAVE PHY)

El estándar IEEE 802.11p define las características de las capas física (PHY) y MAC para poder operar en un entorno con comunicaciones vehiculares. La capa física (WAVE PHY) utiliza OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) como técnica de transmisión. Las características del canal físico se muestran en la Tabla. 5 [14]:

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

Tabla. 5 Características WAVE PHY. [14]

3.2.2.2. Capa WAVE MAC

La capa MAC se encarga de establecer los mecanismos de acceso al canal de comunicación, para que un conjunto de estaciones pueda compartir de manera eficiente el medio inalámbrico. El IEEE 802.11p define el uso de del protocolo de acceso al medio CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance*).

Otra función que realiza la capa MAC es la priorización de los mensajes generados por las aplicaciones de seguridad, ya que estos son sensibles a los retardos. Para poder coordinar todos los tipos de mensajes el 802.11p presenta un esquema de acceso al canal mejorado, el **EDCA** (*Enhanced Distributed Channel Access*) que especifica cuatro categorías de acceso, una para cada canal y con prioridades diferentes. Las comunicaciones V2X se establecen mediante los dos tipos de canal que aparecen a continuación [14][57]:

- **Control Channel** (CCH): canal de comunicación tipo *broadcast* dedicado para paquetes de alta prioridad (WSM) y muy baja latencia. Utilizado por las aplicaciones de seguridad.
- **Service Channel** (SCH): canal utilizado para la comunicación bidireccional entre las **OBU** y las **RSU**. Aplicaciones específicas hacen uso de este canal que a la vez se pueden ejecutar en otros canales de servicio. Para su funcionamiento es necesario el establecimiento de unos servicios que habilitan las comunicaciones entre las OBUs y las RSU, los **WBSS** (*WAVE Basic Service Set*)

El hecho de disponer de dos canales diferenciados en el espectro permite gestionar más de un servicio simultáneamente después de haber sido coordinados por el canal de control. La sincronización y coordinación de canal en el momento que un dispositivo se añade a una red WAVE o WBSS es necesaria para asegurar que todos los dispositivos están monitorizando los canales CCH correctamente.

3.2.2.3. Capa de red

La capa superior a la capa MAC es la capa de red cuyos servicios están definidos por el estándar IEEE 1609.3. Contiene dos planos diferenciados, el plano de datos y el plano de gestión:

- **Plano de datos:** se encarga de los protocolos y el hardware necesario para la transmisión de datos, y gestiona principalmente el tráfico generado por y para aplicaciones, aunque también puede gestionar el tráfico entre los diferentes planos.
- **Plano de gestión:** se encarga de la configuración y del mantenimiento del sistema. Emplea servicios del plano de datos para intercambiar tráfico de administración entre dispositivos.

A nivel de red existen dos protocolos de comunicación, el **WSMP** (*WAVE Short Message Protocol*) diseñado concretamente para comunicaciones vehiculares con alta eficiencia en términos de uso de canal y el IPv6 [14][21].

3.2.3. Estandarización

La siguiente sección resume los estándares más relevantes aplicables para la tecnología DSRC y para el desarrollo de aplicaciones de seguridad sobre esta tecnología. Se proporciona el contexto de los estándares existentes, IEEE 802.11p, IEEE 1609.X, SAE J2735 y SAE J2945.

IEEE 802.11 – Medium Access Control and Physical Layers for Wireless Local Area Networks: este estándar contiene 16 revisiones centradas principalmente con el control de enlace lógico, MAC y PHY. La revisión que aplica para DSRC es la 802.11p, la cual opera en el rango frecuencial de 5GHz y utiliza un ancho de banda de 75 MHz entre 5.850 y 5.925GHz, siendo la mitad del ancho de banda que utiliza el estándar 802.11a. IEEE 802.11p supone que las comunicaciones V2I se producen durante pequeños instantes de tiempo, por lo que, permite que se produzcan las comunicaciones sin seguir la asociación y autenticación de procedimientos de los mecanismos RSNA, motivo por el cual las medidas de seguridad se implementan en la capa superior. El estándar 802.11p es la capa inferior en la que se basa el IEEE 1609.x [55].

IEEE 1609.X – Familia de estándares WAVE: 1609.x define una gama de estándares con técnicas de seguridad para la protección de los servicios que utilizan DSRC de 5.9GHz. Esta familia de estándares utiliza IEEE 802.11p para definir las capas PHY y MAC y especifica la arquitectura y el conjunto estandarizado de servicios e interfaces para implementar comunicaciones V2I y V2V. Los siguientes estándares forman parte del conjunto IEEE 1609.X [55]:

- **IEEE 1609.0 – Guía IEEE para la arquitectura WAVE:** contiene la definición de la arquitectura, operaciones y servicios requeridos para las comunicaciones WAVE multicanal en entornos vehiculares. Este estándar está activo y la última versión fue publicada en 2013.
- **IEEE 1609.2 – Servicios de seguridad para aplicaciones y administración de mensajes:** contiene la definición del formato de los mensajes y el procesamiento de estos para los dispositivos WAVE. También describe los métodos para asegurar servicios para mensajes de gestión y de aplicaciones. La última versión fue publicada en 2016 y fue la revisión del IEEE 1609.2-2013.
- **IEEE 1609.3 – Servicios de Red:** contiene la definición de los servicios a nivel de capa 3 (red) y capa 4 (transporte) de la pila OSI de comunicaciones, como soporte de la conectividad inalámbrica entre dispositivos en vehículos (OBU) y unidades de carretera (RSU). Dentro de un sistema WAVE proporciona el enrutamiento y direccionamiento, permitiendo múltiples capas por debajo o encima de la capa de Servicios de redes WAVE. Este estándar está activo desde el año 2016 como una revisión de la norma 1609.3–2010.
- **IEEE 1609.4 – Operación multicanal:** contiene especificaciones sobre las funciones y servicios de la subcapa MAC que permiten conectividad multicanal entre dispositivos sin necesidad de conocer los parámetros físicos. Este estándar contiene la descripción para la coordinación de canales para que los dispositivos operen con múltiples canales utilizando funciones adicionales para la comunicación en la subcapa MAC fuera del contexto del conjunto de servicios básicos especificado por el IEEE 802.11. Este estándar está activo desde 2016 como una revisión de la norma 1609.4-2010.
- **IEEE 1609.11 – Protocolo de intercambio de datos para pago electrónico en ITS:** representa una extensión del IEEE 1609.2 que define los servicios y el

formato de los mensajes de seguridad que se necesitan para realizar pagos electrónicos seguros.

- **IEEE 1609.12 – Asignación de identificadores:** especifica la asignación del identificador WAVE. Se identifican los siguientes parámetros: *Provider Service Identifier (PSID)*, *Object Identifier (OID)*, *EtherType*, *36-bit Organizationally Unique Identifier (OUI-36)*, *Management ID*.

SAE J2735 – Diccionario de mensajes DSRC: este estándar contiene la especificación del conjunto de mensajes y sus elementos de datos requeridos para las aplicaciones DSRC utilizadas por los sistemas de comunicación WAVE. Fue desarrollado con enfoque hacia DSRC, pero es posible aplicarlo en aplicaciones implementadas bajo otras tecnologías de comunicación inalámbrica, ya que se desarrolló para que fuera independiente de los protocolos subyacentes de la capa inferior [48][55].

SAE J2945/1 – Requisitos del sistema a bordo para comunicaciones V2V: este estándar se lanzó en 2016 y contiene las especificaciones de los requisitos para un sistema de comunicaciones de seguridad V2V. Los requisitos presentan perfiles estándar, funcionales y de rendimiento. Tiene como objetivo garantizar que el intercambio de BSM proporcione la integridad requerida y la integridad de los datos en las comunicaciones entre vehículos al mismo tiempo que respalda el rendimiento de las aplicaciones de seguridad [47][55].

3.2.4. Infraestructura

Las redes vehiculares basadas en DSRC pueden soportar comunicaciones del tipo V2V y V2I. En la Figura. 26 se pueden observar los diferentes actores (OBUs y RSU) que participan en las redes vehiculares basadas en DSRC, las cuales requieren de la implantación de una infraestructura dedicada.

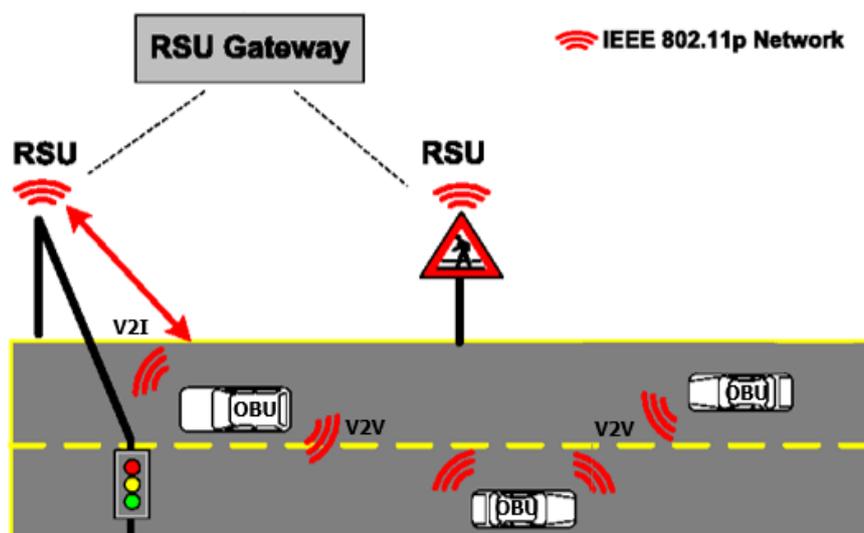


Figura. 26 Escenario de redes vehiculares usando IEEE 802.11p. Fuente: Semantic scholar [80]

Las OBUs se instalan principalmente en vehículos para compartir información, proporcionan las comunicaciones tanto entre vehículos como entre infraestructura (RSU) y pueden transmitir regularmente mensajes de estado a otras OBUs y admitir aplicaciones de seguridad entre vehículos. También reúnen datos del vehículo junto con datos del sistema GPS para su transmisión a las RSU.

Las RSU se acostumbran a instalar en intersecciones, semáforos y otras ubicaciones y proporcionan la interfaz a los vehículos dentro de su alcance. Las RSU están compuestas de un transceptor radio (DSRC o WAVE), un procesador de aplicaciones y una interfaz con la red de comunicaciones V2I. También cuentan con una unidad GPS y están conectadas a la red de comunicaciones V2I (RSU Gateway). Usando su interfaz a la red de comunicaciones V2I, puede enviar datos privados desde y hacia los OEM. La RSU también puede gestionar la priorización de mensajes hacia y desde el vehículo. Aunque la OBU tiene prioridades establecidas dentro de sus aplicaciones, la priorización también debe establecerse dentro de la RSU para garantizar que no se exceda el ancho de banda disponible [71].

3.2.5. Expansión geográfica

Durante el mandato de Barack Obama, la Administración Nacional de Seguridad del Tráfico en Carreteras propuso incluir el DSRC como la tecnología a implantar en los nuevos vehículos para permitir las comunicaciones V2X, ya que era la única tecnología disponible en 2016, pero la administración de Donald Trump no ha avanzado con esta implementación.



Figura. 27 Captura mercado DSRC año 2019. Fuente: Technology Informa [59]

A principios de 2019, la Comisión Europea propuso elegir la tecnología DSRC, pero en la última instancia la regulación se retiró bajo la presión de los operadores inalámbricos y de algunas empresas como Qualcomm, que se estarían presionando a favor de los sistemas basados en la tecnología C-V2X [58].

Vehículos equipados con DSRC se han vendido en Japón desde 2015, seguido por EE. UU donde se empezaron a comercializar en 2017 y finalmente en Europa a partir del 2019. El futuro del estándar DSRC es incierto debido a la reciente introducción de la competencia del estándar C-V2X combinada con la desaceleración para obtener la aprobación de la propuesta de mandato por parte del gobierno de los EE. UU.

Europa

A mediados del 2017, Volkswagen anunció que empezaría a implementar comunicaciones V2X a partir de 2019. La octava generación de Golf lleva incorporado un conjunto de chips de NXP para permitir comunicaciones V2X basadas en DSRC (802.11p). Se esperan más de medio millón de ventas anuales de Golf en Europa, provocando que sea el despliegue más grande del mundo de DSRC. Los vehículos podrán compartir mensajes básicos de seguridad que pueden transmitirse tanto desde los vehículos como desde las unidades de carretera equipadas con radios DSRC.

En Hamburgo Siemens estaría empezando a equipar señales de tráfico con unidades DSRC para proporcionar alertas y otras compañías como Honda, Bosch y Continental han realizado demostraciones de intersecciones inteligentes utilizando sensores y DSRC [58].

Japón

Toyota introdujo la tecnología DSRC en 2015 en varios modelos del mercado japonés, pero tuvieron poco impacto en el mercado, ya que no se desplegó un gran volumen de unidades. Después de valorar el hecho de que ningún otro fabricante hubiera apoyado a la tecnología DSRC, Toyota suspendió su plan de desplegar DSRC en sus vehículos [58].

Estados Unidos

Cadillac instaló la tecnología DSRC a su modelo CTS en 2017 para el mercado estadounidense, pero debido a que las volúmetrías eran pequeñas, no tuvo gran impacto en el mercado [58].

El fabricante de automóviles japonés Toyota anunció en abril de 2018 que en 2021 iniciarían la instalación de la tecnología DSRC con el objetivo de adopción en la mayor parte de su línea de producción a mediados de la década de 2020. Sin embargo, un año después, en abril de 2019 Toyota Motor Corp comunicó que abandonaba los planes de implantación de DSRC en sus vehículos por falta de participación de otros fabricantes de vehículos.[66]

3.2.6. Aplicaciones

Hoy en día se usa ampliamente una versión temprana de DSRC para el cobro electrónico de peajes (una aplicación V2I); sin embargo, las aplicaciones V2V no serán completamente funcionales hasta que un porcentaje significativo de automóviles en la carretera estén equipados con sistemas DSRC [56].

Las **aplicaciones de seguridad** tienen como objetivo reducir el número de accidentes mediante la predicción y la notificación a los conductores de la información obtenida de las comunicaciones entre vehículos y los sensores instalados en la carretera. Las aplicaciones de seguridad se explican en detalle en el capítulo 4.2 y las más típicas podrían ser:

- Advertencia de congestiones y accidentes
- Advertencia intersecciones, gestión de velocidad
- Cruces ferroviarios, prioridad para vehículos de emergencia

Las **aplicaciones de eficiencia del tráfico** pueden fomentar un mejor uso de las carreteras y pueden operar localmente o en una porción de red más grande. Estas aplicaciones también tienen un efecto beneficioso sobre la seguridad vial y las más típicas son las siguientes:

- Control dinámico de semáforos y de tráfico
- Navegación conectada y notificación de atascos

Las **aplicaciones de pago e información** se pueden basar en el reconocimiento de matrícula basada en cámaras, las señales de tráfico variables o las complementadas con balizas DSRC [56]. Las aplicaciones de pago podrían ser:

- Control de estacionamiento, carga de congestión y control de peaje en autopistas

4. Sistemas de transporte inteligente (ITS)

En el presente capítulo se describe el concepto de los Sistemas de Transporte Inteligente (ITS) desde su origen hasta la afectación en términos económicos, de seguridad y ambientales que tiene el uso de estos sistemas.

También se mencionan las aplicaciones derivadas de la utilización de los sistemas ITS, a nivel de seguridad o eficiencia vial y comerciales y de información.

Por último, se describen los mensajes de seguridad asociados con los sistemas de seguridad, entrando en detalle en los mensajes BSM y CAM, ya que son los más comunes y utilizados, y con menos detalle el resto de los mensajes.

4.1. Introducción

Los **Sistemas de Transporte Inteligente (ITS)** presentan su origen en 1960, cuando en Estados Unidos se desarrolló el Sistema de Guía electrónica de rutas. En 1994 el Congreso Mundial de ITS aceleró el desarrollo y la implementación de sistemas de transporte inteligente para mejorar los sistemas de control de tráfico a nivel mundial. A partir de ese punto, numerosas organizaciones han desarrollado y personalizado aplicaciones ITS para cubrir necesidades específicas. Las ITS están atrayendo la atención de la industria automotriz, los profesionales y las entidades gubernamentales, el que se traduce en un esfuerzo de colaboración entre el sector privado y el sector público.

Teniendo en cuenta la carga económica de los accidentes de tráfico y la contribución del transporte a las emisiones mundiales de CO₂, se espera que el mercado global de ITS experimente un crecimiento prometedor entre los años 2019 y 2027, con una tasa de crecimiento de aproximadamente un 13%.

Los sistemas de Transporte Inteligente (ITS) representan la integración de la tecnología de la información y las comunicaciones con la infraestructura de transporte, vehículos y usuarios. Gracias a la compartición de información, las ITS permiten a las personas sacar más partido de las redes de transporte, con mayor seguridad y menos impacto ambiental. *Cooperative ITS* (C-ITS) es el sector de las ITS encargado del intercambio de información en tiempo real entre los usuarios de la carretera y los servicios avanzados con un enorme potencial para aumentar la comodidad, la movilidad y la seguridad.

La interacción entre los vehículos y con la infraestructura vial es el dominio de los **Sistemas Cooperativos de Transporte Inteligente (C-ITS)** que permitirán a los usuarios de la carretera y a los agentes de tráfico compartir información y utilizarla para coordinar sus acciones. Se espera que esta cooperación, habilitada por la conectividad entre vehículos e infraestructura mejore sustancialmente la seguridad vial, la eficiencia del tráfico y la comodidad de la conducción, permitiendo a los conductores a tomar decisiones correctas y a adaptarse a las condiciones de tráfico [77][78][79].

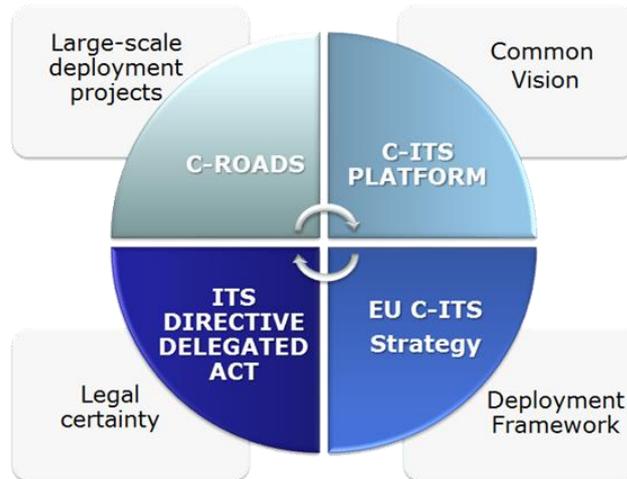


Figura. 28 Estrategia Europea sobre C-ITS. Fuente: www.ec.europa.eu [51]

La comisión europea adoptó en 2016 una estrategia para los C-ITS (*EU C-ITS Strategy*), una iniciativa para la movilidad cooperativa, conectada y automatizada, con el objetivo de facilitar la convergencia de las inversiones y los marcos regulatorios en toda la UE, para los despliegues de servicios C-ITS a partir de 2019. Esta estrategia incluye tanto la adopción del marco legal apropiado para garantizar la seguridad jurídica de los inversores públicos y privados (*Legal certainty*), la disponibilidad de fondos para los proyectos, la continuidad del proceso de la Plataforma C-ITS (*C-ITS Platform*), así como la cooperación internacional en los aspectos relacionados con vehículos conectados y cooperativos (*Common Vision*). Además, incluye una plataforma de seguimiento continuo con la plataforma C-ROADS con un marco de implantación (*Deployment Framework*) para proyectos de gran escala (*Large-scale deployment projects*).[51]

4.2. Aplicaciones de seguridad

Uno de los propósitos de las comunicaciones V2V es mejorar la seguridad vial de las carreteras. El Departamento de Transporte (DoT – *Department of Transportation*) de Estados Unidos ha estado investigando la seguridad de las comunicaciones V2V y en su programa de investigación definieron aplicaciones de seguridad para la tecnología, como ayudar a los conductores a evitar colisiones frontales, aumentar la seguridad en las intersecciones, realizar un seguimiento de los puntos ciegos de los vehículos, advertencias de cambio de carril de otros conductores y advertencias de vehículos que estén fuera de control.

