

Sistemas de Transporte Inteligente

Instituto Federal de Telecomunicaciones ©
Dirección General de Ingeniería del Espectro y Estudios Técnicos
Dirección de Ingeniería y Tecnología
México, junio 2025.

Ricardo Castañeda Álvarez

Director General de Ingeniería del Espectro y Estudios Técnicos
ricardo.castaneda@ift.org.mx

Roberto Carlos Castro Jaramillo

Director de Ingeniería y Tecnología
roberto.castro@ift.org.mx

Allan Lujano Giron

Subdirector de Tecnologías del Espectro
allan.lujano@ift.org.mx

Angélica Rosalía Montiel Cerón

Especialista en Tecnologías del Espectro
angelica.montiel@ift.org.mx

La opinión vertida en este estudio representa la postura
de la Dirección General de Ingeniería del Espectro y Estudios Técnicos;
no prejuzga sobre la opinión de otras áreas o de los miembros
que conforman el Pleno del Instituto Federal de Telecomunicaciones.

Sistemas de Transporte Inteligente

Allan Lujano Giron

Angélica Rosalía Montiel Cerón

Ricardo Castañeda Álvarez

Roberto Carlos Castro Jaramillo

© 2025

Allan Lujano Giron

Datos de contacto:

allan_lg@outlook.com, allan.lujano@ift.org.mx

Revisión editorial: Allan Lujano Giron

Gracias por descargar esta publicación. El copyright es propiedad exclusiva de los autores; no se permite su reproducción, copiado ni distribución con fines comerciales o ánimos de lucro. Si disfrutaste este documento, por favor invita a tus amigos a descargar su propia copia en www.ift.org.mx, donde pueden encontrar más información.

[Hoja intencionalmente en blanco]

Resumen ejecutivo

Los Sistemas de Transporte Inteligente son aquellos sistemas que emplean la combinación de las tecnologías de la información y comunicación, los dispositivos de determinación de la posición y las tecnologías de automatización, con el objetivo de mejorar la seguridad, la gestión, la eficiencia y la eficacia de la infraestructura y los medios de transporte, cuyas principales aplicaciones son las siguientes:

- Prevención de colisiones.
- Monitoreo y control de la red de tránsito.
- Sistemas de información a conductores y pasajeros.
- Administración del transporte público.
- Sistemas de gestión de emergencias.

Entre las principales tecnologías con las que operan los Sistemas de Transporte Inteligente se encuentran el *Wireless Access Vehicular Environment* desarrollado por el *Institute of Electrical and Electronics Engineers*, el ITS-G5 desarrollado por el *European Telecommunications Standards Institute*, y el C-V2X desarrollado por el *3rd Generation Partnership Project*. Todas estas tecnologías están enfocadas a operar en el segmento de frecuencias de 5850 MHz a 5925 MHz.

En tal sentido, distintos países y regiones del mundo ya cuentan con regulación vigente que permite el uso cotidiano de los Sistemas de Transporte Inteligente en el segmento de frecuencias de 5850 MHz a 5925 MHz, como es el caso de Los Estados Unidos de América, Canadá, Australia, Brasil y los países que conforman a la Unión Europea. Cada uno de ellos, permite la operación de dichos sistemas con alguna de las tecnologías antes mencionadas.

Con el objetivo de identificar las ventajas y beneficios que podría representar para México la implementación de los Sistemas de Transporte Inteligente, en este Estudio se realizan distintas recomendaciones, tomando como base lo presentado en los primeros tres capítulos, los comentarios vertidos en el proceso de Consulta Pública de Integración llevado a cabo en el año 2021 por el Instituto Federal de Telecomunicaciones y las opiniones de algunos expertos de la academia en México sobre el tema. Dichas recomendaciones se proponen desde el punto de vista técnico (i.e. banda de frecuencias de operación, canalización, potencias de operación, etc.) y desde el punto de vista regulatorio (el tipo de uso del espectro radioeléctrico y la homologación de los dispositivos destinados a Sistemas de Transporte Inteligente).

Introducción

A medida que los sistemas de transporte terrestre han evolucionado, se han beneficiado de los avances en las tecnologías y servicios de telecomunicaciones, aprovechando múltiples servicios y aplicaciones que van desde tener sistemas de navegación propios, hasta poder establecer una conexión a Internet mediante dispositivos integrados en los propios vehículos. Todos estos avances tecnológicos han provocado que la industria automotriz y de tecnologías de la información y comunicación, desarrollen mejoras que permitan a conductores y pasajeros un mayor conocimiento acerca de su trayecto, y con ello, viajar de forma más segura y eficiente, así como optimizar diversos aspectos relacionados con la planeación y gestión del transporte y su seguridad, incluida la de los peatones.

Con este objetivo en mente, fueron desarrollados los sistemas de transporte inteligente, los cuales se apoyan de infraestructura al borde de las vialidades para transmitir información oportuna hacia los vehículos, y a su vez, éstos puedan comunicarse entre ellos mismos para evitar colisiones, informar de accidentes, obras o bloqueos de vialidades, por mencionar algunos ejemplos. Para ello, los sistemas de transporte inteligente fueron diseñados para operar en bandas del espectro radioeléctrico específicas y con parámetros técnicos de operación que aseguren la comunicación segura entre los diferentes dispositivos que forman parte de dichos sistemas.

Es por ello que la Dirección General de Ingeniería del Espectro y Estudios Técnicos, a través de la Dirección de Ingeniería y Tecnología, realiza el presente estudio con el objetivo de analizar y exponer el funcionamiento de los sistemas de transporte inteligente, sus principales aplicaciones y las tecnologías con las que operan, con el fin de proponer recomendaciones regulatorias para su eficaz adopción y utilización futura en México. Dichas recomendaciones, se plantean de tal forma que puedan ser consideradas dentro la normativa aplicable en la regulación y operación de los sistemas de transporte inteligente en nuestro país.

El estudio está compuesto por cuatro capítulos:

- **Capítulo I. Definición y aplicación de los Sistemas de Transporte Inteligente:** se aborda la definición de los sistemas de transporte inteligente acorde con las consideraciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones y la descripción de algunas de sus aplicaciones.
- **Capítulo II. Principales tecnologías de los Sistemas de Transporte Inteligente:** en este capítulo se analizan las principales tecnologías con las que operan los sistemas de transporte inteligente.
- **Capítulo III. Experiencia comparada de la regulación de los Sistemas de Transporte Inteligente:** consiste en el análisis de diferentes regulaciones en materia de sistemas de transporte inteligente de los siguientes órganos reguladores: *Federal Communications Commission*, de los Estados Unidos de América; *Innovation, Science and Economic Development Canada*, de Canadá; *Australian Communications and Media Authority* de Australia; la Agencia Nacional de Telecomunicaciones de Brasil; y un análisis de lo establecido por la Unión Europea a

través de la Conferencia Europea de Administraciones de Correos y Telecomunicaciones.

- **Capítulo IV. Recomendaciones para la futura regulación de los Sistemas de Transporte Inteligente en México:** se recopilan los comentarios y opiniones compartidos por miembros del sector académico en México, así como los obtenidos en un proceso de Consulta Pública de Integración realizado por el Instituto en 2021, para que, en conjunto con lo abordado en los capítulos anteriores, se formulen una serie de recomendaciones para la introducción y regulación eficiente de los sistemas de transporte inteligente en México.

Acónimos

16-QAM	<i>16 Quadrature Amplitude Modulation</i>
3GPP	<i>3rd Generation Partnership Project</i>
5G	Quinta Generación de tecnologías móviles
64-QAM	<i>64 Quadrature Amplitude Modulation</i>
ACMA	<i>Australian Communications and Media Authority</i>
ADS	<i>Automated Driving System</i>
ANATEL	Agencia Nacional de Telecomunicaciones
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BPSK	<i>Binary Phase-shift keying</i>
BSS	<i>Basic Service Set</i>
CENIDET	Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico
CEPT	Conferencia Europea de Administraciones de Correos y Telecomunicaciones
CFR	<i>Code of Federal Regulations</i>
CPI	Consulta Pública de Integración
C-V2X	<i>Cellular vehicle-to-everything</i>
D2D	<i>Device to Device</i>
DCC	<i>Decentralized Congestion Control</i>
DDT	<i>Dynamic Driving Task</i>
DFS	<i>Dynamic Frequency Selection</i>
DRCA	Dispositivos de Radiocomunicaciones de Corto Alcance
DSRC	<i>Dedicated short-range communications</i>
DSRCS	<i>Dedicated Short Range Communications Service</i>
EA	<i>Economic Area</i>
eNB	<i>E-UTRAN NodeB</i>

ETSI	<i>European Telecommunications Standards Institute</i>
E-UTRA	<i>Evolved Universal Terrestrial Radio Access</i>
FC	<i>Frequency Coordinator</i>
FCC	<i>Federal Communications Commission</i>
GB	Guarda Banda
gNB	<i>Next Generation Node B</i>
HARQ	<i>Hybrid Automatic Repeat Request</i>
HV	<i>Host Vehicle</i>
I2V	Infraestructura a Vehículo
ICM	Industriales, Científicos y Médicos
ID	Identificador
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IFT	Instituto Federal de Telecomunicaciones
IP	<i>Internet Protocol</i>
IPv6	<i>Internet Protocol Version 6</i>
ISED	<i>Innovation, Science and Economic Development Canada</i>
ITS-G5A	Banda de frecuencias de ITS-G5 de 5875-5905 MHz
ITS-G5B	Banda de frecuencias de ITS-G5 de 5855-5875 MHz
ITS-G5C	Banda de frecuencias de ITS-G5 de 5470-5725 MHz
ITS-G5D	Banda de frecuencias de ITS-G5 de 5905-5925 MHz
kB	Kilobytes
LMS	<i>Location and Monitoring Service</i>
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
LTE-V2X	<i>Long-Term Evolution Vehicle-to-Everything</i>
LTE-Uu	Interfaz entre la red LTE y el equipo de usuario
MAC	<i>Medium Access Control</i>
Mb	Megabits

MLME	<i>MAC Layer Management Entity</i>
ms	Milisegundos
NR	<i>New Radio</i>
NR-V2X	<i>New Radio Evolution Vehicle-to-Everything</i>
NR-Uu	Interfaz entre la red NR y el equipo de usuario
NTIA	<i>National Telecommunications and Information Administration</i>
OBU	<i>On-Board Unit</i>
ODD	<i>Operational Design Domain</i>
OEDR	<i>Object and Event Detection and Response</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
OSI	<i>Open Systems Interconnection</i>
PC5	<i>Interfaz de enlace lateral</i>
PDCCP	<i>Packet Data Convergence Protocol</i>
PER	<i>Packet Error Rate</i>
PHY	<i>Physical Layer</i>
PIRE	Potencia Isotrópica Radiada Equivalente
PLME	<i>PHY Layer Management Entity</i>
PRA	Potencia Radiada Aparente
ProSe	<i>Proximity-based services</i>
PSSS	<i>Primary Sidelink Synchronization Signal</i>
QPSK	<i>Quadrature Phase Shift Keying</i>
RF	Radiofrecuencia
RLC	<i>Radio Link Control</i>
RPC	Registro Público de Concesiones
RRC	<i>Radio Resource Control</i>
RSRP	<i>Reference Signal Received Power</i>
RSSI	<i>Received Signal Strength Indicator</i>

RSU	<i>Roadside Unit</i>
RV	<i>Remote Vehicle</i>
SCI	<i>Sidelink Control Information</i>
SINR	<i>Signal to Noise and Interference Ratio</i>
SPS	<i>Semi-Persistent Scheduling</i>
SSSS	<i>Secondary Sidelink Synchronization Signal</i>
STI	Sistemas de Transporte Inteligente
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>
UDP	<i>User Datagram Protocol</i>
UE	<i>User Equipment</i>
UIT	Unión Internacional de Telecomunicaciones
ULS	<i>Universal Licensing System</i>
UNAM	Universidad Nacional Autónoma de México
UTRAN	<i>Universal Terrestrial Radio Access Network</i>
Uu	Interfaz entre la UTRAN y el UE
V2I	Vehículo a Infraestructura
V2N	Vehículo a Red
V2P	Vehículo a Peatón
V2V	Vehículo a Vehículo
V2X	Vehículo a Todo
WAVE	<i>Wireless Access Vehicular Environment</i>
WME	<i>WAVE Management Entity</i>
WSMP	<i>WAVE Short Message Protocol</i>

Metodología de investigación

Las tecnologías y estándares de Sistemas de Transporte Inteligente (STI) abordados en el Capítulo II, *Wireless Access Vehicular Environment* (WAVE), ITS-G5 y *Cellular vehicle-to-everything* (C-V2X), fueron elegidos en consistencia con los estándares adoptados por los reguladores incluidos en el Capítulo III, además de ser considerados como los principales estándares avanzados de STI.

Por otra parte, los Reguladores presentados en el Capítulo III fueron elegidos considerando aquellos que cuentan con una disposición, norma o regulación específica para STI (hasta el 4 de mayo de 2021) y que dicha disposición, norma o regulación se encuentra de forma accesible y en idioma español o inglés. Los reguladores que cumplen con estas características son la *Federal Communications Commission* (FCC) de los Estados Unidos de América, el *Innovation, Science and Economic Development Canada* (ISED) de Canadá, la Australian Communications and Media Authority (ACMA) de Australia, la Agencia Nacional de Telecomunicaciones (ANATEL) y la Conferencia Europea de Administraciones de Correos y Telecomunicaciones (CEPT, por las siglas en francés de *Conférence Européenne des administrations des Postes et des Télécommunications*) de la Unión Europea.

El Capítulo IV tiene como objetivo recopilar las opiniones y aportaciones de los actores involucrados en los STI en México, a través de los principales actores que participan en el desarrollo, implementación y operación de dichos sistemas: los sectores académico e industrial del país.

En lo que respecta al sector académico, entre julio y agosto de 2020, se realizó una búsqueda en Internet de los diferentes centros de investigación de todo el país, para encontrar líneas de investigación relacionadas con STI. Como resultado, se encontraron las líneas de investigación de la Dra. Alicia Martínez Rebollar del Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET), y de la Dra. Angélica del Rocío Lozano Cuevas de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Así, se procedió a convocar vía electrónica a ambas doctoras para invitarlas a compartir sus conocimientos con la Unidad de Espectro Radioeléctrico (UER) del Instituto Federal de Telecomunicaciones (IFT), y así recabar sus comentarios, aportaciones y preocupaciones en torno a las necesidades de los STI para su implementación en México. Ambas doctoras respondieron a la convocatoria y accedieron a participar en el presente estudio. Además, debido a la propuesta de la Dra. Alicia, se extendió la invitación al Dr. Hugo Estrada Esquivel (quien también realiza investigaciones en torno a los STI en el CENIDET) a la entrevista con la UER para compartir sus aportes y opiniones sobre los STI.

Para el caso del sector industria, se realizó una búsqueda en Internet de los distintos fabricantes y distribuidores del sector automotriz que tienen presencia en el país. Una vez identificados, se convocó vía electrónica a 15 empresas con el objetivo de invitarlos a participar en entrevistas con la UER, con la intención de reunir los comentarios, aportaciones y preocupaciones de la industria en torno a las necesidades de los STI para su implementación en México. Sin embargo, ninguna de las empresas contactadas respondió a la convocatoria para concretar dichas reuniones.

Debido a lo anterior y con el fin de integrar al estudio la opinión del sector industria, se decidió incorporar en el Capítulo IV las opiniones recabadas en el INFORME DE CONSIDERACIONES DE LOS COMENTARIOS, OBSERVACIONES, PROPUESTAS Y/O APORTACIONES RECIBIDAS DURANTE LA CONSULTA PÚBLICA DE INTEGRACIÓN DEL "CUESTIONARIO SOBRE NECESIDADES DE ESPECTRO PARA SISTEMAS DE TRANSPORTE INTELIGENTE EN LA BANDA 5850-5925 MHz"¹ (en lo sucesivo "el Informe"), cuyo propósito es concentrar los comentarios recibidos durante dicha Consulta Pública, respecto a la implementación de STI en la banda de frecuencias de 5850-5925 MHz.

¹ Para mayor información, consúltese en:
<http://www.ift.org.mx/sites/default/files/industria/temasrelevantes/17437/documentos/informedeconsideracionescpi-sti-5ghz002.pdf>

Índice

Resumen ejecutivo.....	i
Introducción	ii
Acrónimos	iv
Metodología de investigación.....	viii
Capítulo I. Definición y aplicaciones de los Sistemas de Transporte Inteligente	13
1.1. Definición.	13
1.2. Arquitectura de los STI.	13
1.3. Características técnicas de operación.	14
1.4. Requerimientos Generales.....	15
1.5. Aplicaciones de los STI.....	16
1.5.1. Sistemas de control de vehículo.	16
1.5.2. Sistemas de administración de tráfico.	17
1.5.3. Sistemas de información a viajeros.	17
1.5.4. Sistemas de transporte público.....	17
1.5.5. Sistemas de administración de flotillas.....	18
1.5.6. Sistemas de gestión de emergencias.	18
1.5.7. Servicios de pago electrónico.	18
1.5.8. Sistemas de asistencia al peatón.....	19
1.6. Diferencias entre STI y los sistemas de conducción automática.....	19
Capítulo II. Principales tecnologías de los STI.....	23
2.1. IEEE: WAVE.....	23
2.1.1. Estándares ASTM: ASTM E2213-03 y ASTM E2665-08.....	30
2.1.1.1. ASTM E2213-03.....	30
2.1.1.2. ASTM E2665-08.....	34
2.2. ETSI: ITS-G5.	34
2.3. 3GPP: C-V2X (LTE-V2X y NR-V2X).....	40
2.4. Tabla comparativa de los estándares de los STI.	53
Capítulo III. Experiencia comparada de la regulación de los STI	56
3.1. Estados Unidos: Comisión Federal de Comunicaciones.	56
3.1.1. Proceso de autorización de los STI.	57
3.1.2. Servicio de Localización y Monitoreo.....	58
3.1.3. Servicio de Comunicaciones Dedicadas de Corto Alcance.....	63

3.1.4.	Propuesta de Enmienda y C-V2X	66
3.2.	Canadá: Desarrollo Económico, Ciencia e Innovación.	70
3.2.1.	Servicio de Localización y Monitoreo.	74
3.2.2.	Comparación entre los reguladores de Estados Unidos y Canadá en materia de STI.	77
3.3.	Australia: Autoridad Australiana de Comunicaciones y Medios	77
3.3.1.	Autorización de los STI.	78
3.3.2.	Operación de los STI.	79
3.4.	Unión Europea: Conferencia Europea de Administraciones de Correos y Telecomunicaciones.	81
3.4.1.	Operación de los STI.	82
3.4.2.	Tendencia de los STI en la Unión Europea.	86
3.5.	Brasil: Agencia Nacional de Telecomunicaciones.	86
3.5.1.	Operación de los STI.	87
3.6.	Análisis de la experiencia comparada: características de la regulación de los STI.	89
Capítulo IV. Recomendaciones para la futura regulación de los STI en México		93
4.1.	Situación actual de la banda de frecuencias de 5850 a 5925 MHz.	93
4.2.	Consulta Pública de Integración.	93
4.3.	Entrevistas con el sector académico.	96
4.3.1.	Opiniones y comentarios del Dr. Hugo Estrada y la Dra. Alicia Martínez.	96
4.3.2.	Opiniones y comentarios de la Dra. Angélica Lozano.	98
4.4.	Propuestas para la regulación de los STI en México.	100
4.4.1.	Características técnicas de operación.	100
4.4.4.1.	Banda de frecuencias de operación y canalización.	100
4.4.4.2.	Potencias de operación de los dispositivos.	101
4.4.4.3.	Convivencia con otros servicios y máscara de emisión.	101
4.4.2.	Aspectos normativos.	103
4.4.2.1.	Uso de la banda de frecuencias.	103
4.4.2.2.	Homologación de los dispositivos de los STI.	104
4.4.3.	Consideraciones adicionales para la regulación de los STI en México.	104
Referencias		107

[Hoja intencionalmente en blanco]

Capítulo I. Definición y aplicaciones de los Sistemas de Transporte Inteligente

En el presente capítulo se describe la definición de los Sistemas de Transporte Inteligente, así como los elementos que los constituyen, sus principales características técnicas de operación, y algunas de sus aplicaciones.

1.1. Definición.

Los STI son definidos por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) como aquellos sistemas que emplean la combinación de las tecnologías de la información y comunicación, los dispositivos de determinación de la posición y las tecnologías de automatización, con el objetivo de mejorar la seguridad, la gestión, la eficiencia y la eficacia de la infraestructura y los medios de transporte², así como de brindar solución a los crecientes problemas de congestión de tráfico ocasionados por el aumento de la población en la zonas urbanas y los cambios en la densidad poblacional³.

1.2. Arquitectura de los STI.

La arquitectura de los STI contempla la interacción entre los diferentes elementos requeridos para ofrecer los servicios relacionados a la gestión del transporte⁴. Los elementos que requieren comunicación entre sí pueden ser vehículos, peatones, infraestructura vehicular, carreteras o servicios de cómputo en la nube, los cuales dan origen a sistemas de comunicación Vehículo a Peatón (V2P), Vehículo a Vehículo (V2V), Vehículo a Infraestructura (V2I), Infraestructura a Vehículo (I2V) y Vehículo a Red (V2N), algunos de los cuales se muestran en la Figura 1.1.

² UIT-R, "Manual sobre comunicaciones móviles terrestres (incluido el acceso inalámbrico) SISTEMAS DE TRANSPORTE INTELIGENTE", *Unión Internacional de Telecomunicaciones. Sector de Radiocomunicaciones*, Suiza, 2006, p III. Consultado el 19 de marzo de 2020, disponible en: https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/hdb/R-HDB-49-2006-OAS-PDF-S.pdf.

³ UIT-R, "Rep. ITU-R M.2445-0. Intelligent transport systems (ITS) usage", *Unión Internacional de Telecomunicaciones. Sector de Radiocomunicaciones*, Suiza, noviembre de 2018, p 5. Consultado el 17 de marzo de 2020, disponible en: https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2445-2018-PDF-E.pdf.

⁴ UIT-R, "Recommendation ITU-R M.1890-1. Operational radiocommunication objectives and requirements for advanced Intelligent Transport Systems", *Unión Internacional de Telecomunicaciones. Sector de Radiocomunicaciones*, Suiza, enero de 2019, pp. 3-7. Consultado el 20 de marzo de 2020, disponible en: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.1890-1-201901-!//PDF-E.pdf.

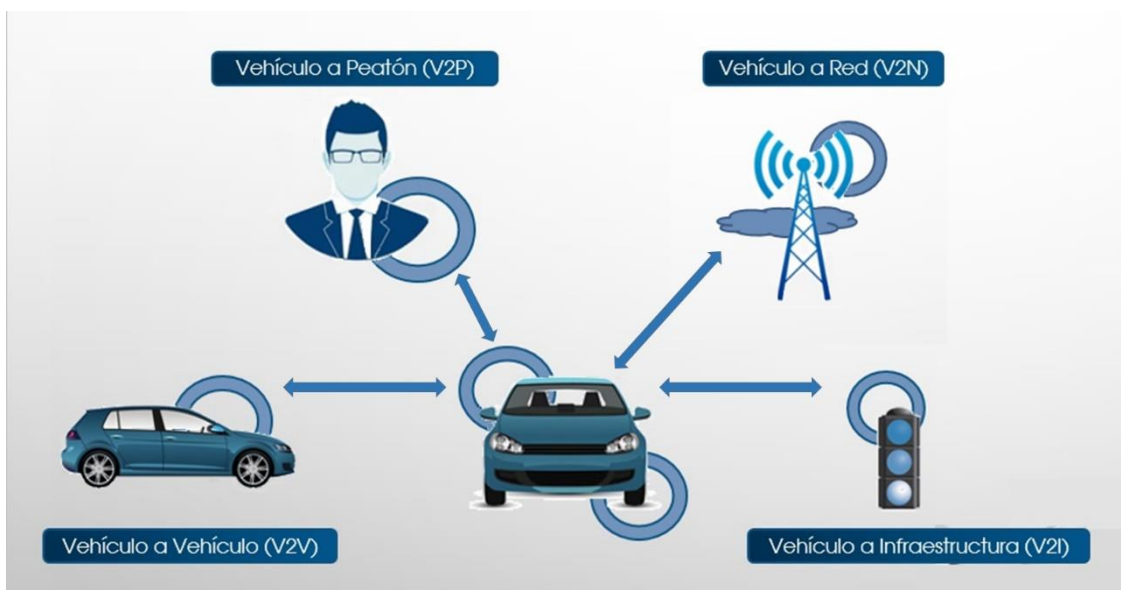


Figura 1.1. Sistemas de comunicación V2X⁵.

El conjunto de todos estos sistemas de comunicación es comúnmente llamado "sistemas de comunicación Vehículo a Todo" (V2X)⁶. Los sistemas V2X son generalmente referidos como un sistema de red *ad-hoc*, debido a que todos los elementos pueden ser receptores y transmisores de información, o en su caso, tener la capacidad de enrutar y retransmitir mensajes a otros elementos de la red.

1.3. Características técnicas de operación.

Para que los elementos que constituyen a los STI puedan comunicarse entre sí de manera efectiva, es necesaria la armonización de los parámetros técnicos de operación. Es por esto que en el reporte ITU-R M. 2445-0. *Intelligent transport systems (ITS) usage*, la UIT propone que los STI operen con las siguientes características técnicas⁷:

- I. Banda de frecuencias de 5850 a 5925 MHz.
- II. Ancho de banda de canal de 10 MHz o múltiplos de este.
- III. Latencia de hasta 1000 ms para comunicaciones V2P, y de hasta 100 ms para la comunicación V2V, V2I, I2V y V2N.
- IV. Usar paquetes de hasta 2 kB a una velocidad de datos máxima de 27 Mb/s.
- V. Una cobertura máxima de 1000 metros cúbicos por estación.

⁵ Elaboración propia.

⁶ UIT-R, "Manual sobre comunicaciones móviles terrestres (incluido el acceso inalámbrico) SISTEMAS DE TRANSPORTE INTELIGENTE", Unión Internacional de Telecomunicaciones. Sector de Radiocomunicaciones, Suiza, 2006, p 15. Consultado el 3 de abril de 2020, disponible en: https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/hdb/R-HDB-49-2006-OAS-PDF-S.pdf.

⁷ UIT-R "Rec. UIT-R M.2121-0 Harmonization of frequency bands for Intelligent Transport Systems in the mobile service", Unión Internacional de Telecomunicaciones. Sector de Radiocomunicaciones, Suiza, enero de 2019, p. 5. Consultado el 19 de marzo de 2020, disponible en: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.2121-0-201901-S!!PDF-E.pdf

Con estos parámetros, las redes vehiculares que conforman los STI pueden garantizar una compatibilidad global para favorecer la interoperabilidad de los sistemas y así procurar el cumplimiento de sus objetivos.

1.4. Requerimientos Generales.

Con el objetivo de garantizar que los STI procuren en todo momento la seguridad de los vehículos mediante una operación óptima, la UIT⁸ propone una serie de requisitos generales que deben ser cumplidos por estos sistemas:

- I. Cada vehículo debe ser individualmente identificable.
- II. Deben soportar un método de autenticación para comunicaciones individuales.
- III. Deben soportar un método de autenticación de grupos por Identificador (ID), para comunicaciones en grupo.
- IV. Deben proporcionar mensajes de alerta relacionados a la seguridad del vehículo.
- V. La información relacionada a la ubicación del vehículo debe estar siempre disponible para los administradores de la red.
- VI. La información del momento en que ocurre un accidente debe ser capaz de transmitirse y recibirse por los vehículos (involucrados, próximos y de emergencia).
- VII. La comunicación V2X debe ser capaz de transmitir y recibir mensajes en comunicación punto a punto y punto a multipunto.
- VIII. Cuando sea necesario, el vehículo debe ser capaz de retransmitir un mensaje recibido a los vehículos cercanos.
- IX. El vehículo debe ser capaz de recolectar información de los vehículos cercanos cuando ésta sea solicitada por el conductor o los pasajeros.
- X. Los dispositivos terminales (pantallas, bocinas y display) deben ser capaces de desplegar la información al conductor o a los pasajeros en forma de voz, texto o video.
- XI. Los dispositivos terminales deben tener interfaces de usuario para diferentes servicios (como entrada por voz, teclado, mouse o pantalla táctil).
- XII. Los dispositivos terminales deben tener interfaces externas (USB, Bluetooth, etc.) para actualizar el software y la información.

Aunado a lo anterior, existen requerimientos asociados especialmente a las aplicaciones relacionadas a la seguridad del vehículo, tales como:

- I. Los vehículos de emergencia deben ser capaces de transmitir información acerca de su dirección de movimiento (vueltas hacia calles laterales, en bifurcaciones o salidas).
- II. Todos los vehículos deben ser capaces de obtener información sobre su localización, velocidad o aceleración.
- III. Los métodos de autenticación para los mensajes con información sobre incidentes inesperados deben estar disponibles en todo momento.
- IV. Los mensajes con información sobre incidentes inesperados deben tener prioridad.

⁸ UIT-R, "Rep. ITU-R M.2228-1. Advanced intelligent transport systems radiocommunications", *Unión Internacional de Telecomunicaciones. Sector de Radiocomunicaciones*, Suiza, julio de 2015, p 6. Consultado el 19 de marzo de 2020, disponible en: https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2228-1-2015-PDF-E.pdf

- V. Los vehículos de emergencia deben ser capaces de transmitir en *broadcast*⁹ el mensaje de alarma sobre su dirección de movimiento.
- VI. Los vehículos de emergencia deben ser capaces de transmitir información sobre su destino.
- VII. Cuando sea necesario, cualquier vehículo debe ser capaz de retransmitir un mensaje de alarma a los vehículos cercanos.
- VIII. Cuando sea necesario, cualquier vehículo debe ser capaz de obtener información en marcha y en circunstancias inesperadas.

1.5. Aplicaciones de los STI.

La UIT¹⁰ clasifica en 8 categorías a las aplicaciones de los STI, cada una de las cuales está destinada a proveer diferentes funcionalidades. Estas aplicaciones se describen a continuación.

1.5.1. Sistemas de control de vehículo.

Los sistemas de control de vehículo están orientados a asistir en gran medida a la conducción, a través de la transferencia de información entre vehículos, conductores y la infraestructura¹¹:

- **Prevención de colisiones longitudinal:** ayuda a prevenir colisiones frontales, traseras o al conducir en reversa, entre vehículos y entre vehículos y objetos o peatones.
- **Prevención de colisiones laterales:** ayuda a prevenir colisiones cuando los vehículos cambian de carril.
- **Prevención de colisiones en intersecciones:** ayuda a prevenir las colisiones en las intersecciones.
- **Sistemas de mejora de visión:** mejoran la capacidad del conductor de observar la carretera y los objetos sobre ésta.
- **Despliegue de contenciones previo al choque:** anticipa una colisión inminente y activa los sistemas de seguridad de los pasajeros antes de que ésta ocurra.
- **Sistemas automatizados de camino:** sistemas que buscan asistir la operación humana en la conducción del vehículo apoyándose de la infraestructura¹².

⁹ Transmisión punto a multipunto en la que el *host* transmite una trama o paquete y todos los nodos de la red lo reciben. Anttalainen, Tramo y Jaäskeläinen, Ville, *Introduction to communication networks*, 1ª ed, Estados Unidos, Artech House, 2014, p. 76.

¹⁰ UIT-R, "Recommendation ITU-R M.1890-1. Operational radiocommunication objectives and requirements for advanced Intelligent Transport Systems", *Unión Internacional de Telecomunicaciones. Sector de Radiocomunicaciones*, Suiza, enero de 2019, pp. 3-7. Consultado el 20 de marzo de 2020, disponible en: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.1890-1-201901-!//PDF-E.pdf

¹¹ Shladover, Steven E., *Advanced Vehicle Control Systems (AVCS)*, Estados Unidos, IEEE International Congress on Transportation Electronics, 2002, pp. 103-112..

¹² Alessandrini, Adriano *et al.*, *Automated Road Transport Systems (ARTS)—The Safe Way to Integrate Automated Road Transport in Urban Areas*, Estados Unidos, Springer, 2015, p. 195.

- **Procuración de la seguridad:** proporciona alertas sobre la condición del conductor, el vehículo y/o de la carretera.

1.5.2. Sistemas de administración de tráfico.

Los sistemas de administración del tráfico tienen como objetivo mejorar el flujo del tráfico, teniendo como resultado la prevención del congestionamiento vial:

- **Monitoreo y control de la red de tráfico:** gestiona el movimiento del tráfico en las calles y autopistas.
- **Administración de la demanda de viajes:** apoya políticas y regulaciones diseñadas para mitigar los impactos sociales y ambientales de la congestión de tráfico.
- **Detección y gestión de incidentes:** ayuda a las organizaciones privadas y públicas a identificar de forma rápida los incidentes, y de cómo implementar una respuesta para minimizar su efecto en el tráfico.
- **Monitoreo y mitigación de emisiones:** provee información para el monitoreo de la calidad del aire y el despliegue de estrategias para mejorarla.
- **Administración de estacionamiento:** proporciona información sobre los lugares de estacionamiento, y/o administra la entrada y salida de vehículos.

1.5.3. Sistemas de información a viajeros.

Los sistemas de información a viajeros tienen la intención de asistir a las personas en la planeación de viajes y durante su recorrido, a través de información sobre las condiciones del tráfico:

- **Información previa al viaje:** provee información para seleccionar el mejor medio de transporte, hora de salida y ruta.
- **Información a conductor en ruta:** proporciona avisos al conductor y señalización dentro del vehículo para la seguridad durante el viaje.
- **Información de tránsito en ruta:** proporciona información a los viajeros que utilizan el transporte público antes de comenzar su viaje.
- **Guía de ruta:** asiste a los viajeros para llegar a sus destinos con instrucciones simples (visuales y auditivas).
- **Concordancia de viajes y reservaciones:** mejora y hace más sencilla la compartición de viajes.

1.5.4. Sistemas de transporte público.

Los sistemas de transporte público están diseñados para mejorar la eficiencia del transporte público, y hacerlo más atractivo proporcionando información sobre los horarios de los viajes en tiempo real:

- **Administración del transporte público:** automatiza las operaciones, planeación y administración de las funciones de los sistemas de transporte público.
- **Transporte público personalizado:** recomienda el uso de vehículos públicos con rutas flexibles para ofrecer un servicio más conveniente a los clientes.

1.5.5. Sistemas de administración de flotillas.

Los sistemas de administración de flotillas tienen la intención de mejorar la eficiencia y productividad de los vehículos con operaciones comerciales:

- **Administración de vehículo:** permite la compra electrónica de credenciales¹³, así como el reporte y monitoreo del kilometraje y niveles de combustible de forma automática.
- **Monitoreo y seguimiento de seguridad:** monitorea el estatus de seguridad tanto del vehículo comercial, como de la carga y del conductor.
- **Administración de flotillas:** supervisa y controla de las operaciones de flotillas de vehículos, además de mejorar la eficiencia y calidad de los servicios.
- **Autorización de vehículo:** facilita la autorización e identificación del vehículo en las fronteras (nacionales e internacionales).
- **Inspecciones automatizadas en carretera:** facilita y agiliza las inspecciones realizadas en carretera.
- **Respuesta a incidentes con materiales peligrosos:** proporciona una descripción inmediata de materiales peligrosos a los cuerpos de emergencia.