- **Forward Collision Warning (FCW)** es un sistema de seguridad avanzada con monitorización de la velocidad tanto del propio vehículo como del vehículo de delante y la distancia entre ambos. En caso de que la distancia de seguridad con el vehículo de delante se vea vulnerada, el sistema FCW advertirá al conductor de forma visual o sonora de la probabilidad de una colisión. Esta aplicación utiliza los datos recibidos de los vehículos que están dentro de la zona de comunicación para determinar si la colisión es inminente. Estos sistemas no toman el control del vehículo, la responsabilidad de operación de accionar los frenos es del conductor [46][47].

- **Emergency Electric Brake Light Warning (EEBL)** permite que un vehículo transmita la información de un evento de freno de emergencia a los vehículos incluidos dentro del rango de comunicación permitido. Los vehículos que reciben la información determinan la importancia del evento y si es necesario advierte al conductor para evitar la colisión. Es una aplicación útil para situaciones en las que la visibilidad es reducida [47][49].
- **Left Turn Assist (LTA)** es un sistema de seguridad cuyo objetivo es reducir los accidentes originados en las situaciones de giro a la izquierda, las cuales son críticas para la seguridad. El asistente de giro se activa cuando se detecta una situación potencialmente peligrosa, como un vehículo aproximándose por el carril opuesto. La aplicación LTA analiza los BSM recibidos y clasifica que vehículos se aproximan por el carril izquierdo más cercano para determinar si la maniobra de giro a la derecha supondrá un riesgo para el vehículo. A partir de la información del BSM calcula también el espacio libre contra el primer vehículo que se aproxima por el carril izquierdo [47].
- **Blind Spot Warning/Lane Change Warning (BSW/LCW)** es un sistema de seguridad destinado a advertir al conductor de vehículo durante un cambio de carril si la zona del punto ciego en la que el vehículo intenta cambiar esta o estará ocupada por otro vehículo que circula en la misma dirección. También puede proporcionar información del punto ciego al conductor sin que tenga intención de cambiar de carril [47][49].
- **Intersection Movement Assistant (IMA)** es una aplicación de seguridad que permite advertir al conductor de un vehículo que no es seguro ingresar en una intersección debido a la alta probabilidad de colisión con otros vehículos que se encuentran en la intersección, ya sean controladas o incontroladas por señales de stop. Permite proporcionar información de aviso de impacto a los sistemas de los vehículos para realizar acciones para reducir la probabilidad de accidentes en las intersecciones [47][49].
- **Control Loss Warning (CLW)** es una aplicación de seguridad que permite que un vehículo transmita un evento de pérdida de control a los vehículos que están dentro del rango de comunicación. La pérdida de control del vehículo se determina a partir de la activación del ABS, del control de tracción o el control de estabilidad. A partir de la información recibida, el vehículo receptor determina la importancia del evento y advierte al conductor si es necesario [47][49].
- **Curve Speed Warning (CSW)** es una aplicación de seguridad que permite a los vehículos recibir información de aproximación a una curva y la velocidad recomendada para dicha curva. El vehículo puede mostrar advertencias adicionales para los casos en los que la velocidad sea superior a la recomendada para la curva [49].

4.3. Mensajes de seguridad

En este capítulo se presenta una descripción detallada de los mensajes de seguridad BSM (*Basic Safety Message*) y CAM (*Cooperative Awareness Message*) ya que son los más utilizados a nivel mundial por los sistemas ITS y adicionalmente se introduce una mención a otros tipos de mensajes que también participan en este tipo de sistemas pero que no son tan prioritarios.

4.3.1. BSM

Los mensajes de seguridad básica (*Basic Safety Message – BSM*) son paquetes de comunicación estandarizados que se envían con una periodicidad de diez mensajes por segundo entre vehículos conectados y están definidos en el estándar SAE J2735. Los BSM contienen datos del estado del vehículo, como por ejemplo velocidad y posición. Estos mensajes son la base de las aplicaciones de seguridad, las cuales presentan unos estrictos requisitos de confiabilidad y latencia para los sistemas de comunicación. Estas aplicaciones siguen los protocolos de comunicación estándar definidos por el SAE J2735 y el IEEE 1609.x.

Los mensajes BSM están formados por dos partes, la Parte I que debe estar incluida en cada mensaje y la Parte II que contiene elementos opcionales y se incluyen según sea necesario de acuerdo con las políticas de cada aplicación, más allá de la norma del SAE, por lo que un BSM sin contenido opcional de la Parte II es un mensaje válido.

La estructura de los mensajes BSM (Figura. 29) está dividida en dos partes diferenciadas de la siguiente manera (información detallada en el Anexo A – Contenido mensaje BSM) [48]:

- **BSM Part I – CoreData:** contiene elementos de datos críticos que son obligatorios en cada BSM enviado. Los contenidos de la Parte I también se reutilizan en otras partes.
- **BSM Part II:** en un mensaje BSM puede haber múltiples extensiones presentes:
 - **VehicleSafetyExtensions:** se utiliza para enviar detalles adicionales sobre el vehículo para aplicaciones de seguridad, como indicadores de eventos e información detallada de la posición. Habitualmente se envía junto a BSM Part I o es utilizado en otros mensajes con la misma o menor frecuencia.
 - **SpecialSafetyExtensions:** se utiliza para enviar información opcional adicional para vehículos especiales. Vehículos especiales hace referencia a vehículos o dispositivos equipados que difieren de otros vehículos en su capacidad general o intención de fluir en el tráfico con permisos de certificación especiales.
 - **SupplementalVehicleExtensions:** se utiliza para enviar elementos de información adicionales incluyendo tanto la funcionalidad V2V como aplicaciones de monitoreo V2I.

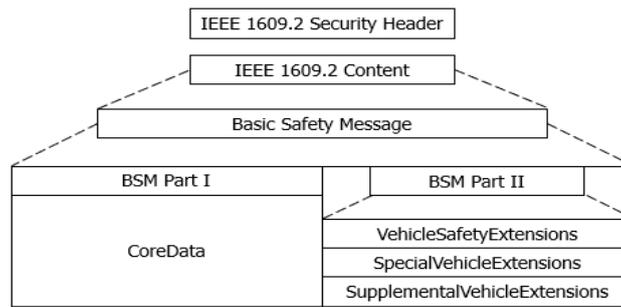


Figura. 29 Estructura mensaje BSM. Fuente: Elaboración propia

El hecho de que un vehículo sea capaz de recibir de manera segura y correcta mensajes BSM es fundamental para el funcionamiento de las aplicaciones de seguridad. El riesgo existente de inyección de mensajes falsos por parte de un atacante se puede mitigar exigiendo que todos los remitentes firmen digitalmente todos los mensajes. Esta medida implica un aumento del tamaño del mensaje y de la carga computacional del receptor, ya que debe verificar las firmas de un elevado número de mensajes.

4.3.2. CAM

Los Mensajes de Conciencia Cooperativa (CAM – *Cooperative Awareness Message*) pertenecen al protocolo CAM definido en el estándar ETSI 302 637-2 y se transmiten dentro de la red ITS-G5 (802.11p) y proporcionan información de presencia, posiciones y el estado básico de las estaciones ITS a otras estaciones ITS que se encuentran dentro del rango de comunicación. Todas las estaciones ITS podrán enviar y recibir mensajes CAM, siempre que estén conectadas a una red V2X.

Cuando las estaciones ITS reciben CAM están recibiendo información de otras estaciones, como sus posiciones, movimientos, atributos e información básicos del sensor, con el objetivo de conocer en cada momento el comportamiento de los vehículos y el estado de tráfico de la carretera, pudiendo así actual en consecuencia en función de la situación.

El formato de los mensajes CAM depende del tipo de estación que genere y envíe el CAM. La cabecera ITS, el contenedor básico y el contenedor de alta frecuencia siempre deben aparecer en un mensaje CAM, independientemente del tipo de estación ITS que lo genere, sin embargo, el contenido de los contenedores de baja y alta frecuencia sí que dependerán del tipo de estación ITS. Otro campo opcional es el contenedor de vehículo especial cuyo contenido dependerá del tipo de vehículo utilizado.

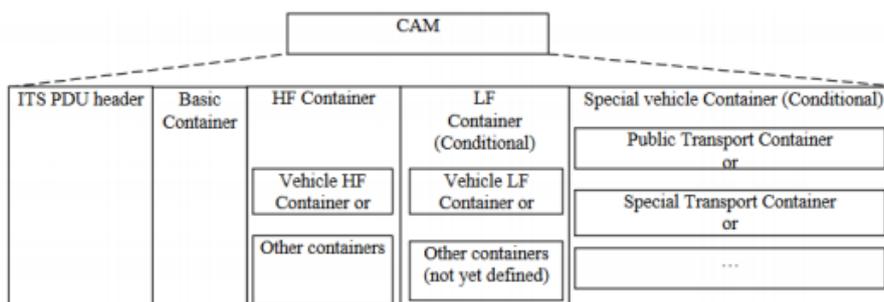


Figura. 30 Estructura general de un mensaje CAM. Fuente: SAE [48]

4.3.3. Otros mensajes

Además de los mensajes explicados en el capítulo 4.3 existen otros mensajes de seguridad que por su menor relevancia se explicaran con menos nivel de detalle.

DENM (*Decentralized Environmental Notification Message*): definidos por el Instituto Europeo de Normas de Telecomunicaciones en 2011 constituyen otro tipo de mensajes de soporte de aplicaciones que proporcionan un servicio de notificación sobre el estado de la carretera. Aunque este tipo de mensajes han sido concebidos por la ETSI para admitir aplicaciones activas de seguridad, se pueden aplicar a cualquier aplicación ITS interesada en obtener información sobre las condiciones de tráfico en las carreteras.

PVD (*Probe Vehicle Data*): los mensajes PVD se utilizan para intercambiar el estado de un vehículo con otros dispositivos, típicamente RSUs para admitir la recopilación de información sobre comportamientos típicos de desplazamiento del vehículo a lo largo de un segmento de la carretera. En el uso típico, el vehículo informante ha recopilado información que enviará a las RSUs junto con información sobre el punto en el tiempo y el espacio cuando ocurrió el evento de la instantánea.

PDM (*Probe Data Management*): se utilizan para controlar el tipo de datos recopilados y enviados por las OBUs a las RSUs para definir patrones de cobertura de las RSUs, instantes en que una OBU se asocia con una RSU y puede empezar a enviar mensajes de PVD.

MAP (*Map Data Message*): son utilizados para transmitir varios tipos de información geográfica de las carreteras. Su uso principal es transmitir mapas de geometría de carriles con las intersecciones existentes dentro de un solo mensaje. El contenido del mensaje incluye elementos como intersecciones complejas, segmentos de carreteras y curvas de alta velocidad.

TIM (*Traveler Information Message*): este tipo de mensaje se utiliza para enviar información relacionada con varios tipos de avisos y señales de tráfico a los dispositivos. Hace un uso intensivo del sistema de codificación ITIS para enviar frases conocidas, aunque permite también texto limitado para los nombres de lugares locales. Los tipos de mensajes admitidos especifican varios subdialectos de patrones de frases ITIS para reducir aún más el número de octetos que se envían.

SPAT (*Signal Phase and Timing*): se utilizan para transmitir el estado actual de una o más intersecciones. Junto con los mensajes MAP, el receptor puede determinar el estado de la fase de la señal y cuando ocurrirá la siguiente fase esperada. Estos mensajes envían el estado del movimiento actual de cada fase activa en el sistema en función de lo que sea necesario. Los movimientos inactivos no se transmiten normalmente. Los movimientos se asignan a enfoques específicos y conexiones de ingreso a carriles de salida.

PSM (*Personal Safety Message*): este tipo de mensaje todavía está bajo desarrollo y se pretende utilizar para transmitir datos de seguridad sobre el estado de los usuarios vulnerables de la vía pública (VRU), como peatones, ciclistas o trabajadores.

5. Evolución redes celulares

5.1. Estado del arte

En 1980 se desarrolló el estándar para la primera generación de tecnología inalámbrica, en la que las estaciones base se conectaban al resto de sistema telefónico a través de sistemas digitales y se utilizaban solamente para transmisiones de voz.

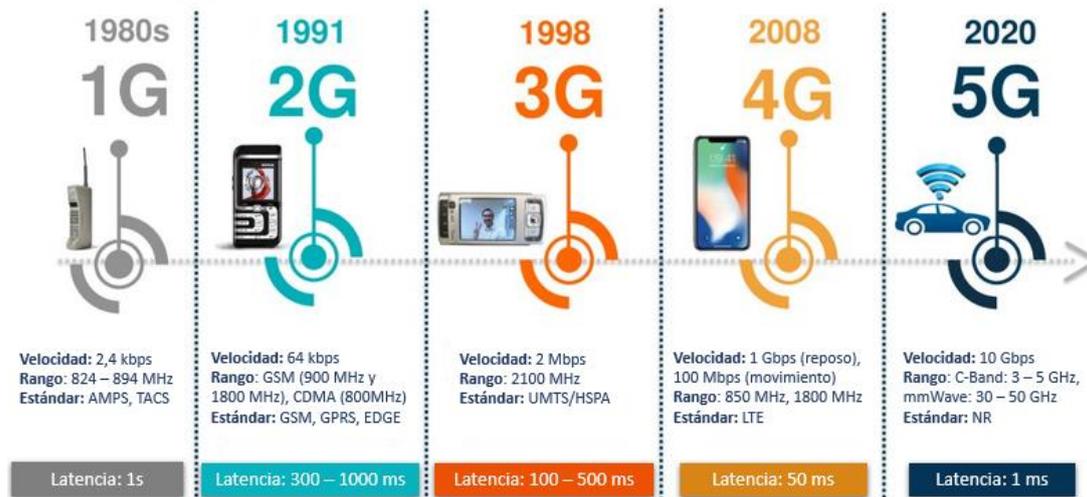


Figura. 31 Evolución redes celulares. Fuente: Mauritius Telecom [67]

En 1991 apareció el estándar *Global System for Mobile Communications*, GSM, basado en la red de segunda generación y en otros protocolos como CDMA, TDMA, iDEN y PDC. Con el 2G aparecieron las primeras transferencias de paquetes de datos. Antes de aparecer la tercera generación llegaron las redes móviles de GPRS (2.5G) y EDGE (2.75G) que contemplaban mejoras en cuanto a la cobertura.

Con la tercera generación, 3G apareció la transmisión simultánea de voz y datos con velocidades hasta 2 Mbps y las generaciones intermedias anteriores del 4G de 3.5G y 3.75G.

La cuarta generación, 4G, trajo consigo redes basadas completamente en el protocolo IP alcanzando la convergencia entre las redes de cable y las inalámbricas. Para permitir su despliegue se tuvo que liberar la banda de 800 MHz. Dicha generación presenta velocidades de hasta 1 Gbps, es compatible con IPv6, *soft-handover*, baja latencia y diseñada para la transmisión de video en alta definición. Con lo que equivaldría al 4.5G, LTE *Advanced* se podrían alcanzar velocidades de hasta 300 Mbps [68].

La quinta generación, 5G, permite llevar las características del 4G a una escala mayor, mejorando la capacidad y el rendimiento, permitiendo un mayor número de dispositivos conectados por unidad de superficie, latencias del orden de 1 ms, mayor omnipresencia y disponibilidad, mayor flexibilidad y eficiencia para el operador en términos de diseño, operación y provisión de servicios y mejor eficiencia espectral y posibilidad de utilizar bandas milimétricas (> 20GHz).[62]

5.2. C-V2X sobre 4G LTE

En 2017 el 3GPP completó la estandarización de la tecnología *Cellular Vehicle-to-Everything* (C-V2X) basado en LTE.

Las redes vehiculares basadas en C-V2X aprovechan la cobertura integral de las redes LTE seguras y bien establecidas. Además, las redes 4G permiten comunicaciones altamente confiables, en tiempo real a altas velocidades y con tráfico de alta densidad. C-V2X sobre LTE habilita las comunicaciones tanto de corto como de largo alcance entre vehículos e infraestructura vial y forma parte de la hoja de ruta hacia la conectividad 5G NR.

5.2.1. Arquitectura 4G LTE

El desarrollo de LTE (*Long Term Evolution*) se inició por el 3GPP a finales del 2004 y se prolongaron los estudios hasta el año 2006 donde el 3GPP empezaría la descripción de las especificaciones para el nuevo estándar teniéndolo finalizado para el año 2008 la *Release 8*. Desde su lanzamiento, LTE ha ido evolucionado, por lo general el 3GPP lanza una actualización del estándar cada tres años (Figura. 32) y para diferenciar las diferentes versiones de LTE, el 3GPP introdujo nombres comerciales como *LTE-Advanced* (*Release 10/11*) y *LTE-Advanced Pro* (*Release 13/14*). La *Release 13/14* supuso un hito clave para el Gigabit LTE porque se adquirieron velocidades de 1.2 Gbps.



Figura. 32 Evolución 4G LTE. Fuente: Semiconductores [50]

La arquitectura general de un sistema LTE se basa en la arquitectura de las anteriores generaciones especificadas por el 3GPP, denominada en las especificaciones como *Evolved Packet Core* (EPC), siguiendo el concepto de dividir el sistema en los siguientes tres elementos:

- *User Equipment* (UE)
- *Terrestrial Radio Acces Network* (UTRAN)
- *Evolved Packet Core* (EPC)
 - *Mobility Management Entity* (MME)
 - *Serving Gateway* (S-GW)
 - *Packet Data Network Gateway* (P-GW)
 - *Home Subscriber Server* (HSS)

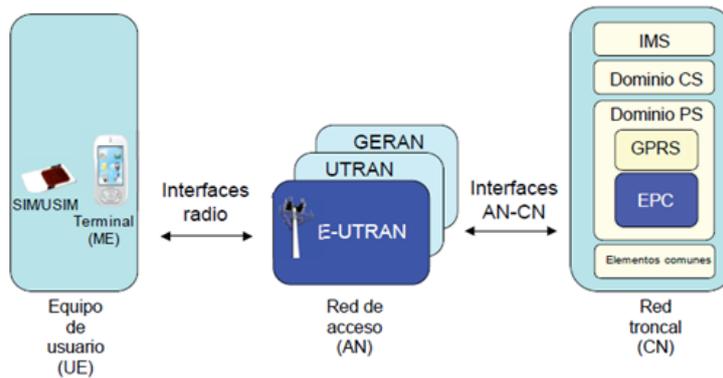


Figura. 33 Arquitectura sistema LTE. Fuente: Intotally [52]

Tal y como ilustra la Figura. 32, E-UTRAN corresponde a la red de acceso que utiliza OFDMA como tecnología en la interfaz radio de comunicación con los equipos de usuario. La red de acceso E-UTRAN junto con la red troncal EPC proporcionan conjuntamente los servicios de transferencia de paquetes IP entre el equipamiento de usuario y las redes de paquetes externas. El servicio de transferencia de paquetes IP que ofrece LTE entre el equipamiento de usuario y las redes externas se ha denominado servicio portador EPS (*EPS Bearer Service*). La transferencia de paquetes que proporciona la red de acceso E-UTRAN se denomina *E-UTRAN Radio Access Bearer* (ERAB). La interconexión entre los equipos físicos que albergan las funciones de la red troncal EPC y la red de acceso E-UTRAN se realiza mediante tecnologías de red basadas en IP.

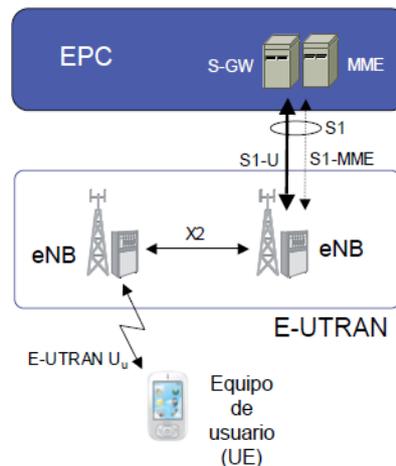


Figura. 34 Red de acceso E-UTRAN. Fuente: Intotally [52]

La red de acceso se compone de una entidad de red denominada *Envolved NodeB* (eNodeB) que constituye la estación base de E-UTRAN, quien integra toda la funcionalidad de la red de acceso, como se puede observar en la Figura. 34. Los eNodeBs se encargan de proporcionar conectividad entre los equipos de usuario (UE) y la red troncal EPC y se comunican por las interfaces E-UTRAN Uu con los UEs, S1 con la red troncal EPC y X2 para comunicarse entre los propios eNodeBs. La interfaz S1 está dividida en dos interfaces, la S1-MME para el plano de control y la S1-U para el plano de usuario, ya que la separación del plano de usuario y el de control es una característica importante de las redes LTE [52].

Asignación de recursos radio en LTE

El acceso al medio en LTE se realiza de forma síncrona, la línea temporal está dividida en ranuras temporales sincronizadas, llamadas subtramas, de 1 milisegundo. El ancho de banda en frecuencia se divide en *Resource Blocks* (RBs) de 180 kHz, permitiendo así realizar multiplexación en tiempo (TDM) y en frecuencia (FDM) entre las transmisiones de los diferentes usuarios. Las interferencias entre usuarios se evitan porque la estación base controla todas las comunicaciones entre dispositivos y maximiza así el rendimiento de estas.

5.2.1.1. Comunicaciones LTE-D2D

Las comunicaciones LTE presentan algunos problemas para ser utilizadas en comunicaciones vehiculares V2X. Uno de ellos es, que las transmisiones celulares realizan dos saltos en el enlace entre dos terminales, por el canal *uplink* entre terminal emisor y estación base y *downlink* entre estación base y el terminal receptor, que junto con el retardo de configuración y el procesamiento de red pueden comprometer los requisitos de latencia mínima. La posible saturación del canal de comunicaciones con altas densidades vehículos es otro de los problemas que presentan este tipo de comunicaciones. Por otro lado, las comunicaciones entre vehículos (V2V) no deben depender de la red móvil y deben ser capaces de mantener un rendimiento mínimo incluso en condiciones sin cobertura.

Para abordar estos inconvenientes, las primeras comunicaciones LTE-V2X estandarizadas son básicamente V2V sobre la base de las LTE-D2D. Las comunicaciones LTE-D2D, estandarizadas a partir de la *Release 12* para aplicaciones de seguridad, se realizan mediante un enlace directo *Sidelink* entre dos terminales cercanos utilizando la tecnología E-UTRAN, sin necesidad de pasar por la estación base, incluso estando en condiciones de no cobertura. Otro beneficio que aportan las comunicaciones LTE-D2D es el aumento de la eficiencia gracias al reúso espacial de recursos permitiendo dos transmisiones dentro de una misma celda sin interferirse si se cumplen los requisitos de distancia entre dispositivos [72].

5.2.1.2. Comunicaciones LTE-V2X

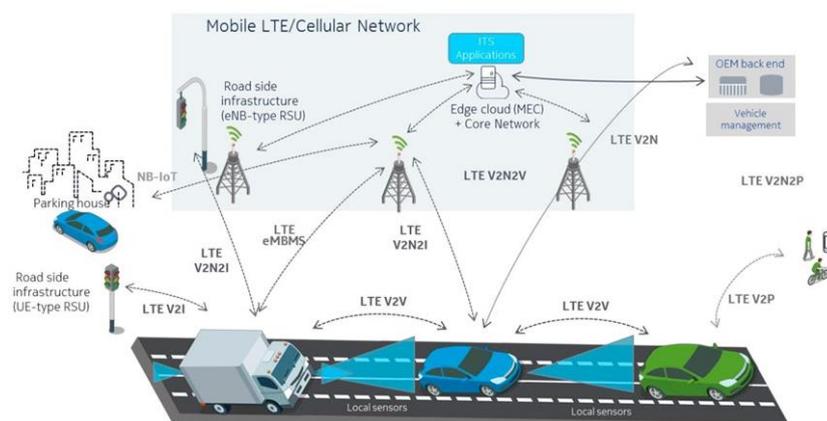


Figura. 35. Entorno comunicaciones LTE-V2X. Fuente: Nokia [61]

Las comunicaciones V2X presentan unos requisitos más estrictos que las comunicaciones LTE-D2D en términos de latencia y alta ocupación de canal y menos estrictos en términos de eficiencia energética.

Las comunicaciones directas en Modo 1 y Modo 2 permiten la recepción discontinua (DRX) gracias a la división temporal en periodos sincronizados entre los diferentes nodos. En el Modo 2, los recursos de cada transmisión se seleccionan aleatoriamente y para mejorar la fiabilidad de las transmisiones y mermar la posibilidad de que dos nodos escojan los mismos recursos, los paquetes se envían hasta cuatro veces.

Para solucionar las limitaciones de los modos de las comunicaciones LTE-D2D se han especificado dos nuevos modos, Modo 3 y Modo4, para LTE-V2X. Estos dos modos presentan una modificación en la estructura de gestión de recursos, aportando una ganancia en flexibilidad se consigue exigiendo a los nodos una recepción permanente aumentando con ella el consumo energético.

Las transmisiones LTE-V2X se realizan en un subconjunto de recursos reservado para ellas y aislado del resto de transmisiones móviles para que estén protegidas de interferencias.

La infraestructura móvil LTE existente está facilitando el posicionamiento de las comunicaciones LTE-V2X, ya que permite transmisiones en rangos de distancia mayores que las transmisiones basadas en DSRC o LTE-D2D. A pesar de que las transmisiones por la red móvil puedan tener limitaciones de escalabilidad o latencia, pueden suponer una fuente de información sobre eventos a largas distancias como atascos o accidentes. La información transmitida por la red celular es enviada a todos los nodos en *broadcast* que estén dentro del rango geográfico concreto [61][72].

5.2.2. Métricas redes 4G LTE

Debido a que las redes vehiculares basadas en C-V2X utilizan actualmente la infraestructura de las redes móviles 4G, se muestran de forma sintetizada las métricas más significativas de estas redes. El enfoque de las redes 4G fue mejorar la cobertura de datos, la capacidad, el rendimiento y la calidad del servicio. Los requisitos incluían la operación en canales de radio de hasta 40 MHz y una eficiencia espectral extremadamente alta. En la Tabla. 6 se muestra un resumen de los KPIs (*Key Performance Indicators*) de las redes 4G LTE [75].

	4G LTE
Velocidad de datos	100Mbps – movilidad alta 1Gbps – movilidad baja
Experiencia de usuario	10Mbps
Latencia	10 -100 ms
Capacidad	200 usuarios/celda
Movilidad	350 km/h
Eficiencia espectral	DL – 5bps/Hz – 100Mbps UL – 2.5bps/Hz – 50Mbps
Ancho de banda	>20Mhz 100 MHz agregado
Densidad de conexiones	100.000/ km ²
Capacidad de tráfico	0.1Mbps/km ²

Tabla. 6 KPIs redes 4G LTE. Fuente: 5GAA [74]

5.2.3. Escenarios de uso

La tecnología 4G LTE fue diseñada originalmente para servicios de banda ancha con tasas altas de transmisión de datos, donde es posible encontrar aplicaciones del ámbito del IoT, como los servicios de información y entretenimiento de los coches.

- **IoT – Internet of Things:** hace referencia a una extensión de conexiones de red a diferentes sensores y dispositivos, ofreciendo un mayor grado de capacidades analíticas a objetos como bombillas o cerraduras. La interoperabilidad es un punto clave de IoT. NB-IoT y LTE-M son dos tecnologías desarrolladas para aplicaciones IoT [73]:
 - **NB-IoT** (*Narrow Band* – IoT) está desarrollada para permitir una comunicación eficiente y una larga duración de la batería para dispositivos distribuidos de manera masiva, y utiliza la red de telefonía móvil existente para conectar
 - **LTE-M** para comunicaciones de máquina, incluyendo ancho de banda reducido, potencia máxima de transmisión más baja y soporte reducido para la transmisión de enlace descendente. LTE-M, también conocida por CAT-M1, utiliza las antenas LTE instaladas y está optimizada para un ancho de banda mayor y para conexiones de móvil que incluyan voz.
- **Seguridad pública:** el 3GPP introdujo en 2016 estándares para comunicaciones de misión crítica a través de redes LTE para su uso en aplicaciones de seguridad pública[26].
- **C-V2X:** el 3GPP completó en 2017 la estandarización de C-V2X basado en LTE para conectar vehículos entre sí, infraestructura y otros usuarios o servicios en la nube.

5.3. C-V2X sobre 5G NR

5G NR está diseñado para proporcionar una amplia variedad de servicios, con tres grandes desafíos principales que 5G NR debe resolver para permitir una sociedad completamente conectada, mayor volumen de tráfico, un crecimiento masivo de los dispositivos y una transmisión más confiable y de baja latencia. Estos desafíos dan como resultado los siguientes tres casos de uso, que se explicaran más en detalle en el capítulo 5.3.3 [62]:

- Banda ancha móvil mejorada (**eMBB**)
- Comunicaciones masivas de tipo máquina (**mMTC**)
- Comunicaciones de baja latencia ultra confiables (**uRLLC**)

Las redes móviles 5G serán clave para proporcionar conectividad para las comunicaciones de vehículo a vehículo (V2V) y de vehículo a infraestructura (V2I).

El 3GPP está trabajando en el desarrollo de New Radio (NR) en la *Release* 16 construido encima de 5G NR estandarizado con la *Release* 15. Se espera que NR V2X admita aplicaciones avanzadas de V2X que requieren garantías de QoS mucho más estrictas en comparación con las aplicaciones que C-V2X puede admitir, en algunos

casos de uso se requieren latencias extremo a extremo de menos de 3 ms y tasas de confiabilidad del 99.999%. [60]

5.3.1. Arquitectura 5G NR

Los sistemas 5G utilizan una arquitectura más inteligente, con redes de acceso vía radio (RAN), las cuales ya no están limitadas por la complejidad de la infraestructura o la proximidad de las estaciones base. De igual manera que en los sistemas LTE, la arquitectura de los sistemas 5G está dividida en tres bloques [62][63]:

- **User Equipement (UE)**
- **5G Core Network (5GC)**
- **Next Generation – Radio Access Network (NG-RAN)**

Las redes 5G presentan dos modos de funcionamiento:

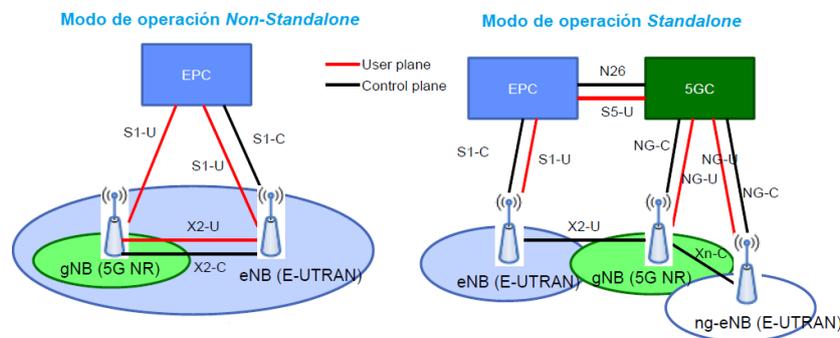


Figura. 36 Modos de funcionamiento sistemas 5G. Fuente: [62]

NSA (Non Stand Alone): en este modo de funcionamiento el nodo de 4G es el encargado de la señalización, del plano de control (CP) y el nodo 5G solo aporta el plano de usuario (UP). La conexión está anclada a LTE con portadoras 5G NR para aumentar la velocidad y reducir la latencia. El modo NSA presenta las siguientes características[62][63]:

- Las estaciones base 5G conocidas como gNB a partir de la *release* 15 del 3GPP, están conectadas a la red central EPC de LTE.
- Conectividad dual entre LTE y 5G NR.

SA (Stand Alone): en este modo de funcionamiento el nodo 5G funciona con independencia del 4G ofreciendo tanto el plano de control como el de usuario al UE. Es en este modo donde realmente se pueden desplegar dos de las principales funcionalidades diferenciales de 5G, la baja latencia gracias al uso de MEC (*Mobile Edge Computing*) y el *Network Slicing*. Presenta las siguientes diferencias frente a NSA [62][63]:

- Funcionalidad completa para el sistema 5G.
- El gNB está conectado al 5GC.
- El gNB controla el plano de usuario (UP) y el plano de control (CP).

Los paradigmas de la nueva arquitectura 5G se basan en la flexibilidad y escalabilidad y en ofrecer de forma virtualizada multitud de servicios sobre la misma infraestructura. La arquitectura de los sistemas 5G está basada en los siguientes principios [62][63]:

- Separación entre el plano de control y el plano de usuario (**CUPS – Control and User Planes Split**) (Figura. 37). Se busca que la implantación permita que evolucione de forma que se minimice el condicionamiento del uno frente al otro, aportando mayor escalabilidad y evolución independientes. También permite implementaciones flexibles, con ubicaciones centralizadas o distribuidas para los diferentes planos. Es una evolución de la arquitectura del núcleo de 4G-EPC que se está desplegando en las últimas *Releases* [63].

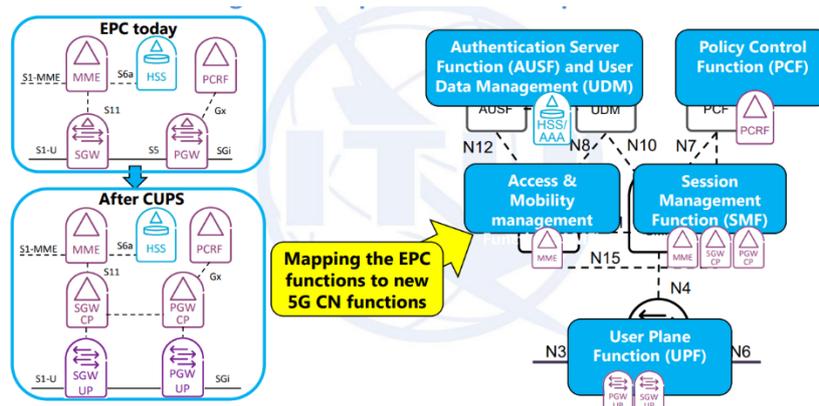


Figura. 37 Cambios y mejoras respecto con 4G. Fuente: ITU [75]

- **Arquitectura Basada en Servicios (SBA – Service Based Architecture)**. Las funciones de red del plano de control (CP) están diseñadas de forma que cada una ofrezca al resto su actividad como un servicio. Esto quiere decir que no todas las funciones tienen que conocer las funcionalidades de las otras ya que se relacionan en modo cliente – servidor o mediante subscripción – notificación. La manera de relacionarse entre ellas es mediante APIs sobre protocolos de tipo común, como HTTP. Deriva del concepto de SOA (*Service Oriented Arquecture*), donde los servicios entre el NFs del CP son provisionados por otros componentes de aplicación a través de un protocolo de comunicación sobre una red (Figura. 38) [63].

- › A Control Plane Network Function can provide one or more NF Services
- › A NF Service consist of operations based on either a request-response or a subscribe-notify model
- › Common control protocol using e.g. HTTP based API, replacing protocols like e.g. Diameter

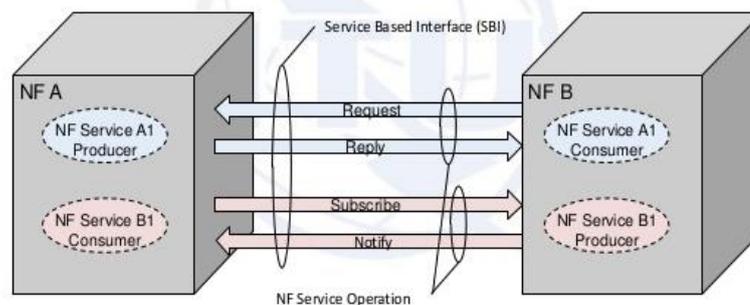


Figura. 38 Arquitectura basada en servicios. Fuente: ITU [75]

- Network slicing** crea redes virtuales y aisladas sobre un conjunto de recursos de capa física y funciones lógicas compartidas (Figura. 39). Una *slice* es vista como una red lógica extremo a extremo que puede ser creada dinámicamente. Un UE puede acceder a varias *network slices* al mismo tiempo sobre la misma conexión radio. A su vez un *slice* incluye NFs (*Network Functions*) del plano de control y del plano de usuario y recursos de la red de acceso e implementa versiones de las funciones de red (NF) o de los esquemas de modulación de la red de acceso optimizadas para su función.

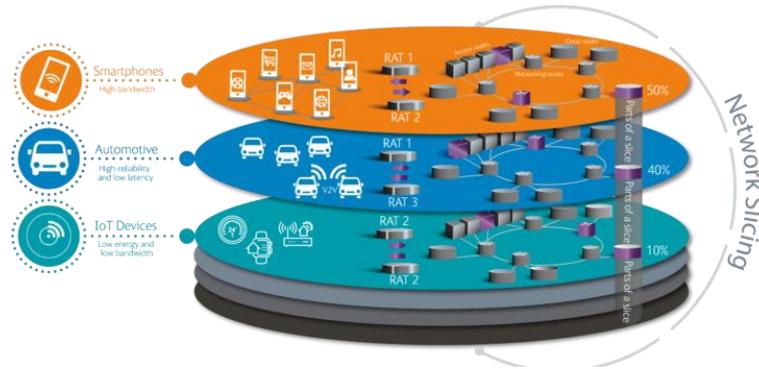


Figura. 39 Arquitectura de *Network slicing*. [62]

Las comunicaciones vehículo a red (V2N) es un caso de uso típico para *network slicing*. La conducción autónoma o los servicios de seguridad y emergencias requerirán un segmento (*slice*) de red *Ultra-Confiable Low Latency* (URLLC). Entretanto, los servicios auxiliares de confort o movilidad personal requerirán una porción de red de mayor esfuerzo o un de eMBB. Un vehículo podría acceder a diferentes *slices* al mismo tiempo, tanto para el uso de los sistemas de infoentretenimiento como para las aplicaciones de detección de peligros en la carretera. En la Figura. 40 se muestra el escenario comentado, los cortes podrían provenir de uno o más dispositivos. El 3GPP definió que un dispositivo puede admitir hasta ocho *slices* diferentes con un AMF (*Access Mobility Function*) común para todos y un SMF (*Session Management Function*) por segmento. En la Figura. 40 hay tres segmentos de red conectados al mismo dispositivo que comparten la misma instancia de AMF. El segmento n°1 es mIoT y es el encargado de enviar datos al núcleo y a la red de datos. El segmento n°2 ofrece almacenamiento en caché en el borde (*Edge*) de la red y el segmento n°3 ofrece acceso a una aplicación V2X en el borde (*Edge V2X*) [62][63].

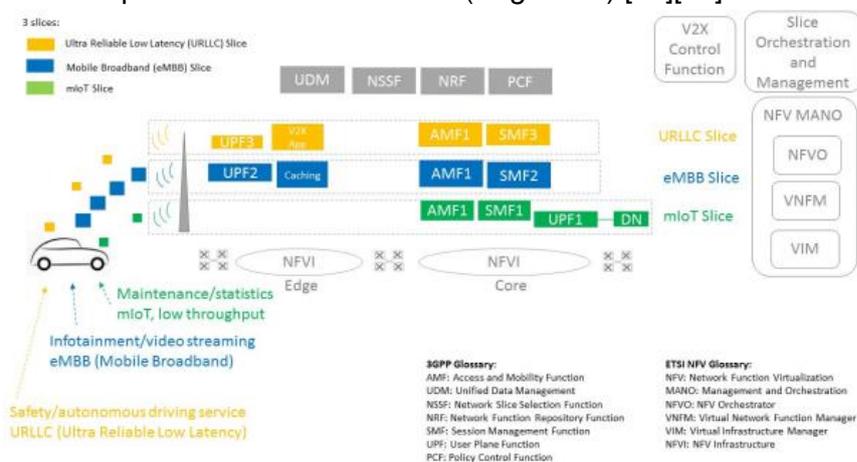


Figura. 40 Ejemplo de V2X *network slicing* [62]

- **Multi-Access-Edge Computing (MEC)** es un tipo de computación perimetral que extiende las capacidades de la computación en la nube para llevarlas al borde de la red. Mientras que la computación en la nube tradicional ocurre en servidores remotos ubicados lejos del usuario y el dispositivo, MEC permite que los procesos tengan lugar en estaciones base, oficinas centrales y otros puntos de agregación de la red. Al cambiar la carga computacional en la nube a servidores locales individuales, MEC ayuda a reducir la congestión de las redes móviles y a disminuir la latencia, mejorando la calidad de la experiencia (QoE) de los usuarios finales. [64]

La característica de *Edge Cloud Assisted V2X* potencia la importancia de las redes 5G para las comunicaciones vehiculares, ya que permite que los vehículos conectados intercambien información con servidores alojados en el borde de la nube (*Edge cloud*) reduciendo así el consumo de energía y garantizando la latencia. Además, tanto los vehículos conectados como otros elementos de la infraestructura vial podrán enviar información al borde de la nube para el procesamiento centralizado (*BigData*) proporcionando así una visión global sobre las condiciones de tráfico.