1.5.6. Sistemas de gestión de emergencias.

Los sistemas de gestión de emergencias están destinados a mejorar los tiempos de respuesta de los vehículos de emergencia ante incidentes y otros escenarios en los que se requiera una ruta despejada para optimizar su desplazamiento. Los sistemas de gestión de emergencia no están limitados a la atención de incidentes de tráfico o relacionados con la infraestructura vial, también deben intervenir en situaciones de emergencia relacionadas con la seguridad pública, protección civil, desastres naturales y/o incendios:

- **Notificaciones de emergencia y seguridad personal:** provee notificaciones de un incidente y solicita ayuda inmediata.
- **Seguridad de viajes públicos:** crea un entorno seguro para los operadores de transporte público.
- **Administración de vehículos de emergencia:** reduce el tiempo que le toma a un vehículo de emergencia responder a un incidente.

1.5.7. Servicios de pago electrónico.

Los servicios de pago electrónico son una actividad comercial que pretenden mejorar la seguridad y efectividad de las transacciones¹⁴:

¹³ Estas credenciales otorgan al titular derechos o autorizaciones específicas, por ejemplo, el registro y título de vehículos, licencias de impuestos sobre el uso de combustible, licencias de viaje, autorización de operación, permisos de sobredimensionamiento y/o sobrepeso, permisos de transporte de materiales peligrosos, etc.
FHA, *NATIONAL PROGRAM PLAN FOR INTELLIGENT VEHICLE-HIGHWAY SYSTEM (IVHS)*, 1ª ed., Estados Unidos, Federal Highway Administration, 1993, p. III-13-2.

¹⁴ Ling, Yun *et al.*, *RSA-based secure electronic cash payment system*, Singapur, 2007 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, 2007, p. 1898.

- **Servicios de pago electrónico basados en comunicación V2I:** permite a los viajeros pagar por los servicios de transporte de forma electrónica, basados en la comunicación V2I.
- **Servicios de pago electrónico basados en sistemas de navegación global por satélite:** permite a los viajeros pagar por los servicios de transporte de forma electrónica, basados en sistemas de navegación global por satélite.

1.5.8. Sistemas de asistencia al peatón.

Los sistemas de asistencia al peatón están destinados a asistir a los peatones en escenarios con tránsito, por ejemplo, en las intersecciones vehiculares.

- **Guía de ruta para peatones:** ayuda a los peatones a encontrar las direcciones correctas para llegar a sus destinos.
- **Prevención de accidentes entre vehículo y peatón:** detecta situaciones peligrosas y proporciona las alertas necesarias tanto para vehículos como para peatones con el fin de evitar estas situaciones.

1.6. Diferencias entre STI y los sistemas de conducción automática.

Dentro de las aplicaciones de los STI, se encuentran descritos los sistemas de control de vehículo¹⁵, cuyo objetivo es el de asistir en la conducción a través de los elementos de infraestructura. Sin embargo, no se especifica en qué grado dicha asistencia involucra la operación del conductor a bordo del vehículo, por lo que puede resultar confusa la diferencia entre la conducción automática y la conducción asistida para dicha aplicación.

Desde la perspectiva de los sistemas de automatización de conducción de vehículos motorizados¹⁶, la *Society of Automotive Engineers*, proporciona una taxonomía con definiciones detalladas en donde identifica 6 niveles de conducción automatizada, en donde el nivel 0 se refiere a una conducción llevada a cabo completamente por el conductor, mientras que en el nivel 5 se hace referencia a una conducción totalmente automática, en la cual no es necesaria la intervención de algún usuario. Dicha clasificación se encuentra en la Tabla 1.1 y ayuda a determinar cuán involucrado se encuentra el conductor durante la conducción a través de las siguientes definiciones¹⁷:

- *Dynamic Driving Task* (DDT): aquellas funciones en tiempo real necesarias para conducir un vehículo en una carretera con tráfico (movimientos laterales, aceleración, etc.).

¹⁵ UIT-R, "Recommendation ITU-R M.1890-1. Operational radiocommunication objectives and requirements for advanced Intelligent Transport Systems", *Unión Internacional de Telecomunicaciones. Sector de Radiocomunicaciones*, Suiza, enero de 2019, p. 3. Consultado el 23 de marzo de 2020, disponible en: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.1890-1-201901-!//PDF-E.pdf

¹⁶ SAE international, *Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles*, Estados Unidos, SAE International, 2018, p. 2.

¹⁷ *Idem*, p. 6.

- *Operational Design Domain* (ODD): las condiciones de operación bajo las cuales un sistema de conducción automática está específicamente diseñado para funcionar, por ejemplo, las condiciones ambientales y geográficas.
- *Object and Event Detection and Response* (OEDR): es una subtarea del DDT que se encarga de monitorear el entorno de conducción (detectar, reconocer y clasificar), así como de ejecutar las acciones necesarias para completar la DDT.
- *Automated Driving System* (ADS): se refiere al software y hardware que de forma colectiva son capaces de llevar a cabo de forma total la DDT, sin importar si está limitada a un ODD en específico.

Tabla 1.1. Niveles de automatización de conducción¹⁸.

Nivel	Nombre	Descripción
0	Sin automatización de conducción	El conductor lleva a cabo toda la DDT, incluso cuando estén operando sistemas activos de seguridad ¹⁹ .
1	Asistencia al conductor	El sistema de automatización de conducción ²⁰ lleva a cabo el control del movimiento lateral o del movimiento longitudinal del vehículo (no ambas), bajo un esquema ODD específico, mientras que el conductor lleva a cabo todas las demás tareas de la DDT.
2	Automatización parcial de conducción	El sistema de automatización de conducción lleva a cabo el control del movimiento lateral y del movimiento longitudinal del vehículo, mientras que el conductor se encarga del OEDR y supervisa el desempeño del sistema.
3	Automatización condicional de conducción	El ADS lleva a cabo la DDT por completo, siempre que se encuentre un esquema ODD específico, de forma que se espera que el conductor tome el control cuando se sale del ODD, o bien, cuando bajo cualquier circunstancia la DDT no se ejecuta de forma óptima.
4	Alta automatización de conducción	El ADS lleva a cabo la DDT por completo, siempre que se encuentre en un esquema ODD específico y no se espera que el usuario intervenga.
5	Automatización completa de conducción	El ADS lleva a cabo la DDT por completo de forma incondicional, sin importar el ODD en el que se encuentre (en todos los posibles escenarios y condiciones de tráfico), sin la expectativa de que el usuario intervenga de alguna forma, bajo ninguna circunstancia.

Es claro que los sistemas de conducción automática involucran la operación de elementos muy diversos para ejecutar la conducción de un vehículo a diferentes niveles, que van más allá de interfaces de radiofrecuencia. Además, el reconocimiento de la conexión V2I, como un factor necesario para que la operación de vehículos automatizados mejore el flujo de tránsito²¹, permite ver cómo los STI son considerados como una herramienta dentro del

¹⁸ SAE international, *Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles*, Estados Unidos, SAE International, 2018, p. 19.

¹⁹ Sistemas vehiculares que monitorean las condiciones dentro y fuera del vehículo con el objetivo de identificar agentes potencialmente peligrosos para el vehículo, sus ocupantes y los demás usuarios de las vías (peatones, ciclistas, etc.), que actúan de forma inmediata para evitar o mitigar las potenciales colisiones.

²⁰ El sistema de automatización de conducción se refiere a cualquiera de los 6 niveles que pueden ser alcanzados por el sistema y, por lo tanto, es diferente al ADS.

²¹ Shladover, Steven *et al.*, *Road Vehicle Automation 2*, Suiza, Springer, 2014, p. 8.

desarrollo de sistemas de conducción automática para mejorar su desempeño; es decir, los sistemas de conducción automática pueden considerarse sistemas complejos constituidos por diversos elementos (tales como sistemas de mapeo digital, comunicación, procesamiento o reconocimiento del camino)²², de los cuales se desprenden sus propias aplicaciones y que, por lo tanto, están fuera del objetivo y alcance del presente estudio.

²² *Idem*, pp. 10-12

[Hoja intencionalmente en blanco]

Capítulo II. Principales tecnologías de los STI

En este capítulo se abordarán las principales tecnologías con las que operan los STI, las cuales han evolucionado de acuerdo a las diferentes arquitecturas y a los parámetros técnicos de estos sistemas. Debido a esto, se hace un breve análisis del funcionamiento de los estándares publicados por las siguientes organizaciones de estandarización:

- WAVE, del Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE, por las siglas en inglés de *Institute of Electrical and Electronics Engineers*),
- ITS-G5, del Instituto Europeo de Normas de Telecomunicaciones (ETSI, por las siglas en inglés de *European Telecommunications Standards Institute*) y,
- C-V2X, del Proyecto Asociación de Tercera Generación (3GPP, por las siglas en inglés de *3rd Generation Partnership Project*).

2.1. IEEE: WAVE.

El IEEE realizó la estandarización del WAVE (*Wireless Access Vehicular Environment*), el cual es un sistema de radiocomunicación móvil dedicado a proporcionar comunicaciones de datos V2V y V2I. El estándar WAVE es, por lo tanto, una tecnología idónea para las comunicaciones de los STI, que ayuda a vincular carreteras, tráfico y vehículos cubiertos por el despliegue de estos sistemas con tecnología de información coordinada e interoperable. La tecnología WAVE está basada en los estándares IEEE 802.11p (denominado acceso inalámbrico en entornos vehiculares) y el IEEE 1609.4²³ bajo un esquema de modulación de división de frecuencia ortogonal (OFDM, por las siglas en inglés de *Orthogonal Frequency Division Modulation*).

El objetivo principal del WAVE es controlar el flujo de vehículos y disminuir el tráfico en las ciudades para así reducir el número de accidentes entre ellos. Por lo tanto, mediante la tecnología WAVE es posible operar sistemas de control de vehículo y sistemas de administración de tráfico. Como se puede observar en la Figura 2.1, se ilustran dos casos en los que se utilizaría el WAVE para prevenir colisiones traseras. El primero se utiliza mediante el aviso a los vehículos cercanos cuando otro vehículo disminuye o aumenta su velocidad, mientras que el segundo se utiliza con una luz de emergencia extendida en caso de que un vehículo más grande (como un camión de carga) obstruya la visibilidad de los demás vehículos y también ayuda a informar sobre los cambios de velocidad, con el fin de evitar un accidente²⁴.

²³ UIT-R "Report ITU-R M.2445-0 (11/2018) Intelligent transport systems (ITS) usage", *Unión Internacional de Telecomunicaciones. Sector de Radiocomunicaciones*, Suiza, 2019, p. 23. Consultado el 29 de abril de 2022, disponible en: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKewiSwuP-gbr3AhWJDkQIHdz-AV8QFnoECAQQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.itu.int%2Fdmns_pub%2Fitu-r%2Fopb%2Frep%2FR-REP-M.2445-2018-PDF-E.pdf&usg=AOvVaw2_tFNh6XpVvg_QB9Q_E9pf

²⁴ Jiang, Daniel y Delgrossi, Luca, *IEEE 802.11p: Towards an International Standard for Wireless Access in Vehicular Environments*, Singapur, IEEE Vehicular Technology Conference, 2008, p. 2036.

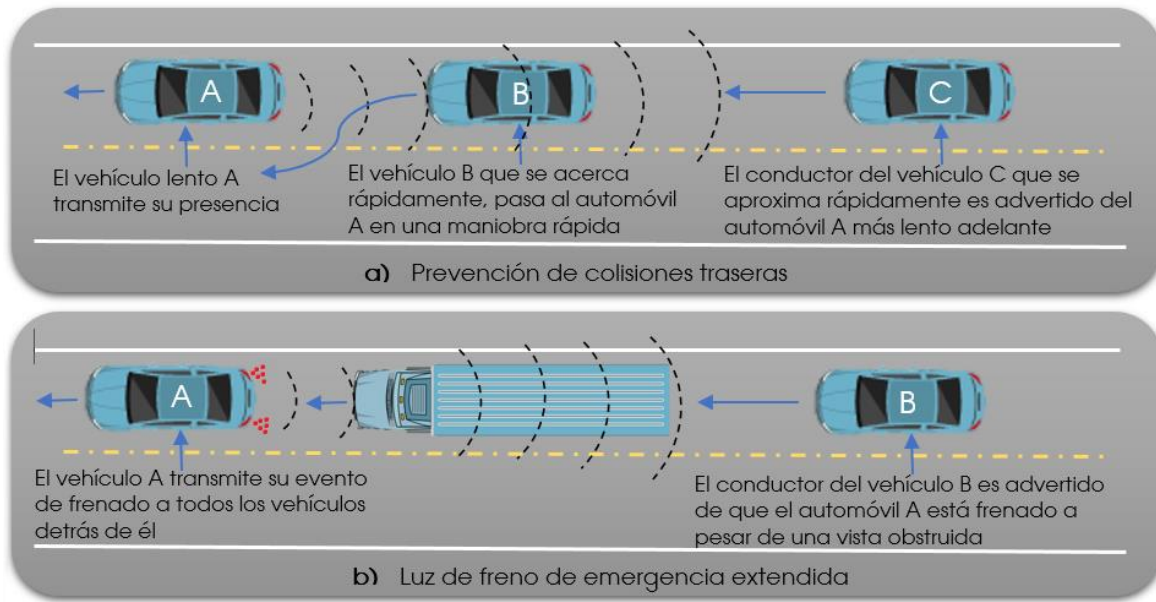


Figura 2.1. Ejemplos de comunicación del estándar WAVE²⁵.

El estándar IEEE 802.11p está basado en el estándar ASTM E2213 v2, el cual fue publicado por la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM, por las siglas en inglés de *American Society for Testing and Materials*). El estándar IEEE 802.11p es una enmienda al estándar IEEE 802.11 (WiFi)²⁶ y se encuentra enfocado principalmente a²⁷:

- Describir las funciones y servicios requeridos por las estaciones STI con el WAVE para operar en un entorno que varía rápidamente e intercambiar mensajes sin tener que unirse a un conjunto de servicios básicos (BSS²⁸, por las siglas en inglés de *Basic Service Set*), como en el caso de uso tradicional del IEEE 802.11, derivado de que el acceso inalámbrico en un entorno vehicular impone un conjunto de nuevos requisitos en el sistema de comunicaciones, lo que condujo a la introducción del modo operativo del estándar WAVE y del WAVE BSS en el IEEE 802.11p. Cuando operan en modo WAVE, las estaciones no necesitan unirse a un BSS ya que pueden intercambiar datos utilizando un Identificador de Conjuntos de Servicios Básicos, que está disponible en todo momento. Esto reduce drásticamente la configuración de la conexión aérea y se adapta bien a las aplicaciones de seguridad vehicular²⁹.
- Definir la técnica para el establecimiento de la comunicación entre los dispositivos que operan con la tecnología WAVE, así como las funciones de interfaz de usuario las

²⁵ Elaboración propia.

²⁶ Martin, Klapez, "Minimization of IEEE 802.11p Packet Collision Interference through Transmission Time Shifting", *Journal of Sensor and Actuator Networks*, Italia, 2020, p. 2. Consultado el 29 de abril de 2022, disponible en: <https://www.mdpi.com/2224-2708/9/2/17>

²⁷ Jiang, Daniel y Delgrossi, Luca, *IEEE 802.11p: Towards an International Standard for Wireless Access in Vehicular Environments*, Singapur, IEEE Vehicular Technology Conference, 2008, pp. 2036-2040.

²⁸ Un BSS es un grupo de estaciones IEEE 802.11 enlazadas por un punto de acceso (AP, por las siglas en inglés *Access Point*) y configuradas para comunicarse entre sí a través del enlace inalámbrico. Controla el acceso a los recursos y servicios de un AP y permite que una transmisora (escucha las señales de un AP y luego se une al BSS) filtre las emisiones de otras transmisoras no relacionadas cercanas.

²⁹ Aplicaciones de telemática de transporte y tráfico, a través de comunicaciones dedicadas de corto alcance.

cuales son controladas por la capa de control de acceso al medio (MAC, por las siglas en inglés de *Medium Access Control*).

La tecnología WAVE opera en la banda de frecuencias 5850 – 5925 MHz (banda de 5.9 GHz) y este estándar segmenta la banda de frecuencias de 5.9 GHz en 7 canales con un ancho de banda de 10 MHz para cada uno y un canal de 5 MHz usado como banda de guarda. En la Tabla 2.1 se describe la canalización del estándar IEEE 802.11p. Los canales 174 y 176 así como los canales 180 y 182 pueden ser combinados para formar los canales 175 y 181 respectivamente, con anchos de banda de 20 MHz³⁰.

Tabla 2.1. Canalización del estándar IEEE 802.11p³¹.

Número de canal	Rango de frecuencias [MHz]	Tipo de canal	Uso del canal
170	5850-5855	Reservado	Es usado como guarda banda (GB).
172	5855-5865	Designado para aplicaciones de seguridad pública	Provee soluciones de comunicación prioritarias como la prevención de colisiones y la comunicación V2V.
174	5865-5875	Canal de Servicio	Usados para proveer servicios generales de datos del Protocolo de Internet (IP, por las siglas en inglés <i>Internet Protocol</i>) en la capa de aplicación, por ejemplo, para video llamadas o para la transferencia de datos.
175	5865-5885	Canal de Servicio	
176	5875-5885	Canal de Servicio	
178	5885-5895	Canal de Control	Responsable de la configuración del canal, controlar la transmisión del enlace de broadcast, la corrección de errores de señal y la transmisión de mensajes de tiempo crítico.
180	5895-5905	Canal de Servicio	Usados para proveer servicios generales de datos IP en la capa de aplicación, por ejemplo, para video llamadas o para la transferencia de datos.
181	5895-5915	Canal de Servicio	
182	5905-5915	Canal de Servicio	
184	5915-5925	Designado para aplicaciones de seguridad pública	Canal de alta potencia para comunicaciones de larga distancia y alta potencia, juega un rol protector contra la congestión en otros canales.

Conforme a lo descrito en la Tabla 2.1, en la Figura 2.2 se ilustra la banda de frecuencias y los canales del IEEE 802.11p.

³⁰ Saad, Aws *et al.*, "Vehicular Ad Hoc Networks: Growth and Survey for Three Layers", *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, febrero de 2017, p. 276. Consultado el 29 de abril de 2022, disponible en: <http://ijece.iaescore.com/index.php/IJECE/article/view/6278>

³¹ *Idem.*

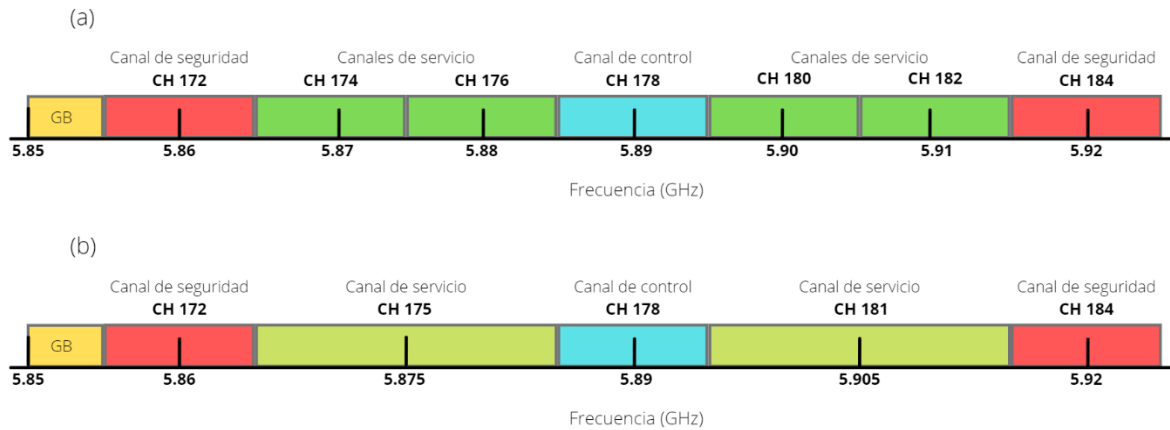


Figura 2.2. Banda de frecuencias empleada por el estándar IEEE 802.11p: a) banda de IEEE 802.11p con 7 canales de 10 MHz; (b) banda de IEEE 802.11p con 3 canales de 10 MHz y 2 canales de 20 MHz³².

De acuerdo a este estándar, la tecnología WAVE presenta la arquitectura que se muestra en la Figura 2.3. En el protocolo de bloques el sistema WAVE incluye los estándares IEEE P1609.1, IEEE P1609.2, IEEE P1609.3, IEEE P1609.4 y el propio IEEE 802.11p, los cuales definen la arquitectura, modelos de comunicación, estructura de gestión, seguridad y características de acceso físico para vehículos en carretera y el entorno³³. En específico, el estándar IEEE 802.11p se utiliza para el control de acceso a medios (MAC) y la capa física (PHY), mientras que el conjunto de protocolos IEEE P1609 es utilizado para las capas de aplicación, transporte, red y enlace de datos, así como en la gestión de recursos y seguridad, además de la gestión de recursos, el servicio de seguridad y la gestión de la información, los servicios de red y el funcionamiento multicanal³⁴.

³² Elaboración propia.

³³ Prabhat, Singh, Ghanshyam y Thakur, *Spectrum Sharing in Cognitive Radio Networks: Towards Highly Connected Environments*, 1a ed., Estados Unidos, Wiley, 2021, p. 314.

³⁴ Saad, Aws *et al.*, "Vehicular Ad Hoc Networks: Growth and Survey for Three Layers", *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, febrero de 2017, p. 276. Consultado el 29 de abril de 2022, disponible en: <http://ijece.iaescore.com/index.php/IJECE/article/view/6278>

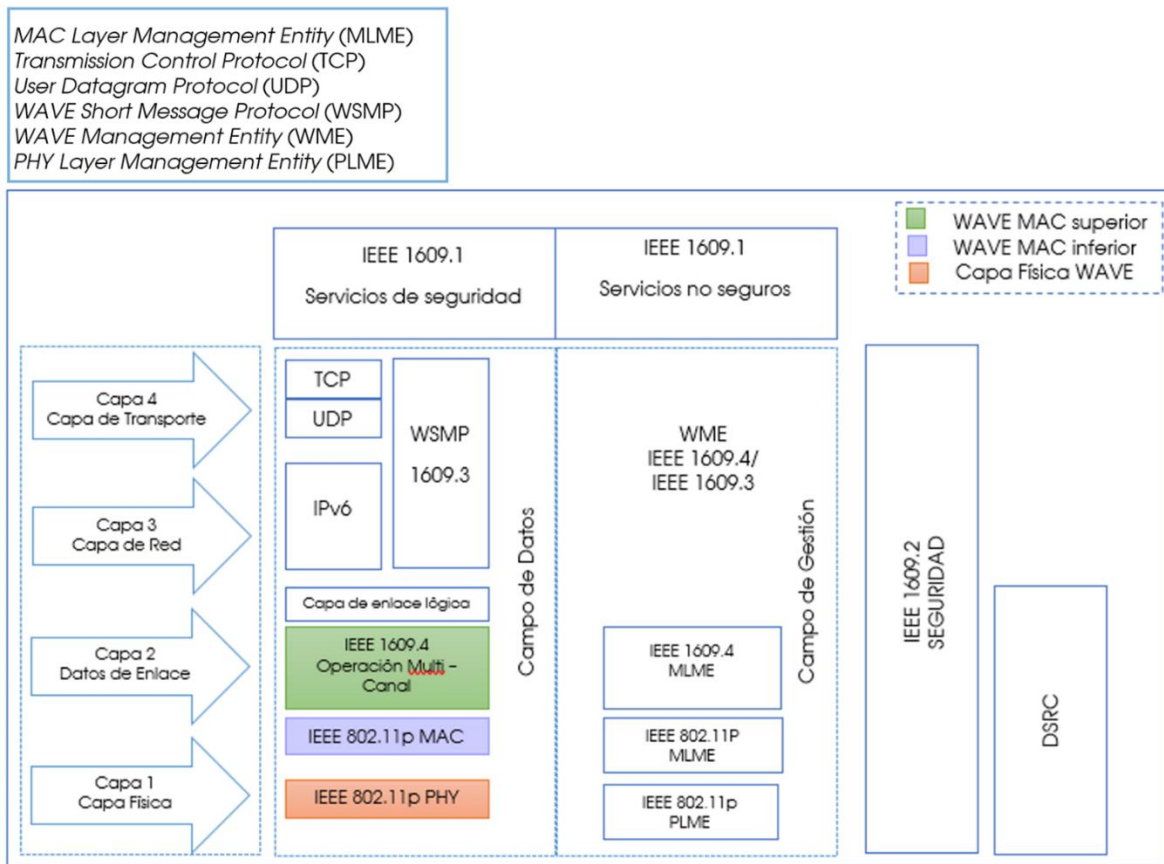


Figura 2.3. Protocolo en bloques del estándar WAVE³⁵.

Como se muestra en la Figura 2.3, el estándar IEEE 802.11p, es solo una parte de un grupo de estándares relacionados con todas las capas de protocolos para operaciones basadas en las Comunicaciones Dedicadas de Corto Alcance (DSRC, por las siglas en inglés de *Dedicated Short Range Communications*). Si bien el estándar IEEE 802.11p está limitado por el alcance del estándar IEEE 802.11 (que es estrictamente un estándar de nivel MAC y PHY (*Physical Layer*) destinado a funcionar a cortas distancias), todo el conocimiento y las complejidades relacionadas con el plan de canal DSRC y el concepto operativo están a cargo de los estándares IEEE 1609 de la capa superior. En particular, el estándar IEEE 1609.3 cubre la configuración y administración de la conexión del estándar WAVE y el estándar IEEE 1609.4 permite el funcionamiento de capas superiores a través de múltiples canales, sin requerir conocimiento de los parámetros PHY³⁶. La arquitectura del estándar WAVE tiene como prioridad mejorar la seguridad de las personas evitando accidentes, y por extensión, la seguridad de sus bienes y de los bienes públicos, es decir, las vías, carreteras o alumbrados, por lo que presenta una comunicación bidireccional V2I, incluyendo la capacidad de proporcionar mensajes prioritarios a unidades involucradas en entornos de transporte público y privado.

³⁵ Elaboración propia con información de Jiang, Daniel y Delgrossi, Luca, *IEEE 802.11p: Towards an International Standard for Wireless Access in Vehicular Environments*, Singapur, IEEE Vehicular Technology Conference, 2008.

³⁶ Jiang, Daniel y Delgrossi, Luca, *IEEE 802.11p: Towards an International Standard for Wireless Access in Vehicular Environments*, Singapur, IEEE Vehicular Technology Conference, 2008, p. 2037.

Además, la tecnología WAVE permite que dos vehículos que se mueven rápidamente (entre 80 km/h y 180 km/h aproximadamente)³⁷ dentro de la distancia comunicable (cuya máxima distancia varía entre 300 m y 1000 m aproximadamente, con línea de vista directa)³⁸ pueden iniciar directamente su intercambio de datos utilizando un identificador único para cada vehículo. Para ello, el estándar WAVE se apoya en el Protocolo de Internet versión 6 (IPv6) para crear una BSS, en la cual se definen los términos para establecer la comunicación a través del canal de control y se transmite la información relacionada a los vehículos y/o infraestructura a través del canal de servicio³⁹.

Los sistemas del estándar WAVE operan transmitiendo señales de radio para intercambiar datos entre vehículo-vehículo y entre vehículo-infraestructura. Para esto se emplean dos tipos de equipos⁴⁰:

- Unidades a bordo (OBU, por las siglas en inglés de *On Board Unit*), que consisten en equipos de comunicación y procesamiento instalados en los vehículos para establecer comunicaciones WAVE con otros vehículos e infraestructura. Las OBU son más efectivas cuando están integradas dentro del vehículo y están habilitadas para interactuar con otros equipos a bordo del vehículo, como el conjunto de sensores del vehículo, el sistema de frenos antibloqueo y otros subsistemas, lo que permite complementar los sistemas existentes.
- Unidades al borde de la carretera (RSU, por las siglas en inglés de *Road Side Unit*), estas se encuentran instaladas sobre o a lo largo de la carretera u otra infraestructura y se comunican con las OBU que pasan, mediante el uso de radio señales. Una RSU consiste en circuitos de radiocomunicación, un circuito de procesamiento y equipo relacionado (módulos para la gestión remota, fuente de alimentación, armazón, entre otros). Pueden estar enlazadas con centros de gestión de tráfico y otros equipos al borde de la carretera (como señales para controlar el tráfico), así como al Internet para intercambiar datos y mantener información de credenciales de seguridad.

El estándar IEEE P1609.2 está basado en estándares como la criptografía de curva elíptica⁴¹, formatos de certificado de WAVE y métodos de cifrado híbrido. Los mensajes de *broadcast* generalmente no se dirigen a un destino en particular y están relacionados con aplicaciones de seguridad. Además, contienen el sello de tiempo que se obtiene del reloj interno para la sincronización. Sin embargo, estos mensajes solo se firman con el certificado del remitente. El estándar WAVE usa el algoritmo de firma digital de curva elíptica. Los mensajes de transacción son generalmente mensajes de unidifusión y se pueden usar para acceder a

³⁷ Chen, Shuai et.al., "Key Indices Analysis of IEEE 802.11p Based Vehicle to Infrastructure System in Highway Environment", Elsevier, China, 2013. Consultado el 29 de abril de 2022, disponible en: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S1877042813021514?token=B75CC0060DD82367F875DF47884A4867CA38BD9DF89E90B520112C3EDD9AFB04FD144CFFD3AC93603CD709B23C0800C5>

³⁸ UIT-R, "REPORT ITU-R M.2445-0-Intelligent transport systems (ITS) usage", Unión Internacional de Telecomunicaciones. Sector de Radiocomunicaciones, noviembre de 2018, consultado el 30 de mayo del 2020, disponible en: https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2445-2018-PDF-E.pdf

³⁹ Jiang, Daniel y Delgrossi, Luca, IEEE 802.11p: Towards an International Standard for Wireless Access in Vehicular Environments, Singapur, IEEE Vehicular Technology Conference, 2008, pp. 2036-2040.

⁴⁰ UIT-R "REPORT ITU-R M.2445-0-Intelligent transport systems (ITS) usage", Unión Internacional de Telecomunicaciones. Sector de Radiocomunicaciones, noviembre de 2018. Consultado el 29 de abril de 2022, disponible en: https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2445-2018-PDF-E.pdf

⁴¹ Es una forma de criptografía de clave pública en la que las claves se representan mediante puntos en una curva elíptica acordada por las partes que se comunican. Provee una seguridad mayor que los sistemas de criptografía tradicionales. Jao, David, Handbook of Information and Communication Security, 1ª ed., Alemania, Springer, 2010, p. 35-57.

servicios basados en la ubicación y datos personales. En consecuencia, para proteger los datos, estos mensajes se cifran con un algoritmo de cifrado simétrico. Para garantizar una mayor protección, el algoritmo utiliza una clave aleatoria que se cifra mediante el esquema de cifrado integrado de curva elíptica⁴².

En la Tabla 2.2 se describen los parámetros técnicos de los dispositivos que funcionan con el estándar WAVE.

Tabla 2.2. Parámetros técnicos del estándar WAVE⁴³.

Parámetro	WAVE
Potencia pico del transmisor (dBm)	Potencia Isotrópica Radiada Equivalente (PIRE) de 23 a 44.8 dBm (depende del canal usado, si el dispositivo es RSU u OBU, y si es para uso gubernamental o privado)
Sensibilidad del receptor (dBm)	-92 dBm como valor mínimo -94 dBm como valor típico
Modulación	Modulación por desplazamiento de fase binaria (BPSK, por las siglas en inglés de <i>Binary Phase Shift Keying</i>), Modulación por desplazamiento de fase en cuadratura (QPSK, por las siglas en inglés de <i>Quadrature Phase Shift Keying</i>), Modulación de amplitud en cuadratura de 16 símbolos (16-QAM, por las siglas en inglés de <i>16-Quadrature Amplitude Modulation</i>) y Modulación de amplitud en cuadratura de 64 símbolos (64-QAM, por las siglas en inglés de <i>64-Quadrature Amplitude Modulation</i>). ⁴⁴
Velocidad de transmisión (Mb/s)	Dependiendo de la modulación empleada: 3, 4.5, 6, 9, 12, 18, 24 o 27 Mb/s (3, 6, y 12 Mb/s son obligatorios)
Tipo de antena	Para vehículos e infraestructura se usan antenas omnidireccionales. A veces se usan antenas sectoriales para los transmisores instalados en la infraestructura.
Altura de la antena (m)	1.5 a 15 m
Polarización de la antena	Vertical o circular.
Latencia (ms)	100 ms
Radio máximo de cobertura (m)	1000 m con línea de vista
Velocidad máxima entre dispositivos (km/h)	80 km/h a 180 km/h ⁴⁵

⁴² Alnasser, Aljawharah *et al.*, "Cyber security challenges and solutions for V2X communications: A survey", *Elsevier*, 14 de marzo de 2019, p. 55. Consultado el 10 de mayo de 2022, disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1389128618306157>

⁴³ UIT-R "REPORT ITU-R M.2445-0-Intelligent transport systems (ITS) usage", *Unión Internacional de Telecomunicaciones. Sector de Radiocomunicaciones*, noviembre de 2018. Consultado el 29 de abril de 2022, disponible en: https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2445-2018-PDF-E.pdf

⁴⁴ Abeldime M.S., Abdelgader y Wu, Lenan., "The Physical Layer of the IEEE 802.11p WAVE Communication Standard: The Specifications and Challenges", *Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science 2014 Vol II*, Estados Unidos, octubre de 2014. Consultado el 10 de febrero del 2022, disponible en: http://www.iaeng.org/publication/WCECS2014/WCECS2014_pp691-698.pdf

⁴⁵ Jiang, Daniel y Delgrossi, Luca, *IEEE 802.11p: Towards an International Standard for Wireless Access in Vehicular Environments*, Singapur, IEEE Vehicular Technology Conference, 2008, pp. 2036-2040.

2.1.1. Estándares ASTM: ASTM E2213-03 y ASTM E2665-08.

Al abordar la estandarización de las comunicaciones de STI, la ASTM se concentra principalmente en el servicio de comunicaciones dedicadas de corto alcance, cuyo funcionamiento se describe en el estándar ASTM E2213-03. De igual forma, mediante el estándar ASTM E2665-08, se estandariza un sistema de gestión de archivos de datos de monitoreo de tráfico generados por los STI. A continuación, se explican las principales características de ambos estándares.

2.1.1.1. ASTM E2213-03.

La ASTM publicó el estándar ASTM E2213-03 "*Standard Specification For Telecommunications And Information Exchange Between Roadside And Vehicle Systems 5 GHz Band Dedicated Short Range Communications (DSRC) Medium Access Control (MAC) And Physical Layer (PHY) Specifications*", el cual tiene como propósito proporcionar comunicaciones inalámbricas a distancias cortas (menores a 1000 m) entre fuentes de información y estaciones de transacciones en el borde de la carretera y unidades de radio móviles, entre unidades móviles y entre unidades portátiles y unidades móviles. Esta especificación fue hecha para ser una extensión de la tecnología IEEE 802.11p del estándar WAVE en el entorno de los vehículos de alta velocidad. Define un control de acceso al medio y una interfaz aérea que permite la entrega de mensajes precisa y válida con OBU que se montan principalmente en vehículos en movimiento de alta velocidad. Las comunicaciones también ocurren entre vehículos estacionarios o de baja velocidad y RSU en el borde de la carretera o fuera de ella, en áreas privadas o públicas⁴⁶.