- **SDN (Software Defined Networks)** y **NFV (Network Function Virtualization)** son dos tecnologías que permiten proporcionar programabilidad, flexibilidad y modularidad a las redes. SDN hace referencia al paradigma de las redes programables y a la capacidad de las aplicaciones de software para programar dispositivos de red individuales dinámicamente y controlar así el comportamiento de la red en su conjunto. En cuanto a NFV, es una tecnología aplicada a los operadores de telecomunicaciones que permite desplegar funciones y servicios de red basados en virtualizados basados en software, los cuales pueden estar alojados en hardware centralizado o distribuido.

Las características de programabilidad abierta y control centralizado lógicamente de los paradigmas de SDN y NFV ofrecen técnicas de control y administración potentes, que admiten la asignación de recursos y gestión de *handover* en comunicaciones V2X. Los vehículos podrían recibir datos simultáneamente de más de una red mediante el diseño de un sistema multi-RAT basado en SDN. Asimismo, la clasificación de paquetes basada en SDN permite reducir el retraso y la pérdida de paquetes, habilitando así servicios críticos de V2X [62][63].

- **Machine Learning para V2X.** La comunicación V2X basada en inteligencia artificial depende del aprendizaje automático a partir de la información obtenida de diversas fuentes, para predecir y evitar posibles accidentes de tráfico y para aumentar la eficiencia de los vehículos inteligentes y los sistemas de transporte. Los algoritmos de aprendizaje automático pueden implementarse de forma distributiva involucrando a cada vehículo conectado y son capaces de mejorar la direccionalidad de las comunicaciones *mmWave V2X* [62].
- **Ondas milimétricas (mmWave) y massive MIMO.** Las redes 5G pretenden utilizar el espectro entre 30 y 300 GHz, las ondas milimétricas. Combinadas con modulaciones de orden superior y técnicas de *massive MIMO (massive Multiple Input Multiple Output)* que mejoran la eficiencia espectral, *mmWave* puede lograr

velocidades de datos más altas, del orden de gigabits por segundo, que los sistemas de comunicación actuales. En comunicaciones *mmWave* es esencial tener una gran cantidad de antenas en el transmisor y en el receptor para formar haces de transmisión nítidos. Es posible desplegar una gran cantidad de antenas por lo que el *beamforming* ha despertado un gran interés en estos sistemas. Es posible que las comunicaciones *mmWave* V2X sean compatibles a través de los sistemas de comunicación 5G, las estaciones base 5G como infraestructura para V2I y el modo 5G D2D para las comunicaciones V2V. Para las comunicaciones *mmWave* V2X debe haber múltiples transceptores *mmWave* para superar el bloqueo¹ de las señales por los vehículos o peatones cercanos.[70]

5.3.1.1. Comunicaciones 5G D2D

Las comunicaciones D2D son una piedra angular para mejorar el rendimiento del sistema y admitir nuevos servicios con las redes 5G. En general, los beneficios relacionados con D2D incluyen una eficiencia espectral aumentada, una velocidad y capacidad de datos mejoradas, cobertura extendida, latencia reducida y eficiencia energética y de costes mejorada. Estos beneficios son el resultado de la proximidad de los usuarios que emplean comunicación D2D, un aumento de la reutilización espacial de los recursos de tiempo y frecuencia y del uso de un solo enlace en el modo D2D en lugar de usar un recurso de enlace ascendente y un enlace descendente cuando se comunica a través de la estación base en el modo celular.

En los futuros sistemas 5G, se espera que las comunicaciones D2D controladas por la red ofrezcan la oportunidad de gestionar localmente los enlaces de comunicación de corto alcance y permita separar el tráfico local de la red global. Con esto se eliminará la carga en el *backhaul*² y la red central causada por la transferencia de datos y señalización relacionada y se reducirá el esfuerzo de administración de los nodos de la red central. La comunicación directa D2D extiende la idea de gestión de red distribuida incorporando dispositivos finales en concepto de gestión de red, donde el dispositivo de usuario inalámbrico con capacidad D2D puede tener una doble función: actuar como un nodo de infraestructura y/o como un dispositivo de usuario final. Más lejos, D2D directo facilita la comunicación de baja latencia debido al enlace de comunicación local entre usuarios cercanos. De hecho, el D2D directo se ha visto como una de las características necesarias para soportar servicios en tiempo real en el futuro sistema 5G. Otro aspecto importante es la confiabilidad, donde se puede emplear un enlace D2D adicional para aumentar la confiabilidad a través de un mayor grado de diversidad.[62][69]

¹ Las ondas milimétricas tienen capacidades de cobertura mucho más bajas debido a una mayor absorción.

² *Backhaul*: es la porción de una red jerárquica que comprende los enlaces intermedios entre el núcleo, y las subredes en sus bordes.

5.3.1.2. Comunicaciones 5G V2X

Las comunicaciones 5G V2X introducen capacidades avanzadas como el diseño eficiente de enlace lateral para un rendimiento optimizado a todas las velocidades y multidifusión con fiabilidad basada en la distancia y en la relevancia de las aplicaciones. Presenta mejor rendimiento en cuanto a baja latencia, mayor eficiencia espectral y mayor capacidad. Además, utiliza ranuras para agregar enlaces laterales con fiabilidad mejorada con retroalimentación, señales de referencia dinámica para velocidades diferentes y codificación de canal avanzada.

Utiliza interfaz de aire OFDM escalable y estructura de ranura flexible con multidifusión confiable basada en retroalimentación de los receptores NAK³, retransmisión basada en HARQ⁴, múltiples receptores envían NAK usando el mismo recurso, también conocido como SFN⁵.

NR C-V2X admite DMRS adaptativo de 2, 3 y 4 símbolos para un rendimiento de alta velocidad con densidad de diseño de señal de referencia variable y colocación estratégica de símbolos de referencia, proporcionando mayor eficiencia espectral, una reducción en el uso del ancho de banda y mayor capacidad. El aumento de la eficiencia espectral a altas velocidades también se consigue gracias al espaciado variable entre portadoras, con opciones de 15, 30 y 60 kHz con soporte de banda ancha hasta 100 MHz.

5G V2X consigue una cobertura uniforme agregando la distancia como dimensión. La información de ubicación se comparte eficientemente en el canal de control de la capa física permitiendo la retroalimentación NAK con HARQ en función de la distancia. Los vehículos a cierta distancia e interesados en los mismos servicios forman parte del mismo grupo, y los grupos pueden conectarse de manera confiable según la distancia. Programación semipersistente adecuada para mensajes básicos de seguridad con paquetes de tamaños similares y transmisión periódica (típicamente ~100 ms). Modelo de tráfico variable de programación de paquetes basado en los diferentes tamaños de paquetes, con latencias más bajas (<100ms).[31]

5.3.2. Métricas redes 5G NR

5G NR (IMT-2020) es más flexible, confiable y seguro que las IMT anteriores. Se reconoce que las tecnologías para IMT-2020 se pueden aplicar en una variedad de escenarios de implementación y pueden admitir una variedad de entornos, capacidades de servicio y opciones de tecnología. En la Tabla. 7 aparecen de forma resumida los KPIs (*Key Performance Indicators*) esperados para las redes 5G NR. Por otro lado, La Figura. 41 muestra las mejoras en cuanto a capacidades de 5G NR (IMT-2020) frente a 4G (IMT-Advanced).

³ NAK *Negative ACK*

⁴ HARQ *hybrid automatic repeat request*

⁵ SFN *Single Frequency Network*

	5G NR
Velocidad de datos	DL - 20Gbps UL - 10Gbps
Experiencia de usuario	100Mbps
Latencia	1 ms
Movilidad	500 km/h
Fiabilidad	10 ⁻⁵
Eficiencia espectral	DL – 30bps/Hz UL – 15bps/Hz
Eficiencia energética red	100x
Ancho de banda	>1GHz
Densidad conexiones	1.000.000/ km ²
Disponibilidad	99.99% (uRLLC)
Capacidad de tráfico	10Mbps/km ²

Tabla. 7 KPIs 5G NR. Fuente: 5GAA [74]

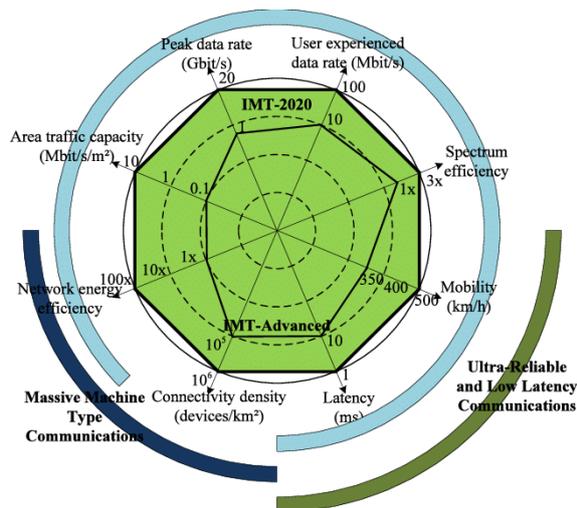


Figura. 41 Capacidades IMT-2020. Fuente: ITU [75]

5.3.3. Escenarios de uso

Los servicios de redes móviles 5G se clasifican en tres categorías para cumplir con los requisitos de automatización en múltiples dominios verticales [62][63]:

- **Enhanced Mobile Broadband (eMBB)** pretende cumplir con la demanda cada vez mayor de tráfico móvil que imponen los servicios que consumen un alto ancho de banda y velocidades de datos muy altas, como por ejemplo vídeos en alta definición o realidad virtual. Proporciona velocidades de datos extremadamente altas, del orden de varios Gbps y amplía la cobertura de red más allá de la de 4G.
- **Massive Machine Type Communications – Massive IOT (mMTC)** tienen como objetivo admitir conexiones densas de varios tipos de dispositivos, de hasta 1.000.000.000 dispositivos por km² (sensores, dispositivos IoT, móviles), con requisitos de bajo ancho de banda y bajo consumo de energía en el UE en áreas abarrotadas como ciudades y agricultura inteligentes. Está diseñado para proporcionar una penetración profunda en el interior y una cobertura de área amplia para una conectividad de millones de dispositivos.
- **Ultra Reliable Low Latency Communications (uRLLC)** para servicios críticos que requieren muy baja latencia y muy alta confiabilidad y disponibilidad. El modo uRLLC satisface la conducción asistida y automatizada, el control de movimiento de máquinas y gestión remota. Puede cumplir requisitos estrictos de latencia extremo a extremo, del orden de 1 ms, de confiabilidad y disponibilidad.

Ocasionalmente los casos de uso no pueden asociarse únicamente a una de las tres categorías, pero esta categorización es útil para identificar los requisitos necesarios. La Figura. 42 muestra los principales escenarios de los servicios de las redes 5G, con algunos casos de uso para cada escenario.

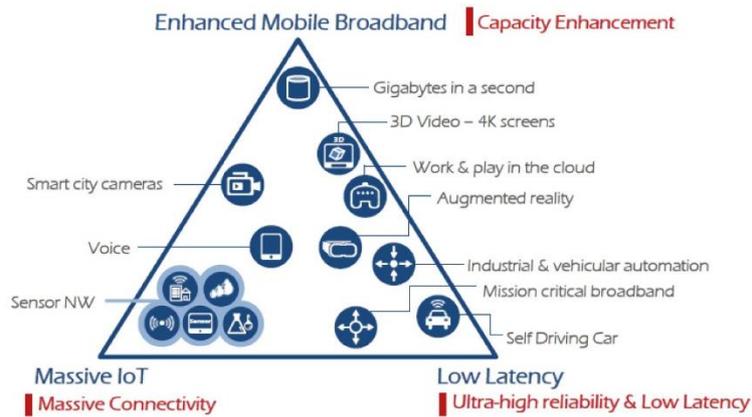


Figura. 42 Escenarios de uso 5G. Fuente: ITU-R IMT 2020 [75]

En la Tabla. 8 se muestran los requisitos de la red radio para las tres categorías de servicios 5G.

	Velocidad de datos	Experiencia de usuario	Eficiencia espectral	Movilidad	Latencia	Densidad conexión	Eficiencia energética de la red	Capacidad tráfico
eMBB	Alta	Alta	Alta	Alta	Media	Media	Alta	Alta
mMTC	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Alta	Media	Baja
uRLLC	Baja	Baja	Baja	Alta	Alta	Baja	Baja	Baja

Tabla. 8 Requisitos de red de las tres categorías de servicios 5G. Fuente: Introducción 5G [63]

Las comunicaciones V2X se pueden clasificar como un tipo de comunicación de tipo máquina ultra confiable y a su vez es un caso de uso que comparte algunas características de mMTC y uRLLC. Las técnicas de comunicación uRLLC serán capaces de soportar nuevos servicios como comunicaciones V2X (Vehículo a Dispositivo o Infraestructura o Vehículo) para la seguridad del tráfico en los mismos.

5.4. Cumplimiento requisitos para V2X

Partiendo de las capacidades de las redes 4G LTE y 5G NR expuestas en las secciones 5.2.2 y 5.3.2 respectivamente y teniendo en cuenta los requisitos de algunas de las aplicaciones de seguridad basadas en redes V2X (Tabla. 9), se puede concluir que:

Las **redes 4G** actuales no cumplen los requisitos para las aplicaciones V2X en términos de: latencia en aquellos casos que sea menor de 10ms, en capacidad de tráfico para ninguno de los casos y en rendimiento de usuario, ya que muchas de ellas requieren más de 10Mbps. En cambio, sí que cumplen en términos de densidad de dispositivos y movilidad en la mayoría de los casos.

Se espera que las redes 5G sean capaces de soportar la mayoría de las aplicaciones V2X ya que con sus tres escenarios de uso (eMBB, mMTC y uRLLC) cumplen los requisitos de este tipo de aplicaciones (latencias de 1ms, disponibilidad del 99.99%, confiabilidad de 10^{-5} , movilidad hasta 500km/h, ...)

Caso de uso	Latencia (ms)	Fiabilidad	Disponibilidad (%)	Densidad dispositivos	Densidad tráfico	Rendimiento usuario	Movilidad (km/h)
Conducción autónoma	1	10^{-5}	99.999	500-3000/km ²	10Gbps/km ²	0.1-29Mbps	100 - 500
Alertas de colisión	5	$10^{-3} - 10^{-5}$	99.999	500-3000/km ²	10Gbps/km ²	0.1-29Mbps	100 – 500
Seguridad carretera	10 -100	$10^{-3} - 10^{-5}$	99.999	3000/km ²	10Gbps/km ²	10Mbps	100
Seguridad autopista	10 -100	$10^{-3} - 10^{-5}$	99.999	3000/km ²	10Gbps/km ²	10Mbps	500
Eficiencia de tráfico	<100	10^{-5}	99.9	3000/km ²	10Gbps/km ²	10Mbps	<500
Congestión de tráfico	8	10^{-5}	95.0	100000/km ²	450Gbps/km ²	20 – 100 Mbps	
Intersecciones urbanas	<50	10^{-5}	99.999	3000/km ²	10Gbps/km ²	10Mbps	<50

Tabla. 9 Requisitos aplicaciones V2X. Fuente: 5GAA [74]

6. Evaluación experimental tecnologías V2X

El objetivo de esta evaluación experimental es demostrar que actualmente no existen limitaciones de diseño para la aplicación de los mensajes de seguridad, ya que los estándares ya están desarrollados y tecnológicamente disponemos de herramientas y sistemas que permiten la interacción con estos tipos de mensajes.

Dicha experimentación consiste en la **simulación de un vehículo** dotado de una plataforma de comunicaciones V2X que se encuentra **transmitiendo en broadcast mensajes BSM** a otros elementos (vehículos, infraestructura, peatones...) que se encuentren dentro de su rango de comunicación.

Para el escenario de pruebas se han utilizado dispositivos V2X propiedad de Ficosa, desde la plataforma Carcom de C-V2X hasta el cableado y antenas empleadas para toda la configuración. Para respetar la propiedad intelectual únicamente se presentará información pública de los dispositivos.

Originalmente el objetivo de la evaluación experimental era más ambicioso, incluyendo también pruebas en laboratorio para realizar una comparativa de los parámetros de radiofrecuencia (potencia de transmisión, sensibilidad GNSS...) entre una plataforma C-V2X y otra DSRC. Debido a la situación excepcional de COVID-19 no se han podido realizar estas pruebas adicionales.

6.1. Análisis de mensajes de seguridad

Debido a la importancia de los mensajes de seguridad en los sistemas ITS y el auge que está experimentando su uso recientemente para los vehículos conectados tanto en sistemas basados en DSRC como en C-V2X, como parte experimental de este proyecto se ha incluido un análisis de mensajes BSM, uno de los explicados en el capítulo 4.3.1. Las pruebas contienen tanto la parte de inyección de señales vía CAN que actualizan los campos de los mensajes BSM como el análisis de estos campos en función de los valores inyectados.

6.1.1. Configuración entorno V2X

Para la realización del análisis de mensajes de seguridad BSM de las comunicaciones V2X de los sistemas ITS se ha utilizado un *setup* como el que aparece en la Figura. 43, donde la simulación del vehículo la lleva a cabo el dispositivo Carcom, el bus CAN del vehículo es simulado mediante el *kvaser* y la batería del vehículo mediante la fuente de alimentación.

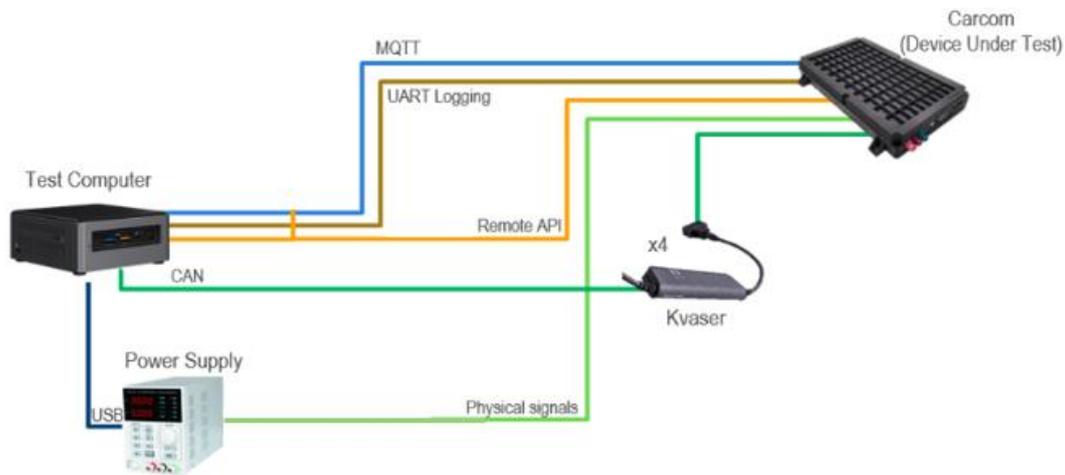


Figura. 43 Elementos escenario de pruebas V2X. Fuente: Elaboración propia

A continuación, se detallan los elementos del *setup* utilizado para la evaluación experimental:

- **Carcom:** *C-V2X On-Board Unit*. La plataforma Carcom puede integrar de forma modular las dos opciones de comunicación C-V2X o DSRC. Los módulos V2X permiten comunicaciones internas y externas dentro del vehículo al integrar varias tecnologías de telecomunicaciones, como comunicaciones V2X, bus CAN, WiFi y sistemas de posicionamiento de alta precisión. La plataforma Carcom con tecnología C-V2X ha sido la primera plataforma en recibir la certificación europea Red con la colaboración del Laboratorio Dekra. [39]
- **Antenas:** las antenas utilizadas con la plataforma Carcom son: CV2X DRX y PTRX, GNSS, WiFi BT, LTE principal y diversidad.
- **KVASER:** El *Kvaser Leaf Light HS V2* es una interfaz USB de alta velocidad para CAN que ofrece transmisión y recepción sin pérdidas de mensajes CAN estándar y extendidos en el bus CAN.
- **Fuente de alimentación DC:** TENMA 72-2540 programable con control remoto de alimentación mediante interfaz RS232 o USB. Tensión de salida entre 0V y 30V y corrientes de salida entre 0A y 5A, potencia nominal de 150W y tensión máxima de alimentación de 230VAC.
- **Cable UART:** el cable UART convierte de manera rápida y sencilla el E/S serie UART de un microcontrolador en USB. TTL-232R contiene una placa de circuito con un chip FT232x encapsulados en un conector USB-A.
- **Ordenador:** una parte de las pruebas se puede realizar con un ordenador con sistema operativo Windows y la segunda parte se tiene que realizar con sistema operativo Linux.
 - En el ordenador **Windows** se utilizarán las siguientes aplicaciones:
 - **CAN Tool:** herramienta para enviar señales de CAN mediante el KVASER a la OBU.
 - **Packet Capture – Wireshark:** para analizar el contenido de los mensajes BSM.

- El ordenador con **Linux** se utilizará para extraer la captura de mensajes BSM de la plataforma Carcom, la cual está desarrollada en Linux. Se utilizará el protocolo *Zmodem* que permite la transferencia de datos de manera rápida, robusta y sin errores gracias a la comprobación de redundancia cíclica (CRC) de 32 bits.
- **MQTT (*Message Queue Telemetry Transport*)**: es un protocolo de mensajería de publicación y suscripción diseñado para dispositivos que requieren un bajo ancho de banda, un consumo bajo y pocos recursos y enfocado a la conectividad *Machine-to-Machine* (M2M). Su arquitectura consiste en una topología en estrella, donde el nodo central o *broker* gestiona la red y transmite los mensajes con un alto número de clientes. Para iniciar una conversación tanto el emisor como el receptor deben estar suscritos a un “*topic*” que tienen una estructura jerárquica.[65]

6.1.2. Utilización de señales de CAN

Los elementos de un mensaje BSM no están de manera genérica presentes en los mensajes, sino que es necesario realizar acciones de entrada sobre la plataforma Carcom para así forzar la aparición de estos elementos con la información actualizada en función de la entrada utilizada. En el caso de esta evaluación experimental se van a utilizar señales de CAN para realizar el disparo y actualización de los diferentes elementos.

La plataforma Carcom dispone de cuatro canales físicos de entrada de CAN conectados al bus CAN del vehículo para poder recibir información y señales de las diferentes ECUs (*Electronic Control Unit*)⁶ conectadas al vehículo.

Cada uno de los mensajes de CAN contiene diferentes señales de CAN a partir de las cuales se van a actualizar los elementos relacionados de los mensajes BSM.

Para habilitar el canal de comunicaciones CAN se deben seguir los siguientes pasos:

1. Inicializar los puertos CAN
2. Inicializar el SPI
3. Leer el número puerto y el *baud rate*⁷.
4. Enviar un diagnostico broadcast para leer el número VIN⁸
5. Comprobar que el VIN leído coincide con el VIN almacenado

Una vez comprobado que el número VIN leído coincide con el almacenado el *workflow* que siguen las señales de CAN para la plataforma utilizada para realizar las pruebas es el que aparece en la Figura. 44. Las señales que viajan por el bus CAN del vehículo entran a los 4 cables de CAN físicos las que seguidamente se traducen mediante una tabla de configuración CAN (CCT – *CAN Configuration Table*) a señales de CAN Virtual

⁶ ECU – Electronic Control Unit: es un sistema integrado en la electrónica automotriz que controla un sistema o subsistema electrónico del vehículo.

⁷ *Baud rate* es el número de unidades de señal por segundo. Un baudio puede contener varios bits.

⁸ VIN – *Vehicle Identification Number* hace referencia al número de chasis o número de bastidor y es una secuencia de dígitos que identifica cada vehículo. El estándar ISO 3779 – 1983 define la estructura y contenido del VIN para favorecer la creación de un sistema homogéneo mundialmente. <https://es.vin-info.com/que-es-un-vin>

(VCAN). Una vez disponemos de los mensajes de señales de VCAN estos son enviados al microprocesador principal que se encargará de enviarlos al *stack* V2X donde se rellenarán los campos del BSM afectados por estas señales con la información que estas contengan.



Figura. 44 *Workflow* señales de CAN a BSM. Fuente: Elaboración propia

Las señales de CAN están definidas en la base de datos de CAN (DBC – *CAN Data Base*) que se utiliza para identificar cada paquete que se recibe por la red de CAN del vehículo. El contenido de las DBCs viene definido por los diferentes fabricantes en función del modelo o de las funcionalidades de los vehículos.

6.1.3. Procedimiento para capturar mensajes BSM

El chip ubicado en la placa principal de la placa Carcom nos permite obtener los datos de tráfico, ya que tiene control sobre el periférico que contiene el *stack* de comunicaciones que controla todas las conexiones V2X. Para ello es necesario utilizar el comando *tcpdump* de Linux que puede enviarse a través de una conexión en serie con el chip principal. *Tcpdump* es una herramienta para analizar el tráfico que circula por una red permitiendo al usuario capturar y mostrar en tiempo real los paquetes transmitidos y recibir por la red en cuestión. En este caso, se ha realizado una captura de los paquetes que viajan por la interfaz que conecta el chip principal con el *stack* de comunicaciones V2X.

La siguiente línea muestra el comando utilizado para realizar las capturas para el análisis de los mensajes BSM:

```
tcpdump -i lo -n "udp dst port 7943" -w /tmp/test01.pcap
```

Una vez finalizada la captura mediante el *tcpdump* en la placa procederemos a extraer el archivo de la placa para su análisis conectando vía puerto serie la placa al ordenador Linux. Para la extracción del archivo se utilizará el protocolo de transferencia *zmodem*.

6.1.4. Pruebas escenario V2X

En esta sección se describe el montaje de los diferentes elementos hardware necesarios para realizar la evaluación experimental propuesta. Seguidamente se describe el proceso de inyección de las señales de CAN utilizadas para estas pruebas, contemplando también una comprobación mediante *mosquitto MQTT* y *candump* de la transformación de estas señales a Virtual CAN. Finalmente se muestra el contenido de los mensajes BSM capturados analizando que los elementos relacionados con las señales de CAN inyectadas se han visto modificados según la información que hemos insertado.

Para la puesta a punto del escenario de pruebas se ha montado la plataforma Carcom conectando todas las antenas necesarias (CV2X DRX y PTRX, GNSS, WiFi BT, LTE), el cable UART y el cable KVASER para CAN entre la placa y el ordenador.

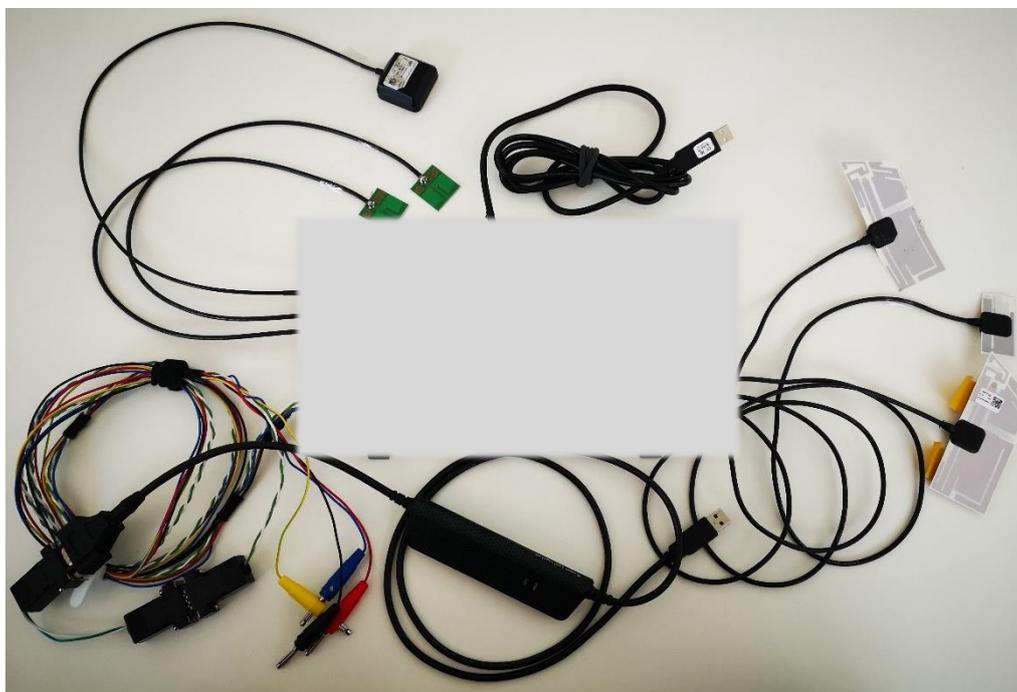


Figura. 45 Setup evaluación experimental mensajes BSM. Fuente: Elaboración propia

En la parte inferior de la Figura. 45 partiendo de izquierda a derecha tenemos el cable de alimentación con 4 bananas (Rojo: Batería, Azul: *Ignition* – encendido, Negro: Masa, Amarillo – Sin uso) y una entrada de CAN, cable KVASER conectado a la entrada de CAN y las antenas de telefonía, WiFi y Bluetooth (Rosa: LTE 800, Lila: LTE 1800, Amarillo: WiFi/BT). En la parte superior, tenemos las antenas de radiofrecuencia y GNSS (Verde: CV2X DRX, Rojo: CV2X PTRX, Azul: GNSS) y el cable UART conectado al chip principal de la Carcom.

Para alimentar la placa Carcom es necesario conectar tanto la batería (Rojo) como el encendido (azul) a la fuente de alimentación configurada a 12.8V.

La información contenida en los mensajes BSM puede provenir tanto de GNSS (*Global Navigation Satellite System*) como de las señales CAN del vehículo.

Para poder mostrar y analizar cambios en los elementos de los mensajes BSM correspondientes tanto a la Parte I, como a la Parte II se han seleccionado las señales que aparecen en la Tabla. 10, en la que se muestra el nombre de la señal, que elemento del mensaje BSM modifican. En el Anexo B – Relación señales de CAN y elementos BSM, se puede consultar esta tabla con los valores que puede tomar cada elemento.

Señal de CAN	Elemento BSM
PRNDL	BSMcoreData.transmission
Vehicle Speed	BSMCoreData.speed
ABS Active	BSMCoreData.Brakes

Vehicle Width	BSMCoreData.Vehiclesize
Vehicle Length	BSMCoreData.Vehiclesize
Left Turn Signal	VehicleSafetyExtensions.ExteriorLights
Right Turn Signal	VehicleSafetyExtensions.ExteriorLights
Hazard Lights On	VehicleSafetyExtensions.ExteriorLights
Parking Lights On	VehicleSafetyExtensions.ExteriorLights
SSP	SpecialVehicleExtensions.vehicleAlerts.sspRights
Multi Vehicle Response	SpecialVehicleExtensions.vehicleAlerts.multi
Classification	SupplementalVehicleExtensions.classification
Role	SupplementalVehicleExtensions.classDetails.role
Vehicle_type	SupplementalVehicleExtensions.classDetails.hpmsType
Response equip	SupplementalVehicleExtensions.classDetails.responseEquip
Vehicle_Height	SupplementalVehicleExtensions.VehicleData.height
Vehicle_Mass	SupplementalVehicleExtensions.VehicleData.mass
Bumper_height_front Bumper_height_rear	SupplementalVehicleExtensions.VehicleData.bumpers.front SupplementalVehicleExtensions.VehicleData.bumpers.rear
Is_raining	SupplementalVehicleExtensions.WeatherReport.isRaining
Rain_rate	SupplementalVehicleExtensions.WeatherReport.rainRate
Precip_situation	SupplementalVehicleExtensions.WeatherReport.precipSituation
Solar_radiation	SupplementalVehicleExtensions.WeatherReport.solarRadiation
Friction	SupplementalVehicleExtensions.WeatherReport.friction
Road_friction	SupplementalVehicleExtensions.WeatherReport.roadFriction
Outside_aire_temperautre	SupplementalVehicleExtensions.WeatherProbe.airTemp
Air_pressure	SupplementalVehicleExtensions.WeatherProbe.AirPressure
Front_wipper_status Rear_wipper_status	SupplementalVehicleExtensions.WeatherProbe.rainRates.statusFront SupplementalVehicleExtensions.WeatherProbe.rainRates.statusRear
Obs_Detection_Direction	SupplementalVehicleExtensions.ObstacleDetection.Direction
Obs_Detection_Distance	SupplementalVehicleExtensions.ObstacleDetection.Distance

Tabla. 10 Relación señales de CAN y elementos mensaje BSM

La nomenclatura de las señales CAN que aparecen en la Tabla. 10 no están definidas por ningún estándar ni es obligatorio su uso tal cual, simplemente es una configuración definida internamente en concordancia con la configuración del stack de comunicaciones.

De cara a inyectar las señales por CAN a la placa hay que tener en cuenta que estas están agrupadas de manera interna también en diferentes mensajes de CAN y en función de la estructura de cada una de las señales y su longitud se han creado unos diseños (*layout*) de los diferentes mensajes. Es decir, a la hora de inyectar cada una de las señales se deberá utilizar el identificador del mensaje que las contiene y seguidamente el valor de los bytes que apliquen para generar cada señal concretamente.

Mensaje	Señales CAN
300	PRLND
302	ABS Active
304	Vehicle speed, Left/Right turn signal, Hazard lights On, Parking lights
307	Vehicle_type, vehicle_height, vehicle_mass, bumper_height_front, vehicle width, vehicle length
308	Multi_vehicle_response, Response_type, Role, response_equip, bumper_height_rear
309	Obs_detecion_direction, obs_detecion_distance
30A	Outside_air_temperature, front_wipper_status, rear_wipper_status,
30C	Is_raining, rain_rate
30D	Classification, disabled_vehicle

Tabla. 11 Agrupación señales de CAN por mensajes

A continuación, se muestra un ejemplo de diseño del mapa de CAN para mensajes con las diferentes señales que contienen, donde se puede ver qué posición de byte ocupa cada una de ellas y cuál es su longitud (DLC).

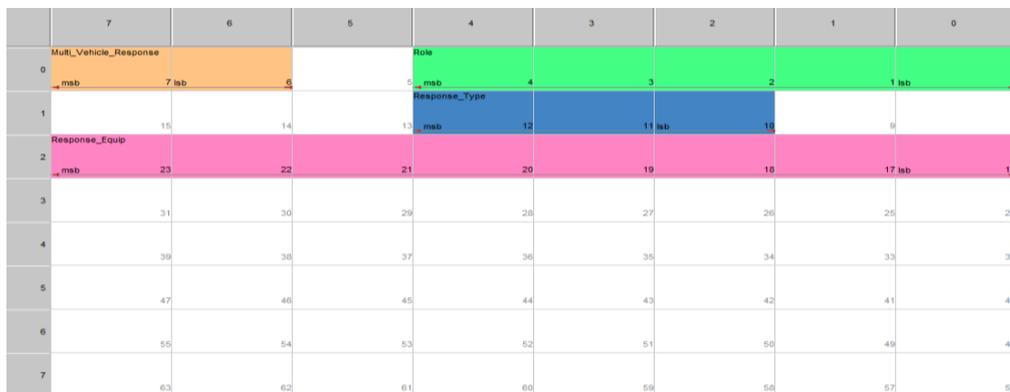


Figura. 46 Diseño mensaje 308

Debido al gran número de señales de CAN que se van a utilizar en esta evaluación experimental, se mostrará el procedimiento de inyección mediante la herramienta CAN Tool de un grupo de las señales en vez de la totalidad de ellas, ya que no aportaría valor adicional puesto que el procedimiento es el mismo para todas las señales modificando el valor de los bytes de información.

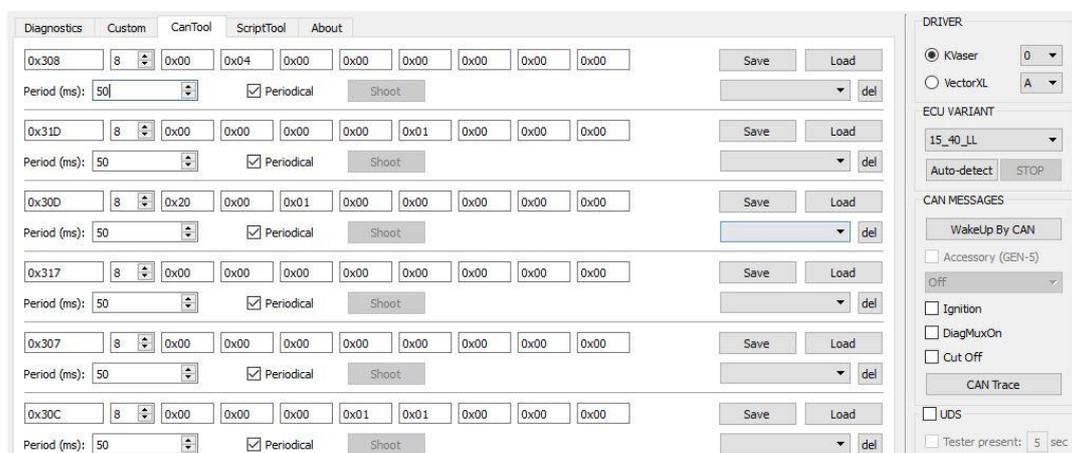


Figura. 47 Herramienta para inyectar CAN

La Tabla. 12 contiene los valores inyectados para cada una de las señales de CAN utilizadas. Hay que tener en cuenta que para que la OBU envíe mensajes BSM es imprescindible que esté sincronizado en posición y tiempo mediante GNSS, en caso contrario, el stack de comunicaciones no transmitirá ningún mensaje.

PRNDL: 1	Parking Lights On: 1	Vehicle_Height: 126	Friction: 100
Vehicle Speed: 4	SSP: 10	Vehicle_Mass: 254	Road_friction: 50
ABS Active: 0	Multi Vehicle Response: 1	Bumper_height_front/rear: 126	Outside_aire_temperautre: 126
Vehicle Width: 245	Classification: 0	Is_raining: 1	Air_pressure: 255
Vehicle Length: 800	Role: 0	Rain_rate: 65534	Front/Rear_wipper_status: 6
Left/RightTurn Signal: 0	Vehicle_type: 15	Precip_situation: 15	Obs_Detection_Direction: 32766
Hazard Lights On: 1	Response equip: 1	Solar_radiation: 65534	Obs_Detection_Distance: 32766

Tabla. 12 Valores señales de CAN inyectadas

Una vez se están transmitiendo las diferentes señales de CAN a la placa se puede realizar una comprobación de la transformación de las señales físicas a señales virtuales de CAN mediante *mosquitto* MQTT⁹ o la herramienta de *candump*¹⁰. Siguiendo la línea de lo comentado para el procedimiento de inyección de las señales, se añadirá el procedimiento de transformación a CAN Virtual únicamente de un grupo de las señales.

Para este punto hay que tener en cuenta que la transformación entre CAN físico y CAN Virtual se realiza mediante la CCT (*CAN Configuration Table*) y que igualmente las señales virtuales estarán agrupadas en mensajes, pero estos tendrán un identificador diferente a los mensajes físicos.