La canalización para las DSRC establecida en el ASTM E2213-03 es muy similar a la canalización utilizada por el WAVE. La banda DSRC emplea 7 canales de 10 MHz y un guarda banda de 5 MHz, los canales 172 y 184 están designados para aplicaciones de seguridad pública, los canales 174, 176, 180 y 182 son canales de servicio usados para proveer servicios generales de datos, y el canal 178 es el canal de control. Los canales 174 y 176 así como los canales 180 y 182 se pueden combinar respectivamente para crear dos canales de 20 MHz. En la Tabla 2.3 se describe la canalización del estándar ASTM E2213-03.

Tabla 2.3. Canalización del estándar ASTM E2213-03⁴⁷.

Número de canal	Rango de frecuencias [MHz]	Tipo de canal	Uso del canal
170	5850-5855	Reservado	Es usado como guarda banda (GB).
172	5855-5865	Designado para aplicaciones de seguridad pública	Provee soluciones de comunicación prioritarias como la prevención de colisiones y la comunicación V2V.
174	5865-5875	Canal de Servicio	Usado para proveer servicios generales de datos IP en la capa de aplicación, por ejemplo, para video llamadas o para la transferencia de datos.
175	5865-5885	Canal de Servicio	
176	5875-5885	Canal de Servicio	

⁴⁶ ASTM, "Standard Specification for Telecommunications and Information Exchange Between Roadside and Vehicle Systems — 5 GHz Band Dedicated Short Range Communications (DSRC) Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications", *American Society for Testing and Materials*, Estados Unidos, 2018.

⁴⁷ *Idem*.

Número de canal	Rango de frecuencias [MHz]	Tipo de canal	Uso del canal
178	5885-5895	Canal de Control	Responsable de la configuración del canal, controlar la transmisión del enlace de broadcast, la corrección de errores de señal y la transmisión de mensajes de tiempo crítico.
180	5895-5905	Canal de Servicio	Usado para proveer servicios generales de datos IP en la capa de aplicación, por ejemplo, para video llamadas o para la transferencia de datos.
181	5895-5915	Canal de Servicio	
182	5905-5915	Canal de Servicio	
184	5915-5925	Designado para aplicaciones de seguridad pública	Canal de alta potencia para comunicaciones de larga distancia y alta potencia, juega un rol protector contra la congestión en otros canales.

De acuerdo con lo descrito en la tabla anterior, la Figura 2.4 ilustra la banda de frecuencias usada por las DSRC.

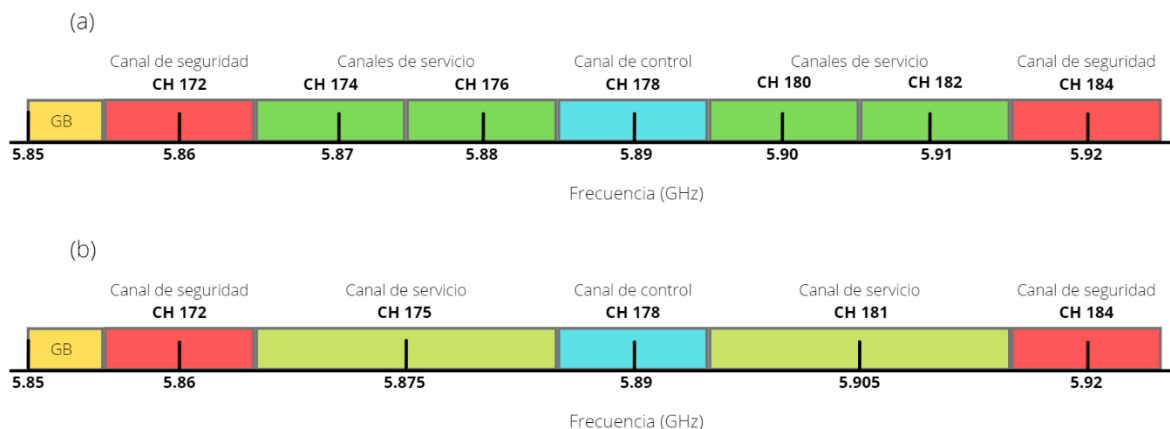


Figura 2.4. Banda de frecuencias usada por las DSRC: (a) banda de las DSRC con 7 canales de 10 MHz; (b) banda de las DSRC con 3 canales de 10 MHz y 2 canales de 20 MHz⁴⁸.

Los límites de potencia para las DSRC dependerán del tipo de dispositivo (OBU o RSU), del canal usado y de si las operaciones son de seguridad pública o si son privadas. Para los canales cuyas operaciones sean de seguridad pública se podrá alcanzar una PIRE de hasta 48.8 dBm y para los canales con operaciones privadas se tendrá un límite de 23 dBm⁴⁹.

Los dispositivos de las DSRC deben ser capaces de transferir mensajes hacia y desde vehículos a velocidades de 136 km/h con una Tasa de Error de Paquete (PER, por las siglas en inglés *Packet Error Rate*) de menos del 10% para los dispositivos que utilizan tramas de datos con longitudes de 1000 bytes, y hacia y desde vehículos a velocidades de 193 km/h con PER inferior al 10% para dispositivos con tramas de datos de longitudes de 64 bytes⁵⁰.

Las RSU de las DSRC pueden funcionar como estaciones o puntos de acceso y las OBU de las DSRC sólo tienen funciones consistentes a esas estaciones, es decir, su funcionalidad

⁴⁸ Elaboración propia.

⁴⁹ ASTM, "Standard Specification for Telecommunications and Information Exchange Between Roadside and Vehicle Systems — 5 GHz Band Dedicated Short Range Communications (DSRC) Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications", *American Society for Testing and Materials*, Estados Unidos, 2018.

⁵⁰ *Idem*.

depende del tipo de estación con la que se comuniquen. Las funciones comunes entre todas las RSU son que estas unidades estacionarias controlan el acceso al medio de Radiofrecuencia (RF) para las OBU en su zona de comunicación o para designar el control como únicamente transmisión de datos. En la Figura 2.5 se ilustra la comunicación entre OBU y RSU.

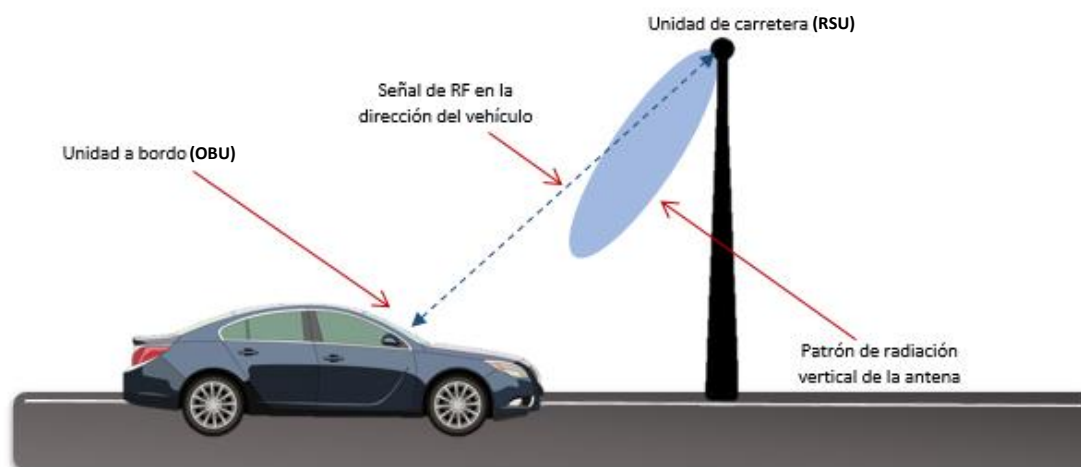


Figura 2.5. Comunicación de Unidad a bordo con Unidad de carretera⁵¹.

Con el fin de acomodar este ambiente más dinámico con esencialmente la misma tecnología de radio y así proveer comunicaciones públicas seguras, las DSRC usan una estrategia de acceso a canales diferentes a las unidades de IEEE 802.11p, empleando reglas de operaciones adicionales⁵²:

- La estrategia de administración de sistemas se describe primordialmente en el estándar de canal de control y de canal de servicio. La esencia de esta estrategia es la identificación de un sistema de accesos prioritarios y un canal de servicio de envío de datos obligatorio que transfiere límites de tiempo mientras esté activo. Una OBU sólo escucha el canal de control por mensajes o anuncios de la aplicación y un intercambio de asignación de canal de datos, pero no escanea otras estaciones.
- La potencia de RF, sensibilidad, y los patrones de antena son intencionados para ser referenciados a una ubicación estándar del vehículo. Esta ubicación estándar se busca que sea en la defensa frontal del pasajero del vehículo o el equivalente en un vehículo comercial.

Por último, la norma de las DSRC en la capa PHY para la banda de 5.9 GHz especifica que los dispositivos del STI deben operar bajo un esquema de modulación OFDM. El esquema de modulación OFDM proporciona a las DSRC capacidades de comunicación de carga útil de datos de 3, 4, 5, 6, 9, 12, 18, 24 y 27 Mbit/s. Además, se pueden admitir capacidades de carga útil de datos de 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48 y 54 Mbit/s en combinaciones de canales opcionales.

⁵¹ Elaboración propia.

⁵² ASTM, "Standard Specification for Telecommunications and Information Exchange Between Roadside and Vehicle Systems – 5 GHz Band Dedicated Short Range Communications (DSRC) Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications", *American Society for Testing and Materials*, Estados Unidos, 2018.

El soporte de transmisión y recepción a velocidades de datos de 3, 6 y 12 Mbit/s es obligatorio. El sistema utiliza 52 sub-portadoras, moduladas mediante modulación BPSK o QPSK, 16-QAM o 64-QAM. La codificación de corrección de errores directa (codificación por convolución) se utiliza con una tasa de codificación de 1/2, 2/3 o 3/4. En la Tabla 2.4 se enlistan las tasas de transmisión y su relación con los tipos de modulación y las tasas de codificación.

Tabla 2.4. Tasas de transmisión de bits y modulaciones de las DSRC⁵³.

Tasa de transmisión de bits (Mbits/s)	Modulación	Tasa de codificación (R)
3	BPSK	1/2
4.5	BPSK	3/4
6	QPSK	1/2
9	QPSK	3/4
12	16-QAM	1/2
18	16-QAM	3/4
24	64-QAM	2/3
27	64-QAM	3/4

A manera de resumen, en la Tabla 2.5 se describen los parámetros técnicos de los dispositivos de las DSRC.

Tabla 2.5. Parámetros técnicos de las DSRC⁵⁴.

Parámetro	DSRC
Potencia pico del transmisor (dBm)	PIRE de 23 a 44.8 dBm (depende del canal usado, si el dispositivo es RSU u OBU y si es para uso gubernamental o privado)
Sensibilidad del receptor RSU y OBU (dBm)	-85 dBm con BPSK -67 dBm con 64-QAM
Modulación (OFDM)	BPSK, QPSK, 16-QAM y 64-QAM ⁵⁵
Velocidad de transmisión (Mb/s)	Dependiendo de la modulación empleada: 3, 4.5, 6, 9, 12, 18, 24 o 27 Mb/s (3, 6, y 12 Mb/s son obligatorios)
Tipo de antena	Para vehículos e infraestructura se usan antenas omnidireccionales. A veces se usan antenas sectoriales para los transmisores instalados en la infraestructura.
Polarización de la antena	Vertical o circular.

⁵³ ETSI, "ETSI EN 302 663 V1.2.0 (2012-11) Intelligent Transport Systems (ITS); Access layer specification for Intelligent Transport Systems operating in the 5 GHz frequency band", *European Telecommunications Standards Institute*, Francia, mayo de 2019, p. 16. Consultado el 2 de mayo de 2022, disponible en: https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302600_302699/302663/01.03.00_20/en_302663v010300a.pdf

⁵⁴ ASTM, "Standard Specification for Telecommunications and Information Exchange Between Roadside and Vehicle Systems — 5 GHz Band Dedicated Short Range Communications (DSRC) Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications", *American Society for Testing and Materials*, Estados Unidos, 2018.

⁵⁵ Abeldime M.S., Abdelgader y Wu, Lenan., "The Physical Layer of the IEEE 802.11p WAVE Communication Standard: The Specifications and Challenges", *Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science 2014 Vol II*, Estados Unidos, octubre de 2014. Consultado el 10 de febrero del 2022, disponible en: http://www.iaeng.org/publication/WCECS2014/WCECS2014_pp691-698.pdf

Parámetro	DSRC
Latencia (ms)	100 ms
Radio máximo de cobertura (m)	1000 m con línea de vista
Velocidad máxima entre dispositivos (km/h)	136 km/h a 193 km/h ⁵⁶

2.1.1.2. ASTM E2665-08.

Mientras que muchos STI recolectan datos de tráfico, son pocos los que resguardan estos datos de manera permanente en un medio de almacenamiento accesible. La ASTM explica que el estándar ASTM E2665-08 "*Standard Specification for Archiving ITS-Generated Traffic Monitoring Data*" se ocupa del archivo de datos de monitoreo de tráfico generado por los STI, incluidos aquellos datos de monitoreo de tráfico convencionales, datos recopilados directamente de los STI y datos de tiempo de viaje de vehículos de prueba. De igual forma, está destinado al uso principal por parte de desarrolladores y administradores de sistemas de gestión de datos archivados, y también puede ser utilizado por las operaciones de tráfico y las partes interesadas en la planificación que necesitan comprender el contenido del sistema de gestión de datos archivados. Su principal objetivo es promover la interoperabilidad entre los sistemas de tráfico y los archivos⁵⁷.

Un sistema de gestión de datos archivados recopila, archiva, administra y distribuye datos generados a partir de fuentes STI para su uso en la administración del transporte, evaluación de políticas, seguridad, planificación, monitoreo del desempeño, evaluación de programas, operaciones y aplicaciones de investigación. Estos archivos también integran datos de monitoreo de tráfico convencional junto con los datos de tráfico generados por los STI⁵⁸.

Algunas aplicaciones soportadas por el estándar ASTM E2665-08 son el apoyo a la gestión de incidentes, diseminación de información del viajero, apoyo a las medidas de desempeño, planificación del programa del sistema de transporte inteligente, programa de monitoreo del tráfico, planificación de corredores inteligentes, planificación de evacuación y desvío, apoyo a la planificación de seguridad, planificación de operaciones, previsión de la demanda de viajes y soporte de simulación.

2.2. ETSI: ITS-G5.

Estandarizada por el ETSI, ITS-G5 es la tecnología de acceso para ser utilizada en las bandas de frecuencia de 5470 a 5725 MHz y de 5855 a 5925 MHz, dedicadas a los STI en Europa para respaldar las comunicaciones de V2V y V2I. La tecnología especificada para la capa de acceso se denomina ITS-G5.

⁵⁶ ASTM, "Standard Specification for Telecommunications and Information Exchange Between Roadside and Vehicle Systems — 5 GHz Band Dedicated Short Range Communications (DSRC) Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications", *American Society for Testing and Materials*, Estados Unidos, 2018.

⁵⁷ ASTM E2665-08, "ASTM E2665-08 - Standard Specifications for Archiving ITS-Generated Traffic Monitoring Data", *U.S. DOT*, Estados Unidos, 28 de septiembre de 2009. Consultado el 21 de febrero de 2022, disponible en: <https://www.standards.its.dot.gov/Factsheets/PrintFactsheet/74>

⁵⁸ *Idem*.

El estándar ITS-G5 utiliza estándares ya existentes para comunicaciones. La capa de enlace de datos se divide en dos subcapas: MAC y control de enlace lógico. La capa PHY y la capa MAC están cubiertas bajo el estándar IEEE 802.11. El control de enlace lógico se basa en ANSI/IEEE Std 802.2. El estándar ITS-G5 también agrega características para métodos de control de congestión descentralizado (DCC, por las siglas en inglés *Decentralized Congestion Control*) para controlar la carga de la red y evitar un comportamiento inestable⁵⁹.

El sistema básico del estándar ITS-G5 está totalmente armonizado con la tecnología WAVE. Sin embargo, a diferencia del WAVE, el ITS-G5 fue desarrollado completamente bajo un sistema *ad-hoc*⁶⁰ cuyo funcionamiento no recae en ningún componente fijo de red, como los puntos de acceso, las estaciones base, u otros componentes de la infraestructura⁶¹.

El espectro que utiliza el ITS-G5 se divide en tres secciones principales: ITS-G5A (5875-5905 MHz), ITS-G5B (5855-5875 MHz) e ITS-G5D (5905-5925 MHz). Para las bandas de espectro ITS-G5A e ITS-G5B, la separación de canales es de 10 MHz. La banda de frecuencias ITS-G5A está reservada para aplicaciones de seguridad vial STI y solo se permite su uso por estaciones que cumplen con ITS-G5. La banda de frecuencias ITS-G5B está reservada para aplicaciones STI de tráfico vial que no sean de seguridad y solo se permite su uso en estaciones que cumplan con el estándar ITS-G5. Adicionalmente, en la banda de frecuencias ITS-G5C (5470-5725 MHz) operan redes de acceso de radio de banda ancha, redes de radio de área local y redes inalámbricas de área local⁶². La Tabla 2.6 muestra los rangos de frecuencia, los requisitos reglamentarios relacionados, el uso y las normas que se utilizarán para la asignación de los STI dentro de la Unión Europea.

Tabla 2.6. Asignación de frecuencias en la Unión Europea⁶³.

Banda	Rango de Frecuencia (MHz)	Uso	Regulación	Estándar
ITS-G5A	5875 a 5905	STI relacionados con aplicaciones de seguridad vial.	Decisión (UE) 2020/1426	EN 302 571
ITS-G5B	5855 a 5875	STI no relacionados con aplicaciones de seguridad, pero si con aplicaciones de tráfico vial.	Recomendación ECC/REC/(08)01	EN 302 571

⁵⁹ ETSI, "Intelligent Transport Systems (ITS); Access layer specification for Intelligent Transport Systems operating in the 5 GHz frequency band", *European Telecommunications Standards Institute*, 2012. Consultado el 29 de abril de 2022, disponible en: https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302600_302699/302663/01.02.00_20/en_302663v010200a.pdf

⁶⁰ Una red ad-hoc es una red inalámbrica que conecta dinámicamente dispositivos cliente inalámbricos entre sí sin el uso de un dispositivo de infraestructura, como un punto de acceso o una estación base.

NIST, "Archived NIST Technical Series Publication", *National Institute of Standards and Technology*, Estados Unidos, mayo de 2017, p. 35. Consultado el 19 de abril de 2022, disponible en: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/SP/nistspecialpublication800-121r1.pdf>

⁶¹ UIT-R "REPORT ITU-R M.2445-0-Intelligent transport systems (ITS) usage", *Unión Internacional de Telecomunicaciones. Sector de Radiocomunicaciones*, noviembre de 2018, p. 33. Consultado el 29 de abril de 2022, disponible en: https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2445-2018-PDF-E.pdf

⁶² ETSI, "ETSI EN 302 663 V1.2.0 (2012-11) Intelligent Transport Systems (ITS); Access layer specification for Intelligent Transport Systems operating in the 5 GHz frequency band", *European Telecommunications Standards Institute*, Francia, mayo de 2019, p.10. Consultado el 2 de mayo de 2022, disponible en: https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302600_302699/302663/01.03.00_20/en_302663v010300a.pdf

⁶³ *Idem*.

Banda	Rango de Frecuencia (MHz)	Uso	Regulación	Estándar
ITS-G5C	5470 a 5725	Red de radio de área local (Redes de acceso por radio de banda ancha y Redes inalámbricas locales).	Decisiones ECC/DEC/(04)08 y (EU) 2022/179	EN 301 893
ITS-G5D	5905 a 5925	Futuras aplicaciones de STI.	Decisión ECC/DEC/(12)04	EN 302 571

La Figura 2.6 ilustra la asignación de canales en el rango de 5 GHz para las bandas de frecuencia enumeradas en la Tabla 2.6. También muestra las bandas europeas para la comunicación dedicada de corto alcance, que en Europa se refiere a la norma EN 300 674, utilizada para el cobro de peaje electrónico⁶⁴.

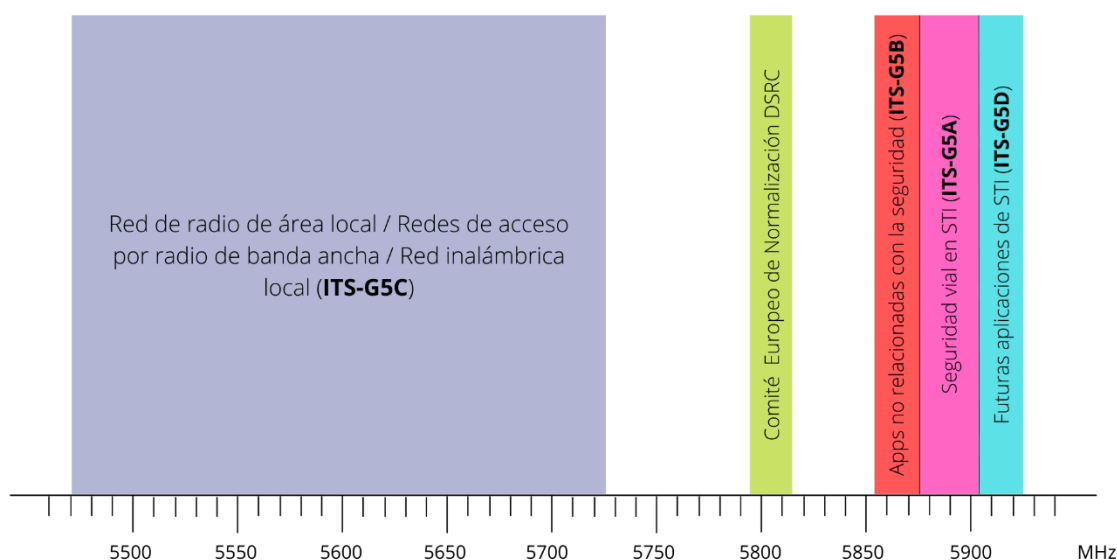


Figura 2.6. Asignación de canales para el rango de frecuencias de 5 GHz del ITS-G5⁶⁵.

Además de los requerimientos tradicionales para el transmisor y el receptor, el ITS-G5 especifica el uso de un mecanismo de protección de los sistemas basados en las DSRC del Comité Europeo de Normalización que operan en la banda de frecuencias de 5795 MHz a 5815 MHz. Estos mecanismos y restricciones optimizarán una coexistencia fluida en ambos sistemas operando en una vecindad cercana. Conjuntamente, en la especificación ETSI TS 103 175 se explica que los sistemas del ITS-G5 deben implementar un mecanismo de control de congestión para garantizar una operación fluida bajo condiciones de alta carga de canal⁶⁶.

El DCC es un componente obligatorio de las estaciones del ITS-G5 que operan en las bandas de frecuencia ITS-G5A e ITS-G5B para mantener la estabilidad de la red, la eficiencia del

⁶⁴ *Ibidem*.

⁶⁵ Elaboración propia.

⁶⁶ UIT-R "REPORT ITU-R M.2445-0-Intelligent transport systems (ITS) usage", *Unión Internacional de Telecomunicaciones. Sector de Radiocomunicaciones*, noviembre de 2018, p. 35. Consultado el 29 de abril de 2022, disponible en: https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2445-2018-PDF-E.pdf

rendimiento y la asignación justa de recursos a las estaciones del ITS-G5. Esta tecnología trabaja con sistemas integrados (computadoras en una placa única con capacidades funcionales específicas y limitadas). Una sola placa aloja todos los componentes clave, como el microprocesador, la memoria y las unidades de entrada/salida. El software suele ser desarrollado por el fabricante y se basa en un pequeño módulo de memoria no volátil⁶⁷. El estándar ITS-G5 utiliza el protocolo DCC para el control de la carga de la red, cambiando dinámicamente las reglas de acceso al canal con las siguientes acciones: parametrizar la potencia de transmisión, modificar el intervalo de tiempo mínimo de transmisión de los mensajes periódicos, y cambiar la tasa de transferencia y la sensibilidad de radio⁶⁸. En la Tabla 2.7 se muestra la asignación de canales de STI para el estándar ITS-G5.

Tabla 2.7. Asignación de canales STI en la Unión Europea⁷⁰.

Número de canal de IEEE 802.11	Frecuencia (MHz)	Banda ITS-G5	Tipo de canal	Tasa de datos (Mbits/s)	Límite de PIRE (dBm)
94-145	Varias en la banda de 5470 MHz a 5725 MHz	ITS-G5C	Servicio	Depende del ancho de banda del canal	30 dBm para DFS69 maestro
172	5855-5865	ITS-G5B	Servicio	6	30 dBm para DFS esclavo
174	5865-5875	ITS-G5B	Servicio	6	23
176	5875-5885	ITS-G5A	Servicio	6	33
178	5885-5895	ITS-G5A	Servicio	12	23
180	5895-5905	ITS-G5A	Control	6	33
182	5845-5855	ITS-G5D	Servicio	6	0
184	5905-5915	ITS-G5D	Servicio	6	0

El estándar europeo ITS-G5 trae cambios importantes en las capas de Red y Transporte; además, introduce una nueva capa entre la capa de Transporte y la de Aplicaciones, como instalaciones y un nuevo esquema para minimizar la probabilidad de congestión del canal de radio. El conjunto de protocolos 802.11 utiliza el acceso de canal distribuido mejorado con acceso múltiple de detección de portadora con prevención de colisiones y soporte para la calidad de servicio que ofrece transmisiones inter-vehiculares directas y rápidas de los

⁶⁷ Memoria que no necesita de energía para mantener la información almacenada.

Plonus, Martin, *Electronics and Communications for Scientists and Engineers*, 2a ed., Reino Unido, Butterworth-Heinemann, 2020, p. 318.

⁶⁸ Karoui, Mouna et al., Performance comparison between LTE-V2X and ITS-G5 under realistic urban scenarios, Bélgica, IEEE VTC-spring, 2020, p. 2.

⁶⁹ Selección dinámica de frecuencia, del inglés *Dynamic Frequency Selection*. Es un esquema de selección de canales para Wi-Fi que permite limitar el número de canales de 5 GHz disponibles o imponer restricciones adicionales a su uso, ya que el espectro se comparte con otras tecnologías y servicios.

WiFi Alliance, "What is dynamic frequency selection (DFS)?", *WiFi Alliance*. Consultado el 19 de abril de 2022, disponible en: <https://www.wi-fi.org/knowledge-center/faq/what-is-dynamic-frequency-selection-dfs>

⁷⁰ ETSI, "ETSI EN 302 663 V1.2.0 (2012-11) Intelligent Transport Systems (ITS); Access layer specification for Intelligent Transport Systems operating in the 5 GHz frequency band", European Telecommunications Standards Institute, Francia, mayo de 2019, p. 10. Consultado el 2 de mayo de 2022, disponible en: https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302600_302699/302663/01.03.00_20/en_302663v010300a.pdf

mensajes de control. Este esquema es eficiente para cargas de red bajas y medias. Para cargas elevadas, la calidad del servicio en las redes inalámbricas se degrada y se pierden muchos paquetes. Para mantener la estabilidad de un sistema de comunicación, su carga debe mantenerse por debajo de un umbral especificado y los mensajes de control deben transmitirse con la mayor rapidez y frecuencia posible⁷¹.

La capa de acceso se basa principalmente en el estándar IEEE 802.11 e incluye características del estándar IEEE 802.11p. Está compuesto por la capa PHY y la capa de enlace de datos del modelo *Open Systems Interconnection* (OSI). La capa de enlace de datos se divide en dos subcapas: control de acceso al medio y control de enlace lógico. La capa PHY del ITS-G5 se deriva del estándar IEEE 802.11a. La capa MAC del ITS-G5 tiene el mismo esquema definido en el IEEE 802.11-2012. Además, la tecnología del ITS-G5 adopta un modo ad hoc básico llamado "Fuera del contexto de un BSS". Este modo permite que las estaciones del ITS-G5 eviten las operaciones de exploración, autenticación y asociación de canales necesarias para establecer un BSS. La estación del ITS-G5 utiliza un identificador BSS para mantener una transmisión de mensajes directa e inmediata⁷².

En la Figura 2.7 se muestra la arquitectura de referencia de la estación STI y también se describe la arquitectura de la capa de acceso del estándar ITS-G5. La capa de acceso de la arquitectura de referencia de la estación STI incluye tanto la capa PHY como la capa de enlace de datos del modelo OSI⁷³.

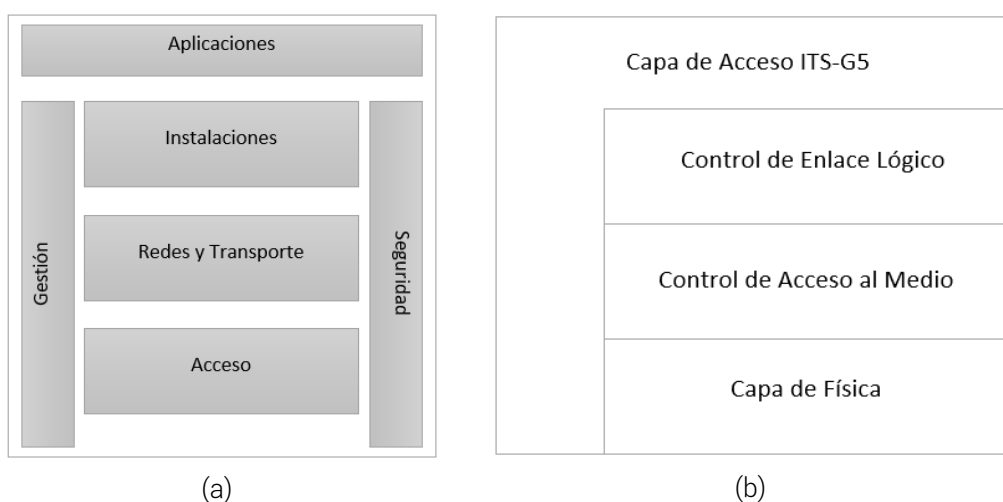


Figura 2.7. Arquitectura de: (a) estación STI; (b) capa de acceso del ITS-G5⁷⁴.

Una estación ITS-G5 debe cumplir con los siguientes estándares del IEEE⁷⁵:

⁷¹ *Ibidem*.

⁷² *Idem*.

⁷³ ETSI, "Intelligent Transport Systems (ITS); Access layer specification for Intelligent Transport Systems operating in the 5 GHz frequency band", European Telecommunications Standards Institute, Francia, noviembre de 2012, pp. 8-9. Consultado el 2 de mayo de 2022, disponible en: https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302600_302699/302663/01.02.00_20/en_302663v010200a.pdf

⁷⁴ Elaboración propia.

⁷⁵ *Idem*.

- 1) Operar bajo un esquema de modulación OFDM establecido en el estándar IEEE 802.11.
- 2) La funcionalidad de la capa MAC como se define en el estándar IEEE 802.11 al establecer el parámetro de información de gestión de la base, permitiendo la comunicación fuera del contexto de un conjunto de servicios básicos.
- 3) El control de enlace lógico como se define en el estándar ANSI/IEEE Std. 802.2 y el modo de funcionamiento se establece en modo sin conexión no reconocido⁷⁶.
- 4) El protocolo de acceso a la subred se define en el IEEE 802-2001.

Cabe mencionar que, para las aplicaciones de seguridad, ITS-G5 es la tecnología de mayor rendimiento, dado que permite una baja latencia y un alto rango de detección⁷⁷.

De manera similar al estándar WAVE, el estándar ITS-G5 emplea un algoritmo de firma digital de curva elíptica. El ITS-G5 también opera con la infraestructura de llave pública⁷⁸.

Como se muestra en la Tabla 2.8, al igual que la tecnología WAVE y el ASTM E2213-03, la capa PHY del ITS-G5 también permite usar modulaciones BPSK, QPSK, 16-QAM y 64-QAM, así como alcanzar tasas de transmisión de hasta 27 Mbits/s.

Tabla 2.8. Modulación y tasa de transmisión del ITS-G5⁷⁹.

Modulación	Tasa de transmisión (Mbits/s)	Tasa de codificación
BPSK	3	1/2
BPSK	4.5	3/4
QPSK	6	1/2
QPSK	9	3/4
16-QAM	12	1/2
16-QAM	18	3/4
64-QAM	24	2/3
64-QAM	27	3/4

A manera de resumen, en la Tabla 2.9 se describen los parámetros técnicos de los dispositivos que operan conforme al estándar ITS-G5.

⁷⁶ El control de enlace lógico define tres modos de operación para la comunicación de datos entre puntos de acceso. En el modo sin conexión no reconocido, no se necesita establecer un enlace de datos para intercambiar las unidades de datos de protocolo entre controles de enlace lógico. En este modo las unidades de datos de protocolo no son reconocidas en la capa de enlace lógico, tampoco existe un control de flujo ni recuperación de errores.

IEEE, ISO/IEC 8802-2:1998 Information technology— Telecommunications and information exchange between systems— Local and metropolitan area networks— Specific requirements— Part 2: Logical Link Control, 3a ed., Estados Unidos, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1998, p. 42.

⁷⁷ Baldini, Gianmarco *et al.*, "Regulated applications for the road transportation infrastructure: The case study of the smart tachograph in the European Union", *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, Italia, junio de 2018, p. 10. Consultado el 31 de agosto de 2023, disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1874548217300392>

⁷⁸ Fernandes, Bruno *et al.*, Implementation and Analysis of IEEE and ETSI Security Standards for Vehicular Communications, Springer, 2018, pp. 4 y 7.

⁷⁹ Karoui, Mouna *et al.*, Performance comparison between LTE-V2X and ITS-G5 under realistic urban scenarios, Bélgica, IEEE VTC-spring, 2020, p. 7.

Tabla 2.9. Parámetros técnicos del ITS-G5⁸⁰.

Parámetro	ITS-G5
Potencia pico del transmisor (dBm)	PIRE de 33 dBm (depende del canal usado).
Sensibilidad del receptor (dBm)	Dependiendo de la modulación empleada: -91, -90, -88, -86, -83, -79, -75, -74 dBm. ⁸¹
Modulación (OFDM)	BPSK, QPSK, 16-QAM y 64-QAM.
Velocidad de transmisión (Mb/s)	Dependiendo de la modulación empleada: 3, 4.5, 6, 9, 12, 18, 24 o 27 Mb/s (3, 6, y 12 Mb/s son obligatorios).
Tipo de antena	Para vehículos se usan antenas omnidireccionales. A veces se usan antenas sectoriales para los transmisores instalados en la infraestructura.
Polarización	Circular y vertical. ⁸²
Latencia (ms)	100 ms
Radio máximo de cobertura (m)	1000 m
Velocidad máxima entre dispositivos (km/h)	110 km/h ⁸³

2.3. 3GPP: C-V2X (LTE-V2X y NR-V2X).

C-V2X es una tecnología de comunicación vehicular desarrollada por el 3GPP, basada en la red celular, lo que facilita la comunicación convencional V2N para proporcionar servicios de *back-end*⁸⁴ (servicios en la nube como administración del tráfico, mapas dinámicos en alta definición, búsqueda y asignación de plazas de estacionamiento, notificación de accidentes, etc.), para obtener información del tráfico con mensajes de advertencia con un tamaño de aproximadamente 300 bytes⁸⁵, tales como⁸⁶:

⁸⁰ UIT-R "REPORT ITU-R M.2445-0-Intelligent transport systems (ITS) usage", *Unión Internacional de Telecomunicaciones. Sector de Radiocomunicaciones*, noviembre de 2018, p. 31. Consultado el 29 de abril de 2022, disponible en: https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2445-2018-PDF-E.pdf

⁸¹ ETSI, "Intelligent Transport Systems (ITS); Access layer specification for Intelligent Transport Systems operating in the 5 GHz frequency band", *European Telecommunications Standards Institute*, Francia, mayo de 2019, p. 10. Consultado el 2 de mayo de 2022, disponible en: https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302600_302699/302663/01.03.00_20/en_302663v010300a.pdf

⁸² ETSI, "Intelligent Transport Systems (ITS); Radiocommunications equipment operating in the 5 855 MHz to 5 925 MHz frequency band; Harmonised Standard covering the essential requirements of article 3.2 of Directive 2014/53/EU", *European Telecommunications Standards Institute*, Francia, febrero de 2017, p. 19. Consultado el 2 de mayo de 2022, disponible en: https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302500_302599/302571/02.01.01_60/en_302571v020101p.pdf

⁸³ Tahir, Muhammad Naeem and Katz, Marcos, "Heterogeneous (ITS-G5 and 5G) Vehicular Pilot Road Weather Service Platform in a Realistic Operational Environment", *Sensors*, Suiza, 2021, p. 2. Consultado el 9 de mayo de 2022, disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7957786/pdf/sensors-21-01676.pdf>

⁸⁴ Hedge, A. and Festag, A., "Mode Switching Strategies in Cellular-V2X", *Elsevier*, 2019, p. 81. Consultado el 2 de mayo de 2022, disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896319303829>

⁸⁵ 5GAA, "Mode Switching Strategies in Cellular-V2X", *5G Automotive Association*, Alemania, 13 de junio de 2019, p. 17. Consultado el 2 de mayo de 2022, disponible en: https://5gaa.org/wp-content/uploads/2019/07/5GAA_191906_WP_CV2X_UCs_v1-3-1.pdf

⁸⁶ Rodríguez Saiz, Aida, "TECNOLOGÍAS C-V2X Y DSRC PARA EL VEHÍCULO CONECTADO EN REDES DE NUEVA GENERACIÓN", *Universitat Oberta de Catalunya*, España, 11 de junio de 2020, pp. 42-44. Consultado el 2 de mayo de 2022, disponible en: <http://openaccess.uoc.edu/webapps/o2/bitstream/10609/117806/6/arosa92TFM0620memoria.pdf>

- Mensajes de Conciencia Cooperativa, que proporcionan información de presencia, posiciones y el estado básico de las estaciones STI a otras estaciones STI que se encuentran dentro del rango de comunicación.
- Mensajes de Notificación Ambiental Descentralizado, siendo un tipo de mensajes de soporte de aplicaciones que proporcionan un servicio de notificación sobre el estado de la carretera.
- Mensajes de Seguridad Básica, que son paquetes de comunicación estandarizados que se envían con una periodicidad de 10 mensajes por segundo entre vehículos conectados que contienen datos como velocidad y posición.

El estándar C-V2X realiza la comunicación directa entre dispositivos de acceso, es decir, V2V, V2P y V2I en las bandas 38 (2570 MHz a 2620 MHz) y 47 (5855 MHz a 5925 MHz) del Acceso de Radio Terrestre Universal Evolucionado (E-UTRA, del inglés *Evolved Universal Terrestrial Radio Access*). La banda 38 es una banda licenciada de uso exclusivo por *New Radio Vehicle-to-Everything* (NR-V2X) en regiones particulares (p. ej. en la Unión Europea y en China⁸⁷), y la banda 47 es una banda de uso sin licencia. El C-V2X puede operar con anchos de banda de canal de 5, 10, 20, 25, 30 o 40 MHz, y utiliza la técnica de duplexación por división de tiempo⁸⁸. Con respecto de las comunicaciones V2N, todas las bandas de frecuencias definidas por el 3GPP para *Long Term Evolution* (LTE) y *New Radio* (NR) son válidas para su operación donde las regulaciones lo permitan⁸⁹.

Algunos de los casos de uso del estándar C-V2X son los siguientes⁹⁰:

- Asistente de giro a la izquierda en tráfico cruzado (seguridad, conducción autónoma): ayuda al vehículo anfitrión (HV, de las siglas en inglés *Host Vehicle*) que intenta girar a la izquierda a través del tráfico que se acerca desde la dirección opuesta.
- Asistente de movimiento en intersecciones (seguridad, conducción autónoma): el HV estacionario avanza directamente desde la parada en una intersección. El HV recibe una alerta si no es seguro pasar por la intersección (es decir, alertas de tráfico cruzado que se aproxima por el lado izquierdo o derecho; tráfico entrante que tiene la intención de girar a la izquierda).
- Advertencia de frenado de emergencia (seguridad, conducción autónoma): alerta al HV de que un vehículo remoto principal (RV, por las siglas en inglés *Remote Vehicle*) está experimentando un frenado de emergencia.
- Advertencia de embotellamiento (comodidad): advierte al HV de un embotellamiento que se aproxima en la carretera o notifica al HV de una obstrucción o aglomeración en la ruta de navegación.

⁸⁷ Qualcomm, "Global update on 5G spectrum", *Qualcomm*, noviembre de 2019, pp. 10 y 14. Consultado el 2 de agosto de 2023, disponible en: <https://www.qualcomm.com/content/dam/qcomm-martech/dm-assets/documents/spectrum-for-4g-and-5g.pdf>

⁸⁸ 3GPP, "3GPP TS 38.101-1 V17.5.0 (2022-03) 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; NR; User Equipment (UE) radio transmission and reception; Part 1: Range 1 Standalone (Release 17)", *3rd Generation Partnership Project*, Francia, 2022, pp. 43-50. Consultado el 2 de mayo de 2022, disponible en: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3283>

⁸⁹ ITU-R, "Report ITU-R M.2520-0 The use of the terrestrial component of International Mobile Telecommunications for the Cellular-Vehicle-to-Everything", *Unión Internacional de Telecomunicaciones. Sector de Radiocomunicaciones*, Suiza, 2023, p. 31. Consultado el 13 de abril de 2023, disponible en: https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2520-2022-PDF-E.pdf

⁹⁰ 5GAA, "White Paper C-V2X Use Cases Methodology, Examples and Service Level Requirements", *5G Automotive Association*, Alemania, 13 de junio de 2019, pp. 10-11. Consultado el 2 de mayo de 2022, disponible en: https://5gaa.org/wp-content/uploads/2019/07/5GAA_191906_WP_CV2X_UCs_v1-3-1.pdf

- Actualización de software (gestión de operaciones del vehículo): el fabricante del vehículo actualiza el software del módulo de control electrónico para los vehículos específicos.
- Monitoreo remoto del estado del vehículo (gestión de operaciones del vehículo): los propietarios, operadores de flotas y proveedores de servicios de vehículos autorizados monitorean el estado del HV y reciben alertas cuando se requiere mantenimiento o servicio.
- Advertencia de ubicación peligrosa (seguridad, conducción autónoma): advierte al HV de una ubicación peligrosa y brinda información adicional para navegar de manera segura alrededor del peligro.
- Armonización de velocidad (eficiencia del tráfico y respeto al medio ambiente, conducción autónoma): notifica al HV de la velocidad recomendada que se aplicará en cierta ubicación para optimizar el flujo del tráfico, minimizar las emisiones y garantizar una conducción suave y segura.
- Uso compartido de sensores de alta precisión (conducción autónoma): el vehículo utiliza sus propios sensores e información de sensores de otros vehículos para percibir su entorno, y funciona de forma segura para realizar un cambio de carril de conducción automatizado.
- Transparencia para maniobra de adelantamiento (seguridad): al conductor del HV que indica la intención de adelantar a un RV usando el carril de tráfico que se aproxima, se le proporciona una transmisión de video que muestra la vista frente al RV.
- Advertencia de cambio de carril (seguridad): el HV indica la intención de cambiar de carril y los vehículos vecinos reciben una alerta en caso de falta de espacio, riesgo de colisión o que su maniobra no está permitida en el tramo de carretera actual.
- Usuario vulnerable de la carretera (sociedad y comunidad, seguridad): alerta al HV de que se aproxima un usuario vulnerable en la carretera o que cruza una intersección y advierte de cualquier riesgo de colisión.

El estándar C-V2X es una familia de tecnologías que permite que los vehículos se conecten con sus alrededores. Para ello, el automóvil se convierte en un centro de datos móviles, que puede compartir la información mediante sensores a través de todo el ecosistema de transporte. Como se muestra en la Figura 2.8, el automóvil puede comunicarse no sólo con otros vehículos o con la infraestructura, sino que también con los peatones y los ciclistas a través de sus dispositivos móviles vía la red celular.

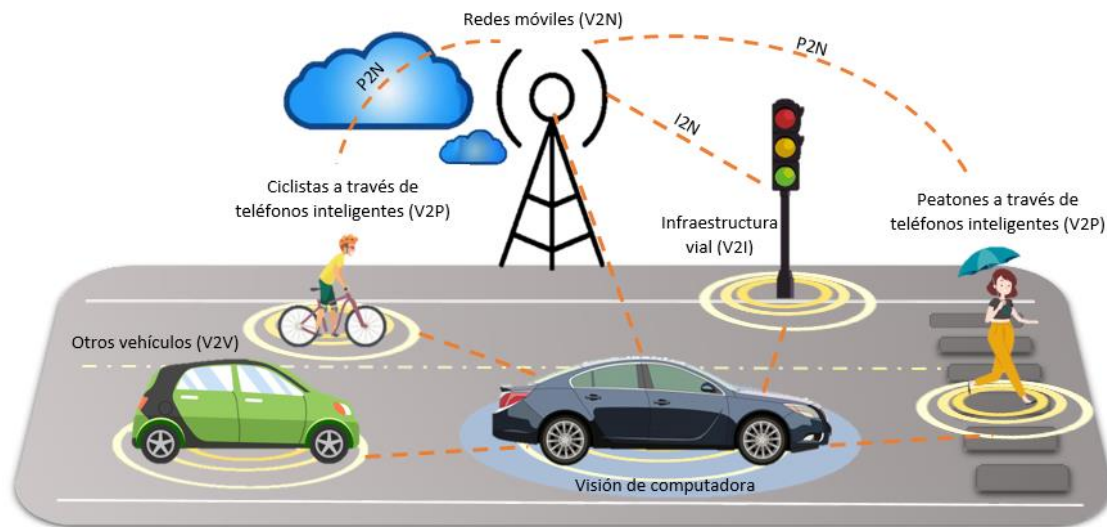


Figura 2.8. Comunicación C-V2X⁹¹.

Las actividades de estandarización del 3GPP en cuanto a la comunicación C-V2X tienen sus inicios en el *Release 12*, mediante el cual se presentó por primera vez la comunicación D2D (Dispositivo a Dispositivo, del inglés *Device to Device*). A continuación, se muestra un breve resumen de las publicaciones de 3GPP respecto a C-V2X⁹²:

- *Release 12*, basado en LTE. Se estandariza el enlace lateral o *Sidelink* en inglés, un elemento clave que permite la comunicación directa entre dispositivos (D2D). A esta interfaz se le llama PC5.
- *Release 14*. Fueron estudiadas y estandarizadas las primeras comunicaciones V2X en LTE (LTE-V2X). Se mejora la interfaz PC5 para casos de uso vehicular. El objetivo principal de las comunicaciones LTE-V2X es soportar los casos de uso para proveer seguridad en los caminos y satisfacer la demanda de los requerimientos de confiabilidad y latencia.
- *Release 16*. En esta especificación se presentó por primera vez el enlace lateral de *New Radio* con un enfoque en V2X (NR-V2X), mejorando la confiabilidad, latencia, capacidad y flexibilidad. Los casos de uso no se limitan a aplicaciones de seguridad en el camino, sino que también tienen como objetivo casos de uso como el *Platooning*⁹³, sensores extendidos, conducción avanzada y conducción remota.

El estándar C-V2X se introdujo por primera vez en el *release 14* de 3GPP basada en la tecnología LTE, y en las últimas versiones (versiones 15 y 16), se busca que el C-V2X sea compatible con las redes celulares de 5ª generación (5G)⁹⁴.

⁹¹ Elaboración propia.

⁹² Harounabadi, Mehdi *et al.*, *V2X in 3GPP Standardization: NR Sidelink in Rel-16 and Beyond*, IEEE Communications Standards Magazine, 2021, p. 2.

⁹³ Un pelotón o *platoon* en inglés, es una cadena de vehículos que se siguen con una distancia de seguridad reducida, empleando comunicaciones de baja latencia y alta confiabilidad. La cabeza del pelotón envía comandos y recibe retroalimentación de los otros vehículos para controlar el pelotón.

Nardini, Giovanni *et al.*, "Cellular-V2X Communications for Platooning: Design and Evaluation", *Sensors*, 11 de mayo de 2018. Consultado el 3 de agosto de 2023, disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5981612/>.

⁹⁴ Hedge, A. and Festag, A., "Mode Switching Strategies in Cellular-V2X", *Elsevier*, 2019, pp. 81-86. Consultado el 2 de mayo de 2022, disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896319303829>

La operación del estándar C-V2X depende de dos interfaces estandarizadas por el 3GPP: PC5 y Uu. La interfaz PC5 funciona gracias a la comunicación de enlace lateral, que consiste en la comunicación directa entre dos UE (equipo de usuario, del inglés *User Equipment*) sin la participación de una estación base en la transmisión y repetición del tráfico de datos. La interfaz Uu lleva a cabo las comunicaciones entre la Red Universal de Acceso Radio Terrestre (UTRAN, por las siglas en inglés *Universal Terrestrial Radio Access Network*) y los UE.

En las comunicaciones LTE-V2X, se llama LTE-Uu⁹⁵ a la interfaz que conecta los UE con las estaciones base de la red LTE. Estas estaciones base se nombran eNB (Nodo B de la red E-UTRA, del inglés *E-UTRAN NodeB*).

La 3GPP define dos modos de comunicación a través de la interfaz PC5, específicamente diseñados para comunicaciones LTE-V2X; estos se describen a continuación⁹⁶:

- Modo 3 (dentro de cobertura). En este modo los vehículos deben estar en la zona de cobertura de la estación base, debido a que los recursos de los UE y el tiempo de sincronización son gestionados y seleccionados por el eNB a través de la interfaz LTE-Uu. Para usar este modo de comunicación, los UE deben tener una suscripción a la red celular y contar con la autorización del operador móvil para llevar a cabo comunicaciones V2X.
- Modo 4 (fuera de cobertura). En este modo los vehículos no necesitan estar dentro de la zona de cobertura de la estación base, ya que los vehículos implementan un mecanismo autónomo de selección de recursos que consiste en monitorear el canal antes de transmitir. Además, el tiempo de sincronización se establece mediante navegación por satélite. En este modo se puede establecer comunicación sin contar con una suscripción a la red celular.

Los modos de operación de la interfaz PC5 se muestran en la Figura 2.9.

⁹⁵ Basada en comunicaciones LTE que utilizan infraestructura móvil. Puede ser utilizarse típicamente para comunicaciones V2N entre un vehículo y un servidor de aplicaciones. También puede ser utilizada para coordinar comunicaciones directas V2V, por medio de alojamiento de recursos manejados por una red móvil.

Rebbeck, Tom *et al.*, "FINAL REPORT FOR 5GAA SOCIO-ECONOMIC BENEFITS OF CELLULAR V2X", *Analysys Mason*, Reino Unido, diciembre de 2017, p. 28. Consultado el 2 de mayo de 2022, disponible en: https://5gaa.org/wp-content/uploads/2017/12/Final-report-for-5GAA-on-cellular-V2X-socio-economic-benefits-051217_FINAL.pdf

⁹⁶ ITU-R, "Report ITU-R M.2520-0 The use of the terrestrial component of International Mobile Telecommunications for the Cellular-Vehicle-to-Everything", *Unión Internacional de Telecomunicaciones. Sector de Radiocomunicaciones*, Suiza, 2023, p. 7. Consultado el 10 de abril de 2023, disponible en: https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2520-2022-PDF-E.pdf

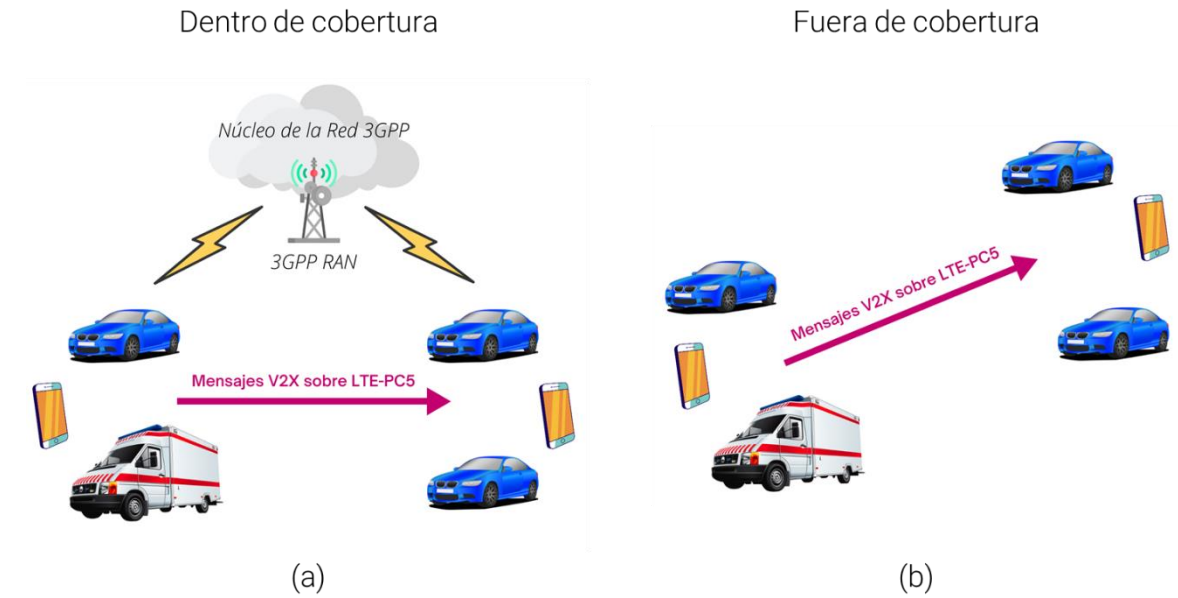


Figura 2.9. Comunicación LTE-V2X mediante PC5: (a) Modo 3; (b) Modo 4⁹⁷.

El estándar LTE-V2X puede funcionar dentro y fuera de la cobertura de la red. Sin embargo, la comunicación que usa la interfaz LTE-Uu solo es posible cuando los UE están dentro de la cobertura de la red, donde los UE pueden recibir mensajes V2X mediante *unicast*⁹⁸ en el enlace ascendente y mediante *broadcast* o *unicast* en el enlace descendente⁹⁹. Respecto a los casos de uso V2N a través de la LTE-Uu, el UE debe contar con una suscripción a la red celular y con la autorización para ingresar al servidor donde se aloja la aplicación¹⁰⁰. Lo anterior se puede observar en la Figura 2.10.

⁹⁷ Elaboración propia.

⁹⁸ Transmisión punto a punto, es decir, los datos se entregan desde un nodo emisor a un nodo receptor específico.

Buford, John *et al.*, *P2P Networking and Applications*, 1ª ed, Estados Unidos, Morgan Kaufmann, 2008, pp. 203-228.

⁹⁹ Karoui, Mouna *et al.*, Performance comparison between LTE-V2X and ITS-G5 under realistic urban scenarios, Bélgica, IEEE VTC-spring, 2020, p. 3.

¹⁰⁰ ITU-R, "Report ITU-R M.2520-0 The use of the terrestrial component of International Mobile Telecommunications for the Cellular-Vehicle-to-Everything", *Unión Internacional de Telecomunicaciones. Sector de Radiocomunicaciones*, Suiza, 2023, p. 7. Consultado el 10 de abril de 2023, disponible en: https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2520-2022-PDF-E.pdf

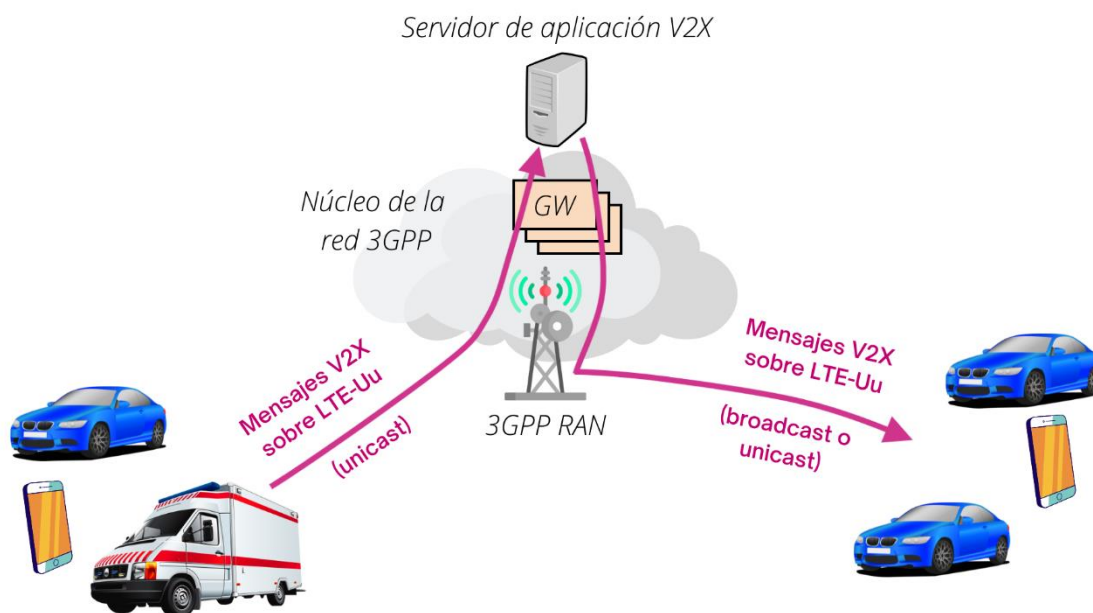


Figura 2.10. Comunicación LTE-V2X mediante LTE-Uu¹⁰¹.

La tecnología LTE-V2X puede operar en conjunto con las tecnologías PC5 y LTE-Uu indistintamente si se trata de la transmisión o recepción por alguna de estas dos tecnologías. Es decir, un equipo puede utilizar sólo LTE-Uu para transmitir y sólo PC5 para recibir y viceversa¹⁰². Ambas formas de comunicación utilizan bandas de frecuencias diferentes, así que no compiten por anchos de banda¹⁰³.

La interfaz PC5 establece comunicación directa en un rango de proximidad de cientos de metros y permite los casos de uso que son sensibles a la latencia. En cuanto a la interfaz Uu, la comunicación se lleva a cabo mediante redes de área amplia, y permite los casos de uso con mayor tolerancia a la latencia. Por ejemplo, las comunicaciones V2V, V2I y V2P, transmiten información de manera inmediata en áreas pequeñas, por lo que típicamente emplean el modo 4 de PC5. En cuanto a las comunicaciones V2N, estas son empleadas para compartir información a través de la interfaz Uu en un área relativamente más grande, y/o acceder al *edge computing*¹⁰⁴ u otro tipo de servidores C-V2X¹⁰⁵.

¹⁰¹ Elaboración propia.

¹⁰² Karoui, Mouna et al., Performance comparison between LTE-V2X and ITS-G5 under realistic urban scenarios, Bélgica, IEEE VTC-spring, 2020, p. 3.

¹⁰³ Rebbeck, Tom et al., "FINAL REPORT FOR 5GAA SOCIO-ECONOMIC BENEFITS OF CELLULAR V2X", *Analysys Mason*, Reino Unido, diciembre de 2017, p. 29. Consultado el 2 de mayo de 2022, disponible en: https://5gaa.org/wp-content/uploads/2017/12/Final-report-for-5GAA-on-cellular-V2X-socio-economic-benefits-051217_FINAL.pdf

¹⁰⁴ El *edge computing* es una estructura de computación distribuida que acerca las aplicaciones empresariales a los orígenes de los datos, es decir, los datos se procesan y analizan más cerca del punto donde se crean. Debido a que los datos no atraviesan la red hacia la nube o hacia un centro de datos para ser procesados, la latencia se reduce significativamente.

IBM, "What Is Edge Computing", International Business Machines Corporation. Consultado el 18 de abril de 2023, disponible en: <https://www.ibm.com/cloud/what-is-edge-computing>

¹⁰⁵ ITU-R, "Report ITU-R M.2520-0 The use of the terrestrial component of International Mobile Telecommunications for the Cellular-Vehicle-to-Everything", *Unión Internacional de Telecomunicaciones. Sector de Radiocomunicaciones*, Suiza, 2023, pp. 7-10. Consultado el 10 de abril de 2023, disponible en: https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2520-2022-PDF-E.pdf

Con el *Release* 16 del 3GPP se presentó el enlace lateral para *New Radio* (NR-PC5), es decir se adaptó la interfaz PC5 para funcionar con tecnología 5G. Con estos cambios también se introducen nuevos casos de uso para las comunicaciones V2X, tales como¹⁰⁶:

- *Platooning*: un pelotón (o *platoon* en inglés), es una cadena de vehículos que se siguen con una distancia de seguridad reducida, empleando comunicaciones de baja latencia y alta confiabilidad. La cabeza del pelotón envía comandos y recibe retroalimentación de los otros vehículos para controlar el pelotón¹⁰⁷. Permite a los vehículos el intercambio de información dentro del pelotón, conducción cooperativa automatizada para agrupaciones de corta distancia, intercambio de información y cambio de modo de conducción.
- Conducción avanzada: se refiere a la conducción semiautomática o totalmente automática, en la que se supone una mayor distancia entre vehículos. Las RSU y los vehículos pueden recopilar información de sensores locales y vehículos cercanos y compartir dicha información entre sí, para coordinar las maniobras o trayectorias de los vehículos circundantes. Esto resulta en una conducción más segura, una mayor eficiencia del tráfico y ayuda a evitar colisiones. Los ejemplos de conducción avanzada incluyen la prevención cooperativa de colisiones, el intercambio de información para la conducción automatizada limitada, el intercambio de información para la conducción totalmente automatizada, la alineación de la trayectoria de emergencia y la provisión de intersecciones de información de seguridad para la conducción urbana.
- Sensores extendidos: permiten el intercambio de datos e información de sensores locales o el intercambio de datos de video de las cámaras entre RSU, vehículos, dispositivos de peatones y servidores de aplicaciones V2X. Con sensores extendidos, los vehículos pueden mejorar la percepción de los entornos para una toma de decisiones más inteligente. Los casos de uso incluyen el uso compartido de mapas de sensores y estados, la percepción colectiva del entorno y el intercambio de datos de video para la conducción automatizada.
- Conducción remota: implica habilitar una aplicación V2X o un conductor para controlar un vehículo de forma remota. Esto se utilizaría cuando un vehículo remoto se encuentra en escenarios peligrosos o para personas que no pueden conducir por sí mismas. Además, la conducción basada en la computación en la nube se puede emplear para la conducción remota, donde se puede acceder a una plataforma de servicio *back-end* basada en la nube para el transporte público.

Estos nuevos casos de uso conllevan nuevos requerimientos para la red celular¹⁰⁸, por ejemplo:

- Precisión de la posición lateral de 0.1 m entre los UE.
- Descubrimiento y comunicación entre los UE.

¹⁰⁶ Harounabadi, Mehdi *et al.*, *V2X in 3GPP Standardization: NR Sidelink in Rel-16 and Beyond*, IEEE Communications Standards Magazine, 2021, p. 2.

¹⁰⁷ Nardini, Giovanni *et al.*, "Cellular-V2X Communications for Platooning: Design and Evaluation", *Sensors*, 11 de mayo de 2018. Consultado el 3 de agosto de 2023, disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5981612/>

¹⁰⁸ Varios de estos requerimientos solo se alcanzan en redes NR, como por ejemplo, la latencia reducida, mayor seguridad en las comunicaciones, la alta densidad de dispositivos que pueden ser gestionados por la red, o las características dirigidas a las comunicaciones *Machine-to-Machine* (comunicaciones de bajo consumo de energía).

- Permitir que los operadores seleccionen qué tecnología de acceso por radio de 3GPP usan para cada caso de uso.
- Permitir a los UE el acceso a la red móvil a través de otros UE.

La nueva interfaz NR-PC5 funciona con dos modos de operación¹⁰⁹:

- Modo 1 (dentro de la cobertura). Los recursos son asignados por la estación base de 5G llamada gNB (Nodo B de la siguiente generación, del inglés *Next Generation Node B*). En este modo de comunicación es necesario contar con una suscripción a la red celular NR y haber sido autorizado por el operador de la red móvil para acceder a las comunicaciones V2X.
- Modo 2 (fuera de la cobertura). Los recursos son asignados por los UE de manera autónoma. Es posible establecer comunicación entre los UE que no cuenten con una suscripción a la red celular NR.

Estos modos de operación son muy similares a los modos 3 y 4 de LTE-PC5. Al igual que en el estándar LTE-V2X, en el NR-V2X se lleva a cabo la comunicación de los UE con los gNB, a través de la interfaz Uu o NR-Uu. Los mensajes V2X a través de NR-PC5 pueden ser transmitidos mediante *broadcast*, *unicast* o *groupcast*¹¹⁰. Los mensajes V2X a través de NR-Uu solo soportan *unicast*¹¹¹.

Los canales en las interfaces Uu y PC5 están organizados como canales lógicos, de transporte y físicos, los cuales se describen en la Tabla 2.10.

Tabla 2.10. Canales del estándar C-V2X¹¹².

Tipo de canal	Canal	Uso
Canales Lógicos	<i>Sidelink Traffic Channel</i>	Es una interfaz que lleva la información del usuario hacia el <i>Physical Sidelink Shared Channel</i> .
	<i>Sidelink Broadcast Control Channel</i>	Es usado para transmitir mediante broadcast los datos de control, para sincronización en escenarios fuera de cobertura y en cobertura parcial, o para la sincronización entre los UE que se encuentran en diferentes células.
Canales de Transporte	<i>Sidelink Shared Channel</i>	Soporta el riesgo de colisión, dependiendo de la asignación de recursos de la estación base ¹¹³ .

¹⁰⁹ ITU-R, "Report ITU-R M.2520-0 The use of the terrestrial component of International Mobile Telecommunications for the Cellular-Vehicle-to-Everything", *Unión Internacional de Telecomunicaciones. Sector de Radiocomunicaciones*, Suiza, 2023, p. 7. Consultado el 10 de abril de 2023, disponible en: https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2520-2022-PDF-E.pdf

¹¹⁰ Transmisión multipunto a multipunto, en el que uno o más nodos miembros de un grupo pueden enviar tráfico a todos los demás miembros del grupo.

Oliver, Yu y Cao Yuan, "Dynamic Groupcast Traffic Grooming in WDM Networks", *Institute of Electrical Electronics Engineers*, Estados Unidos, 2006, p. 2606.

¹¹¹ 3GPP, "3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Services and System Aspects; Release 16 Description; Summary of Rel-16 Work Items (Release 16)", *3rd Generation Partnership Project*, Estados Unidos, enero de 2021, p. 25. Consultado el 2 de mayo de 2022, disponible en: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3493>

¹¹² Haidine, Abdelfatteh, An LTE-Direct-Based Communication System for Safety Services in Vehicular Networks, Reino Unido, IntechOpen, 2021, pp. 7-8.

¹¹³ Schlien, J. y Roessler, A., "Device to Device Communication in LTE", *ROHDE & SCHWARZ*, Alemania, 29 de septiembre de 2015, p. 8. Consultado el 2 de mayo de 2022, disponible en: https://cdn.rohde-schwarz.com/pws/dL_downloads/dL_application/application_notes/1ma264/1MA264_0e_D2DComm.pdf

Tipo de canal	Canal	Uso
	<i>Sidelink Broadcast Channel</i>	Lleva información necesaria para establecer la conectividad de enlace lateral entre dispositivos.
	<i>Sidelink Discovery Channel</i>	Canal de descubrimiento.
Canales Físicos	<i>Physical Sidelink Shared Channel</i>	Transporta los datos con la información del usuario a través del aire.
	<i>Physical Sidelink Broadcast Channel</i>	Lleva la información del <i>Sidelink Broadcast Channel</i> . Además, se transmite junto con las señales de sincronización de enlace lateral primario y secundario ¹¹⁴ .
	<i>Physical Sidelink Control Channel</i>	Transporta la información requerida por el UE para ser capaz de recibir y demodular al <i>Physical Sidelink Shared Channel</i> ¹¹⁵ .
	<i>Physical Sidelink Discovery Channel</i>	Canal de descubrimiento.

El modo de transmisión de la información de la tecnología C-V2X se lleva a cabo mediante el siguiente proceso¹¹⁶:

- La capa de control de recursos de radio (RRC, por las siglas en inglés *Radio Resource Control*) continuamente monitorea la disponibilidad de cobertura celular y selecciona apropiadamente el modo de asignación.
- Dependiendo de la naturaleza del tráfico que se va a transmitir (*broadcast, unicast, etc.*), la capa RRC configura la información de prioridad en la información de control de enlace lateral y la entrega a la capa MAC para configurar la concesión de enlace lateral y realizar la programación.
- La capa MAC solicita los recursos de tiempo y frecuencia de la capa PHY como se especifica en los estándares 3GPP correspondientes. La alineación de la sincronización y la frecuencia entre el transmisor y el receptor es esencial para una comunicación confiable.

El proceso anterior se muestra en la Figura 2.11.

¹¹⁴ Dahlman, Erik *et al.*, 4G LTE-Advanced Pro and The Road to 5G, 3a ed., Reino Unido, *Academic Press*, 2016, p. 482.

¹¹⁵ Harounabadi, Mehdi *et al.*, *V2X in 3GPP Standardization: NR Sidelink in Rel-16 and Beyond*, IEEE Communications Standards Magazine, 2021, p. 4.

¹¹⁶ Hedge, A. and Festag, A., "Mode Switching Strategies in Cellular-V2X", *Elsevier*, 2019, pp. 81-86. Consultado el 2 de mayo de 2022, disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896319303829>

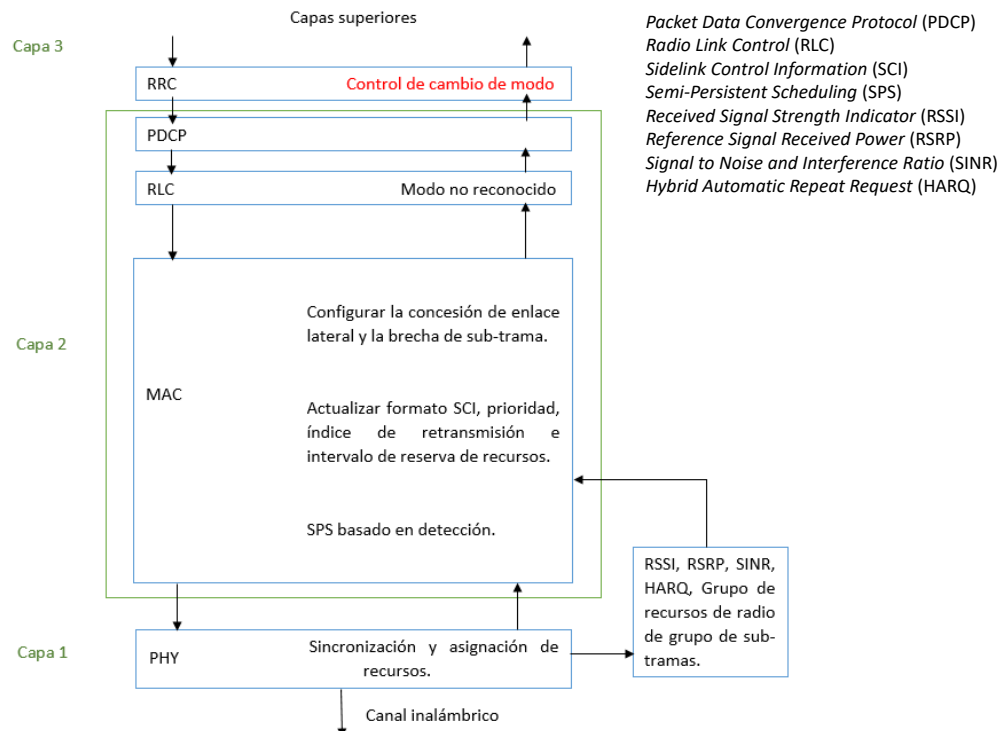


Figura 2.11. Protocolo del estándar C-V2X para el plano de usuario¹¹⁷.