Los mensajes transformados a CAN Virtual presentan una nomenclatura con un rango 700, manteniendo las dos segundas cifras iguales que los mensajes de CAN físicos.

```
$ candump can0 | grep 709
can0 709 [6] 7F FF 80 00 FD FF
can0 709 [6] 7F FF 80 00 FD FF
can0 709 [6] 7F FF FE FF FD FE
can0 709 [6] 7F FF FE FF FD FE
can0 709 [6] 7F FF FE FF FD FE
```

```
$ mosquitto_sub -t "CAN_EVENT/709"
can0 709 [6] 7F FF 80 00 FD FF
can0 709 [6] 7F FF 80 00 FD FF
can0 709 [6] 7F FF FE FF FD FE
can0 709 [6] 7F FF FE FF FD FE
can0 709 [6] 7F FF FE FF FD FE
```

Una vez se están transmitiendo todas las señales de CAN de forma periódica cada 50ms para poder analizar los mensajes BSM con todos los elementos actualizados procedemos a realizar la captura de mensajes mediante la herramienta *tcpdump*.

```
$ tcpdump -i lo -n "udp dst port 7943" -w /tmp/test1TFM.pcap
```

⁹ *Mosquitto* es un agente de mensajes de código abierto que implementa el protocolo MQTT - <https://mosquitto.org/>

¹⁰ *candump*: permite imprimir todos los datos que recibe una interfaz CAN.

Después de extraer el fichero test1TFM.pcap de la placa procedemos a analizar su contenido mediante la herramienta *caputre-app*, que tiene una función muy parecida a la herramienta Wireshark.

No.	Time	Capture Sender	Source	Destination	Protocol	Length
2	2020.02.25 07:53:21 +0100	10.0.0.1	00:00:00:86:06:95	FF:FF:FF:FF:FF:FF	bsm	303 bytes
5	2020.02.25 07:53:21 +0100	10.0.0.1	00:00:00:86:06:95	FF:FF:FF:FF:FF:FF	bsm	404 bytes
7	2020.02.25 07:53:22 +0100	10.0.0.1	00:00:00:86:06:95	FF:FF:FF:FF:FF:FF	bsm	303 bytes
9	2020.02.25 07:53:22 +0100	10.0.0.1	00:00:00:86:06:95	FF:FF:FF:FF:FF:FF	bsm	303 bytes
11	2020.02.25 07:53:22 +0100	10.0.0.1	00:00:00:86:06:95	FF:FF:FF:FF:FF:FF	bsm	303 bytes
14	2020.02.25 07:53:22 +0100	10.0.0.1	00:00:00:86:06:95	FF:FF:FF:FF:FF:FF	bsm	303 bytes
18	2020.02.25 07:53:22 +0100	10.0.0.1	00:00:00:86:06:95	FF:FF:FF:FF:FF:FF	bsm	404 bytes
21	2020.02.25 07:53:22 +0100	10.0.0.1	00:00:00:86:06:95	FF:FF:FF:FF:FF:FF	bsm	303 bytes
23	2020.02.25 07:53:22 +0100	10.0.0.1	00:00:00:86:06:95	FF:FF:FF:FF:FF:FF	bsm	303 bytes
25	2020.02.25 07:53:22 +0100	10.0.0.1	00:00:00:86:06:95	FF:FF:FF:FF:FF:FF	bsm	404 bytes
27	2020.02.25 07:53:23 +0100	10.0.0.1	00:00:00:86:06:95	FF:FF:FF:FF:FF:FF	bsm	303 bytes
29	2020.02.25 07:53:23 +0100	10.0.0.1	00:00:00:86:06:95	FF:FF:FF:FF:FF:FF	bsm	303 bytes
31	2020.02.25 07:53:23 +0100	10.0.0.1	00:00:00:86:06:95	FF:FF:FF:FF:FF:FF	bsm	303 bytes
35	2020.02.25 07:53:23 +0100	10.0.0.1	00:00:00:86:06:95	FF:FF:FF:FF:FF:FF	bsm	303 bytes
39	2020.02.25 07:53:23 +0100	10.0.0.1	00:00:00:86:06:95	FF:FF:FF:FF:FF:FF	bsm	404 bytes
41	2020.02.25 07:53:23 +0100	10.0.0.1	00:00:00:86:06:95	FF:FF:FF:FF:FF:FF	bsm	303 bytes
43	2020.02.25 07:53:23 +0100	10.0.0.1	00:00:00:86:06:95	FF:FF:FF:FF:FF:FF	bsm	303 bytes
45	2020.02.25 07:53:23 +0100	10.0.0.1	00:00:00:86:06:95	FF:FF:FF:FF:FF:FF	bsm	404 bytes

Figura. 48 Captura mensajes BSM enviados Carcom

En la Figura. 48 se puede observar un grupo de 45 mensajes BSM enviados por la placa Carcom de prueba.

El primer concepto que se puede comprobar a partir de la captura es la **periodicidad** de envío de mensajes BSM por parte de los vehículos, que según lo que indica la sección 5.2 del estándar SAE J2735 debe de ser de **10 mensajes por segundo** en condiciones de red sin saturación. A partir de dicha información, se procede a comprobar la cantidad de mensajes BSM que hemos capturado:

- Se puede observar en la Figura. 48 que entre los instantes 7:53:22 y 7:53:23 la placa envía un total de **8 mensajes** y si hacemos un barrido por los siguientes segundos se puede concluir que de media envía 8 mensajes BSM. Con esta información se ha podido comprobar que la periodicidad incluida en el estándar de manera teórica se cumpliría en un escenario real con una pequeña reducción de los mensajes enviados en función de la calidad y de la congestión de la red y del estado del resto de procesos del stack de comunicaciones integrado en la placa.

Por otro lado, se puede verificar el hecho de que los mensajes BSM son enviados en **broadcast**, ya que en la captura se puede observar cómo el origen de los mensajes es la MAC **00:00:00:86:06:95** y la MAC destino es **FF:FF:FF:FF:FF:FF**, siendo esta última la dirección para los envíos broadcast.

Una vez se han comprobado los dos puntos anteriores procedemos a analizar el contenido de los mensajes que se han capturado.

No.	Time	Capture Sender	Source	Destination	Protocol	Length
140	2020.02.25 07:53:28 +0100	10.0.0.1	00:00:00:86:06:95	FF:FF:FF:FF:FF:FF	bsm	303 bytes
142	2020.02.25 07:53:28 +0100	10.0.0.1	00:00:00:86:06:95	FF:FF:FF:FF:FF:FF	bsm	404 bytes
144	2020.02.25 07:53:28 +0100	10.0.0.1	00:00:00:86:06:95	FF:FF:FF:FF:FF:FF	bsm	303 bytes
146	2020.02.25 07:53:29 +0100	10.0.0.1	00:00:00:86:06:95	FF:FF:FF:FF:FF:FF	bsm	303 bytes
148	2020.02.25 07:53:29 +0100	10.0.0.1	00:00:00:86:06:95	FF:FF:FF:FF:FF:FF	bsm	303 bytes
150	2020.02.25 07:53:29 +0100	10.0.0.1	00:00:00:86:06:95	FF:FF:FF:FF:FF:FF	bsm	303 bytes
156	2020.02.25 07:53:29 +0100	10.0.0.1	00:00:00:86:06:95	FF:FF:FF:FF:FF:FF	bsm	404 bytes
159	2020.02.25 07:53:29 +0100	10.0.0.1	00:00:00:86:06:95	FF:FF:FF:FF:FF:FF	bsm	303 bytes
161	2020.02.25 07:53:29 +0100	10.0.0.1	00:00:00:86:06:95	FF:FF:FF:FF:FF:FF	bsm	303 bytes
163	2020.02.25 07:53:29 +0100	10.0.0.1	00:00:00:86:06:95	FF:FF:FF:FF:FF:FF	bsm	404 bytes
165	2020.02.25 07:53:29 +0100	10.0.0.1	00:00:00:86:06:95	FF:FF:FF:FF:FF:FF	bsm	292 bytes

▶ ethernet: Ethernet II
 ▶ ipv4: IPv4
 ▶ udp: User Datagram Protocol
 ▶ ieee80211: IEEE 802.11
 ▶ llc: Logical Link Control
 ▶ wsm: Wave Short Message (2015)
 ▶ ieee1609dot2: IEEE 1609.2 Security Header

Figura. 49 Protocolos aplicados a los mensajes BSM

Según lo comentado en el capítulo 3.2.3 con relación a la estandarización y en el capítulo 4.3.1 sobre los mensajes BSM, este tipo de aplicaciones deben seguir los protocolos definidos por el SAE J2735 y el IEEE 1609.X. Como se puede observar en la parte inferior de la Figura. 49 aparecen los protocolos que aplican para los mensajes de tipo BSM, **IEEE 802.11**, **wsm – Wave Short Message** y **IEEE 1609.2**. IEEE 1609.2 hace referencia a los servicios de seguridad para aplicaciones y administración de mensajes, por lo que los elementos del BSM, que aparecen detallados en el Anexo A – Contenido mensaje BSM, los encontraremos desplegando este protocolo.

Para evitar que un atacante inyecte mensajes falsos en la red o intercepte mensajes BSM de forma maliciosa, todos los vehículos firman los datos utilizando su clave privada y cuando el receptor recibe el mensaje firmado, este verifica la firma del mensaje utilizando la clave pública del remitente para asegurarse de que el mensaje no haya sido alterado. En la Figura. 50 se puede comprobar como los mensajes que están siendo enviados por la placa van correctamente firmados con *ecdsaNistP256Signature*:

- **ECDSA¹¹** - *Elliptic Curve Digital Signature Algorithm* basado en el algoritmo de firma digital.
- **NIST P-256¹²** – proporciona 128 bits de seguridad.
- **ECC¹³** - *Elliptic curve cryptography*

¹¹ ECDSA <https://academy.bit2me.com/que-es-ecdsa-curva-eliptica/>

¹² NIST P-256 <https://safecurves.cr.yt.to/>

¹³ ECC <https://hackernoon.com/what-is-the-math-behind-elliptic-curve-cryptography-f61b25253da3>



Figura. 50 IEEE 1609.2 SignedData

En este punto de la evaluación experimental y teniendo en cuenta las señales de CAN que se han inyectado en la placa (Tabla. 10) procedemos a verificar que los elementos del mensaje BSM asociados a cada una de las señales se han actualizado correctamente.

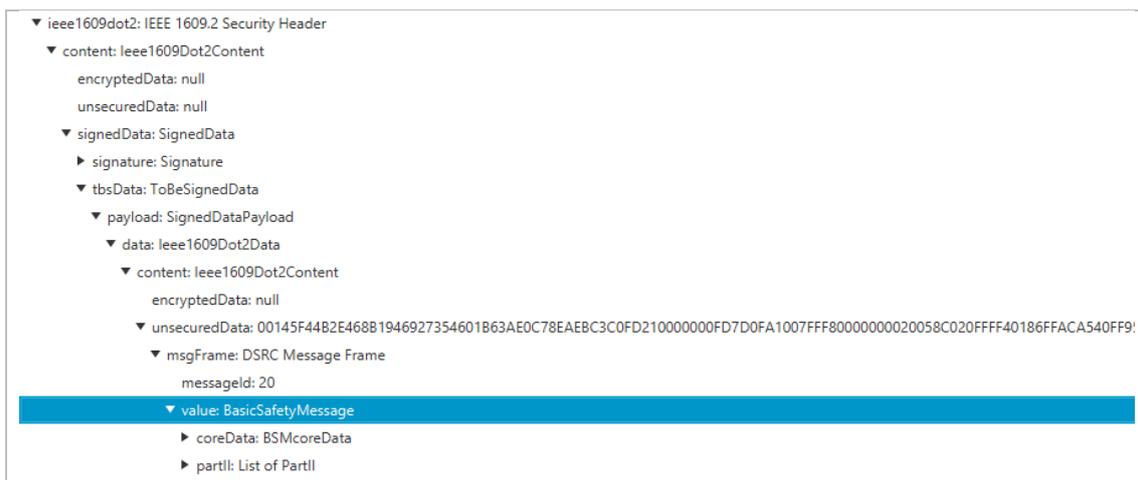


Figura. 51 Contenido mensaje BSM

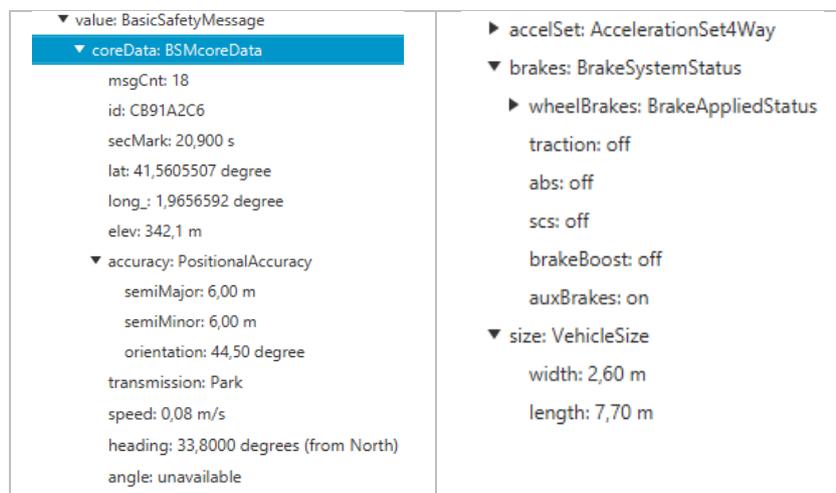


Figura. 52 BSM Parte I – CoreData

La Figura. 52 muestra la Parte I – *CoreData* del mensaje BSM la cual contiene los elementos de datos básicos críticos que se consideran necesarios en cada BSM emitido, con lo que su presencia es obligatoria en todos los mensajes. La información extraída abalizando los elementos que contiene el CoreData en relación con el estándar SAE J2735 se ha distribuido en las siguientes tablas en función de su clasificación:

La siguiente tabla muestra los valores relacionados con el contador de mensajes, identificador y secuencia incluidos en los mensajes BSM:

Elemento	Valor	Descripción
msgCnt	18	Proporciona un número de secuencia dentro de una secuencia de mensajes con el mismo DSRCmsgID y del mismo remitente
Id	C891A2C6	Este valor cambiará periódicamente para garantizar el anonimato general del vehículo
secMark	20.900s	

Tabla. 13 BSM Core Data – Elementos identificación de mensajes BSM

Los elementos con Información proveniente de GNSS se muestran en la Tabla. 14:

Elemento	Valor	Descripción
Lat	41. 5605507°	Ubicación geográfica de Viladecavalls, donde se han realizado las pruebas.
Long	1. 9656592°	
Elev	342.1 m	
Accuracy: PositionalAccuracy		
semiMajor	6.00 m	Precisión esperada del sistema GNSS
semiMinor	6.00 m	
orientation	44.50°	

Tabla. 14 BSM Core Data – Elementos BSM con información GNSS

Los elementos con información de señales CAN se muestran en la Tabla. 15:

Elemento	Valor	Descripción
Transmission	Park	Estado actual de la transmisión del vehículo es aparcado
Speed	0.08 m/s – 28.8 km/h	Velocidad expresada en unidades de 0.02 metros por segundo
Heading	33.800°	Rumbo 33.800°
Angle	unavailable	No disponible ya que no se ha inyectado ninguna señal que actualice este elemento.
wheelBrakes: BrakeAppliedStatus		
Traction	OFF	Control de tracción desactivado
ABS	OFF	ABS desactivado
SCS	OFF	Control de estabilidad desactivado
brakeBoost	OFF	Refuerzo de freno desactivado
auxBrakes	ON	Frenos auxiliares activados
Size: vehicleSize		
width	2.6 m	2.6m de ancho
length	7.70 m	7.70m de largo

Tabla. 15 BSM Core Data – Elementos BSM con información de señales CAN

<ul style="list-style-type: none"> ▼ partII_Value: VehicleSafetyExtensions <ul style="list-style-type: none"> ▼ events: VehicleEventFlags <ul style="list-style-type: none"> eventStabilityControlActivated: false eventDisabledVehicle: true eventAirBagDeployment: true eventABSActivated: false eventReserved1: false eventWipersChanged: false eventHazardLights: true eventLightsChanged: true eventHardBraking: false eventHazardousMaterials: true eventStopLineViolation: true eventTractionControlLoss: false eventFlatTire: false 	<ul style="list-style-type: none"> ▼ pathHistory: PathHistoryUS <ul style="list-style-type: none"> initialPosition: null currGNSSStatus: null ▶ crumbData: List of PathHistoryPoint ▼ pathPrediction: PathPrediction <ul style="list-style-type: none"> radiusOfCurve: straight confidence: 100,0% ▼ lights: ExteriorLightsUS <ul style="list-style-type: none"> hazardSignalOn: true highBeamHeadlightsOn: false leftTurnSignalOn: false lowBeamHeadlightsOn: false rightTurnSignalOn: false parkingLightsOn: true automaticLightControlOn: false daytimeRunningLightsOn: true fogLightOn: true
--	--

Figura. 53 BSM Parte II – *VehicleSafetyExtensions*

VehicleSafetyExtensions forma parte de la segunda parte de los mensajes BSM, la cual tiene una presencia totalmente opcional, es decir si ninguno de sus elementos está siendo modificado por alguna señal de CAN no tiene por qué aparecer en los mensajes BSM enviados.

En la Figura. 53 se pueden observar los elementos que constituyen la segunda parte del BSM, concretamente la de *VehicleSafetyExtensions*. De la figura se puede extraer la siguiente información:

- **Events:VehicleEventFlags:** para cada evento el remitente tiene la opción de establecer el marcador a 1 (true) si se cumplen los criterios establecidos, es decir si ha habido cambio en el estado de alguno de los eventos.
- **Lights: ExteriorLights:** teniendo en cuentas las señales inyectadas (*Left/Right Turn Signal, Hazard Lights On* y *Parking Lights On*) se puede observar que:
 - **hazardSignalOn:** true
 - **leftTurnSignalOn:** false, **rightTurnSignalOn:** false
 - **parkingLightsOn:** true

Una vez analizados los elementos que se han visto modificados por las señales de CAN, se puede asimilar mejor el funcionamiento de los eventos con las siguientes relaciones:

EventHazardLights: true → *hazardSignalOn: true*
EventLightChanged: true → *hazardSignalOn: true, parkingLightsOn: true*

<ul style="list-style-type: none"> ▼ partII_Value: SupplementalVehicleExtensions <ul style="list-style-type: none"> classification: 0 ▼ classDetails: VehicleClassification <ul style="list-style-type: none"> keyType: 0 role: basicVehicle iso3883: null hpmsType: axleCnt7MultiTrailer vehicleType: null responseEquip: ground_fire_suppression responderType: null fuelType: null regional: null 	<ul style="list-style-type: none"> ▼ vehicleData: VehicleData <ul style="list-style-type: none"> height: 6,30 m ▼ bumpers: BumperHeights <ul style="list-style-type: none"> front: 126 rear: 126 mass: 254 trailerWeight: null ▼ weatherReport: WeatherReport <ul style="list-style-type: none"> isRaining: precip rainRate: 65534 precipSituation: frozenPrecipitationHeavy solarRadiation: 65534 friction: 100 roadFriction: 1,00 micro
<ul style="list-style-type: none"> ▼ weatherProbe: WeatherProbe <ul style="list-style-type: none"> airTemp: 86 °C airPressure: 1088 hPa ▼ rainRates: WiperSet <ul style="list-style-type: none"> statusFront: automaticPresent rateFront: 126 statusRear: automaticPresent rateRear: 126 	<ul style="list-style-type: none"> ▼ obstacle: ObstacleDetection <ul style="list-style-type: none"> obDist: 225 obDirect: 225 description: null locationDetails: null

Figura. 54 BSM Part II – SupplementalVehicleExtensions

SupplementalVehicleExtensions es un marco de datos opcional que forma parte de la segunda parte de los mensajes BSM. De la Figura. 54 se puede extraer la información relacionada con las señales de CAN utilizadas.