En la capa PHY se utilizan dos tipos de señales de sincronización de enlace lateral: la señal de sincronización de enlace lateral primario (PSSS, del inglés *Primary Sidelink Synchronization Signal*) y la señal de sincronización de enlace lateral secundario (SSSS, *Secondary Sidelink Synchronization Signal*). La PSSS es usada para sincronizar el tiempo inicial y la estimación de los límites entre la trama y la subtrama. Está diseñada para simplificar la detección de las fuentes de sincronización, ya sea dentro o fuera de cobertura, por lo que puede incluir el tipo de fuente de sincronización (eNB o UE) y el conteo de saltos¹¹⁸.

La SSSS optimiza el rendimiento de la estimación del desplazamiento de la frecuencia. Una combinación de PSSS y SSSS es empleada para calibrar la referencia del reloj y el reconocimiento del identificador de la fuente de sincronización¹¹⁹.

Además, la capa PHY envía información sobre los parámetros de calidad del enlace, como la relación señal/ruido de interferencia, la potencia recibida de la señal de referencia y el indicador de intensidad de la señal recibida en la capa MAC¹²⁰. El monitoreo de la calidad del

¹¹⁷ Elaboración propia con información de Hedge, A. and Festag, A., "Mode Switching Strategies in Cellular-V2X", Elsevier, 2019. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896319303829>.

¹¹⁸ Abbasi, Mahmoud *et al.*, "Synchronization Techniques in "Device to Device- and Vehicle to Vehicle-Enabled" Cellular Networks: A survey", *Elsevier*, 2021, p. 6. Consultado el 2 de mayo de 2022, disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045790620308016>

¹¹⁹ *Idem*.

¹²⁰ *Idem*.

enlace tiene el propósito de indicar el estatus de la sincronización (en sincronización o fuera de sincronización) a las capas superiores¹²¹.

La red C-V2X permite la seudonimización¹²² y la privacidad del UE que utiliza C-V2X, al garantizar que ningún otro UE pueda rastrearlo o identificarlo más allá de un cierto periodo de tiempo breve, necesario para el funcionamiento de la aplicación C-V2X; esto está sujeto a las regulaciones regionales y/o política del operador para la aplicación C-V2X¹²³.

La seguridad de LTE-V2X depende del acceso a la red celular, ya que en las comunicaciones dentro de cobertura se lleva a cabo una autenticación mutua entre el UE y el núcleo de la red celular. En cambio, en las comunicaciones fuera de cobertura, se emplean parámetros de autenticación D2D que, pese a ser válidos sólo por un tiempo específico, incrementan el riesgo de seguridad¹²⁴.

El UE utiliza codificación simétrica precompartida y un algoritmo de integridad para señalar los paquetes que son enviados a la red. Sin embargo, el algoritmo de cifrado sólo es aplicado a los mensajes entre el UE y el eNB. Los mensajes D2D fuera de cobertura son encriptados mediante la tecnología de servicios basados en la proximidad (ProSe, del inglés *Proximity based Services*); a pesar de ello, al ser enviados mediante *broadcast*, no se protege la integridad de los datos¹²⁵. Con el estándar NR-V2X se mejora la seguridad de los mensajes V2N, no obstante, aún no existe encriptación para los mensajes V2V en la capa física¹²⁶.

Por último, cabe mencionar que C-V2X es compatible con otras tecnologías dedicadas a los STI, por ejemplo, para asegurar la compatibilidad de C-V2X con el DSRC, las capas superiores del UE que están realizando la comunicación de enlace lateral, envían una indicación a las capas inferiores cuando el UE se encuentra en la proximidad de una estación DSRC y así se pueden comunicar los dispositivos de ambas tecnologías¹²⁷.

A manera de resumen, en la Tabla 2.11 se enlistan los parámetros técnicos del estándar C-V2X.

¹²¹ ETSI, "ETSI TS 136 213 V14.2.0 (2017-04) LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures (3GPP TS 36.213 version 14.2.0 Release 14)", *European Telecommunications Standards Institute*, Francia, abril de 2017, p. 12. Consultado el 2 de mayo de 2022, disponible en: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136200_136299/136213/14.02.00_60/ts_136213v140200p.pdf

¹²² La seudonimización es un proceso al que se someten los datos de un sujeto empleando un seudónimo (identificador) para proteger su identidad real.

Fischer-Hübner, Simone, *Encyclopedia of Database Systems*, 1a ed., Estados Unidos, Springer, 2009, p. 2207.

¹²³ ITU-R, "Report ITU-R M.2520-0 The use of the terrestrial component of International Mobile Telecommunications for the Cellular-Vehicle-to-Everything", *Unión Internacional de Telecomunicaciones. Sector de Radiocomunicaciones*, Suiza, 2023, p. 23. Consultado el 11 de abril de 2023, disponible en: https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2520-2022-PDF-E.pdf

¹²⁴ Alnasser, Aljawharah *et al.*, "Cyber security challenges and solutions for V2X communications: A survey", *Elsevier*, 14 de marzo de 2019, p. 55. Consultado el 10 de mayo de 2022, disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1389128618306157>

¹²⁵ *Idem*.

¹²⁶ RIT, "Security in V2V and V2N Communication", *Rochester Institute of Technology*, Estados Unidos, 2021, p. 12. Consultado el 10 de mayo de 2022, disponible en: https://www.rit.edu/wisplab/sites/rit.edu.wisplab/files/2021-10/V2V_Security_updated_10_10_2021.pdf

¹²⁷ ITU-R, "Report ITU-R M.2520-0 The use of the terrestrial component of International Mobile Telecommunications for the Cellular-Vehicle-to-Everything", *Unión Internacional de Telecomunicaciones. Sector de Radiocomunicaciones*, Suiza, 2023, p. 28. Consultado el 13 de abril de 2023, disponible en: https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2520-2022-PDF-E.pdf

Tabla 2.11. Parámetros técnicos del estándar C-V2X¹²⁸.

Parámetro	C-V2X
Potencia pico del transmisor (dBm)	23 dBm ¹²⁹
Sensibilidad del receptor (dBm)	-90.4 dBm ¹³⁰
Modulación	QPSK, 16-QAM y 64-QAM ¹³¹
Velocidad de transmisión (Mb/s)	Dependiendo de la modulación empleada: 0, 6, 7, 10, 13, 16, 21 y 27 Mb/s. ¹³²
Latencia (ms)	Un máximo de ¹³³ : • 1000 ms para V2N. • 100 ms para V2V, V2P y V2I. • 20 ms para casos específicos V2V (p. ej. la detección previa al choque).
Radio máximo de cobertura (m)	500 m ¹³⁴
Velocidad del UE (km/h)	Velocidad máxima ¹³⁵ : • Para V2V una velocidad relativa¹³⁶ de 500 km/h. • Para V2V/V2P una velocidad absoluta¹³⁷ de 250 km/h. • Para V2I una velocidad absoluta de 250 km/h.

¹²⁸ Elaboración propia.

¹²⁹ Kumar Gulia, Aman, "A Simulation Study on the Performance Comparison of the V2X Communication Systems: ITS-G5 and C-V2X", *KTH VETENSKAP OCH KONST*, Suiza, 2020, p. 19. Consultado el 2 de mayo de 2022, disponible en: <http://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:1422828/FULLTEXT01.pdf>

¹³⁰ *Idem*.

¹³¹ Anwar, Waqar et al., Physical Layer Evaluation of V2X Communications Technologies: 5G NR-V2X, LTE-V2X, IEEE 802.11bd, and IEEE 802.11p, Estados Unidos, IEEE 90th Vehicular Technology Conference, 2019, p. 3.

¹³² *Idem*.

¹³³ ITU-R, "Report ITU-R M.2520-0 The use of the terrestrial component of International Mobile Telecommunications for the Cellular-Vehicle-to-Everything", *Unión Internacional de Telecomunicaciones. Sector de Radiocomunicaciones*, Suiza, 2023, p. 7. Consultado el 10 de abril de 2023, disponible en: https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2520-2022-PDF-E.pdf

¹³⁴ Anwar, Waqar et al., Physical Layer Evaluation of V2X Communications Technologies: 5G NR-V2X, LTE-V2X, IEEE 802.11bd, and IEEE 802.11p, Estados Unidos, IEEE 90th Vehicular Technology Conference, 2019, p. 6.

¹³⁵ ITU-R, "Report ITU-R M.2520-0 The use of the terrestrial component of International Mobile Telecommunications for the Cellular-Vehicle-to-Everything", *Unión Internacional de Telecomunicaciones. Sector de Radiocomunicaciones*, Suiza, 2023, p. 7. Consultado el 10 de abril de 2023, disponible en: https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2520-2022-PDF-E.pdf

¹³⁶ La velocidad relativa depende del marco de referencia empleado, el cual puede estar fijo en el espacio o en movimiento. Zbigniew, Oziewicz y Page, William S., "Concepts of relative velocity", *arXiv*, 29 de marzo de 2011, pp. 1-12. Consultado el 31 de marzo de 2023, disponible en: <https://arxiv.org/pdf/1104.0684.pdf>

¹³⁷ La velocidad absoluta es medida utilizando un sistema de coordenadas fijo en el espacio.

Yu, Jiang, "An Analysis on Absolute Velocity", *Journal of Physical Mathematics*, China, 2016, p. 1. Consultado el 31 de marzo de 2023, disponible en: <https://projecteuclid.org/journals/journal-of-physical-mathematics/volume-7/issue-3/An-Analysis-on-Absolute-Velocity/10.4172/2090-0902.1000188.full>

2.4. Tabla comparativa de los estándares de los STI.

En este orden de ideas, después de haber explicado y analizado las principales características de las tecnologías de STI, se realiza una comparación entre los estándares descritos en este capítulo.

Tabla 2.12. Comparación de los parámetros técnicos y características de los estándares de STI¹³⁸.

Estándar de STI	Bandas de frecuencias de operación	Límites de potencia del transmisor (dBm)	Latencia (ms)	Rango de alcance (m)	Velocidad máxima entre dispositivos (km/h)	Aplicaciones que soporta	Métodos de encriptación
WAVE / ASTM E2213-03	5850 MHz a 5925 MHz	PIRE de 23 dBm a 44.8 dBm ¹³⁹	100 ms	1000 m ¹⁴⁰	136 km/h a 193 km/h	Sistemas de control de vehículo, de administración de tráfico, de información a viajeros, de manejo de emergencias, de pago electrónico, de gestión de transporte público y de manejo de flotillas.	Firma digital de curva elíptica, formatos de certificado de WAVE y métodos de cifrado híbrido.
ITS-G5	5850 MHz a 5925 MHz y 5470 MHz a 5725 MHz	PIRE de 23 a 33 dBm ¹⁴¹	100 ms	1000 m	110 km/h	Sistemas de control de vehículo y sistemas de administración de tráfico	Firma digital de curva elíptica e infraestructura de llave pública.
C-V2X	5855 MHz a 5925 MHz	Potencia pico de 23 dBm	20 ms, 100 ms y 1000 ms ¹⁴²	500 m	250 km/h a 500 km/h ¹⁴³	Sistemas de control de vehículo, de administración de tráfico, de administración de flotillas,	Codificación simétrica precompartida y algoritmo de integridad, sólo disponible entre UE y eNB.

¹³⁸ Elaboración propia.

¹³⁹ Depende del canal usado, si el dispositivo es RSU u OBU y si es para uso gubernamental o privado.

¹⁴⁰ Con línea de vista.

¹⁴¹ Depende del canal usado.

¹⁴² Depende del tipo de comunicación V2X y del caso de uso.

¹⁴³ Depende del tipo de comunicación V2X.

Estándar de STI	Bandas de frecuencias de operación	Límites de potencia del transmisor (dBm)	Latencia (ms)	Rango de alcance (m)	Velocidad máxima entre dispositivos (km/h)	Aplicaciones que soporta	Métodos de encriptación
						de información a viajeros, de manejo de emergencias, de pago electrónico, de gestión de transporte público y de asistencia al peatón.	Encriptación ProSe en la comunicación D2D.

[Hoja intencionalmente en blanco]

Capítulo III. Experiencia comparada de la regulación de los STI

En el presente Capítulo se analiza la regulación aplicada a los STI en América del Norte, en Australia y en Brasil. De forma complementaria, se estudia la regulación aplicada por la Unión Europea con el propósito de exponer un panorama diverso que enriquezca el análisis acerca de estos sistemas.

3.1. Estados Unidos: Comisión Federal de Comunicaciones¹⁴⁴.

La FCC divide a los STI en el Servicio de Localización y Monitoreo (LMS, por las siglas en inglés de *Location and Monitoring Service*) y en el Servicio de Comunicaciones Dedicadas de Corto Alcance (DSRCS, por las siglas en inglés de *Dedicated Short Range Communications Service*). A su vez, los sistemas que operan en el DSRCS son regulados tanto por la Subparte M *Intelligent Transportation System Radio Service* (en lo sucesivo "Subparte M"), como por la Subparte L *DSRCS On-Board Units*, pertenecientes a las Partes 90 y 95, respectivamente, del Título 47 del Código de Regulaciones Federales (CFR, por las siglas en inglés de *Code of Federal Regulations*). En la Subparte M se describen las condiciones técnicas generales de operación del Servicio de Radio para STI, cuyo propósito es el de integrar las tecnologías basadas en RF a la infraestructura nacional de transporte, además de desarrollar e implementar este tipo de sistemas¹⁴⁵.

La FCC emitió reglas para atribuir la banda de frecuencias 5850-5925 MHz al servicio móvil con el fin de ser empleada por el DSRCS para la operación de los STI. La FCC designó 75 MHz para este tipo de aplicaciones y estableció sus condiciones técnicas de operación¹⁴⁶. Posteriormente, adoptó reglas de servicio para regular las licencias y uso de la banda de 5.9 GHz para el DSRCS en el servicio de radio STI¹⁴⁷. El procedimiento de autorización para los STI se describe en la Subparte F de la Parte 1 *Wireless Radio Services Applications and Proceedings*¹⁴⁸ y se complementa de forma específica para los Servicios Privados de Radio Móvil Terrestre en la Subparte G de la Parte 90.

¹⁴⁴ *Federal Communication Commission, FCC.*

¹⁴⁵ FCC, "Title 47, Chapter I, Subchapter D, Part 90—PRIVATE LAND MOBILE RADIO SERVICES", *Electronic Code of Federal Regulations*, Estados Unidos, 7 de noviembre de 2019. Consultado el 24 de abril de 2020, disponible en: <https://gov.ecfr.io/cgi-bin/text-idx?SID=d8e30bb8cd020cb6dc3187fd40768c9b&mc=true&node=pt47.5.90&rgn=div5#sp47.5.90.a>

¹⁴⁶ FCC, "Amendment of Parts 2 and 90 of the Commission's Rules to Allocate the 5.850-5.925 GHz Band to the Mobile Service for Dedicates Short Range Communications of Intelligent Transportation Services", *Federal Communications Commission*, Estados Unidos, 21 de octubre de 1999. Consultado el 7 de octubre de 2021, disponible en: <https://docs.fcc.gov/public/attachments/FCC-99-305A1.pdf>

¹⁴⁷ FCC, "Amendment of the Commission's Rules Regarding Dedicated Short-Range Communication Services in the 5.850-5.925 GHz Band (5.9 GHz Band)", *Federal Communications Commission*, Estados Unidos, 17 de diciembre de 2003. Consultado el 7 de octubre de 2021, disponible en: <https://docs.fcc.gov/public/attachments/FCC-03-324A1.pdf>

¹⁴⁸ FCC, "Title 47, Chapter I, Subchapter A, Part 1—PRACTICES AND PROCEDURE", *Electronic Code of Federal Regulations*, Estados Unidos, 14 de Agosto de 2020. Consultado el 16 de agosto de 2020, disponible en: <https://www.ecfr.gov/cgi-bin/text-idx?SID=9c23ba16452c1baa6776eec2bea2b3e7&mc=true&node=se47.1.2.1803&rgn=div8>

3.1.1. Proceso de autorización de los STI.

De forma general, los servicios cubiertos por la Parte 90 son autorizados en un esquema de uso compartido del espectro, y en segmentos de espectro específicos que requieren de la recomendación de un *Frequency Coordinator* (FC)¹⁴⁹, que dictamine la frecuencia más apropiada para el sistema en cuestión, con el objetivo de promover una convivencia armónica entre los servicios existentes. Los FC¹⁵⁰ son organizaciones privadas certificadas por FCC para realizar estas recomendaciones a los solicitantes, en función del tipo de servicio y del tipo de operaciones del solicitante. Entre estas organizaciones se encuentran los Coordinadores de Emergencias Médicas y de Incendios como la *International Municipal Signal Association*¹⁵¹, y los Coordinadores de Mantenimiento de Autopistas, por ejemplo, la *American Association of State Highway and Transportation Officials*¹⁵². No obstante, en frecuencias mayores a 800 MHz, no es necesaria la recomendación de un FC para la operación de los servicios que se encuentran regulados bajo la Parte 90.

El proceso de autorización de los servicios cubiertos por la Parte 90 requiere el llenado y presentación de un formato provisto por FCC, el cual debe contener la información del solicitante para determinar su elegibilidad, además de especificar el tipo de solicitud del que se trata (nueva autorización, modificación de licencia, renovación y cancelación). La información requerida en el formato¹⁵³ para las solicitudes que involucren estaciones de STI se compone de¹⁵⁴:

- Domicilio de las estaciones base,
- área de operación,
- descripción técnica de las antenas,
- frecuencias de operación,
- ancho de banda,
- potencia máxima de transmisión,
- tipo de emisión,
- identificador y
- datos del FC (en el caso de que se solicite operación en una frecuencia que así lo requiera).

Esta solicitud se realiza tanto para los sistemas del LMS, como para los del DSRCS o del C-V2X, y puede llevarse a cabo tanto por individuos como por empresas a través de un representante legal, con la limitante de que no se otorgará ninguna autorización para operar una estación a ningún gobierno extranjero o su representante, así como a ninguna empresa

¹⁴⁹ FCC, "Title 47, Chapter I, Subchapter D, Part 90—PRIVATE LAND MOBILE RADIO SERVICES", *Electronic Code of Federal Regulations*, Estados Unidos, 7 de noviembre de 2019. Consultado el 24 de abril de 2020, disponible en: <https://gov.ecfr.io/cgi-bin/text-idx?SID=d8e30bb8cd020cb6dc3187fd40768c9b&mc=true&node=pt47.5.90&rgn=div5#sp47.5.90.a>

¹⁵⁰ El listado de *Frequency Coordinators* se encuentra en la Subparte B y Subparte C de la Parte 90, así como los canales en los cuales se requiere su recomendación.

¹⁵¹ Para mayor información, consúltese: <https://www.imsasafety.org/imsa-certification/>

¹⁵² Para mayor información, consúltese: <https://www.transportation.org/>

¹⁵³ FCC, "Form 601, Application for Radio Service Authorization", *Federal Communications Commission*, Estados Unidos, 7 de agosto de 2016. Consultado el 24 de abril de 2020, disponible en: <https://transition.fcc.gov/Forms/Form601/601.pdf>

¹⁵⁴ FCC, "Title 47, Chapter I, Subchapter D, Part 90—PRIVATE LAND MOBILE RADIO SERVICES", *Electronic Code of Federal Regulations*, Estados Unidos, 7 de noviembre de 2019. Consultado el 24 de abril de 2020, disponible en: <https://gov.ecfr.io/cgi-bin/text-idx?SID=d8e30bb8cd020cb6dc3187fd40768c9b&mc=true&node=pt47.5.90&rgn=div5#sp47.5.90.a>

fundada bajo las leyes de un gobierno diferente al de Estados Unidos, ni a alguna compañía de la cual más de una quinta parte del capital total se encuentre en posesión de extranjeros¹⁵⁵. Adicionalmente, es necesario que los equipos transmisores empleados en los STI se encuentren debidamente certificados por FCC. Cabe mencionar que, para poder operar estaciones de los STI del tipo portátil, de mano o montadas en un vehículo que se comuniquen con una estación base del STI, no se requiere de alguna licencia¹⁵⁶.

3.1.2. Servicio de Localización y Monitoreo.

Los sistemas del LMS utilizan técnicas de RF para determinar la ubicación y estado de las unidades móviles. Estos sistemas pueden ser autorizados para operar dentro de las bandas de 25-50 MHz, 150-170 MHz, 450-512 MHz y 902-928 MHz. Cabe mencionar que, los sistemas LMS en Estados Unidos operan con tecnologías distintas a aquellas descritas en el Capítulo II del presente Estudio, derivado de que están enfocadas a aplicaciones específicas, como la localización de vehículos.

Las solicitudes para la operación de estos sistemas, además de los requisitos mencionados en el numeral anterior, deberán ser acompañadas por una descripción de las características técnicas del sistema a emplear, entre las que se incluyen:

- Una descripción detallada de la forma en que el sistema operará, con diagramas o mapas.
- El ancho de banda ocupado¹⁵⁷ o el ancho de banda necesario¹⁵⁸ por el sistema, cualquiera que sea mayor.
- Las características de la transmisión de datos que debe incluir la tasa de tiempo de actualización de la ubicación del vehículo, las técnicas de modulación empleadas, la tasa de transmisión de bits, la duración de bit, tiempo del flanco de subida de un bit, y un ejemplo de la transmisión típica de un mensaje en dónde se incluyan los bits de sincronización.
- Un cronograma de implementación de los sistemas durante el periodo inicial de la licencia.

La autorización para los sistemas del LMS son distintas de acuerdo a la banda de frecuencias en que se realice la solicitud, debido a la naturaleza del servicio al cual están atribuidas estas bandas a título primario. En lo que respecta a los segmentos de bandas de 25-50 MHz, 150-170 MHz y 450-512 MHz, se encuentran asignadas en su mayoría al servicio móvil y móvil

¹⁵⁵ FCC, "Title 47, Chapter I, Subchapter D, Part 90—PRIVATE LAND MOBILE RADIO SERVICES", *Electronic Code of Federal Regulations*, Estados Unidos, 7 de noviembre de 2019. Consultado el 24 de abril de 2020, disponible en: <https://gov.ecfr.io/cgi-bin/text-idx?SID=d8e30bb8cd020cb6dc3187fd40768c9b&mc=true&node=pt47.5.90&rgn=div5#sp47.5.90.a>

¹⁵⁶ FCC, "Title 47, Chapter I, Subchapter D, Part 90—PRIVATE LAND MOBILE RADIO SERVICES", *Electronic Code of Federal Regulations*, Estados Unidos, 7 de noviembre de 2019. Consultado el 24 de abril de 2020, disponible en: <https://gov.ecfr.io/cgi-bin/text-idx?SID=d8e30bb8cd020cb6dc3187fd40768c9b&mc=true&node=pt47.5.90&rgn=div5#sp47.5.90.a>

¹⁵⁷ El ancho de una banda de frecuencias tal que, debajo y por encima de los límites, las potencias medias emitidas son iguales a un porcentaje $\beta/2$ de la potencia media total de una emisión determinada. El porcentaje $\beta/2$ recomendado por la UIT es 0.5% para la mayoría de los tipos de emisión. Para mayor información consúltese: <http://search.itu.int/history/HistoryDigitalCollectionDocLibrary/1.43.48.en.101.pdf>

¹⁵⁸ El ancho de la banda de tal forma que para un tipo de emisión determinado resulta suficiente para asegurar la transmisión de la información con una tasa de transferencia y una calidad específica. Para mayor información consúltese: <http://search.itu.int/history/HistoryDigitalCollectionDocLibrary/1.43.48.en.101.pdf>

terrestre¹⁵⁹, aunque algunos segmentos también se encuentran asignados a título primario al servicio de radiolocalización, al servicio fijo y de radioastronomía. Estas bandas pertenecen al grupo de frecuencias para servicios de seguridad pública y operaciones industriales, por lo que la autorización de un sistema del LMS requiere de la recomendación del Coordinador respectivo. Aunado a esto, los sistemas autorizados en estas bandas no podrán ofrecer servicio al público ni proporcionar servicio sobre una base comercial (con fines de lucro).

La autorización de un canal en estas bandas está sujeta a que se cumpla con las siguientes condiciones:

- a) Para la transmisión entre vehículos y estaciones base, cuando se emplee una única frecuencia para la transmisión y la recepción se debe proveer datos de ubicación para aproximadamente 200 vehículos y cuando se utilice un par de frecuencias, una para transmisión y otra para recepción, se deben proveer datos de ubicación para aproximadamente 400 vehículos. El 50% de esta ocupación debe darse para el final del segundo año del inicio de la licencia, y el 70 % para el término de ésta. Si no se cumplen estas medidas de ocupación, las frecuencias serán asignadas a título secundario a algún operador del servicio móvil terrestre autorizado en la misma banda de frecuencias.
- b) La separación mínima entre una estación propuesta para el LMS, y la estación co-canal más próxima que opera un sistema del servicio móvil terrestre, es de 120 km para el modo de operación con frecuencia única, o bien, 56 km para la operación con un par de frecuencias. En los casos en los que no se pueda cumplir con la distancia mínima, FCC debe recibir un acuerdo de conformidad por parte de los operadores del servicio móvil terrestre que se encuentren en co-canal que dejen de emplear emisiones de voz. De no existir dicho acuerdo, el responsable del sistema del LMS debe ser quien elimine la interferencia.
- c) No se autorizará ninguna frecuencia adicional a un licenciario del LMS hasta que demuestre que las frecuencias que ya tenga autorizadas cumplen con una ocupación de al menos el 90% de vehículos (de acuerdo con los términos del inciso a).

Las normas técnicas generales de operación de los dispositivos en estas bandas se describen en la Subparte I¹⁶⁰ y la Subparte J¹⁶¹ de la Parte 90, en donde se establecen las siguientes potencias máximas de transmisión por cada banda:

- 25-50 MHz: la potencia máxima de salida del transmisor es de 300 watts. Las potencias de transmisión máximas para las estaciones móviles en esta banda varían según la frecuencia puntual de operación del equipo, y esta puede ser 1 o 2 watts. La

¹⁵⁹ FCC, "Title 47, Chapter I, Subchapter A, Part 2—FREQUENCY ALLOCATIONS AND RADIO TREATY MATTERS; GENERAL RULES AND REGULATIONS", *Electronic Code of Federal Regulations*, Estados Unidos, 23 de abril de 2020. Consultado el 8 de mayo de 2020, disponible en: <https://gov.ecfr.io/cgi-bin/text-idx?SID=ca4ca93aa4dabfc9a8665d1e9373a26e&mc=true&node=pt47.1.2&rgn=div5#sp47.1.2.b>

¹⁶⁰ FCC, "Title 47, Chapter I, Subchapter D, Part 90—PRIVATE LAND MOBILE RADIO SERVICES", *Electronic Code of Federal Regulations*, Estados Unidos, 7 de noviembre de 2019. Consultado el 24 de abril de 2020, disponible en: <https://gov.ecfr.io/cgi-bin/text-idx?SID=d8e30bb8cd020cb6dc3187fd40768c9b&mc=true&node=pt47.5.90&rgn=div5#sp47.5.90.a>

¹⁶¹ *Idem*.

tabla de frecuencias para operaciones Industriales y Comerciales de la Subparte C contiene las limitaciones para cada frecuencia en específico.

- 150-174 MHz: la Potencia Radiada Aparente (PRA) máxima es de 300 watts para estaciones fijas y 1 watt para estaciones operando en frecuencias del servicio móvil.
- 470-512 MHz: la PRA máxima de las estaciones fijas podrá ser de hasta 225 watts y 10 watts para las estaciones móviles, exceptuando aquellas que se encuentren al Este del Río Hudson, lo cual incluye a los estados de Connecticut, Rhode Island, Massachussets, Nuevo Hampshire, Vermont, Maine y un segmento del estado de Nueva York, en los cuales se permite una PRA para las estaciones móviles de hasta 100 watts.

Debido a que el segmento de 470-512 MHz comparte la banda de frecuencias con los canales de algunas estaciones de televisión radiodifundida en Estados Unidos, la Subparte L¹⁶² de la Parte 90 contiene un listado de las localidades urbanas, en cada una de las cuales se presentan condiciones específicas que se deben cumplir para operar las estaciones fijas de los servicios cubiertos por la Parte 90. Estas características incluyen diferentes alturas de antenas de las estaciones base, segmentos de banda, así como canales específicos por sitio y diferentes PRA asociadas a la distancia de separación entre la estación fija y la estación de televisión utilizados como parámetros de protección contra interferencias co-canal; en esta Subparte se especifica que la estación base de un servicio cubierto por la Parte 90 que opere en esta banda deberá instalarse a menos de 80 km del centro geográfico de estas locaciones urbanas y al mismo tiempo, que sus estaciones móviles solo deberán operar dentro de un radio de 48 km con respecto a la base.

La canalización aplicable en estas bandas se describe en la Tabla 3.1, en dónde se observa el espaciamiento entre canales y el ancho de banda máximo autorizado.

Tabla 3.1. Canalización de las bandas de los Servicios Privados de Radio Móvil Terrestre en las bandas del LMS¹⁶³.

Banda de frecuencias [MHz]	Espaciamiento entre canales [kHz]	Ancho de banda máximo autorizado [kHz]
25-50	20	20
150-174	7.5	20/11.25/6 ¹⁶⁴
406-512	6.25	20/11.25/6 ¹⁶⁵

¹⁶² FCC, "Title 47, Chapter I, Subchapter D, Part 90, Subpart L- Authorization in the Band 470-512 MHz (UHF-TV Sharing)", *Electronic Code of federal Regulations*, Estados Unidos. Consultado el 24 de abril de 2020: <https://www.ecfr.gov/cgi-bin/text-idx?SID=019cdede0f1f5be7bf08d0b7c4d6ab7f&mc=true&node=pt47.5.90&rgn=div5#sp47.5.90>

¹⁶³ FCC, "Title 47, Chapter I, Subchapter D, Part 90—PRIVATE LAND MOBILE RADIO SERVICES", *Electronic Code of Federal Regulations, Estados Unidos*, 10 de febrero de 2023. Consultado el 5 de octubre de 2023, disponible en: <https://www.ecfr.gov/current/title-47/chapter-I/subchapter-D/part-90#sp47.5.90>

¹⁶⁴ El ancho de banda se autoriza en función de los requisitos de operación del sistema.

¹⁶⁵ El ancho de banda se autoriza en función de los requisitos de operación del sistema y de acuerdo a los criterios de ubicación considerados en la Subparte L de la Parte 90 "Authorization in the Band 470-512 MHz (UHF-TV Sharing)" correspondiente a los criterios de análisis para autorización en esta banda en un esquema compartido con las bandas de televisión.

Por otra parte, el segmento de 902-928 MHz¹⁶⁶ se encuentra asignado de forma primaria al servicio de Radiolocalización de uso Federal, y a título secundario se trata de una banda de uso sin licencia, en la cual se permite la operación de dispositivos de RF (cubiertos por la Parte 15), como transmisores que utilizan técnicas espectro disperso o de salto de frecuencias (*Frequency Hopping*), identificadores por radiofrecuencia, sistemas de control remoto, sistemas de seguridad y sensores equipados con transmisores así como equipos Industriales, Científicos y Médicos (ICM), dispositivos en el servicio de Radioaficionados y los sistemas Privados de Radio Móvil. Por ello, se especifica que los sistemas del LMS en esta banda deben ser tolerantes a la interferencia proveniente de los dispositivos ICM, y a su vez, no causar interferencia a éstos ni a las estaciones del Servicio de Radiolocalización Federal¹⁶⁷ que operan en la misma banda.

Los sistemas del LMS en la banda de 902-928 MHz están autorizados para¹⁶⁸:

- Transmitir mensajes de estado o de instrucciones (empleando voz o no).
- Realizar sus funciones de localización y monitoreo.

Para llevarlo a cabo podrán hacer uso de la técnica de conmutación de almacenamiento y reenvío, en dónde el proveedor del LMS almacena las transmisiones desde un vehículo que está siendo monitoreado para su posterior retransmisión a través de la red pública conmutada, o bien, los mensajes se almacenan en la red pública conmutada para su posterior reenvío al vehículo monitoreado.

Adicionalmente, los sistemas del LMS pueden implementar comunicaciones en tiempo real entre los vehículos o con la red pública conmutada cuando se trate de comunicaciones de emergencia, y éstas sólo pueden ser recibidas por el sistema de un punto de despacho¹⁶⁹ o bien de una entidad autorizada para operar los servicios seguridad pública o en los servicios de radio especial de emergencias. Estas entidades se describen en la Subparte B de la Parte 90 y dentro de los entes que pueden ser autorizados están:

- Los distritos.
- Las autoridades gubernamentales.
- Las instituciones dedicadas a proveer servicios de soporte y auxilio de la vida.
- Las instituciones dedicadas a actividades y servicios médicos y hospitalarios.
- Las entidades dedicadas a operar servicios contra incendios, cuerpos de rescate y ambulancias.

¹⁶⁶ Como ya se mencionó anteriormente, la recomendación de un Coordinador en frecuencias mayores a 800 MHz no es necesaria, por lo que la autorización de sistemas del LMS en esta banda está también exenta de este requisito.

¹⁶⁷ Los sistemas de radio operados y pertenecientes al gobierno de los Estados Unidos no se encuentran sujetos a las regulaciones de la Parte 90.

¹⁶⁸ FCC, "Title 47, Chapter I, Subchapter D, Part 90—PRIVATE LAND MOBILE RADIO SERVICES", *Electronic Code of Federal Regulations, Estados Unidos*, 10 de febrero de 2023. Consultado el 5 de octubre de 2023, disponible en: <https://www.ecfr.gov/current/title-47/chapter-I/subchapter-D/part-90#sp47.5.90.I>

¹⁶⁹ Los puntos de despacho son puntos de control de las estaciones base de los sistemas de comunicación, no requieren una autorización explícita de FCC, toda vez que su instalación y operación esté ligada a una o más estaciones base de un sistema autorizado en el servicio.

Por otra parte, los sistemas de LMS en la banda de 902-928 MHz son clasificados en dos tipos: sistemas de multilateración¹⁷⁰ y sistemas que no usan multilateración. El esquema de autorización de los sistemas de multilateración en el LMS es por licencias exclusivas en Áreas Económicas¹⁷¹ (EA, por las siglas en inglés *Economic Area*). Así, FCC solamente otorga una licencia exclusiva por cada una de las 3 sub-bandas de operación (mostradas en la Tabla 3.2), en cada Área Económica, es decir, un licenciatario de un sistema de multilateración del LMS solo podrá ser autorizado en una de las 3 sub bandas por cada EA. Además, el licenciatario está condicionado a demostrar mediante pruebas de campo reales que sus sistemas no causan niveles inaceptables de interferencia a los dispositivos cubiertos por la Parte 15 del CFR que operen en esta banda. Los sistemas de multilateración autorizados en un Área Económica deberán limitar la intensidad de campo de las señales transmitidas por sus estaciones base a 47 dBuV/m en los límites de dicha EA.

Tabla 3.2. Bandas para sistemas LMS de multilateración¹⁷².

Segmentos de frecuencias del LMS [MHz]	Segmento para enlace descendente ¹⁷³ [MHz]
904.000-909.750	927.750-928.000
919.750-921.750 ¹⁷⁴	927.500-927.750
921.750-927.250	927.250-927.500

Los segmentos de frecuencias de 904.000-909.750 MHz, 919.750-921.750 MHz y 921.750-927.250 MHz, pueden ser utilizados para enlaces ascendentes y descendentes cuando se trata de sistemas que utilizan una única frecuencia, A su vez, la banda de 919.750-921.750 MHz, se comparte de forma equitativa con los sistemas de LMS que no son de multilateración.

Por otra parte, los sistemas del LMS que no utilizan multilateración son autorizados bajo un esquema de espectro compartido con licencias por sitio no exclusivas en las bandas mostradas en la Tabla 3.3. Además, comparten de forma equitativa la banda de 919.75-921.75 MHz, con los sistemas del LMS de multilateración. Únicamente las entidades gubernamentales tendrán la opción de presentar una solicitud de autorización en conjunto para operar un grupo de estaciones del LMS que no usan multilateración, pertenecientes a

¹⁷⁰ La multilateración es una técnica de radionavegación y localización cuyo principio de funcionamiento es la medición de la diferencia en los tiempos de llegada de las señales de dos o más estaciones en posiciones conocidas. Para más información consúltese: <http://www.multilateration.com/surveillance/multilateration.html>

¹⁷¹ Un área económica es denominada como un área de servicio basado en la delimitación generada por el Departamento de Comercio en 1995, como producto de un análisis para generar una división regional económica. Existen 176 áreas económicas en Estados Unidos Para mayor información consúltese en: <https://www.fcc.gov/oet/maps/areas>

¹⁷² FCC, "Title 47, Chapter I, Subchapter D, Part 90—PRIVATE LAND MOBILE RADIO SERVICES", *Electronic Code of Federal Regulations*, Estados Unidos, 7 de noviembre de 2000. Consultado el 24 de abril de 2020, disponible en: <https://gov.ecfr.io/cgi-bin/text-idx?SID=d8e30bb8cd020cb6dc3187fd40768c9b&mc=true&node=pt47.5.90&rgn=div5#sp47.5.90.a>

¹⁷³ Limitado a una potencia Efectiva Radiada de 30 W, de acuerdo a la Sección 205 de la Parte 90, para mayor información, consúltese: https://gov.ecfr.io/cgi-bin/retrieveECFR?gp=&SID=3612bf76aefa0b3a38f14084466d3417&mc=true&n=pt47.5.90&r=PART&ty=HTML#se47.5.90_1205

¹⁷⁴ La banda de 919.750-921.750 MHz se comparte de forma equitativa con los sistemas de LMS que no son de multilateración.

un Área Económica para que les sea otorgada una licencia bajo el esquema de Área Económica exclusiva, dicha solicitud deberá listar todas las estaciones a operar.

Tabla 3.3. Bandas para sistemas LMS que no son de multilateración¹⁷⁵.

Sub-banda de LMS [MHz]
902.000-904.000
909.750-921.750

También, FCC establece que la altura de las antenas sobre el nivel del suelo de los sistemas del LMS sin multilateración no deben sobrepasar los 15 m y no pueden proveer un servicio diferente al de localización de vehículos¹⁷⁶.

3.1.3. Servicio de Comunicaciones Dedicadas de Corto Alcance.

Los sistemas del DSRCs utilizan técnicas de radio para transferir información a cortas distancias mediante comunicaciones V2V y V2I, que son efectuadas entre RSU y OBU, como se muestra en la Figura 3.1. Estas comunicaciones tienen como prioridad aquellas que involucren la seguridad de la vida por sobre las demás. Los sistemas del DSRCs podrán ser autorizados para operar en la banda de 5850–5925 MHz.

¹⁷⁵ FCC, "Title 47, Chapter I, Subchapter D, Part 90—PRIVATE LAND MOBILE RADIO SERVICES", *Electronic Code of Federal Regulations*, Estados Unidos, 7 de noviembre de 2000. Consultado el 24 de abril de 2020, disponible en: <https://gov.ecfr.io/cgi-bin/text-idx?SID=d8e30bb8cd020cb6dc3187fd40768c9b&mc=true&node=pt47.5.90&rgn=div5#sp47.5.90.a>

¹⁷⁶ *Ibidem*.

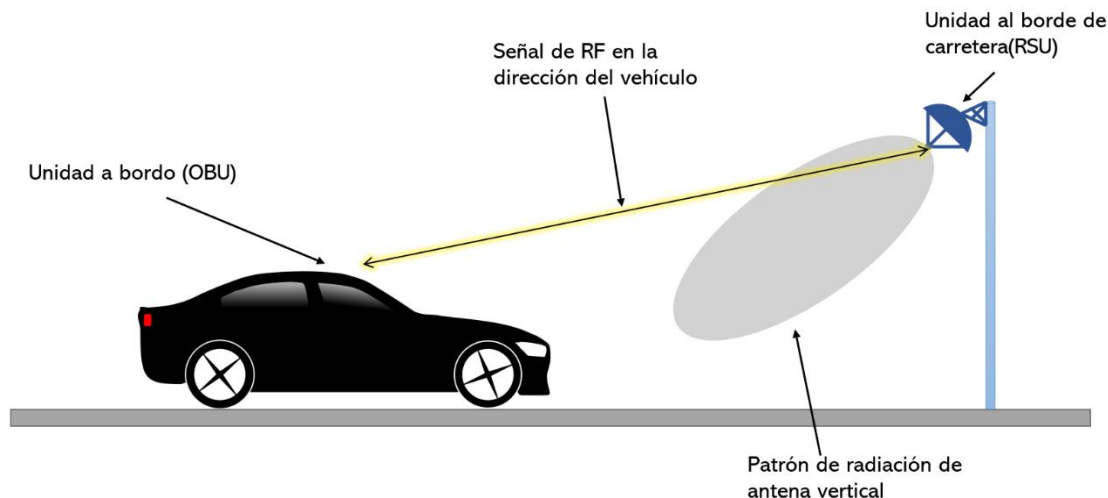


Figura 3.1. Esquema de comunicación OBU-RSU¹⁷⁷.

Una OBU es definida como un transceptor que está generalmente montado en un vehículo y que, en algunos casos, puede tratarse de una unidad móvil. En cambio, una RSU se trata de un transceptor que se encuentra instalado a lo largo de una carretera o en un cruce peatonal, aunque también pueden ser montadas en un vehículo o transportadas a mano, sin embargo, su operación está sujeta a que la unidad se debe encontrar estática. Si bien ambas unidades forman parte de un mismo servicio, son reguladas por separado debido a diferencias en los requisitos y esquemas de autorización.

El proceso de autorización inicial para operar una RSU en el DSRCS consta de presentar el formato¹⁷⁸ previsto por la FCC con toda la información técnica correspondiente señalada en el numeral 3.1.1. Una vez autorizada la licencia, cada estación deberá registrarse en el Sistema Universal de Licencias (ULS, por las siglas en inglés de *Universal Licensing System*)¹⁷⁹. En contraparte, las OBU no requieren de una licencia individual para operar en el DSRCS, pero sí una certificación por parte de FCC.

Las solicitudes para operar una RSU en el DSRCS podrán ser autorizadas a:

- Entidades gubernamentales en representación de territorios, estados, ciudades, condados o similares.
- Cualquier entidad que cumpla con los requisitos para obtener autorización de operación en el grupo de frecuencias Industrial o Comerciales, entre las que se encuentran las entidades que participan en actividades comerciales, actividades clericales, instituciones educativas, filantrópicas o eclesiásticas, actividades de hospitales, clínicas o asociaciones médicas.

¹⁷⁷ Elaboración propia.

¹⁷⁸ Para mayor información, consúltese: <https://www.fcc.gov/sites/default/files/fcc-form-601.pdf>

¹⁷⁹ Las formas y requisitos para realizar un registro en el ULS se encuentran en la Subparte F de la Parte 1 "PRACTICE AND PROCEDURE" del título 47 del CFR, para más información consúltese: https://gov.ecfr.io/cgi-bin/text-idx?SID=a10c63b4bca3f1f51ab67aca500de60f&mc=true&node=se47.1.1_1923&rgn=div8

Las RSU de entidades no gubernamentales serán autorizadas bajo el esquema de asignación en áreas geográficas no exclusivas, mientras que para las solicitadas por entidades gubernamentales serán autorizadas bajo el esquema de asignación por áreas geopolíticas apegándose a la jurisdicción legal de cada entidad.

Como se mencionó anteriormente, tanto las RSU como las OBU podrán operar en la banda de 5850-5925 MHz y están sujetas al cumplimiento del estándar¹⁸⁰ ASTM E2213-03 DSRC, en el cual se especifica la canalización que deben emplear, el uso otorgado y la PIRE máxima por canal. Esta información se describe en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4. Distribución de canales para los DSRC¹⁸⁴.

Número de canal	Rango de frecuencias [MHz]	PIRE máxima ¹⁸¹ [dBm]	Uso del canal
170	5850-5855	-	Reservado
172	5855-5865	33	Designado para aplicaciones de seguridad pública
174	5865-5875	33	Canal de Servicio
175	5865-5885	23	Canal de 20 MHz constituido por la unión de los canales 174-176
176	5875-5885	33	Canal de Servicio
178	5885-5895	33/44.8 ¹⁸²	Canal de Control
180	5895-5905	23	Canal de Servicio
181	5895-5915	23	Canal de 20 MHz constituido por la unión de los canales 180-182
182	5905-5915	23	Canal de Servicio
184	5915-5925	33/40 ¹⁸³	Canal designado para aplicaciones de seguridad pública.

Las licencias autorizan la operación de las RSU en el área determinada empleando todos los canales disponibles en los 75 MHz de la banda, con excepción de los canales que se encuentren reservados. La decisión de autorizar el uso de toda la banda y no asignar canales específicos tiene como objetivo propiciar la cooperación entre sistemas del DSRC y mejorar la coordinación con los otros servicios asignados en esa banda.

Cada RSU es clasificada conforme a lo presentado en la Tabla 3.5, de acuerdo con la potencia máxima del transmisor, de forma que se les asigna un radio máximo de cobertura en el cual

¹⁸⁰ ASTM E2213-03, "Standard Specification for Telecommunications and Information Exchange Between Roadside and Vehicle Systems—5 GHz Band Dedicated Short Range Communications (DSRC) Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications", *ASTM International*, septiembre de 2013, consultado el 27 de Abril de 2020, disponible en: <https://www.astm.org/READINGLIBRARY/VIEW/E2213-03.html>

¹⁸¹ *Idem*.

¹⁸² 33 dBm para sistemas con RSU y OBU operados por entidades privadas y 44.8 dBm para RSU y OBU transmitiendo señales relacionadas con la Seguridad Pública.

¹⁸³ 33 dBm para sistemas con RSU y OBU operados por entidades privadas y 40 dBm para RSU y OBU transmitiendo señales relacionadas con la Seguridad Pública.

¹⁸⁴ FCC, "Title 47, Chapter I, Subchapter D, Part 90—PRIVATE LAND MOBILE RADIO SERVICES", *Electronic Code of Federal Regulations*, Estados Unidos, 7 de noviembre de 2000. Consultado el 24 de abril de 2020, disponible en: <https://gov.ecfr.io/cgi-bin/text-idx?SID=d8e30bb8cd020cb6dc3187fd40768c9b&mc=true&node=pt47.5.90&rgn=div5#sp47.5.90.a>

podrán mantener comunicación con las OBU. Además, se especifica que el centro de radiación de las antenas de las RSU no podrá exceder una altura de 8 m sobre el nivel de la carpeta asfáltica, con el objetivo de cumplir con la PIRE listada en la Tabla 3.4. Por su parte, las OBU están limitadas a una potencia de transmisión de 1 mW¹⁸⁵.

Tabla 3.5. Clasificación de las RSU¹⁸⁶.

Clase de RSU	Potencia máxima del transmisor [dBm]	Radio de cobertura [m]
A	0	15
B	10	100
C	20	400
D	28.8	1000

La FCC establece que las RSU no recibirán protección contra interferencias provenientes de sistemas del Servicio de Radiolocalización Federal que estuvieran en operación. Además, para establecer y operar una RSU a menos de 75 kilómetros del lugar donde se ubican los equipos del Servicio de Radiolocalización Federal, se requiere una coordinación con la Administración Nacional de Telecomunicaciones e Información (NTIA, por las siglas en inglés de *National Telecommunications and Information Administration*)¹⁸⁷.

Referente a la operación de las RSU en las fronteras de Estados Unidos, se especifican dos condiciones bajo las cuales estas deben operar¹⁸⁸:

- Las RSU no deben causar interferencias perjudiciales a las estaciones en Canadá o en México que están autorizadas de acuerdo a la tabla de asignación frecuencias internacional para la Región 2, y debe aceptar cualquier interferencia que pueda ser causada por estas estaciones.
- Los términos en los que el licenciataria del DSRCS fue autorizado para operar una RSU, son susceptibles a modificaciones y acuerdos futuros entre los Estados Unidos y Canadá, o entre Estados Unidos y México, según sea aplicable.

3.1.4. Propuesta de Enmienda y C-V2X.

El 20 de noviembre de 2020, la FCC publicó un primer informe y orden sobre el uso de la banda de 5850-5925 MHz (en lo sucesivo "Primer Informe") mediante el que se emitieron nuevas reglas y una consulta pública respecto a los temas pendientes para finalizar la reestructuración de la banda de 5.9 GHz¹⁸⁹. Posteriormente, el 3 de mayo de 2021, se publicó

¹⁸⁵ FCC, "Title 47, Chapter I, Subchapter D, Part 95—PERSONAL RADIO SERVICES, Subpart L-DSRCS On-Board Units", *Electronic Code of Federal Regulations*, Estados Unidos, 3 de mayo de 2021. Consultado el 3 de octubre de 2023, disponible en: <https://www.ecfr.gov/current/title-47/chapter-I/subchapter-D/part-95/subpart-L>

¹⁸⁶ FCC, "Title 47, Chapter I, Subchapter D, Part 90—PRIVATE LAND MOBILE RADIO SERVICES, Subpart M-Intelligent Transportation Systems Radio Service", *Electronic Code of Federal Regulations*, Estados Unidos, 7 de noviembre de 2000. Consultado el 24 de abril de 2020, disponible en: <https://gov.ecfr.io/cgi-bin/text-idx?SID=d8e30bb8cd020cb6dc3187fd40768c9b&mc=true&node=pt47.5.90&rgn=div5#sp47.5.90.a>

¹⁸⁷ *Idem*.

¹⁸⁸ *Idem*.

¹⁸⁹ FCC, "Use of the 5.850-5.925 GHz Band", *Federal Communications Commission*, Estados Unidos, 18 de noviembre de 2020. Consultado el 13 de octubre de 2021, disponible en: <https://docs.fcc.gov/public/attachments/FCC-20-164A1.pdf>

en el Registro Federal una propuesta de enmienda a las partes 15, 90 y 95 del Título 47 del CFR (en lo sucesivo "la Propuesta de Enmienda") en conformidad con el contenido del Primer Informe. Mediante esta Propuesta de Enmienda la FCC autorizó¹⁹⁰:

- El uso de dispositivos U-NII¹⁹¹ sin licencia en los 45 MHz inferiores de la banda (5850-5895 MHz), conservando los 30 MHz superiores de la banda (5895-5925 MHz) para la operación de los STI.
- Designar la tecnología Cellular-V2X (C-V2X, por las siglas en inglés de *Cellular Vehicle to Everything*) como estándar tecnológico de operación para los STI, remplazando al DSRCS.

A partir de la fecha de entrada en vigor del Primer Informe, las operaciones en interiores de los equipos sin licencia, están permitidas en el segmento de 5850-5925 MHz, con ciertas condiciones técnicas diseñadas para proteger a los STI que operan en el DSRCS y las operaciones del Servicio de Radiolocalización Federal de interferencias dañinas. La FCC aplicó un período de un año a partir de la fecha de entrada en vigor del Primer Informe para que aquellos licenciatarios de STI que operan mediante el DSRCS, transfieran todas sus operaciones a la banda de 5895-5925 MHz. Una vez que las operaciones de STI en DSRCS concluyan su transición a los 30 MHz superiores de la banda de 5.9 GHz, se permitirán las operaciones de dispositivos sin licencia, sin límite de potencia, en el segmento de 5850-5895 MHz, sujeto a la protección contra interferencias dañinas.

Además, la FCC adoptó la tecnología C-V2X como estándar tecnológico de operación para los STI, remplazando al DSRCS, una vez que la FCC adopte el periodo de un año referido en el párrafo anterior, y con ello se complete la transición a la nueva banda de operación de los STI. Para este periodo, la FCC propone que todas las operaciones de los STI en la banda de 5895-5925 MHz se conviertan a C-V2X o dejen de funcionar dos años después de la fecha de entrada en vigor de un segundo informe por emitir. A la espera de la resolución de la transición de las operaciones de STI a C-V2X, los licenciatarios de STI podrán continuar sus operaciones basadas en DSRCS o, alternativamente, tratar de desplegar operaciones basadas en C-V2X a través de los procesos regulatorios existentes de la FCC¹⁹². Cabe mencionar que, tanto las RSU como las OBU que operan con tecnología C-V2X están sujetas al cumplimiento del estándar¹⁹³ 3GPP TR 21.914 V14.0.0.

Al igual que en el DSRCS, el proceso de autorización inicial para operar una RSU con tecnología C-V2X consta de presentar el formato previsto por la FCC con toda la información

¹⁹⁰ FCC, "Use of the 5.850-5.925 GHz Band", *Federal Register*, Estados Unidos, 3 de mayo de 2021. Consultado el 29 de septiembre de 2021, disponible en: <https://www.federalregister.gov/documents/2021/05/03/2021-08801/use-of-the-5850-5925-ghz-band>

¹⁹¹ Los dispositivos U-NII proporcionan conexiones inalámbricas de corto alcance y alta velocidad sin licencia en la banda de 5 GHz para, entre otras aplicaciones, redes locales de radio habilitadas para Wi-Fi, teléfonos inalámbricos y transceptores de banda ancha fijos al aire libre utilizados por los proveedores de Internet inalámbrico.

FCC, "DSRC and U-NII-4 Prototype Device Testing", *Federal Communications Commission*, Estados Unidos. Consultado el 11 de noviembre de 2021, disponible en: <https://www.fcc.gov/oet/unii-4banddevice>

¹⁹² FCC, "Use of the 5.850-5.925 GHz Band", *Federal Register*, Estados Unidos, 3 de mayo de 2021. Consultado el 29 de septiembre de 2021, disponible en: <https://www.federalregister.gov/documents/2021/05/03/2021-08801/use-of-the-5850-5925-ghz-band>

¹⁹³ 3GPP, "3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Services and System Aspects; Release 14 Description; Summary of Rel-14 Work Items (Release 14)", *3rd Generation Partnership Project*, Francia, 17 de septiembre de 2014, Consultado el 14 de 2021, disponible en: <https://www.3gpp.org/3gpp-calendar/44-specifications/releases>

técnica correspondiente señalada en el numeral 3.1.1. Una vez autorizada la licencia, cada estación deberá registrarse en el ULS¹⁹⁴. En contraparte, las OBU no requieren de una licencia individual para operar en el C-V2X.

Las solicitudes para operar una RSU en el C-V2X podrán ser autorizadas a¹⁹⁵:

- Entidades gubernamentales en representación de territorios, estados, ciudades, condados o similares.
- Cualquier entidad que cumpla con los requisitos para obtener autorización de operación en el grupo de frecuencias Industrial o Comerciales, entre las que se encuentran las entidades que participan en actividades comerciales, actividades clericales, instituciones educativas, filantrópicas o eclesiásticas, actividades de hospitales, clínicas o asociaciones médicas.

Las RSU de entidades no gubernamentales serán autorizadas bajo el esquema de asignación en áreas geográficas no exclusivas, mientras que para las solicitadas por entidades gubernamentales serán autorizadas bajo el esquema de asignación por áreas geopolíticas apegándose a la jurisdicción legal de cada entidad¹⁹⁶.

El plan de banda STI modificado elimina los cuatro canales inferiores de 10 MHz (canales 172, 174, 176 y 178) de la Tabla 3.4, incluido el canal de control actual, y uno de los canales de seguridad pública, como se muestra en la Tabla 3.6. Estos cambios requieren que la FCC proponga modificar las reglas técnicas de STI para garantizar que los servicios STI entreguen sus aplicaciones con la seguridad prevista. Por otra parte, la FCC propone mantener la jerarquía de prioridad de los mensajes utilizada con el DSRCs para la implementación del C-V2X.

Tabla 3.6. Distribución de canales propuesta para C-V2X¹⁹⁷.

Número de canal	Rango de frecuencias [MHz]	PIRE máxima ¹⁹⁸ [dBm]	Uso del canal
180	5895-5905	23	Canal de Servicio
181	5895-5915	23	Canal de 20 MHz constituido por la unión de los canales 180-182
182	5905-5915	23	Canal de Servicio
184	5915-5925	33/40 ¹⁹⁹	Canal designado para aplicaciones de seguridad pública.

¹⁹⁴ Las formas y requisitos para realizar un registro en el ULS se encuentran en la Subparte F de la Parte 1 "PRACTICE AND PROCEDURE" del título 47 del CFR, para más información consúltase: https://gov.ecfr.io/cgi-bin/text-idx?SID=a10c63b4bca3f1f51ab67aca500de60f&mc=true&node=se47.1.1_1923&rgn=div8

¹⁹⁵ FCC, "Title 47, Chapter I, Subchapter D, Part 90—PRIVATE LAND MOBILE RADIO SERVICES, Subpart M—Intelligent Transportation Systems Radio Service", *Electronic Code of Federal Regulations*, Estados Unidos, 7 de noviembre de 2000. Consultado el 13 de octubre de 2021, disponible en: <https://gov.ecfr.io/cgi-bin/text-idx?SID=d8e30bb8cd020cb6dc3187fd40768c9b&mc=true&node=pt47.5.90&rgn=div5#sp47.5.90.a>

¹⁹⁶ FCC, "Use of the 5.850-5.925 GHz Band", *Federal Register*, Estados Unidos, 3 de mayo de 2021. Consultado el 29 de septiembre de 2021, disponible en: <https://www.federalregister.gov/documents/2021/05/03/2021-08801/use-of-the-5850-5925-ghz-band>

¹⁹⁷ *Ibidem*.

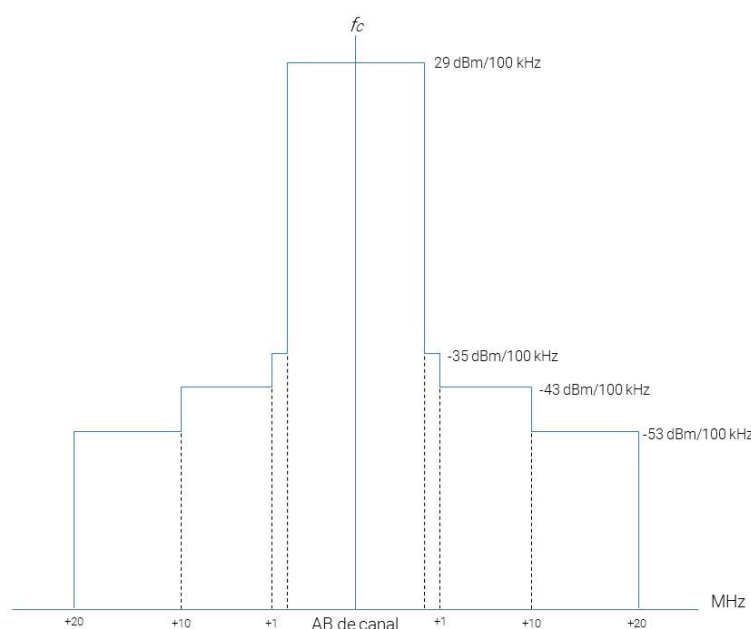
¹⁹⁸ *Idem*.

¹⁹⁹ 33 dBm para sistemas con RSU y OBU operados por entidades privadas y 40 dBm para RSU y OBU transmitiendo señales relacionadas con la seguridad pública.

Cada RSU es clasificada conforme a los presentado en la Tabla 3.5, de acuerdo con la potencia máxima del transmisor, de forma que se les asigna un radio máximo de cobertura en el cual podrán mantener comunicación con las OBU. Además, se especifica que el centro de radiación de las antenas de las RSU no podrá exceder una altura de 8 m sobre el nivel de la carpeta asfáltica a plena potencia, y puede ser tan alta como 15 m con una reducción de potencia correspondiente. Por su parte, las OBU de C-V2X están limitadas a una potencia de transmisión de 33 dBm²⁰⁰.

Por otra parte, las RSU y las OBU de C-V2X deben cumplir con los límites de emisiones fuera de banda establecidos en el Primer informe; su máscara de emisión se muestra en la Figura 3.2²⁰¹.

Figura 3.2. Máscara de emisión de las RSU de C-V2X²⁰².



La FCC establece que las RSU no recibirán protección contra interferencias provenientes de sistemas del Servicio de Radiolocalización Federal que estuvieran en operación. Además, para poder establecer y operar una RSU dentro del radio de las zonas de coordinación de los equipos del Servicio de Radiolocalización Federal, se requiere una coordinación con la NTIA²⁰³.

²⁰⁰ FCC, "Use of the 5.850-5.925 GHz Band", *Federal Register*, Estados Unidos, 3 de mayo de 2021. Consultado el 29 de septiembre de 2021, disponible en: <https://www.federalregister.gov/documents/2021/05/03/2021-08801/use-of-the-5850-5925-ghz-band>

²⁰¹ FCC, "FIRST REPORT AND ORDER, FURTHER NOTICE OF PROPOSED RULEMAKING, AND ORDER OF PROPOSED MODIFICATION", *Federal Communications Commission*, Estados Unidos, 20 de noviembre de 2020, pp. 13535-13537. Consultado el 22 de junio de 2022, disponible en: https://docs.fcc.gov/public/attachments/FCC-20-164A1_Rcd.pdf

²⁰² Elaboración propia con datos de la FCC, noviembre 2020.

²⁰³ FCC, "FIRST REPORT AND ORDER, FURTHER NOTICE OF PROPOSED RULEMAKING, AND ORDER OF PROPOSED MODIFICATION", *Federal Communications Commission*, Estados Unidos, 20 de noviembre de 2020, pp. 13535-13537. Consultado el 22 de junio de 2022, disponible en: https://docs.fcc.gov/public/attachments/FCC-20-164A1_Rcd.pdf

3.2. Canadá: Desarrollo Económico, Ciencia e Innovación²⁰⁴.

El órgano regulador canadiense ISED, define que el DSRCS consiste en enlaces inalámbricos de corto alcance para transferir información mediante comunicación V2V y V2I para llevar a cabo operaciones relacionadas con la mejora del flujo de tránsito, la seguridad y otras aplicaciones del servicio de STI en una variedad de entornos²⁰⁵, como es el cobro automático de peaje y la atención de emergencias. Estas aplicaciones son clasificadas en 8 grupos que incluyen gestión de viajes y del tránsito, gestión del transporte público, pago electrónico, operaciones de vehículos comerciales, gestión de emergencias, sistemas avanzados de seguridad de vehículos y gestión de información.

Al igual que en el caso de la FCC, los STI en Canadá se componen de OBU y de RSU. ISED define a las OBU como un transceptor DSRCS que normalmente se encuentra instalado en un vehículo que puede operar mientras éste se encuentre en movimiento o estacionado. A su vez, una OBU que es diseñada para ser utilizada de tal manera que la estructura radiante del dispositivo se encuentre hasta 20 cm del cuerpo de una persona se denomina OBU portátil²⁰⁶. Por ejemplo, una OBU portátil puede ser llevada en la mano por el personal de seguridad a la escena de un accidente vehicular. En cambio, se estipula que las RSU son transceptores que se encuentran instaladas a lo largo de una carretera o un cruce peatonal²⁰⁷.

De acuerdo a la norma técnica RSS-252 *Intelligent Transportation Systems – Dedicated Short Range Communications (DSRC) – On-Board Unit (OBU)*, las OBU son clasificadas como equipos exentos de licencia de Categoría I²⁰⁸, de forma que solo se requiere un certificado de aprobación técnica expedido por ISED (denominado *Technical Acceptance Certificate*), o un certificado expedido por un cuerpo de certificación, con el cual se hace constar que estos dispositivos cumplen con las normativas requeridas por ISED para poder operar en la banda de 5850-5925 MHz.

Por otra parte, al día de hoy, ISED no ha publicado un estándar técnico aplicable a las RSU para operar en el DSRCS de forma específica, por lo que no se encuentran descritos los requisitos de operación u autorización de estas estaciones. Sin embargo, existe una Propuesta de Política de Utilización del Espectro *Technical and Licensing Requirements to Introduce Dedicated Short-Range Communications-based Intelligent Transportation Systems Applications in the Band 5850-5925*²⁰⁹ (la Propuesta de Política) en donde se

²⁰⁴ Innovation, Science and Economic Development, ISED.

²⁰⁵ ISED, "RSS-252: Intelligent Transportation Systems – Dedicated Short Range Communications (DSRC) – On-Board Unit (OBU)", *Innovation, Science and Economic Development Canada*, Canadá, septiembre de 2017, p1. Consultado el 29 de abril de 2020, disponible en: <https://www.ic.gc.ca/eic/site/smt-gst.nsf/eng/sf11325.html>

²⁰⁶ *Ibidem*.

²⁰⁷ La norma técnica RSS-252 menciona que las RSU se encuentran fuera de su alcance.

²⁰⁸ ISED, "RSS-Gen: General Requirements for Compliance of Radio Apparatus", *Innovation, Science and Economic Development Canada*, Canadá, marzo de 2019, p6. Consultado el 29 de abril de 2020, disponible en: [https://www.ic.gc.ca/eic/site/smt-gst.nsf/vwapj/RSS-Gen1amend12019-04EN.pdf/\\$FILE/RSS-Gen1amend12019-04EN.pdf](https://www.ic.gc.ca/eic/site/smt-gst.nsf/vwapj/RSS-Gen1amend12019-04EN.pdf/$FILE/RSS-Gen1amend12019-04EN.pdf)

²⁰⁹ ISED, "Technical and Licensing Requirements to Introduce Dedicated Short-Range Communications-based Intelligent Transportation Systems Applications in the Band 5850-5925", *Innovation, Science and Economic Development Canada, Canadá*, octubre de 2004, p1-18. Consultado el 13 de mayo de 2020, disponible en: [https://www.ic.gc.ca/eic/site/smt-gst.nsf/vwapj/consultation-shorrange-e.pdf/\\$FILE/consultation-shorrange-e.pdf](https://www.ic.gc.ca/eic/site/smt-gst.nsf/vwapj/consultation-shorrange-e.pdf/$FILE/consultation-shorrange-e.pdf)

menciona el determinar el esquema de otorgamiento de licencias más apropiado para las RSU para este servicio. En la Propuesta de Política, ISED identifica algunas ventajas en el licenciamiento del espectro, pues este esquema permitiría al licenciatario modificar, instalar y cambiar de ubicación las estaciones dentro de un área determinada, facilitando la implementación y actualización a nuevas tecnologías, además de reducir los trámites administrativos por dichos cambios. En contraste, las licencias otorgadas por estación requieren de trámites individuales para autorizar las modificaciones²¹⁰ y por lo tanto, aquellas aplicaciones de STI que requieran la instalación de numerosas estaciones base, significarían un gran número de trámites individuales.

En lo que respecta al proceso de elegibilidad para operar los sistemas del DSRCS para los STI, la Propuesta de Política señala que debería seguir los criterios aplicables a los prestadores de servicios de radiocomunicaciones dispuestos en la sección 9 de las *Radiocommunication Regulations*²¹¹, en dónde se menciona que serán elegibles para obtener una autorización:

- Individuos que sean:
 - Ciudadanos canadienses.
 - Residentes permanentes.
 - No residentes que cuenten con una autorización de trabajo.
- Compañías que se encuentren incorporadas u operando bajo las leyes de Canadá.
- Una sociedad, empresa o fideicomiso si cada socio es elegible para tener una licencia de radio.
- Una entidad de gobierno canadiense, ya sea federal, de una provincia, local o una agencia.
- El gobierno de una entidad que no sea de Canadá, pero que haya firmado La Convención de Viena sobre Relaciones Diplomáticas²¹².
- Cualquier persona que sea residente de otro país diferente a Canadá, que busque establecer y operar una estación de radio diseñada para interconectarse con la red pública conmutada o que requiere una licencia de radio para dispositivos de radio empleados de un evento especial de corta duración.

Al igual que en la regulación previa estadounidense, la norma RSS-252 y la Propuesta de Política se apoyan del estándar ASTM E2213-03²¹³ para describir las especificaciones técnicas de operación de los sistemas, como las máscaras de emisión, la clasificación, la tolerancia de frecuencias, o la potencia máxima de operación. Sin embargo, en caso de existir alguna discrepancia entre la norma RSS-252 y el estándar ASTM, se tomará como válida la norma emitida por ISED.

²¹⁰ En el caso de las modificaciones efectuadas a las estaciones base bajo el esquema de licencia del espectro, es requisito notificar a ISED de los detalles técnicos de dichos cambios, sin embargo, no es necesario un proceso de autorización.

²¹¹ ISED, "Radiocommunication Regulations", *Innovation, Science and Economic Development Canada, Canadá*, 2014. Consultado el 13 de mayo de 2020, disponible en: <https://laws-lois.justice.gc.ca/eng/regulations/sor-96-484/FullText.html>

²¹² Tratado internacional que regula las relaciones diplomáticas entre los países adoptada en 1961.

²¹³ ASTM E2213-03, "Standard Specification for Telecommunications and Information Exchange Between Roadside and Vehicle Systems—5 GHz Band Dedicated Short Range Communications (DSRC) Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications", *ASTM International*, septiembre de 2013, consultado el 27 de Abril de 2020, disponible en: <https://www.astm.org/READINGLIBRARY/VIEW/E2213-03.html>

Por otra parte, los DSRCS pertenecientes a los STI deben operar en la banda de 5850-5925 MHz. Esta banda se encuentra asignada de forma primaria a los servicios Fijo, Fijo Satelital y Móvil, y a título secundario a los servicios de Aficionados y Radiolocalización de acuerdo con la Tabla de Asignación de Frecuencias de Canadá²¹⁴. Asimismo, los dispositivos ICM están habilitados para operar en esta banda.