En la siguiente tabla se muestran los valores extraídos del BSM de los elementos relacionados con la clasificación de vehículos:

classDetails: VehicleClassification		
Elemento	Valor	Descripción
classification	0	El valor de estos elementos según el estándar SAE J2735 equivale a unknownVehicleClass , no equipado o no disponible.
keyType	0	
Role	basicVehicle	Tipo de vehículo de pasajeros ligero (SAE J2735).
hpmsType	axleCnt7MultiTrailer	Indica el tipo de vehículo, en este caso es un remolque múltiple de 7 o más ejes.
responseEquip	ground_fire_suppression	Tipo de vehículo de bomberos (SAE J2735).

Tabla. 16 BSM Parte II – Elementos BSM para la clasificación de vehículos

En la Tabla. 17 se resumen los valores de los datos del vehículo extraídos del BSM:

VehicleData: vehicleData		
Elemento	Valor	Descripción
Height	6.30 m	Valor máximo definido en el SAE J2735
BumpersHeight Front	126 – 1.2m	Indica la altura de los parachoques y el valor del BSM se tiene que transformar según 0.01m la unidad (SAE J2735):
BumpersHeight Rear	126 – 1.2m	
Mass	254	Es el valor máximo de peso aceptado por el SAE J2735 y equivale a 170.000 kg.

Tabla. 17 BSM Parte II – Elementos BSM con los datos del vehículo

En la Tabla. 18 aparecen los valores de la información meteorológica que aparecen en los mensajes BSM:

WeatherReport: weatherReport		
Elemento	Valor	Descripción
IsRaining	Precip	Indica que el sensor de lluvia se ha activado
rainRate	65534 – 23592.24mm/h	Valor máximo aceptado por el SAE J2735 y hace referencia a la precipitación equivalente de agua o nieve. Para lluvia una unidad equivale a 0.36mm/hr.
precipSituation	frozenPrecipitationHeavy	Corresponde con el valor máximo (15) para la situación de precipitación.
solarRadiation	65534 J/m2	Radiación solar directa integrada durante 24h
friction	100%	Valor máximo permitido según el estándar
roadFriction	1.00 micro	Valor máximo permitido (50) y hace referencia al coeficiente de fricción entre el vehículo y la carretera.
WeatherProbe: weatherProbe		
airTemp	86°	Equivale a 46° , ya que el estándar indica que este elemento tiene un offset de -40°C.
airPressure	1088 hPa	Valor de la presión biométrica
rainRates: WiperSet		
statusFront	automaticPresent	Limpiador automático
statusRear	automaticPresent	
rateFront	126	126 barridos por minuto
rateRear	126	

Tabla. 18 BSM Parte II – Elementos BSM con información meteorológica

La Tabla. 19 muestra la información relacionada con la detección de obstáculos y peligros en carretera contenida en un mensaje BSM:

ObstacleDetection		
Elemento	Valor	Descripción
obDist	255 m	Distancia y dirección del obstáculo desde la perspectiva del vehículo.
obDirect	255 m	

Tabla. 19 BSM Parte II – Elementos BSM con información de detección de obstáculos en carretera



Figura. 55 BSM Part II – SpecialVehicleExtensions

SpecialVehicleExtensions es un marco de datos opcional que forma parte de la segunda parte de los mensajes BSM. De la Figura. 55 se puede extraer la información relacionada con las alertas de los vehículos de emergencia (Tabla. 20) de los elementos que se han actualizado con las señales de CAN:

vehicleAlerts: EmergencyDetails		
Elemento	Valor	Descripción
sspRights	10	
sirenUse	notInUse	Se establece si se emite algún tipo de alarma sonora o luminosa desde el vehículo. Asociados a vehículos de emergencia.
lightsUse	notInUse	
multi	singleVehicle	Indica a otros vehículos que más de un vehículo puede estar convergiendo en la misma ubicación.

Tabla. 20 BSM Parte II – Elementos BSM con información de vehículos de emergencia

De manera adicional y con menor nivel de detalle, se adjunta a continuación una captura de mensajes de tipo CAM y de su contenido.

No.	Time	Capture Sender	Source	Destination	Protocol	Length
307	2020.02.24 11:22:04 +0100	10.0.0.1	00:00:07:89:00:00:07:89	Unknown	cam	177 bytes
311	2020.02.24 11:22:04 +0100	10.0.0.1	00:00:01:23:00:00:01:23	Unknown	cam	177 bytes
329	2020.02.24 11:22:05 +0100	10.0.0.1	00:00:07:89:00:00:07:89	Unknown	cam	177 bytes
331	2020.02.24 11:22:05 +0100	10.0.0.1	00:00:01:23:00:00:01:23	Unknown	cam	177 bytes
347	2020.02.24 11:22:06 +0100	10.0.0.1	00:00:07:89:00:00:07:89	Unknown	cam	177 bytes
351	2020.02.24 11:22:06 +0100	10.0.0.1	00:00:01:23:00:00:01:23	Unknown	cam	177 bytes
366	2020.02.24 11:22:07 +0100	10.0.0.1	00:00:07:89:00:00:07:89	Unknown	cam	177 bytes
369	2020.02.24 11:22:07 +0100	10.0.0.1	00:00:01:23:00:00:01:23	Unknown	cam	177 bytes
386	2020.02.24 11:22:08 +0100	10.0.0.1	00:00:07:89:00:00:07:89	Unknown	cam	177 bytes
390	2020.02.24 11:22:08 +0100	10.0.0.1	00:00:01:23:00:00:01:23	Unknown	cam	177 bytes
406	2020.02.24 11:22:09 +0100	10.0.0.1	00:00:07:89:00:00:07:89	Unknown	cam	177 bytes

Figura. 56 Mensajes CAM capturados

Para el caso de los mensajes CAM, se puede observar en la Figura. 56 que la cadencia de envío es de 1 mensaje por segundo y además en este caso, desde la placa de prueba con MAC 00:00:00:86:06:95 estamos recibiendo mensajes CAM de dos emisores: 00:00:00:07:89:00 y 00:00:00:01:23:00.

Teniendo en cuenta la descripción de los mensajes CAM analizada en el capítulo 4.3.2, la estructura de los mensajes CAM capturados coincide con la que muestra la Figura. 30.

<ul style="list-style-type: none"> ▼ basicHeader: Basic Header <ul style="list-style-type: none"> version: 0b0001 / 1 nH: Common Header reserved: 0x00 / 0 lifetimeMultiplier: 0b000001 / 1 lifetimeBase: 1 s rh: 0x01 / 1 	<ul style="list-style-type: none"> ▼ commonHeader: Common Header <ul style="list-style-type: none"> nH: BTP-B reserved1: 0b0000 / 0 headerType: tsb headerSubType: TSB Single-hop scf: false channelOffload: false tcId: 0b000010 / 2 mobile: true flagsReserved: 0b0000000 / 0 length: 0x002F / 47 mhl: 0x01 / 1 reserved2: 0x00 / 0 	<ul style="list-style-type: none"> ▼ shb: Single Hop Broadcast <ul style="list-style-type: none"> ▼ sourcePositionVector: Source position vector <ul style="list-style-type: none"> ▼ gnAddr: GeoNetworking Address <ul style="list-style-type: none"> M: false ST: Unknown SCC: 0b0000000000 / 0 MID: 07:89:00:00:07:89 tst: 2.818.390.972 ms lat: 41,5605121 degree lon: 1,9656701 degree pai: false speed: 0,00 m/s heading: 127,2 degrees (from North) reserved: 0x00000000 / 0
--	---	--

Figura. 57 Contenido mensaje CAM

A pesar de que en el presente documento se ha incluido una sola muestra de valores de los elementos del mensaje BSM, a lo largo de la evaluación experimental sobre el entorno V2X, se han realizado pruebas con diferentes valores para las señales de CAN utilizadas, probando valores mínimos, máximos y no disponibles siguiendo el estándar SAE J2735.

Hay que tener en cuenta que, en este caso, al tratarse de un experimento realizado fuera de vehículo en condiciones de prueba, las señales de CAN se han inyectado de manera manual a la placa, pero en un escenario real en vehículo, las diferentes señales que recibirá la placa provendrán de las diferentes unidades telemáticas (ECUs) que tendrá instaladas el vehículo.

Con esta evaluación se ha podido demostrar que la información contenida en el estándar SAE J2735 es posible implementarla en un sistema de comunicaciones vehiculares real, y que se cumplen los rangos de cada uno de los elementos. La información contenida en cada uno de los BSMs que envían los vehículos es de gran utilidad, ya que esta información es procesada por todos los vehículos que se encuentran dentro del rango de comunicación para generar alertas de seguridad a los conductores y reducir así la siniestralidad vial.

6.2. Valoración económica de la evaluación experimental

Esta sección presenta una estimación de los gastos asociados al equipamiento necesario para la realización de la evaluación experimental de análisis de mensajes BSM.

En la siguiente tabla se muestra un resumen del presupuesto para las pruebas realizadas:

Concepto	Cantidad	Precio	Total
OBU Carcom	1	1.000,00 €	1.000,00 €
Antenas	6	12,00 €	72,00 €
KVASER	1	275,00 €	275,00 €
Fuente alimentación	1	110,00 €	110,00 €
Cable UART	1	22,58 €	22,58 €
Ordenador	1	650,00 €	650,00 €
Cable alimentación	1	15,00 €	15,00 €
Cable CAN	1	20,00 €	20,00 €
Ingeniero	40h	50,00 €/h	2.000,00 €
Total			4.164,58 €

Tabla. 21 Presupuesto para la realización de las pruebas

7. Conclusiones

Después de realizar un análisis exhaustivo de las dos tecnologías punteras para comunicaciones vehiculares, Cellular-V2X y DSRC, a partir de la información contrastada tanto a nivel tecnológico como económico ha sido posible determinar cuál de las dos está mejor posicionada a nivel mundial.

A pesar de que DSRC se desarrolló antes, en 1999 en Estados Unidos y en 2003 en Europa y Japón y que muchas organizaciones optaron por su utilización para la implantación del vehículo conectado, la entrada disruptiva de C-V2X en el mercado ha dejado a la tecnología DSRC en la cuerda floja.

El hecho de que DSRC requiera desplegar infraestructura dedicada tanto a nivel de vehículo con las OBU's como a nivel de carreteras con las RSUs incrementa sustancialmente el coste de despliegue e implantación de esta tecnología. Sin embargo, C-V2X puede aprovechar la infraestructura de red móvil existente, teniendo así un mayor alcance y mayor cobertura, ya que las redes móviles están mundialmente desplegadas ya.

Mediante el capítulo de Expansión geográfica nos hemos podido llevar una idea de que tecnología tiene más peso actualmente, ya que viendo el mapa de expansión actual de C-V2X coincide con las ubicaciones de los principales fabricantes de vehículos, así como de sus factorías, que no tiene porque siempre coincidir. Además, analizando la influencia global actual de DSRC se han encontrado comunicados de fabricantes que habían optado por DSRC que se han retractado y empezaron a implantar en los próximos años la tecnología.

A pesar de que las *releases* actuales de C-V2X presentan un nivel menor de interoperabilidad entre fabricantes que el IEEE 802.11p, el 3GPP está trabajando en nuevas categorías para mejorar esta limitación, el hecho de contar con dos modos de comunicación complementarios que permiten tanto comunicaciones de corto alcance como de largo alcance posiciona mejor tecnológicamente a C-V2X frente a DSRC.

Mediante la evaluación experimental se ha podido demostrar que no existe limitación tecnológica para desarrollar plataformas V2X que cumplan con los estándares definidos. Se ha demostrado que con las plataformas V2X existentes sería posible la comunicación entre vehículos, ya que el envío de mensajes, BSM y CAM en este caso, es viable y se ha validado y cumple con las especificaciones del estándar SAE J2735.

En cuanto a la viabilidad de desarrollo de estas tecnologías (C-V2X y DSRC) sobre las redes actuales, mediante el análisis de la información existente se puede concluir que las redes 4G LTE actuales serían capaces de soportar las primeras fases de despliegue de plataformas C-V2X para el vehículo conectado, sin embargo, de cara a despliegues masivos de plataformas V2X los requisitos de las redes 4G LTE serían limitados en cuanto a capacidad, latencia, velocidad y rendimiento. En cambio, las redes 5G NR serían capaces de soportar las comunicaciones de cerca de un millón de dispositivos con volúmenes de tráfico sin precedentes, con una eficiencia espectral de área enorme

(cientos de bits/s/Hz/km²), un rendimiento muy alto por dispositivo, latencias muy bajas y una alta confiabilidad, mejorando así la experiencia del usuario.

Teniendo en cuenta que no todas las regiones se decantan por la misma tecnología y que los fabricantes de vehículos tampoco están llegando a un consenso en cuanto a que tecnología utilizar, la solución de cara a futuro, donde la mayoría de los vehículos deberían ser capaces de comunicarse con el ecosistema, sería desarrollar una plataforma híbrida de V2X que sea capaz tanto de transmitir a través de C-V2X como DSRC. Con esta solución se erradicaría la problemática del despliegue desigual de plataformas DSRC y C-V2X a pesar de que el coste de desarrollo se vería incrementado.

El proyecto podría seguir desarrollándose a través de las siguientes líneas futuras:

- Investigar más desarrollos y demostraciones de V2X sobre redes 5G.
- Investigar avances *Release 16* y *Release 17* 3GPP
- Pruebas de concepto con más vehículos para validar el máximo de mensajes de seguridad que puede procesar la plataforma.
- Pruebas experimentales sobre redes 5G.
- Interoperabilidad entre plataformas DSRC y C-V2X.

8. Acrónimos

3GPP Third Generation Partnership Project	D2D Device to Device
4G 4th Generation Mobile Communication Technology	DBC Data Base CAN
5G 5th Generation Mobile Communication Technology	DCI Downlink Control Information
5G NR 5th Generation New Radio	DENM Decentralized Environmental Notification Message
5GAA 5G Automotive Association	DL Downlink
5GC 5G Core Network	DMRS Demodulation Reference Signal
5G-D2D 5th Generation Device to Device	DSRC Direct Short Range Communications
5G-V2X 5th Generation Vehicle to Everything	ECC Elliptic Curve Cryptography
ABS Antilock Brake System	ECDSA Elliptic Curve Digital Signature Algorithm
ADAS Advanced Driver Assistance Systems	ECU Electronic Control Unit
AMF Access and Mobility Function	EDCA Enhanced Distributed Channel Access
AP Access Point	EE. UU Estados Unidos
AS Application Server	EEBL Emergency Electric Brake Light Warning
BSM Basic Safety Message	eMBB Enhanced Mobile Broadband
BSW Blind Spot Warning	EN European Standards
CAM Cooperative Awareness Message	EPC Evolved Packet Core
CAN Communication Area Network	ERAB E-UTRAN Radio Access Bearer
CCH Control Channel	ETSI European Telecommunications Standards Institute
CCT Can Configuration Table	EU European Union
CDMA Code Division Multiple Access	E-UTRAN Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network
CDOT Colorado Department of Transportation	FCC Federal Communications Commission
C-ITS Cooperative Intelligent Transportation Systems	FCW Forward Collision Warning
CLW Control Loss Warning	GNSS Global Navigation Satellite System
ConVeX Connected Vehicle to Everything of Tomorrow	GPRS General Packet Radio Service
CP Control Plane	GSM Global System for Mobile
CSMA/CA Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance	HARQ Hybrid Automatic Repeat Request
CSW Curve Speed Warning	HSS Home Subscriber Server
CUPS Control User Plane Split	IA Inteligencia Artificial
C-V2X Cellular Vehicle to Everything	ICV Intelligent and Connected Vehicles

iDEN Integrated Digital Enhanced Network

IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers

IMA Intersection Movement Assistant

IMT International Mobile Telecommunications

IoT Internet of Things

ITS Intelligent Transportation Systems

ITU International Telecommunications Union

KPI Key Performance Indicators

LCW Lane Change Warning

LIDAR Light Detection and Ranging

LTA Left Turn Assist

LTE Long Term Evolution

LTE-D2D Long Term Evolution Device to Device

LTE-V2X Long Term Evolution vehicle to everything

M2M Machine to Machine

MAC Media Access Control

MANET Mobile Ad-hoc Network

MAP Map Data Message

MEC Mobile Edge Computing

MIMO Multiple Input Multiple Output

MME Mobility Management Entity

mMTC Massive Machine Type Communications

MNO Mobile Network Operators

MQTT Message Queue Telemetry Transport

MWC Mobile World Congress

NAK Negative Acknowledgement

NB-IoT Narrow Band Internet of Things

NDRC National Development and Reform Commission

NF Network Functions

NFV Network Function Virtualization

NG-RAN Next Generation - Radio Access Network

NGV Next Generation V2X

NHTSA National Highway Traffic Safety Administration

NIST National Institute of Standards and Technology

NSA Non Stand Alone

OBU On Board Unit

OEM Original Equipement Manufacturer

OFDM Orthogonal Frequency Division Multiplexing

OFDMA Orthogonal Frequency-Division Multiple Access

OID Object Identifier

OSI Open Systems Interconnection

OUI Organizational Unique Identifier

PDM Probe Data Management

PDSCH Physical Downlink Shared Channel

P-GW Packet Data Network Gateway

PSCCH Physical Sidelink Control Channel

PSID Provider Service Identifier

PSM Personal Safety Message

PVD Probe Vehicle Data

QoE Quality of Experience

QoS Quality of Service

RADAR Radio Detection and Ranging

RB Resource Blocks

RF Radiofrequency

RSSI Received Signal Strength Indicator

RSU Road Side Unit

RTC Regional Transportation Commission

SA Stand Alone

SBA Service Based Architecture

SCH Service Channel

SDN Software Defined Networks

SFN Single Frequency Network

S-GW Serving Gateway
SIB System Information Blocks
SIM Subscriber Identity Module
SMF Session Management Function
SNCF Société nationale des chemins de fer français
SOA Service Oriented Architecture
SPAT Signal Phase and Timing
SPS Semi Persistent Schedule
SR Scheduling Request
TAC Transport Accident Commission
TDMA Time Division Multiple Access
TIM Traveler Information Message
UE User Equipement
UL Uplink
UP User Plane
uRLLC Ultra Reliable Low Latency Communications
USA United States of America
USDOT United States Department of Transportation
UTRAN UMTS Terrestrial Radio Access Network
V2I Vehicle to Infraestructura
V2N Vehicle to Network
V2P Vehicle to Pedestrian
V2V Vehicle to Vehicle
V2X Vehicle to Everything
VANET Vehicular Ad-hoc Network
VCAN Virtual Communication Area Network
VIN Vehicle Identification Number
VRU Vulnerable Road Users
WAVE Wireless Access Vehicular Environments
WBSS WAVE Basic Service Set
WLAN Wireless Local Area Network
WSM Wave Short Message
WSMP WAVE Short Message
ZBE Zona de Bajas Emisiones

9. Bibliografía

- [1]. R. Molina-Masegosa, "Gestión de recursos radio en comunicaciones vehiculares V2X basadas en LTE," Revista Doctorado UMH, vol. 3, no. 2, p5, 2017. [Online].
- [2]. <https://www.rcrwireless.com/20200206/analyst-angle/c-v2x-5g-transform-cars-analyst-angle> [último acceso: 11/06/2020]
- [3]. <https://www.its.dot.gov/factsheets/pdf/ConnectedVehicleBenefits.pdf> [último acceso: 11/06/2020]
- [4]. <https://www.blinker.es/blog/coches-conectados-ventajas/> [último acceso: 11/06/2020]
- [5]. <https://www.vidasostenible.org/como-funcionan-en-europa-las-zonas-de-bajas-emisiones/> [último acceso: 11/06/2020]
- [6]. <https://valenciacars.blogspot.com/2020/01/retos-desafios-2020-vehiculos-conectado.html> [último acceso: 11/06/2020]
- [7]. Michelle X. Gong and Shiwen Mao, "An Overview of 3GPP Cellular Vehicle-to-Everything Standards", Publication ResearchGate, September 2017, Vol. 21, Issue 3
- [8]. <https://riunet.upv.es/> [último acceso: 11/06/2020]
- [9]. http://gaia.fdi.ucm.es/files/research/tesis/examples/2011_PicazoSanchez.pdf [último acceso: 11/06/2020]
- [10]. <https://www.slideshare.net/mpodini/5g-and-v2x-automotive-slicing> [último acceso: 11/06/2020]
- [11]. <https://www.tendencias.kpmg.es/2019/02/claves-automocion-2019/> [último acceso: 11/06/2020]
- [12]. <https://whatis.techtarget.com/definition/dedicated-short-range-communication-DSRC> [último acceso: 11/06/2020]
- [13]. <https://www.everythingrf.com/community/what-is-dsrc> [último acceso: 11/06/2020]
- [14]. <http://openaccess.uoc.edu/webapps/o2/bitstream/10609/92186/3/rlrgTFM0119memoria.pdf> [último acceso: 11/06/2020]
- [15]. <https://www.auto-talks.com/technology/dsrc-vs-c-v2x-2/> [último acceso: 11/06/2020]
- [16]. <https://www.eetasia.com/news/article/EU-to-Debate-DSRC-vs-C-V2X> [último acceso: 11/06/2020]
- [17]. <https://www.infopulse.com/blog/c-v2x-technology-revolutionizing-transportation-and-empowering-smart-cities/> [último acceso: 11/06/2020]
- [18]. <https://www.qualcomm.com/media/documents/files/accelerating-c-v2x-commercialization.pdf> [último acceso: 11/06/2020]
- [19]. 5GAA, "5GAA V2X Terms and Definitions" 5GAA TR A-170188 Technical Report, septiembre 2017
- [20]. Marica Amadeo, Claudia Campolo, Antonella Molinaro, Jerome Harri, Christian Esteve Rothenberg and Alexey Vinel, "Enhancing the 3GPP V2X Architecture with Information-Centric Networking", *future internet*, pp. 1-19, octubre 2019
- [21]. https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/133058/TFM_Leandro_Lopez.pdf [último acceso: 11/06/2020]
- [22]. Qualcomm, "Cellular-V2X Technology Overview", Article 80-PE732-63 Rev B
- [23]. Maxime Flament, "Path towards 5G for the automotive sector", 5GAA, 17 Oct 2018
- [24]. 5G Americas White Paper, "Cellular V2X Communications Towards 5G", March 2018
- [25]. http://read.nxtbook.com/peerless_media/digital_engineering/september_2018/the_v2x_standards.html [último acceso: 11/06/2020]
- [26]. <https://www.3gpp.org/v2x> [último acceso: 11/06/2020]
- [27]. 3GPP, "LTE; Service requirements for V2X services", 3GPP TS 22.185 version 14.3.0 Release 14, March 2017
- [28]. <https://ideas.pwc.es/> [último acceso: 11/06/2020]

- [29]. <https://www.networkworld.es/telecomunicaciones/convex-prueba-la-interoperabilidad-directa-en-cv2x-entre-motocicletas-vehiculos-e-infraestructura> [último acceso: 11/06/2020]
- [30]. <https://www.traffictoday.com/news/connected-vehicles-infrastructure/5gaa-says-c-v2x-is-ready-to-roll-out-globally-this-year.html> [último acceso: 11/06/2020]
- [31]. <https://www.qualcomm.com/news/onq/2020/03/31/how-nr-based-sidelink-expands-5g-c-v2x-support-new-advanced-use-cases> [último acceso: 11/06/2020]
- [32]. <https://www.qualcomm.com/news/onq/2020/01/07/c-v2x-momentum-and-future-smart-mobility> [último acceso: 11/06/2020]
- [33]. <https://www.qualcomm.com/media/documents/files/c-v2x-technology-overview.pdf/news/onq/2018/11/01/2019-will-see-commercial-c-v2x-rollouts-throughout-world> [último acceso: 11/06/2020]
- [34]. 5GAA, Dr Dang Xiang, "Update on C-V2X deployment in China", May 2019
- [35]. <https://www.fiercewireless.com/wireless/qualcomm-audi-to-conduct-c-v2x-pilot-virginia-roads> [último acceso: 11/06/2020]
- [36]. <https://www.5gamerica.org/audi-qualcomm-and-virginia-dot-to-deploy-c-v2x/> [último acceso: 11/06/2020]
- [37]. <https://www.traffictoday.com/news/connected-vehicles-infrastructure/las-vegas-to-pilot-c-v2x-communications-with-commsignia-and-qualcomm.html> [último acceso: 11/06/2020]
- [38]. <https://www.codot.gov/programs/operations/intelligent-transportation-systems/innovation/connected-vehicles> [último acceso: 11/06/2020]
- [39]. <https://www.ficosa.com> [último acceso: 11/06/2020]
- [40]. <https://www.fiercewireless.com/wireless/qualcomm-ford-and-panasonic-mark-first-u-s-deployment-c-v2x> [último acceso: 11/06/2020]
- [41]. <https://aegfanews.com/tecnologia/634-primera-prueba-en-espana-de-comunicacion-vehicular-c-v2x-en-entorno-real> [último acceso: 11/06/2020]
- [42]. <https://www.xataka.com/automovil/coches-ciudades-han-comenzado-hablar-espana-asi-arrancan-primeras-comunicaciones-v2x> [último acceso: 11/06/2020]
- [43]. <https://www.telefonica.com/es/web/sala-de-prensa/-/el-laboratorio-i-d-mas-avanzado-al-sur-de-europa-para-la-conduccion-conectada-impulsado-por-telefonica-y-dekra-abre-sus-puertas-en-malaga-y-ofrece-ya-> [último acceso: 11/06/2020]
- [44]. <https://www.greencarcongress.com/2018/12/20181214-cv2xjapan.html> [último acceso: 11/06/2020]
- [45]. <https://www.traffictoday.com/news/connected-vehicles-infrastructure/australia-starts-first-on-road-tests-of-cellular-v2x-technology-in-victoria.html> [último acceso: 11/06/2020]
- [46]. <https://www.safercar.gov/Vehicle+Shoppers/Safety+Technology/fcw/> [último acceso: 11/06/2020]
- [47]. SAE J2945," On-Board System Requirements for V2V Safety Communications", marzo 2016
- [48]. SAE J2735," On-Board System Requirements for V2V Safety Communications", marzo 2016
- [49]. <https://local.iteris.com/cvria/html/applications/applications.html> [último acceso: 11/06/2020]
- [50]. <https://www.semiconductorstore.com/blog/2018/From-Digi-How-to-Pick-the-Right-4G-LTE-Technology-for-Your-Business-Needs-and-Applications/3442/> [último acceso: 11/06/2020]
- [51]. https://ec.europa.eu/transport/themes/its/c-its_en [último acceso: 11/06/2020]
- [52]. <http://intotally.com/tot4blog/2013/07/11/lte-for-beginners-day-2-brief-description-about-lte-network-architecture/?lang=es> [último acceso: 11/06/2020]

- [53]. https://www.researchgate.net/publication/258841686_Performance_of_Vehicle-to-Vehicle_Communication_using_IEEE_80211p_in_Vehicular_Ad-hoc_Network_Environment/figures?lo=1 [último acceso: 11/06/2020]
- [54]. <https://www.fcc.gov/wireless/bureau-divisions/mobility-division/dedicated-short-range-communications-dsrc-service> [último acceso: 11/06/2020]
- [55]. http://www.cts.virginia.edu/wp-content/uploads/2018/12/Task3-Standards-and-Related-Activities-Whitepaper-20180425_Final.pdf [último acceso: 11/06/2020]
- [56]. <https://connectedvehicle.devpost.com/details/understanding-dsrc> [último acceso: 11/06/2020]
- [57]. Nadia Tassoult, Amad Mourad, Moumen Hamouma, "A Survey on Vehicular Ad-Hoc Networks Routing Protocols: Classification and Challenges" Article in Journal of Digital Information Management, Vol. 17 Num. 4, August 2019
- [58]. <https://www.forbes.com/sites/samabuelsamid/2019/10/28/volkswagen-includes-nxp-v2x-communications-in-8th-gen-golf/#70b694d416bc> [último acceso: 11/06/2020]
- [59]. <https://technology.informa.com/605154/vehicle-to-everything-v2x-still-in-its-infancy-yet-very-promising> [último acceso: 11/06/2020]
- [60]. <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=8723326> [último acceso: 11/06/2020]
- [61]. Josue Flores de Valgas, David Martín-Sacristán, Jose F. Monserrat, "5G New Radio Numerologies and their Impact on V2X Communications", Waves - 2018/ISSN 1889-8297
- [62]. UPC, "Tècnic/a en eines i tecnologies de xarxes mòbils 5G", Universitat Politècnica de Catalunya, 2019.
- [63]. Telecom.cat, curs "Introducció a 5G", Febrer 2020
- [64]. <https://stlpartners.com/edge-computing/mobile-edge-computing/> [último acceso: 11/06/2020]
- [65]. <http://mqtt.org/faq> [último acceso: 11/06/2020]
- [66]. <https://www.reuters.com/article/us-autos-toyota-communication/toyota-abandons-plan-to-install-u-s-connected-vehicle-tech-by-2021-idUSKCN1S2252> [último acceso: 11/06/2020]
- [67]. <https://slideplayer.com/slide/16305995/> [último acceso: 11/06/2020]
- [68]. <http://siliconupdates.blogspot.com/2017/07/cellular-vehicle-to-everything.html> [último acceso: 11/06/2020]
- [69]. <https://www.cambridge.org/core/books/5g-mobile-and-wireless-communications-technology/> [último acceso: 11/06/2020]
- [70]. Junil Choi, Vutha Va, Nuria Gonzalez-Prelcic, Robert Daniels, Chandra R. Bhat, and Robert W. Heath Jr., "Millimeter Wave Vehicular Communication to Support Massive Automotive Sensing" May 2018
- [71]. http://www.mogi.bme.hu/TAMOP/jarmurendszerek_iranyitasa_angol/math-ch09.html [último acceso: 11/06/2020]
- [72]. <https://www.electronics-notes.com/articles/connectivity/4g-lte-long-term-evolution/d2d-device-to-device.php> [último acceso: 11/06/2020]
- [73]. <https://accent-systems.com/es/blog/diferencias-nb-iot-lte-m/> [último acceso: 11/06/2020]
- [74]. "LTE to 5G: The Global impact of Wireless innovation", Rysavy Research White Paper/5G Americas, August 2018
- [75]. <https://www.itu.int/> [último acceso: 11/06/2020]
- [76]. <https://semiengineering.com/5g-driving-new-automotive-applications/> [último acceso: 11/06/2020]
- [77]. <https://www.geospatialworld.net/blogs/what-is-intelligent-transport-system-and-how-it-works/> [último acceso: 11/06/2020]
- [78]. <https://theconstructor.org/transportation/intelligent-transportation-system/1120/> [último acceso: 11/06/2020]

- [79]. Junping Zhang, Member, IEEE, Fei-Yue Wang, Fellow, IEEE, Kurfeng Wang, Wei-Hua Lin, Xin Xu, and Cheng Chen, "Data-Driven Intelligent Transportation Systems: A Survey", IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, VOL. 12, NO. 4, December 2011
- [80]. <https://semanticscholar.org> [último acceso: 11/06/2020]

10. Anexos

10.1. Anexo A – Contenido mensaje BSM

La Tabla. 22 muestra la información contenida en un mensaje BSM.

Parte del BSM	Elementos	Descripción
BSM Part I - CoreData	MsgCount	Proporciona un número de secuencia dentro de la secuencia de mensajes con el mismo msgID y remitente
	TemporaryID	Es el identificador aleatorio del dispositivo. Su valor cambiará periódicamente para garantizar el anonimato del vehículo.
	DSecond	Proporciona información temporal
	Latitude	Representa la latitud geográfica de un objeto
	Longitude	Representa la longitud geográfica de un objeto
	Elevation	Representa la posición geográfica encima o debajo del elipsoide de referencia (WGS-84)
	PositionalAccuracy	Consiste en varios parámetros de calidad utilizados para modelar la precisión de la determinación posicional con respecto a cada eje.
	TransmissionState	Proporciona el estado actual de la transmisión del vehículo
	Speed	Representa la velocidad media medida o la reportada.
	Heading	Proporciona el rumbo actual del dispositivo emisor, expresado en unidades de 0.0125 grados desde el norte.
	SteeringWheelAngle	Proporciona el ángulo del volante del conductor.
	AccelerationSet4Way	Es un conjunto de valores de aceleración en 3 direcciones ortogonales del vehículo
	BrakeSystemStatus	Transmite una variedad de información sobre la actividad actual de control de frenos y sistemas del vehículo.
	VehicleSize	Representa la longitud y el ancho del vehículo en un solo concepto de datos.
	BSM Part II - VehicleSafetyExtensions	VehicleEventFlags
PathHistory		Define una ruta geométrica que refleja el movimiento del vehículo etiquetado en el tiempo durante un período de tiempo y/o distancia.

	PathPrediction	Permite que los vehículos y otro tipo de usuarios compartan su trayectoria prevista al estimar una ruta futura.
	ExteriorLights	Proporciona el estado de las luces exteriores.
BSM Part II - SpecialSafetyExtensions	EmergencyDetails	Combina varios elementos de nivel de bit en una estructura para una transmisión eficiente sobre el vehículo durante una llamada de respuesta.
	EventDescription	Proporciona un resumen de un evento o incidente.
	TrailerData	Proporciona un medio para describir los remolques tirados por un vehículo motorizado y/u otros dispositivos equipados.
BSM Part II - SupplementalSafetyExtensions	BasicVehicleClass	Utilizado para proporcionar un sistema de clasificación común para clasificar los dispositivos equipados con DSRC para diversos usos transversales.
	VehicleClassification	Es una estructura con un conjunto compuesto de sistemas de clasificación comunes utilizados en el trabajo de ITS y DSRC. Existen varios tipos que se pueden utilizar para clasificar un vehículo en función de las necesidades.
	VehicleData	Proporciona datos adicionales sobre el vehículo que no se encuentran en la Parte I del BSM.
	WeatherReport	Proporciona mediciones climáticas realizadas por el dispositivo emisor.
BSM Part II - SupplementalSafetyExtensions	WeatherProbe	Proporciona datos básicos sobre la temperatura del aire y la presión barométrica que experimenta un vehículo.
	ObstacleDetection	Se utiliza para relacionar información básica de ubicación sobre un obstáculo detectado o un peligro en la carretera.
	DisabledVehicle	Proporciona el estado operativo y ubicación de un vehículo con un subconjunto de los códigos ITIS.
	SpeedProfile	Admite vehículos conectados que recopilarán y analizarán BSM a medida que viajan: estos consisten en datos de velocidad informados desde la dirección opuesta.
	RTCMPackage	Se utiliza para transmitir mensajes RTCM que tratan con correcciones diferenciales entre usuarios de un dispositivo móvil a otro.

Tabla. 22 Contenido mensajes BSM (Part I & Part II) [47]

10.2. Anexo B – Relación señales de CAN y elementos BSM

Señal de CAN	Elemento BSM	Valores
Transmission	BSMcoreData.transmission	0 – Neutral 1 – Park 2 – forwardGears 3 – reverseGears 4 – 6 – Reserved 7 – unavailable
Speed	BSMCoreData.speed	0 – 8191 – Units of 0.02 m/s
ABS	BSMCoreData.Brakes	0 – unavailable 1 – off 2 – on 3 – engaged
Width	BSMCoreData.Vehiclesize	0 – 1023
Length	BSMCoreData.Vehiclesize	0 – 4095
leftTurnSignalOn	VehicleSafetyExtensions.ExteriorLights	0 – lowBeamHeadlightsOn 1 – highBeamHeadlightsOn
rightTurnSignalOn	VehicleSafetyExtensions.ExteriorLights	2 – leftTurnSignalOn 3 – rightTurnSignalOn
hazardSignalOn	VehicleSafetyExtensions.ExteriorLights	4 – hazardSignalOn 5 – automaticLightControlOn
parkingLightsOn	VehicleSafetyExtensions.ExteriorLights	6 - daytimeRunningLigthsOn 7 – fogLightOn 8 - parkingLightsOn
Response_Type	SpecialVehicleExtensions.vehicleAlerts.responseType	0 – notInUseorNotEquipped 1 – emergency 2 – nonEmergency 3 – pursuit 4 – stationary 5 – slowMoving 6 - stopAndGoMovement
Classification	SupplementalVehicleExtensions.classification	0 – 255 0 – unknownVehicleClass 1 – specialVehicleClass 10 – 11 Basic Passenger Motor 20 – 21 Light Trucks, Pickup, Van, Panel 25 – 35 Trucks various axle 40 – 48 Motorcycle 50 – 58 Transit 60 – 69 Emergency Vehicles 80 – 93 Other
Role	SupplementalVehicleExtensions.classDetails.role	0 – 22 0 – basicVehicle 1 – publicTransport 2 – specialTransport 3 – dangerousGoods 4 – roadWork 5 – roadRescue 6 – emergency 7 – safetyCar ...22 – military
Vehicle_type	SupplementalVehicleExtensions.classDetails.hpmsType	9217 – 9251 9217 – all-vehicles 9218 – bicycles 9219 – motorcycles 9220 – cars

		... 9251 – military-vehicles
Response equip	SupplementalVehicleExtensions.classDetails.responseEquip	9985 – 10113 9985 – ground-fire-suppression 9986 – heavy-ground-equipment ... 10113 – steam-truck
Vehicle_Height	SupplementalVehicleExtensions.VehicleData.height	0 - 127
Vehicle_Mass	SupplementalVehicleExtensions.VehicleData.mass	0 – 255 81 – 4500 kg 181 – 54500 kg 253 – 170000 kg
Bumper_height_front Bumber_height_rear	SupplementalVehicleExtensions.VehicleData.bumpers.front SupplementalVehicleExtensions.VehicleData.bumpers.rear	0 - 127
Is_raining	SupplementalVehicleExtensions.WeatherReport.isRaining	1 – 3 1 – precip 2 – noPrecip 3 – error
Rain_rate	SupplementalVehicleExtensions.WeatherReport.rainRate	0 – 65535 mm/hr
Precip_situation	SupplementalVehicleExtensions.WeatherReport.precipSituation	1 – 15 1 – other 2 – unknown 3 – noPrecipitation ... 15 - frozenPrecipitationHeavy
Solar_radiation	SupplementalVehicleExtensions.WeatherReport.solarRadiation	0 - 65535
Friction	SupplementalVehicleExtensions.WeatherReport.friction	0 – 101
Road_friction	SupplementalVehicleExtensions.WeatherReport.roadFriction	0 – 50 0 – 0.00 micro (frictionless) 50 – 1.00 micro
Outside_aire_temp	SupplementalVehicleExtensions.WeatherProbe.airTemp	0 – 191 -40°C offset
Air_pressure	SupplementalVehicleExtensions.WeatherProbe.AirPressure	0 – 255
Front_wipper_status Rear_wipper_status	SupplementalVehicleExtensions.WeatherProbe.rainRates.statusFront SupplementalVehicleExtensions.WeatherProbe.rainRates.statusRear	0 – 6 0 – unavailable 1 – off 2 – intermitent 3 – low 4 – high 5 – washerinUse 6 – automaticPresent
Obs_Detection_Direction	SupplementalVehicleExtensions.ObstacleDetection.Direction	0 – 28800 Angle range 0 – 359.9875 degrees

Obs_Detection_Distance	SupplementalVehicleExtensions.ObstacleDetection.Distance	0 – 32767 Units in meters
Disabled_Vehicle	SupplementalVehicleExtensions.DisabledVehicle.statusDetails	523 – 541 532 – stalled-vehicle 533 – abandoned-vehicle 534 – disabled-vehicle ... 541 – vehicle-in-water

Tabla. 23 Relación señales de CAN y elementos BSM

10.3. Anexo C – Datasheets del entorno simulado

KVASER:

https://www.kvaser.com/software/7330130980146/V1_2_189/kvaser_leaf_light_v2_usersguide.pdf

OBU CarCom:

https://www.ficosa.com/wp-content/uploads/2018/12/Ficosa_On_Board_Unit_C_V2X.pdf

Fuente de alimentación TENMA:

<http://www.farnell.com/datasheets/2054525.pdf>

Cable UART:

https://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/Cables/DS_TTL-232R_CABLES.pdf

Antenas:

<https://teltonika-networks.com/downloads/en/adhesive-gps-antenna/Datasheet-GNSS-Adhesive-fakra-antenna-003R-00235-v1.1.pdf>