Como un seguimiento a la Propuesta de Política, en febrero del 2017, ISED publicó el Boletín de Sugerencias sobre el Espectro *Displacement of Existing Fixed Service Assignments in the Frequency Band 5850–5925 MHz*²¹⁵, en el cual se sugiere la introducción del DSRCS en la banda de 5850-5925 MHz para posteriormente desplazar las asignaciones del Servicio Fijo en dicha banda. El boletín sugiere una reasignación de las licencias vigentes a otras bandas asignadas al Servicio Fijo y únicamente aquellas estaciones fijas que por su ubicación (estaciones en lugares remotos) puedan no representar una fuente de interferencia al DSRCS podrán realizar una solicitud para continuar su operación en un esquema sin protección contra interferencias.

En la Tabla 3.7 se muestra la designación de canales utilizada por ISED, en la cual se tiene un canal de 5 MHz reservado, un canal de control de 10 MHz y seis canales de 10 MHz cada uno, de los cuales pueden construirse 2 canales de 20 MHz (canales 175 y 181) al combinar un par. Los canales 172 y 184 se encuentran asignados para aplicaciones de seguridad que involucran la seguridad de la vida y la propiedad.

Tabla 3.7. Distribución de canales para los DSRCS²¹⁶.

Número de canal	Rango de frecuencias [MHz]	Uso del canal
170	5850-5855	Reservado
172	5855-5865	Canal de servicio
174	5865-5875	Canal de servicio
175	5865-5885	Canal de servicio
176	5875-5885	Canal de servicio
178	5885-5895	Canal de control
180	5895-5905	Canal de servicio
181	5895-5915	Canal de servicio
182	5905-5915	Canal de servicio
184	5915-5925	Canal de servicio

La especificación RSS-252 hace especial mención de ciertos requerimientos técnicos pertenecientes al estándar ASTM E2213-03, entre los cuales destaca que los dispositivos transmisores tienen permitido transmitir con más potencia con el fin de contrarrestar las

²¹⁴ ISED, "Canadian Table of Frequency Allocations (2018 Edition)", *Innovation, Science and Economic Development Canada, Canadá*, abril de 2018, p45. Consultado el 13 de mayo de 2020, disponible en: [https://www.ic.gc.ca/eic/site/smt-gst.nsf/vwapj/SMSE-07-18-CTFA-2018.pdf/\\$file/SMSE-07-18-CTFA-2018.pdf](https://www.ic.gc.ca/eic/site/smt-gst.nsf/vwapj/SMSE-07-18-CTFA-2018.pdf/$file/SMSE-07-18-CTFA-2018.pdf)

²¹⁵ ISED, "SAB-001-17 — Displacement of Existing Fixed Service Assignments in the Frequency Band 5850–5925 MHz", *Innovation, Science and Economic Development Canada, Canadá*, febrero de 2017. Consultado el 13 de mayo de 2020, disponible en: <http://www.ic.gc.ca/eic/site/smt-gst.nsf/eng/sf11264.html>

²¹⁶ ISED, "RSS-252: Intelligent Transportation Systems — Dedicated Short Range Communications (DSRC) — On-Board Unit (OBU)", *Innovation, Science and Economic Development Canada, Canadá*, septiembre de 2017, p1. Consultado el 29 de abril de 2020, disponible en: [https://www.ic.gc.ca/eic/site/smt-gst.nsf/vwapj/RSP-100-issue11.pdf/\\$file/RSP-100-issue11.pdf](https://www.ic.gc.ca/eic/site/smt-gst.nsf/vwapj/RSP-100-issue11.pdf/$file/RSP-100-issue11.pdf)

pérdidas ocasionadas por los cables conectados a la antena, siempre y cuando se cumplan los límites de PIRE dispuestos en el estándar. Además, ISED resalta que se debe cumplir la tolerancia de ± 10 ppm (partes por millón) en la sintonización de la frecuencia central de operación de los dispositivos. También se hace mención del cumplimiento de las máscaras de emisión para que las emisiones fuera de banda de las diferentes clases de transmisor se acaten a los niveles expuestos en la Tabla 3.8.

Tabla 3.8. Máscaras espectrales para DSRC²¹⁷.

Clase de transmisor	Potencia máxima del transmisor ²¹⁸ [dBm]	Radio de cobertura [metros]	Reducciones de potencia en emisiones fuera de banda (dBr)				
			± 4.5 MHz ²¹⁹	± 5 MHz	± 5.5 MHz	± 10 MHz	± 15 MHz
A	0	15	0	-10	-20	-28	-40
B	10	100	0	-16	-20	-28	-40
C	20	400	0	-26	-32	-40	-50
D	28.8	1000	0	-35	-45	-55	-65

Como se mencionó con anterioridad, las especificaciones técnicas de operación de los dispositivos DSRCs están determinadas por el estándar ASTM. Sin embargo, los dispositivos que son considerados como OBU portátiles no se encuentran definidos en este estándar, por lo que ISED especifica una potencia máxima de salida de 1mW²²⁰.

De forma complementaria, la Propuesta de Política enlista nueve puntos que describen algunas aplicaciones a las que están dedicados algunos canales, así como los límites de potencia del DSRCs operando con el estándar ASTM E2213-03²²¹:

- Las RSU dedicadas la seguridad pública que operen en el canal 172 del DSRCs están diseñadas para aplicaciones que involucran la seguridad de la vida o de la propiedad. La PIRE de las RSU en el canal 172 no deberán exceder los 33 dBm.
- Las RSU para uso industrial que operan en los canales 174, 175 y 176 del DSRCs son utilizadas para implementar operaciones de rango pequeño y mediano. La potencia de alimentación de las antenas de las RSU en los canales 174 y 176 no deberá exceder los 28.8 dBm, ni una PIRE de 33 dBm, mientras que la PIRE de los sistemas que operan en el canal 175, no deberán superar una potencia de entrada a la antena de 10 dBm y una PIRE de 23 dBm.

²¹⁷ ASTM E2213-03, "Standard Specification for Telecommunications and Information Exchange Between Roadside and Vehicle Systems—5 GHz Band Dedicated Short Range Communications (DSRC) Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications", *ASTM International*, septiembre de 2013, consultado el 14 de Mayo de 2020, disponible en: <https://www.astm.org/READINGLIBRARY/VIEW/E2213-03.html>.

²¹⁸ Las especificaciones técnicas de operación se encuentran detalladas en el estándar ASTM E2213-03 DSRC, para más información consúltese: <https://www.astm.org/READINGLIBRARY/VIEW/E2213-03.html>.

²¹⁹ Las reducciones están dadas en densidad espectral de potencia, relativas a la frecuencia central y expresadas en dBr.

²²⁰ ISED, "Technical and Licensing Requirements to Introduce Dedicated Short-Range Communications-based Intelligent Transportation Systems Applications in the Band 5850-5925", *Innovation, Science and Economic Development Canada, Canadá*, octubre de 2004, p11. Consultado el 13 de mayo de 2020, disponible en: [https://www.ic.gc.ca/eic/site/smt-gst.nsf/vwapj/consultation-shortrange-e.pdf/\\$FILE/consultation-shortrange-e.pdf](https://www.ic.gc.ca/eic/site/smt-gst.nsf/vwapj/consultation-shortrange-e.pdf/$FILE/consultation-shortrange-e.pdf)

²²¹ *Idem*.

- c) Las RSU dedicadas a la seguridad pública en el canal 178 del DSRCS no deberán superar una potencia de entrada a la antena de 28.8 dBm y una PIRE de 44.8 dBm, mientras que las RSU privadas se limitarán a una potencia de alimentación a la antena de 28.8 dB, y una PIRE máxima de 33 dBm.
- d) Los canales 180, 181 y 182 son utilizados para implementar operaciones en zonas pequeñas. Las RSU que operen en sistemas relacionados a la seguridad pública no deberán exceder una potencia de alimentación a la antena de 10 dBm y una PIRE de 23 dBm. Estas estaciones deberán utilizar una antena con una ganancia mínima de 6 dBi.
- e) Las operaciones de las OBU y RSU en el canal 184 están diseñadas para implementar aplicaciones para la seguridad pública que involucren la seguridad de la vida y la propiedad. Estas estaciones no deberán tener una potencia de alimentación en la antena de 28.8 dBm y una PIRE de 40dBm.
- f) Las OBU para uso industrial que operen en los canales 174, 176 y 178 del DSRCS no deberán exceder una potencia de alimentación a la antena de 28.8 dBm y una PIRE de 33 dBm.
- g) Las OBU privadas que operen en los canales 180, 181 y 182 no deberán superar una potencia de alimentación a la antena de 20 dBm y una PIRE de 23 dBm.
- h) Las OBU que operen en aplicaciones de seguridad pública en los canales 172, 174 y 176 no podrán exceder una potencia de 28.8 dBm de alimentación a la antena y una PIRE de 33 dBm,
- i) Las OBU que operen en aplicaciones de seguridad pública en el canal 175 no deberán exceder una potencia de alimentación en la antena de 10 dBm y una PIRE de 23 dBm.
- j) Las OBU con operaciones relacionadas a la seguridad pública en el canal 178 estarán limitadas a una potencia de alimentación en la antena de 28.8 dBm y una PIRE de 44.8 dBm.

Por último, las RSU y las OBU deberán transmitir únicamente con la potencia que sea necesaria para comunicarse a la distancia requerida de acuerdo a la aplicación que se haya implementado²²².

3.2.1. Servicio de Localización y Monitoreo.

En Canadá, la operación de equipos de radio en el Servicio de Localización y Monitoreo está regulada por el estándar RSS-137 *Location and Monitoring Service in the Band 902-928 MHz*²²³. Los equipos certificados bajo este estándar son clasificados como equipos de Categoría I y requieren de una licencia para poder operar en este servicio. Adicionalmente, es necesario un certificado de aprobación técnica expedido por ISED, o un certificado expedido por un cuerpo de certificación, con el cual se hace constar que estos dispositivos cumplen con las normativas requeridas por ISED. No obstante, los transpondedores móviles certificados que tengan antenas integradas (no removibles), que produzcan una potencia

²²² ISED, "Technical and Licensing Requirements to Introduce Dedicated Short-Range Communications-based Intelligent Transportation Systems Applications in the Band 5850-5925", *Innovation, Science and Economic Development Canada, Canadá*, octubre de 2004, p11. Consultado el 13 de mayo de 2020, disponible en: [https://www.ic.gc.ca/eic/site/smt-gst.nsf/vwapj/consultation-shortrange-e.pdf/\\$FILE/consultation-shortrange-e.pdf](https://www.ic.gc.ca/eic/site/smt-gst.nsf/vwapj/consultation-shortrange-e.pdf/$FILE/consultation-shortrange-e.pdf)

²²³ ISED, "RSS-137: Location and Monitoring Service in the Band 902-928 MHz", *Innovation, Science and Economic Development Canada, Canadá*, febrero de 2009. Consultado el 14 de mayo de 2020, disponible en: <https://www.ic.gc.ca/eic/site/smt-gst.nsf/eng/sf01521.html>

menor a 3 mW y que únicamente respondan a la recepción de una señal de radio específica, estarán exentos de licencia.

El estándar RSS-137 define dos tipos de sistemas:

- Sistemas de multilateración: es un sistema que utiliza varias estaciones base para localizar una estación móvil mediante triangulación. Está principalmente dedicada a localizar vehículos, pero el servicio puede ser utilizado para otras funciones de localización siempre que la localización de vehículos sea la función principal del sistema.
- Sistemas que no son de multilateración: es un sistema que utiliza un transmisor para su operación. Su función principal es la transmisión de señales de información enviadas desde y hacia los vehículos, tal como el cobro de peaje en carretera.

Las bandas de operación los sistemas de multilateración del LMS se presentan en la Tabla 3.9. Los enlaces descendentes (estación base a estación móvil) para los sistemas de multilateración del LMS también podrán llevarse a cabo en las sub-bandas asignadas para enlaces ascendentes (estación móvil a estación base).

Tabla 3.9. Segmentos de frecuencias para enlaces de sistemas de multilateración del LMS²²⁴.

Segmento para enlace ascendente [MHz]	Segmento para enlace descendente [MHz]
904.000-909.750	927.750-928.000
919.750-921.750	927.500-927.750
921.750-927.250	927.250-927.500

Adicionalmente, en la Tabla 3.10 se especifica el ancho de banda máximo ocupado en cada segmento de frecuencias.

Tabla 3.10. Ancho de banda máximo ocupado en los enlaces del LMS²²⁵.

Segmentos para enlace [MHz]	Máximo ancho de banda ocupado permitido [MHz]
904.000-909.750	5.75
919.750-921.750	2
921.750-927.250	5.5
927.750-928.000	0.25
927.500-927.750	0.25
927.250-927.500	0.25

Dicha distribución, permite habilitar un par de bandas más anchas al combinar más de un segmento. La primera de ellas se puede generar combinando el segmento de 921.75-927.25 MHz con el segmento de 927.25-927.5 MHz para el cual se tendría un máximo ancho de banda ocupado permitido de 5.75 MHz; la segunda banda, se genera combinando los

²²⁴ *Ibidem.*

²²⁵ *Idem.*

segmentos de 919.75-921.75 MHz, 921.75-927.75 MHz, 927.25-927.5 MHz y 927.5-927.75 MHz para el cual se tendría un máximo ancho de banda ocupado permitido de 8 MHz.

Referente a los sistemas que no utilizan multilateración, las bandas asignadas para su operación son:

- 902-904 MHz, con un ancho de banda máximo ocupado de 2 MHz.
- 909.75-921.75 MHz, con un ancho de banda máximo ocupado de 12 MHz.

En cuanto a la potencia de transmisión, tanto para los sistemas de multilateración, como los sistemas que no utilizan multilateración, la PRA máxima de transmisión deberá ser menor a 30 watts en los segmentos dentro del rango de 902-927.25 MHz, mientras que en la banda de 927.25-928 MHz, deberá mantenerse por debajo de los 300 watts. En este sentido, este estándar define cuatro tipos de máscaras de emisión aplicables según las características del transmisor:

- Máscara de emisión "A", para transmisores de banda ancha de sistemas de multilateración: las emisiones no deseadas en 100 kHz fuera del límite de la subbandas de 904-909.75 MHz, 919.75-921.75 MHz y 921.75-927.25 MHz, deberán atenuarse 31 dB²²⁶.
- Máscara de emisión "B", para transmisores de banda angosta en enlaces ascendentes de sistemas de multilateración: la potencia de cualquier emisión fuera de los límites de la sub-banda de operación de cualquier equipo transmisor en la banda de 927.25-928 MHz, deberá atenuarse 70 dB²²⁷.
- Máscara de emisión "C", para otros transmisores: esta máscara aplica para emisiones no deseadas de transmisores no cubiertos por las máscaras "A", "B" y "D" operando en la banda de 902-928 MHz. La potencia de cualquier emisión fuera de la sub-banda de operación del equipo deberá ser atenuada debajo de la potencia de salida máxima permitida (P_{max}) en al menos $55 + 10 \log_{10} P_{max}$ dB
- Máscara de emisión "D", para transmisores intermitentes: los transpondedores móviles cuyas antenas se encuentren integradas en el dispositivo (por ejemplo, transmisores que únicamente responden ante la recepción de una señal de radio específica) y aquellos dispositivos de mano que son operados de forma intermitente no están obligados a cumplir con las máscaras de emisión "A", "B" y "C" siempre que su ancho de banda a 20 dB no exceda el máximo ancho de banda ocupado permitido. Además, en cualquier frecuencia alejada de la frecuencia portadora más allá del 250% del ancho de banda ocupado, la potencia de cualquier emisión deberá atenuarse por debajo de la potencia de salida máxima del transmisor (P_{max}) por lo menos en $43 + 10 \log_{10}(P_{max})$ dB.

²²⁶ Debe existir una atenuación dada por: $16 + 0.4(f_d - 50) + 10 \log_{10} B$ dB, en donde B es el ancho de banda ocupado en MHz, y f_d es la diferencia entre la frecuencia central del equipo transmisor operando en la subbanda y la frecuencia central del ancho de banda de medición expresado como porcentaje de ocupación del ancho de banda.

²²⁷ Debe existir una atenuación dada por $116 \log_{10} \left(\frac{f_{ed} + 10}{6.1} \right)$ dB, donde f_{ed} es la diferencia entre la frecuencia central del ancho de banda de medición y la frecuencia del límite de la sub-banda de operación.

3.2.2. Comparación entre los reguladores de Estados Unidos y Canadá en materia de STI.

Aun cuando la regulación en ambos países es similar debido a que tienen como referencia principal el estándar ASTM E2213-03 para definir las características técnicas de operación de los equipos, los anchos de banda, así como la canalización, se destaca que existen diferencias fundamentales en la forma que conciben el propio servicio de STI. Por un lado, ISED considera a los STI como un servicio en el cual pueden operar equipos del DSRCS en la banda de 5850-5925 MHz, y por otra parte, el LMS cuya operación está asignada únicamente en la banda de 902-928 MHz. Por otro lado, FCC considera el Servicio de STI como un servicio compuesto por el DSRCS (sustituido en el futuro por el C-V2X) y el Servicio LMS, lo cual no solo implica la operación de equipos en bandas diferentes a la de 5850-5925 MHz, sino la inclusión de funcionalidades dedicadas al monitoreo y localización especializadas que fueron implementadas con anterioridad empleando las bandas de 25-50 MHz, 150-170 MHz, 450-512 MHz y 902-908 MHz.

Por otro lado, al igual que la FCC, ISED ha hecho público su interés por realizar cambios a la distribución de la banda de 5850-5925 MHz. En su publicación *Spectrum Outlook 2018 to 2022*²²⁸ hace lo propio reconociendo el desarrollo que ha tenido la tecnología C-V2X a nivel internacional, y tomando en cuenta el interés y comentarios del sector industrial, propone que se discutan y realicen las adecuaciones pertinentes a la distribución de espectro en estas bandas con el objetivo de promover la interoperabilidad y armonización de tecnologías para los STI.

En esta publicación se resalta que una de las ventajas de asignar los primeros 45 MHz (5850-5895 MHz) de la banda de 5.9 GHz como espectro adicional para la operación de equipos sin licencia, es que se incentivaría la operación simultánea de más tecnologías en dicha banda, como lo pueden ser Wifi y los dispositivos ICM, pues esos 45 MHz pasarían a formar parte de la banda adyacente que actualmente ya se encuentra asignada para la operación de equipos sin licencia.

3.3. Australia: Autoridad Australiana de Comunicaciones y Medios ²²⁹.

En Australia, la ACMA regula a los STI a través del *Radiocommunications (Intelligent Transport Systems) Standard 2018*²³⁰ (el estándar de Radiocomunicaciones de STI). En este estándar se define a una estación de STI como un transmisor de radiocomunicaciones que es operado como parte de un STI y que está establecida para apoyar al transporte en carretera que:

- Se encuentra en un vehículo.

²²⁸ ISED, "Spectrum Outlook 2018 to 2022", *Innovation, Science and Economic Development Canada*, Canadá, 6 de junio de 2018. Consultado el 14 de mayo de 2020, disponible en: <http://www.ic.gc.ca/eic/site/smt-gst.nsf/eng/sf11403.html>

²²⁹ Australian Communications and Media Authority, ACMA.

²³⁰ ACMA, "Radiocommunications (Intelligent Transport Systems) Standard 2018", *Australian Communications and Media Authority*, Australia, 3 de diciembre de 2018. Consultado el 15 de mayo del 2020, disponible en: <https://www.legislation.gov.au/Details/F2018L01658>

- Es parte de un vehículo, independientemente de si el transmisor fue o no parte del vehículo desde que este fue fabricado²³¹.
- Es sostenido o transportado por un individuo relacionado con un vehículo (pasajero, o chofer).
- Está en, o es parte de una estructura de carretera, ya sea de forma fija o móvil.

En este mismo sentido, se establece que una estación de STI emplea tecnología inalámbrica para comunicarse desde:

- Un vehículo a una persona.
- Un vehículo a otro vehículo.
- Un vehículo a una estructura.

Lo anterior con el fin de reducir el número de accidentes de tránsito, disminuir las congestiones vehiculares y reducir el impacto ambiental del transporte en las carreteras de Australia. Adicionalmente, se excluyen del Estándar de STI a dispositivos que fueron importados a Australia con el único propósito de ser utilizados en un evento significativo²³².

3.3.1. Autorización de los STI.

Los dispositivos de radiocomunicaciones para STI están contemplados en la licencia de clase *Radiocommunications (Intelligent Transport Systems) Class License 2017*²³³, bajo la cual se autoriza su operación. Las licencias de clase están enfocadas a permitir el uso del espectro para dispositivos en concreto, por ejemplo, los dispositivos Wi-Fi, de espectro disperso, equipos que emiten radiación en infrarrojo, radares, dispositivos de comunicación en banda ciudadana, radionavegación por satélite, estaciones de radiocomunicación móvil aeronáutica, así como los STI²³⁴.

El requisito principal y obligatorio para operar un sistema o dispositivo cubierto por una licencia de clase es, cumplir con todas las condiciones descritas en la misma, entre las que pueden encontrarse²³⁵.

- condiciones que especifiquen las frecuencias de operación de los dispositivos cubiertos²³⁶,

²³¹ Específicamente relacionado a vehículos construidos en Australia, es decir, la estación de STI pudo ser instalada posteriormente en un auto que fue fabricado en Australia.

²³² Un evento significativo se refiere a un evento en una ubicación o ubicaciones y en un tiempo especificados en una noticia aprobada por la Presidencia de ACMA y publicada en el sitio web de ACMA, por ejemplo, los eventos deportivos masivos y conciertos. Para mayor información, consúltese: <http://www.acma.gov.au>

²³³ ACMA, "Radiocommunications (Intelligent Transport Systems) Class License 2017", *Australian Communications and Media Authority*, 5 de febrero de 2018. Consultado el 21 de mayo de 2020, disponible en: <https://www.legislation.gov.au/Details/F2018L00026>

²³⁴ ACMA "Class Licences", *Australian Communications and Media Authority*, 5 de febrero de 2018. Consultado el 21 de mayo de 2020, disponible en: <https://www.acma.gov.au/class-licences>

²³⁵ ACMA, "Radiocommunications (Intelligent Transport Systems) Class License 2017", *Australian Communications and Media Authority*, 5 de febrero de 2018. Consultado el 21 de mayo de 2020, disponible en: <https://www.legislation.gov.au/Details/F2018L00026>

²³⁶ Los dispositivos cubiertos por la licencia de clase y que cumplan con dichas condiciones pueden operar sin necesidad de realizar algún tipo de solicitud ante ACMA debido a que operan en un uso compartido del espectro. ACMA "Class Licences", *Australian Communications and Media Authority*, 5 de febrero de 2018. Consultado el 21 de mayo de 2020, disponible en: <https://www.acma.gov.au/class-licences>

- condiciones de requerimientos técnicos de operación de los dispositivos,
- condiciones de especificaciones sobre el área de operación de los dispositivos,
- condiciones sobre los periodos y la duración de la operación de los dispositivos.

Adicionalmente, es posible y voluntario realizar una solicitud de asesoramiento para la operación de un sistema cubierto bajo una licencia de clase. Este asesoramiento tiene como objetivo dar certeza al solicitante, así como a ACMA de que la operación del sistema cumple plenamente con todas las condiciones de la licencia de clase²³⁷. Cabe resaltar que ni ACMA ni otra autoridad de Australia podrá ejercer alguna acción para interrumpir la operación del STI bajo la premisa de que no se encuentra registrado". No obstante, ACMA reserva el derecho de modificar o revocar las licencias de clase²³⁸, bajo las condiciones que considere pertinentes.

3.3.2. Operación de los STI.

En primera instancia, la licencia de clase autoriza la operación de las estaciones de STI sujeta a las siguientes condiciones técnicas:

- La estación del STI debe operar en una frecuencia, o en un rango de frecuencias mayor a 5855 MHz y menor a 5925 MHz, y con una PIRE máxima de 23 dBm/MHz.
- La estación del STI no debe operar dentro de un radio de 70 km alrededor del Observatorio de Radioastronomía de Murchison. Esta área es conocida como la "Zona silenciosa de radio"²³⁹, la cual protege desde 2005 las operaciones del radiotelescopio contra interferencias perjudiciales.
- La estación de STI debe cumplir²⁴⁰ con las especificaciones del estándar ETSI EN 302 571²⁴¹.

Además, se hacen algunas anotaciones sobre la ocupación de la banda dispuesta para su operación, en la cual se especifica que los dispositivos del STI, que operan bajo esa licencia de clase, no contarán con protección contra interferencias perjudiciales ocasionadas por:

- Estaciones que operen en el Servicio Fijo en la banda de 5905-5925 MHz, o la banda adyacente superior (5925-6700 MHz).
- Dispositivos que operen bajo el servicio Satelital Fijo en frecuencias que coincidan con los canales asignados para los STI dentro de la banda de 5855-5925 MHz.
- Los dispositivos ICM, cuya operación está autorizada en la banda de 5275-5875 MHz.

²³⁷ ACMA "Class Licences", *Australian Communications and Media Authority*, 5 de febrero de 2018. Consultado el 21 de mayo de 2020, disponible en: <https://www.acma.gov.au/class-licences>

²³⁸ ACMA, "Radiocommunications Act 1992, N° 174, 1992", *Australian Department of Infrastructure, Transport, Regional Development and Communications*, Australia, 11 de septiembre de 2019. Consultado el 19 de Mayo de 2020, disponible en: <https://www.legislation.gov.au/Details/C2019C00262>

²³⁹ ACMA, "Radiocommunications (Mind-West Radio Quiet Zone)", *Australian Communications and Media Authority*, 11 de Julio de 2011. Consultado el 21 de mayo de 2020, disponible en: <https://www.legislation.gov.au/Details/F2011L01520>

²⁴⁰ En caso de existir inconsistencias entre las disposiciones técnicas de la Licencia de clase y el estándar ETSI 302 571, será el documento emitido por ACMA el que tome precedencia.

²⁴¹ ETSI, "Intelligent Transport Systems (ITS); Radiocommunications equipment operating in the 5 855 MHz to 5 925 MHz frequency band; Harmonized Standard covering the essential requirements of article 3.2 of Directive 2014/53/EU", *European Telecommunications Standards Institute*. Disponible en: https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302500_302599/302571/02.01.01_60/en_302571v020101p.pdf

- Dispositivos con operaciones dentro de la banda de 5855–5875 MHz, para otros servicios de radiocomunicaciones que operen en co-canal.

Lo anterior, dado que en la tabla de asignación del espectro de radiofrecuencias de Australia²⁴², la banda de 5855-5925 se encuentra asignada a título primario a los servicios Fijo, Satelital Fijo y Móvil, y a título secundario al servicio de Radiolocalización. Asimismo, se limita la operación de los transmisores de las estaciones del STI bajo la licencia de clase en lugares públicos, si el nivel de radiación electromagnética emitida por el transmisor o un grupo de transmisores excede los límites de exposición al público dispuestos en el estándar ARPANSA²⁴³, en el cual se especifica una cantidad de 0.08 W/kg de exposición promedio al cuerpo completo para el público en frecuencias dentro del rango de 100 kHz a 6 GHz.

Por otra parte, el estándar ETSI 302 571 presenta las especificaciones técnicas y métodos de medición para los transmisores y receptores de radio que operan en la frecuencia de 5855-5925 MHz. En este mismo estándar se presenta una segmentación de la banda para diferentes usos: la banda de 5855 MHz-5875 MHz está destinada a aplicaciones de STI que no involucren la seguridad; la banda de 5875 MHz-5905 MHz para aplicaciones de STI relacionadas a la seguridad carretera, y la banda de 5905 MHz–5925 MHz está destinada para aplicaciones futuras que puedan ser desarrolladas. Esta segmentación se observa en la Tabla 3.11, en la que se muestran 7 canales de 10 MHz distribuidos en toda la banda.

Tabla 3.11. Canalización de los STI en Australia²⁴⁴.

Frecuencia central de la portadora f_c (MHz)	Ancho de banda máximo del canal (MHz)
5860	10
5870	10
5880	10
5890	10
5900	10
5910	10
5920	10

²⁴² ACMA, "Australian radiofrequency spectrum allocations chart", *Australian Communications and Media Authority*, Australia 2019. Consultado el 21 de mayo de 2020, disponible en: <https://www.acma.gov.au/sites/default/files/2019-10/Australian%20radiofrequency%20spectrum%20allocations%20chart.pdf>

²⁴³ ARPANSA, "Radiation Protection Standard for Maximum Exposure Levels to Radiofrequency Fields – 3 kHz to 300 GHz", *Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency*. 2002, p7. Consultado el 21 de Mayo de 2020, disponible en: <https://www.arpansa.gov.au/sites/default/files/legacy/pubs/rps/rps3.pdf>

²⁴⁴ ETSI, "ETSI EN 302 571 Intelligent Transport Systems (ITS); Radiocommunications equipment operating in the 5 855 MHz to 5 925 MHz frequency band; Harmonised Standard covering the essential requirements of article 3.2 of Directive 2014/53/EU", *European Telecommunications Standards Institute*, Francia, 6 de febrero de 2017, p. 12. Consultado el 9 de octubre de 2023, disponible en: https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302500_302599/302571/02.01.01_60/en_302571v020101p.pdf

3.4. Unión Europea: Conferencia Europea de Administraciones de Correos y Telecomunicaciones²⁴⁵.

El uso del espectro radioeléctrico para los STI en los países que conforman la Unión Europea está coordinado por la Conferencia Europea de Administraciones de Correos y Telecomunicaciones (CEPT, por las siglas en francés de *Conférence Européenne des administrations des Postes et des Télécommunications*), que a través del *Electronic Communications Committee* (ECC) aborda la asignación de frecuencias y las especificaciones técnicas para estos sistemas.

En el reporte del Estudio²⁴⁶ *Support Study for the ex-post evaluation of the ITS Directive 2010/40/EU*²⁴⁷, se define a los STI como sistemas que aplican tecnologías de la información y comunicación al campo del transporte por carretera, incluyendo la infraestructura, vehículos y usuarios, también en la administración del tránsito y la movilidad, así como las interfaces con otros medios de transporte. En conjunto, las aplicaciones de los STI en la Unión Europea están distribuidas en la banda de 5855 – 5935 MHz, que según la Tabla de Asignación de Frecuencias Común Europea²⁴⁸ se encuentra asignado a título primario al Servicio Fijo, Servicio Fijo Satelital y al Servicio Móvil.

Las especificaciones técnicas aplicables a los equipos transmisores y receptores de los STI se encuentran en el estándar ETSI EN 302 571, el cual no solo contiene las características técnicas, como la canalización, modulación y potencia de transmisión, sino que además contiene los métodos de prueba del cumplimiento de estas especificaciones, como la forma de medición, descripción de las pruebas y las configuraciones de los equipos a utilizar en las mismas.

De forma específica, en la Unión Europea se consideran dos grupos de aplicaciones de los STI: por una parte, las aplicaciones de STI que no están relacionadas a la seguridad son abordadas por la Recomendación *ECC/08-01 Use of the band 5855-5875 MHz for Intelligent Transport Systems (ITS)*²⁴⁹, la cual es de carácter opcional, por lo que podrá o no ser acatada por los países que conforman a la Unión Europea, y por otra parte, las aplicaciones de STI que están relacionadas con la seguridad están previstas en la ECC *Decision (08)01 The harmonised use of Safety-Related Intelligent Transport Systems (ITS) in the 5875-5935 MHz frequency band*²⁵⁰ (La Decisión CEPT/ECC), que dispone de las condiciones de uso del

²⁴⁵ European Conference of Postal and Telecommunications Administrations, CEPT.

²⁴⁶ European Commission, "Support Study for the ex-post evaluation of the ITS Directive 2010/40/EU", *Publications Office of the European Union*, Luxemburgo, 2019. Consultado el 12 de agosto de 2020, disponible en: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/61597d8c-e99e-11e9-9c4e-01aa75ed71a1>

²⁴⁷ European Parliament, "DIRECTIVE 2010/40/EU OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL", *European Parliament, Council of the European Union*, 2010. Consultado el 12 de agosto de 2020, disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:02010L0040-20180109>

²⁴⁸ ERC, "THE EUROPEAN TABLE OF FREQUENCY ALLOCATIONS AND APPLICATIONS IN THE FREQUENCY RANGE 9 kHz to 3000 GHz (ECA TABLE)", *European Radiocommunications committee*, 2011, Dinamarca. Consultado el 26 de agosto de 2020, disponible en: https://www.ecodocdb.dk/download/2ca5fcbd-4090/attachments/2011_ERCRep025.pdf

²⁴⁹ ECC, "ECC Recommendation (08)01, Use of the band 5855-5875 MHz for Intelligent Transport Systems (ITS)", *Electronic Communications Committee*, Dinamarca, 6 de marzo de 2020. Consultado el 12 de agosto de 2020, disponible en: <https://www.ecodocdb.dk/download/798c1836-20c6/REC0801.pdf>

²⁵⁰ CEPT y ECC, "ECC Decision (08)01, The harmonised use of Safety-Related Intelligent Transport Systems (ITS) in the 5875-5935 MHz frequency band", *Electronic Communications Committee*, Dinamarca, 6 de marzo de 2020. Consultado el 12 de agosto de 2020, disponible en: <https://www.ecodocdb.dk/download/b470d271-048b/ECCDEC0801.PDF>

espectro para una convivencia armonizada de las aplicaciones. En contraste con la Recomendación ECC/08-01, la Decisión CEPT/ECC es de carácter obligatorio para los países miembros de la Unión Europea.

La CEPT establece que las administraciones de los países deberán permitir la libre circulación y uso del equipo utilizado en los STI, sujetos al cumplimiento de las disposiciones de la Decisión CEPT/ECC. En consecuencia, las estaciones de los STI estarán exentos de licencias individuales para su operación.

3.4.1. Operación de los STI.

En contraste con la concepción de los otros Reguladores, las disposiciones técnicas de la Unión Europea no plantean alguna diferencia entre las estaciones al borde del camino o infraestructura y las unidades a bordo de los vehículos, las cuales son citadas indistintamente como "estaciones de los STI"²⁵¹.

La Unión Europea recomienda que las administraciones hagan disponible la banda de 5855-5875 MHz para la operación de sistemas de STI en aplicaciones no relacionadas a la seguridad del tránsito. Esta banda se encuentra segmentada en dos bloques de 10 MHz (5855-5865 MHz y 5865-5875 MHz) y se menciona que el ancho de banda del canal en cada bloque debe ser menor a 10 MHz, con el objetivo de respetar los límites del mismo.

En lo que respecta a las transmisiones de las estaciones, la Unión Europea recomienda una densidad espectral de potencia menor a 23 dBm/MHz por canal y una PIRE total de 33 dBm con un control de potencia transmitida²⁵² con un rango de 30 dB. Por último, también recomienda que las aplicaciones no relacionadas a la seguridad operen en un esquema sin protección contra interferencias y asegurando a su vez que, estos sistemas no generen interferencias a las estaciones operando en las mismas bandas o en bandas adyacentes, como los sistemas de cobro de peaje en carreteras y los enlaces del Servicio Fijo que operan debajo de la banda de 5925 MHz.

Por otra parte, en la Decisión de CEPT/ECC se opta por armonizar los STI en aplicaciones relacionadas a la seguridad carretera²⁵³ asignándoles la banda de 5875-5925 MHz, segmentada en cinco bloques de 10 MHz, y los STI en aplicaciones relacionadas a la seguridad del sistema ferroviario²⁵⁴ están asignados a la banda de 5915-5935 MHz, con bloques del mismo ancho de banda. Dicho arreglo de bloques se puede observar en la Figura 3.3.

²⁵¹ En el caso especial de la Unión Europea, los términos RSU y OBU son referidos a unidades DSRCs que se usan generalmente en los sistemas de cobro de peaje automático, sin embargo, no son contempladas dentro de los STI.

²⁵² Técnica de control en la que la potencia de salida de un sistema durante la transmisión se mantiene dentro de un rango especificado, con el objetivo de reducir la interferencia con otros sistemas; para más información consúltese: https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/301800_301899/301893/02.00.07_20/en_301893v020007a.pdf

²⁵³ Aquellas aplicaciones que tienen como objetivo reducir el número de decesos o accidentes empleando comunicación entre estaciones de STI.

²⁵⁴ Se refiere a las aplicaciones, como el Control Automático de Trenes que son utilizados a lo largo de una vía férrea que se encuentra alejada de una carretera; en este sentido, los sistemas de STI en tranvías no se consideran parte de estas aplicaciones.

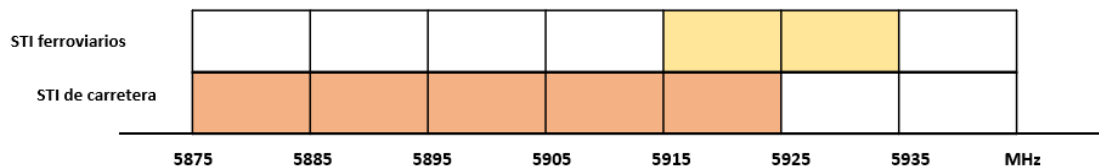


Figura 3.3. Distribución de bloques para los STI en aplicaciones de seguridad de la Unión Europea²⁵⁵.

La operación de los sistemas en la banda de 5875-5925 MHz, deberá ser en un esquema de espectro compartido con protección contra interferencias, de forma que las aplicaciones de STI tendrán prioridad sobre los otros servicios de radiocomunicaciones en la misma banda y en las bandas adyacentes.

Las disposiciones vertidas en las publicaciones de CEPT/ECC están fundamentadas en una serie de reportes emitidos por ECC que estudian, analizan y comparan la evolución de los STI, las consecuencias de su operación en ciertas bandas y la compatibilidad con los sistemas que operan en la misma banda o en bandas adyacentes, entre estos se encuentran:

- *ECC Report 101 – Compatibility studies in the band 5855-5925 MHz between Intelligent Transport Systems (ITS) and other services*²⁵⁶: en el cual se realiza un análisis de compatibilidad entre los STI de forma general (no se distinguen las aplicaciones relacionadas a la seguridad) con los sistemas que ya se encuentran en operación en la banda de 5855-5925 MHz, y en las bandas adyacentes. De este reporte se desprende la Tabla 3.12, que resume la interacción de los servicios y aplicaciones con los STI, en dónde se observa a los STI desde la perspectiva de generadores de interferencia y como víctimas de interferencia.

Tabla 3.12. Conclusiones de compatibilidad de los STI con otros sistemas y servicios en la banda de 5855-5925 MHz²⁵⁷.

Servicio o aplicación	STI como causante de interferencia	STI como víctima de interferencia
Radioaficionados	Se asegura la compatibilidad en toda la banda.	Se asegura la compatibilidad en toda la banda.
Servicio Fijo por Satélite	Se asegura la compatibilidad en toda la banda.	Se asegura la compatibilidad en la mayoría de los casos tomando en cuenta que el número de estaciones terrenas y las medidas físicas (separación) que se encuentra en las instalaciones.
Radiolocalización	Se asegura la compatibilidad únicamente cuando el STI genera emisiones no deseadas con una potencia menor a -55dBm/MHz y el	El STI puede sufrir interferencia en la banda de 5855-5875 MHz.

²⁵⁵ Elaboración propia.

²⁵⁶ Para más información, consúltese: <https://docdb.cept.org/download/67742f5a-d879/ECCREP101.PDF>

²⁵⁷ ECC, "ECC REPORT 101 COMPATIBILITY STUDIES IN THE BAND 5855– 5925 MHz BETWEEN INTELLIGENT TRANSPORT SYSTEMS (ITS) AND OTHER SYSTEMS", *European Conference of Postal and Telecommunications Administrations*, Suiza, febrero de 2007, p. 2. Consultado el 9 de octubre de 2023, disponible en: <https://docdb.cept.org/download/67742f5a-d879/ECCREP101.PDF>

Servicio o aplicación	STI como causante de interferencia	STI como víctima de interferencia
	sistema de radiolocalización opera debajo de los 5850 MHz.	
Dispositivos de Radiocomunicaciones de Corto Alcance (DRCA)	Se asegura la compatibilidad si el STI opera más allá de 5875 MHz. Se requieren técnicas de mitigación en la banda de 5855 – 5875 MHz.	Se requieren técnicas de mitigación en la banda de 5855-5875 MHz, un protocolo LBT ²⁵⁸ (<i>Listen before transmit</i>) se considera útil.
Acceso inalámbrico fijo	Se asegura la compatibilidad si el STI opera por sobre 5875 MHz. Se requieren técnicas de mitigación en la banda de 5855 – 5875 MHz.	Se requieren técnicas de mitigación en la banda de 5855-5875 MHz, un protocolo LBT podría ayudar a evitar interferencias.
Telemática en el tránsito y transporte por carretera.	Se asegura la compatibilidad únicamente cuando el STI genera emisiones no deseadas con una potencia menor a -65dBm/MHz y el sistema de interés opera debajo de 5815 MHz.	La interferencia dependerá de los patrones de radiación de las antenas y se limita al área de comunicación en que opere el sistema.
Servicio Fijo (Radioenlaces)	No se realizó análisis en la banda 5855 – 5875 MHz, dado que se identificaron pocos sistemas operando. En la banda adyacente se asegura la compatibilidad si el STI genera emisiones no deseadas con una potencia menor a -65 dBm/MHz y sistema del Servicio Fijo opera en una banda superior a 5925 MHz.	Los STI en la banda de 5905-5925 MHz podrán sufrir interferencia.

- *ECC Report 228 – Compatibility studies between Intelligent Transport Systems (ITS) in the band 5855-5925 MHz and other systems in adjacent bands:* en el cual se analiza la compatibilidad de los STI con sistemas que operan en bandas adyacentes, específicamente con aquellos en que se identificaron conflictos de interferencia, que son enlaces del Servicio Fijo en frecuencias superiores a 5925 MHz, y los sistemas de cobro de peaje en la banda de 5795 – 5815 MHz.

En consecuencia, se identifica la necesidad de emplear métodos de mitigación de interferencia con los sistemas de cobro de peaje, límites en los ciclos de trabajo de las señales transmitidas, así como umbrales de PIRE de emisiones no deseadas que para STI instalados en camiones es de -65 dBm/MHz, y para los instalados en vehículos de -60 dBm/MHz. Por otro lado, para la interacción de los STI con los sistemas del Servicio Fijo, se establece una PIRE de -40 dBm/MHz, como un nivel adecuado de potencia de emisiones no deseadas para evitar interferencias perjudiciales al Servicio.

- *CEPT Report 20 – The harmonised radio spectrum use for safety critical applications of Intelligent Transport Systems (ITS) in the European Union*²⁵⁹: en el cual se realiza

²⁵⁸ LBT es una técnica empleada en los protocolos de radiocomunicaciones que consiste en monitorear el medio antes de comenzar la transmisión, para asegurarse que este no se encuentra ocupado y evitar interferencias con dispositivos transmitiendo al mismo tiempo y en el mismo canal.

²⁵⁹ Para más información, consúltase: <https://www.ecodocdb.dk/download/cf30339d-ff12/CEPTREP020.PDF>

un análisis para permitir el uso armonizado de la banda de 5855-5925 MHz, para aplicaciones STI relacionadas con la seguridad, a través de estudios que establecen las condiciones necesarias para que los dispositivos de los STI sean resistentes ante interferencias perjudiciales ocasionadas por sistemas co-canal y por emisiones fuera de banda en canales adyacentes. Como una de sus conclusiones, se menciona la necesidad de asignar entre 30 y 50 MHz para las aplicaciones relacionadas a la seguridad, a fin de mitigar interferencias y asegurar comunicaciones confiables, con alta tasa de éxito y baja latencia. Por lo tanto, se propone el uso de la banda de 5875-5925 MHz para las aplicaciones de STI relacionados a la seguridad, dentro de la cual se destina la banda de 5875-5905 MHz de 20 MHz para las aplicaciones de seguridad vehicular crítica.

- *CEPT Report 71* – En respuesta al mandato: *To study the 85xtenión of the Intelligent Transport Systems (ITS) safety-related band at 5.9 GHz*²⁶⁰: en el cual se analiza y aprueba la extensión de la banda de 20 MHz, destinada a las aplicaciones de STI relacionadas con la seguridad que operen en la banda 5875-5905 MHz, para quedar comprendida hasta los 5925 MHz. Además, se establece que los STI no excluyen a otros medios de transporte, tales como camiones, bicicletas, motocicletas, peatones, tranvías, ni equipo empleado en el sector de la construcción o la agricultura; es por esto que se introducen las aplicaciones de STI de vías férreas en entornos urbanos usando el sistema de comunicación para el control del tren (*Communication Based Train Control*, CBTC), y se propone que utilicen la banda destinada por la Comisión Europea para las aplicaciones relacionadas a la seguridad, es decir la banda de 5875-5905 MHz y los posibles 20 MHz adicionales.
- *CEPT Report 290* – *Studies to examine the applicability of ECC Reports 101 and 228 for various ITS technologies under EC Mandate*²⁶¹ : el cual contiene un análisis de compatibilidad de los STI con los servicios de Radioaficionados, Satelital Fijo, Radiolocalización, Fijo y Acceso Inalámbrico Fijo, de forma que se valora si con los cambios que han sufrido los STI, como la adición de los STI para sistemas ferroviarios y las características específicas de la tecnología LTE-V2X, las conclusiones sobre compatibilidad siguen siendo válidas. En sus conclusiones se encuentra que las notas sobre compatibilidad del reporte 101 y 228 siguen siendo compartibles en lo general con los sistemas de STI basados en LTE-V2X, excepto por los sistemas de cobro de peaje pertenecientes a los sistemas de telemática en el tránsito y transporte por carretera, con los cuales se requieren medidas especiales en la operación de los sistemas de peaje para evitar interferencia, tales como modificar los modos de operación de los sistemas de cobro mediante la reducción de las tramas de tiempo de transmisión o bien, reducción del ciclo de trabajo de las señales empleadas.

²⁶⁰ Para más información, consúltese: <https://www.ecodocdb.dk/download/19a361a9-d547/CEPTRep071.pdf>

²⁶¹ Para más información, consúltese: <https://www.ecodocdb.dk/download/f99dec36-68ac/ECC%20Report%20290.pdf>

3.4.2. Tendencia de los STI en la Unión Europea.

El Reporte 71²⁶², que estudia la extensión de la banda dedicada a aplicaciones de seguridad también incluye el análisis de sistemas nuevos para ser incluidos dentro de las aplicaciones de STI, como es el caso de los sistemas de CBTC. Este análisis involucra la compatibilidad con los sistemas ITS-G5 y LTE-V2X que actualmente operan en la Unión Europea.

Si bien, en la Unión Europea actualmente ya operan sistemas considerados C-V2X, se destaca en el Reporte 71 la importancia de mantener una regulación neutra ante las tecnologías existentes con el objetivo de evitar favorecer el desarrollo de una sobre la otra. Sin embargo, en el mismo reporte se hace mención que dicha neutralidad va contra la tendencia de interoperabilidad en toda la Unión Europea, dado que ambas tecnologías no son compatibles entre sí, por lo que el ECC invita a ETSI a determinar los medios para desarrollar condiciones de compartición del espectro entre dichos sistemas (ITS-G5, LTE-V2X y CBTC) y con los demás servicios en la misma banda y en las bandas adyacentes de 5.9 GHz.

3.5. Brasil: Agencia Nacional de Telecomunicaciones.

En Brasil, la Agencia Nacional de Telecomunicaciones (Anatel), publicó el día 1 de septiembre de 2020, la Ley de certificación de productos número 4776²⁶³, mediante la cual se modifican algunos incisos del Anexo I de la Ley Número 14448²⁶⁴ misma en la que se aprobaron los Requisitos técnicos para la evaluación de la conformidad de equipos de radiocomunicaciones de Radiación Restringida²⁶⁵. Esta modificación agrega un numeral sobre sistemas de comunicación de vehículos en el cual se agregan algunas definiciones relacionadas a los STI, por ejemplo, la definición de un sistema de comunicación vehicular como un sistema de ayuda a la conducción en el tránsito, conformado por dispositivos transceptores de vehículos que se comunican directamente con transceptores de otros vehículos (V2V) o de la infraestructura (V2I). Además, se definen los siguientes conceptos:

- Transceptores de infraestructura: dispositivo instalado en una infraestructura de red móvil destinado a comunicarse con un vehículo para enviar y recibir información que ayude a mejorar el tránsito y la comunicación entre la red y el vehículo.
- Transceptores de vehículo: dispositivo instalado en un vehículo para enviar y recibir información entre vehículos, o con un transceptor de infraestructura para ayudar la conducción en el tránsito y comunicar el vehículo con la red.

²⁶² CEPT, "CEPT Report 71 Report from CEPT to the European Commission in response to the Mandate to study the extension of the Intelligent Transport Systems (ITS) safety-related band at 5.9 GHz", *Electronic Communications Committee*, Bélgica, 8 de marzo de 2019. Consultado el 5 de octubre de 2023, disponible en: <https://docdb.cept.org/download/126>

²⁶³ Anatel, "Ato nº 4776, de 01 de setembro de 2020", *Agência Nacional de Telecomunicações*, 1 de septiembre de 2020. Consultado el 7 de diciembre de 2020, disponible en: <https://www.anatel.gov.br/legislacao/es/atos-de-certificacao-de-produtos/2020/1467-ato-4776>

²⁶⁴ Anatel, "Anexo I requisitos técnicos para a avaliação da conformidade de equipamentos de radiocomunicação de radiação restrita", *Agência Nacional de Telecomunicações*, 04 de diciembre de 2017. Consultado el 07 de diciembre de 2020, disponible en: <https://www.anatel.gov.br/legislacao/atos-de-certificacao-de-produtos/2017/1139-ato-14448#anexoI>

²⁶⁵ Estos equipos son similares a los DRCA, los cuales operan a título secundario, no pueden causar interferencias a los servicios primarios o secundarios y no pueden reclamar interferencias perjudiciales provenientes de estos servicios.

Cabe resaltar que los STI, al tratarse de equipos de radiocomunicaciones de Radiación Restringida, sólo requieren de un certificado de homologación para su operación²⁶⁶.

3.5.1. Operación de los STI.

Anatel especifica que los equipos utilizados en los sistemas de comunicación de vehículo, que operan en la banda de 5850-5925 MHz deben cumplir con las siguientes condiciones:

- El canal de comunicación del dispositivo debe ser de 10 MHz, de acuerdo con la canalización descrita en la Tabla 3.13.

Tabla 3.13. Canalización de los Sistemas de comunicación de vehículos²⁶⁷.

Canal N°	Frecuencia inicial y final (MHz)
1	5855-5865
2	5865-5875
3	5875-5885
4	5885-5895
5	5895-5905
6	5905-5915
7	5915-5925

- Las comunicaciones V2V y V2I deberán tener una PIRE de 23 dBm (200 mW) con una tolerancia de ± 2 dB. Además, las comunicaciones V2I consideradas como de alta potencia, tendrán permitida una PIRE máxima de 23 dBm (400 mW).
- Los canales del 5 al 7 están reservados para aplicaciones relacionadas a la seguridad vehicular.

La Ley de certificación de productos además retoma características técnicas específicas del estándar ETSI EN 302 571 V2.1.1²⁶⁸ que los equipos los STI deberán cumplir:

- Estabilidad en frecuencia del transmisor: la frecuencia central de los canales de transmisión dados en la Tabla 3.13 deberá mantenerse en un rango de ± 20 ppm.
- Densidad espectral de potencia: la densidad espectral de potencia no deberá exceder un PIRE de 23 dBm/MHz.
- Control de potencia transmitida: los dispositivos transmisores deberán implementar un mecanismo de Control de potencia transmitida para evitar congestión del canal de comunicación; este sistema de control de potencia deberá tener un rango de hasta 3 dBm sobre la PIRE máxima de transmisión del equipo.

²⁶⁶ Anatel, "Anexo I requisitos técnicos para a avaliação da conformidade de equipamentos de radiocomunicação de radiação restrita", *Agência Nacional de Telecomunicações*, 04 de diciembre de 2017. Consultado el 7 de diciembre de 2020, disponible en: <https://www.anatel.gov.br/legislacao/atos-de-certificacao-de-produtos/2017/1139-ato-14448#anexol>.

²⁶⁷ *Ibidem*.

²⁶⁸ ETSI, "ETSI EN 302 571 v2.1.1 Intelligent Transport Systems (ITS); Radiocommunications equipment operating in the 5 855 MHz to 5 925 MHz frequency band; Harmonised Standard covering the essential requirements of article 3.2 of Directive 2014/53/EU", *European Telecommunications Standards Institute*, febrero de 2017, consultado el 7 de diciembre de 2020, disponible en: https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302500_302599/302571/02.01.01_60/en_302571v020101p.pdf

- Emisiones no deseadas del transmisor: las emisiones fuera de banda deberán contenerse a la máscara de emisión mostrada en la Figura 3.4.

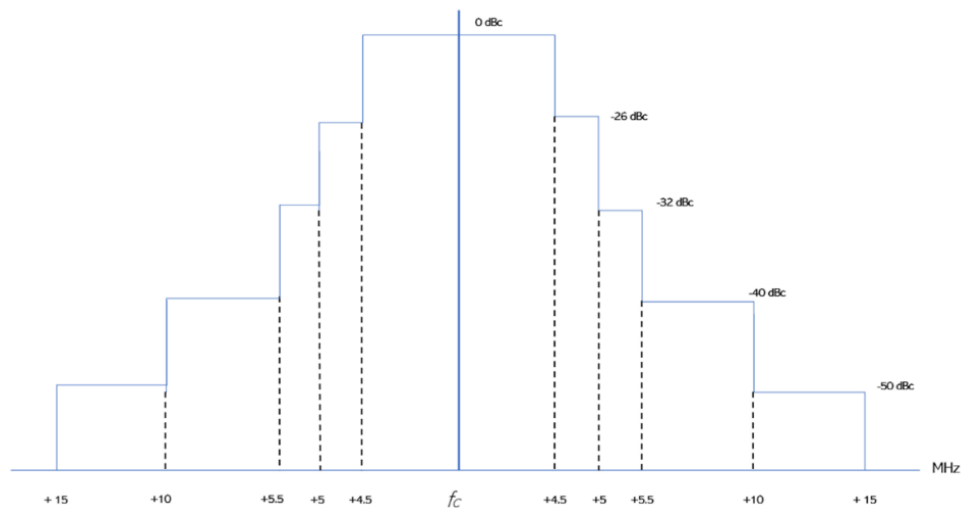


Figura 3.4 Máscara de emisión de los sistemas de comunicación de vehículos²⁶⁹

- Emisiones espurias del receptor: en todas las frecuencias de operación, las emisiones espurias de los receptores deberán acotarse a los valores mostrados en la Tabla 3.14.

Tabla 3.14. Límites de emisiones espurias para receptores²⁷⁰.

Rango de frecuencias	Potencia máxima	Ancho de banda de medición	Requerimientos especiales
$30 \text{ MHz} \leq f < 1\,000 \text{ MHz}$	-57 dBm (PRA)	100 kHz	N/A
$1\,000 \text{ MHz} \leq f \leq 5\,795 \text{ MHz}$	-47 dBm (PIRE)	1 MHz	NA
$5\,795 \text{ MHz} \leq f \leq 5\,815 \text{ MHz}$	-60 dBm (PIRE)	1 MHz	Aplicable para antenas instaladas para operar a menos de 2 m sobre el nivel del suelo.
	-65 dBm (PIRE)	1 MHz	Aplicable para antenas instaladas para operar a mayor de 2m sobre el nivel del suelo
$5\,815 \text{ MHz} \leq f \leq 18 \text{ GHz}$	-47 dBm (PIRE)	1 MHz	N/A

²⁶⁹ Elaboración propia con datos del ETISI, febrero 2017.

²⁷⁰ ETSI, "ETSI EN 302 571 v2.1.1 Intelligent Transport Systems (ITS); Radiocommunications equipment operating in the 5 855 MHz to 5 925 MHz frequency band; Harmonised Standard covering the essential requirements of article 3.2 of Directive 2014/53/EU", *European Telecommunications Standards Institute*, febrero de 2017, consultado el 7 de diciembre de 2020, disponible en: https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302500_302599/302571/02.01.01_60/en_302571v020101p.pdf

3.6. Análisis de la experiencia comparada: características de la regulación de los STI.

Una vez expuestas las disposiciones regulatorias aplicables a los STI en diversas regiones del mundo, es posible generar un análisis en conjunto de sus características principales. De acuerdo con las características revisadas, se realiza una comparación entre los distintos procedimientos regulatorios que envuelven a los STI con el objetivo de conocer la robustez y requisitos del proceso de autorización, así como el esquema a través del cual se permite su operación empleando el espectro radioeléctrico. Además, se analizan las características técnicas bajo las cuales operan los dispositivos en cada región, con el objetivo de constatar la flexibilidad de configuración, operación y posible evolución de los estándares vigentes.

De las características regulatorias de los STI es posible comparar si:

- a) Los STI requieren una autorización del Regulador para ser operados.
- b) Los STI son registrados ante el Regulador.
- c) Los STI requieren un certificado que avale sus características de operación.
- d) Los STI cuentan con protección contra interferencias o prioridad sobre los demás servicios.

Dichas características se exponen en la Tabla 3.15 para cada una de las regiones analizadas.

Tabla 3.15. Comparación de características regulatorias de los STI²⁷¹.

Los STI	Norteamérica		Australia	Unión Europea	Brasil
	Estados Unidos ²⁷²	Canadá			
Requieren una licencia para ser operados.	Sí	Sí	No	No	No
Requieren ser registrados por el regulador.	Sí	Sí	No	Depende el país ²⁷³	Sí
Requieren un certificado que avale sus características de operación.	Sí	Sí	No ²⁷⁴	Sí	Sí
Tienen prioridad o protección contra interferencias sobre los demás servicios.	No	No	No	Solo las aplicaciones de seguridad.	No

Aun cuando Estados Unidos presenta el entorno regulatorio más controlado con respecto a las otras regiones analizadas, debido al requisito de licencia por área geográfica no exclusiva,

²⁷¹ Elaboración propia.

²⁷² Únicamente se considera a los STI que operan en el DSRCS en la banda de 5.9 GHz, ya que los sistemas del LMS no son directamente comparables con las demás regiones.

²⁷³ Depende de cada entidad reguladora de los países miembros de la Unión Europea, por lo que no es posible generalizar.

²⁷⁴ Si bien ACMA no entrega un documento (tipo certificado) que avale el cumplimiento de la regulación de los STI, el interesado en comercializar los dispositivos de dichos sistemas debe guardar las pruebas de cumplimiento (como los resultados de las pruebas de laboratorio) en caso de que ACMA se los llegue a requerir. Para mayor información, consúltese en: <https://www.acma.gov.au/5-steps-suppliers>

así como el requisito de registro de cada estación por parte de FCC, el panorama parece tener una tendencia a cambiar ante el reciente interés por implementar tecnologías nuevas en la banda de 5.9 GHz para los STI, y como consecuencia, las propuestas para reconfigurar la asignación del espectro en la banda de 5.9 GHz. Sin embargo, la concepción de los STI en esta región ha heredado tecnologías antiguas (como es el caso del LMS), las cuales consideran frecuencias debajo de los 5.9 GHz como parte de los STI, lo que implica realizar cambios simultáneamente en la regulación aplicable a dichos servicios.

El caso contrastante es encontrado en la Unión Europea, en dónde, no obstante la naturaleza heterogénea de la región, la regulación ha llevado una evolución constante a la par del desarrollo e implementación de tecnologías nuevas, tal como los sistemas CBTC, siendo la Unión Europea la única región analizada que muestra un particular interés en los STI aplicados al transporte ferroviario. Sin embargo, es destacable la prioridad que se le da a los STI con aplicaciones involucradas en temas de seguridad, pues en los Reportes publicados, aun cuando se analice la introducción de nuevas tecnologías, las aplicaciones relacionadas a la seguridad tienen prioridad por sobre las demás aplicaciones.

Finalmente, mientras que Australia muestra un desarrollo regulatorio fundamentado en las características técnicas de los sistemas como la principal herramienta para regular su operación, apoyándose del estándar europeo para emitir su licencia de clase, y a su vez muestra una amplia flexibilidad en su implementación al no requerir de licencias para su implementación, Brasil considera a los STI como DRCA, por lo que no es necesaria una licencia para su operación y, en contraste a los países de Norteamérica, el funcionamiento de estos sistemas se basa en un estándar europeo.

Por otra parte, de las características técnicas dispuestas para los STI es posible comparar:

- a) Rango de frecuencias de operación.
- b) Número de canales.
- c) Estándar técnico aplicable.
- d) Estándar compatible con LTE.

Mismas características que se exponen en la Tabla 3.16

Tabla 3.16. Comparación de las características regulatorias de los STI en el ámbito técnico²⁷⁵.

Característica	Estados Unidos ²⁷⁶		Canadá	Australia	Unión Europea	Brasil
	DSRCS	C-V2X				
Rango de frecuencias de operación [MHz]	5850-5925	5895-5925	5850-5925	5855-5925	5855-5935	5850-5925

²⁷⁵ Elaboración propia.

²⁷⁶ Únicamente se considera a los STI que operan en el DSRCS y en el C-V2X en la banda de 5.9 GHz, ya que los sistemas del LMS no son directamente comparables con las demás regiones.

Característica	Estados Unidos ²⁷⁶		Canadá	Australia	Unión Europea	Brasil
	DSRCS	C-V2X				
Número de canales	7 ²⁷⁷ /5 ²⁷⁸	3 ²⁷⁹ /2 ²⁸⁰	7 ²⁸¹ /5 ²⁸²	7	8	7
Estándar técnico aplicable	ASTM E2213-03	3GPP TR 21.914 V14.0.0	ASTM E2213-03	ETSI EN 302 571	ETSI EN 302 571 ²⁸³	ETSI EN 302 571
Estándar compatible con LTE	No	Sí	No	Sí	Sí	Sí

Se puede resaltar que, si bien la banda de frecuencias en la Unión Europea cambia en la frecuencia inferior (desplazándose 5 MHz), los canales operativos tienen una distribución casi idéntica, pues esos mismos 5 MHz están reservados en Norteamérica para futuras implementaciones. En contraparte, en virtud del caso de las aplicaciones ferroviarias, la CEPT incluyó un canal superior adicional en la banda de la Unión Europea, aumentado el ancho de la misma en 10 MHz.

Es notorio que los Reguladores de las regiones estudiadas se han aproximado desde diferentes perspectivas y apoyándose de diferentes herramientas para la coordinación en el uso del espectro para los STI. Por una parte, en Estados Unidos se tiene la aprobación y coordinación por áreas geográficas; en Australia, el apego al cumplimiento de características técnicas; en Brasil, el tratamiento de estos sistemas como DRCA; y finalmente la Unión Europea con la priorización de ciertas aplicaciones sobre otros servicios en la misma banda (por ejemplo las aplicaciones relacionadas a la seguridad) y el análisis minucioso de interferencias entre los servicios de radiocomunicaciones que operan en la banda destinada a los STI y en las bandas adyacentes.

²⁷⁷ Siete canales contiguos de 10 MHz cada uno, incluyendo cuatro canales de servicio, un canal de control y dos canales designados para aplicaciones de seguridad pública.

²⁷⁸ Cinco canales de 10 MHz cada uno, en los que se excluyen los dos canales designados para aplicaciones de seguridad pública.

²⁷⁹ Tres canales contiguos de 10 MHz cada uno, incluyendo dos canales de servicio y un canal designado para aplicaciones de seguridad pública.

²⁸⁰ Dos canales de 10 MHz cada uno, en los que se excluye el canal designado para aplicaciones de seguridad pública.

²⁸¹ Siete canales contiguos de 10 MHz cada uno, incluyendo cuatro canales de servicio, un canal de control y dos canales designados para aplicaciones de seguridad pública.

²⁸² Cinco canales de 10 MHz cada uno, en los que se excluyen los dos canales designados para aplicaciones de seguridad pública.

²⁸³ En la Unión Europea aplica el estándar ETSI EN 302 571 para las aplicaciones STI vehiculares de forma obligatoria, pero también está vigente a través de la Recomendación ECC/REC/(08)01 el estándar EN 302 636 y EN 302 637 dedicadas a la seguridad.

[Hoja intencionalmente en blanco]

Capítulo IV. Recomendaciones para la futura regulación de los STI en México

En el presente capítulo se recopilan los comentarios y opiniones compartidos por miembros del sector académico e industria de México, derivado de un proceso de consulta pública de integración (CPI) y de una serie de entrevistas con especialistas en la materia. Así, con base en lo anterior y en la investigación plasmada en los tres primeros capítulos de este Estudio, a continuación se realizan recomendaciones que permitan regular a los STI en México.

4.1. Situación actual de la banda de frecuencias de 5850 a 5925 MHz.

De conformidad con el Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias, la banda de frecuencias de 5850 a 5925 MHz se encuentra atribuida conforme a la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Servicios atribuidos en la banda de frecuencias de 5850 a 5925 MHz²⁸⁴.

Banda de frecuencias	Servicios atribuidos
5850 a 5925 MHz	FIJO MÓVIL FIJO POR SATÉLITE (Tierra-espacio) Aficionados

Además, de acuerdo con la nota MX68, el segmento de frecuencias de 5725 a 5875 MHz se encuentra designado para aplicaciones ICM, por lo que los servicios de radiocomunicación que funcionan en esta banda deben aceptar la interferencia perjudicial resultante de estas aplicaciones, de conformidad con el Reglamento de Radiocomunicaciones de la UIT.

Por otra parte, de conformidad con el Registro Público de Concesiones (RPC)²⁸⁵, existen un total de un título de concesión y 4 autorizaciones para explotar los derechos de emisión y recepción de señales y bandas de frecuencias asociados a sistemas satelitales extranjeros que cubran y puedan prestar servicios en el Territorio Nacional, en la banda de frecuencias de 5850 a 5925 MHz.

4.2. Consulta Pública de Integración.

Durante el periodo comprendido entre el 20 de agosto y el 17 de septiembre de 2021, el IFT, a través de la Unidad de Espectro Radioeléctrico, llevó a cabo una CPI, la cual tuvo por objeto

²⁸⁴ IFT, "ACUERDO mediante el cual el Pleno del Instituto Federal de Telecomunicaciones modifica el Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias", *Diario Oficial de la Federación*, México, 10 de septiembre de 2024. Consultado el 9 de mayo de 2025, disponible en: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5738653&fecha=10/09/2024#gsc.tab=0

²⁸⁵ IFT, "Registro Público de Concesiones", *Instituto Federal de Telecomunicaciones*, México. Consultado el 9 de julio de 2024, disponible en: <https://rpc.ift.org.mx/vrpc>

"recabar comentarios, opiniones o aportaciones que permitan al Instituto determinar las acciones futuras en materia de planeación y administración del espectro radioeléctrico, con relación al uso de la banda de frecuencias 5850-5925 MHz o segmentos de ésta"²⁸⁶. En esta CPI se recibieron un total de 19 participaciones, entre las cuales se encuentran aquellas de diversas empresas y asociaciones relacionadas con el sector automotriz y diferentes concesionarios y autorizados del servicio fijo por satélite en las bandas de frecuencias de 5850 a 5925 MHz y de 5925 a 6425 MHz.

Entre los comentarios²⁸⁷ más frecuentes que se obtuvieron de la CPI se encuentran los siguientes:

- I. Se considera que el mejor uso de la banda de frecuencias de 5850 a 5925 MHz sería para el uso de los STI, debido a que mejoraría la gestión del tráfico y la conducción segura.
- II. Se propone asignar los 75 MHz de la banda mencionada en el numeral anterior para el uso de los STI o asignar sólo los 30 MHz superiores de dicha banda (de 5895 a 5925 MHz), debido a la reciente decisión tomada por FCC en los Estados Unidos de reducir la banda destinada para el uso de los STI y habilitar el uso de dispositivos sin licencia en el segmento de 5850 a 5895 MHz.
- III. Respecto a la canalización, se considera más adecuado conservar la operación de los STI con anchos de banda de canal de 10 MHz y valorar el uso de canales de 20 MHz o 40 MHz para aplicaciones avanzadas.
- IV. Entre las aplicaciones de los STI consideradas por los participantes se encuentran aquellas descritas en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2. Aplicaciones consideradas para los STI por los participantes de la CPI²⁸⁸.

Básicas	Avanzadas	Sin especificar
• Conducción remota. • Conducción cooperativa. • Asistencia de espacio en los señalamientos de alto. • Aplicaciones de movilidad. • Comunicaciones de emergencia de seguridad pública para los socorristas.	• Conducción automatizada. • Conducción alineada y sincronizada de vehículo. • Conducción avanzada con sensores extendidos para permitir la planificación de rutas. • Conducción coordinada.	• Instalación remota. • Paneles de señalamiento dinámico. • Estaciones de pesaje dinámico. • Dispositivos S.O.S para apoyo al usuario de autopistas. • Sistemas redundantes de comunicación para centros de operación y control.

²⁸⁶ IFT, "INFORME DE CONSIDERACIONES DE LOS COMENTARIOS, OBSERVACIONES, PROPUESTAS Y/O APORTACIONES RECIBIDAS DURANTE LA CONSULTA PÚBLICA DE INTEGRACIÓN DEL "CUESTIONARIO SOBRE NECESIDADES DE ESPECTRO PARA SISTEMAS DE TRANSPORTE INTELIGENTE EN LA BANDA 5850-5925 MHz", Instituto Federal de Telecomunicaciones, México, 25 de octubre de 2021, p. 2. Consultado el 8 de junio de 2022, disponible en: <http://www.ift.org.mx/sites/default/files/industria/temasrelevantes/17437/documentos/informedeconsideracionescpi-sti-5ghz002.pdf>

²⁸⁷ IFT, "INFORME DE CONSIDERACIONES DE LOS COMENTARIOS, OBSERVACIONES, PROPUESTAS Y/O APORTACIONES RECIBIDAS DURANTE LA CONSULTA PÚBLICA DE INTEGRACIÓN DEL "CUESTIONARIO SOBRE NECESIDADES DE ESPECTRO PARA SISTEMAS DE TRANSPORTE INTELIGENTE EN LA BANDA 5850-5925 MHz", Instituto Federal de Telecomunicaciones, México, 25 de octubre de 2021, pp. 4-131. Consultado el 21 de junio de 2022, disponible en: <http://www.ift.org.mx/sites/default/files/industria/temasrelevantes/17437/documentos/informedeconsideracionescpi-sti-5ghz002.pdf>

²⁸⁸ Elaboración propia.

Básicas	Avanzadas	Sin especificar
• Conciencia de conducción con mensajes "aquí estoy". • Advertencias de semáforo en rojo y las aplicaciones de intersecciones. • Advertencia de colisión en intersección. • Advertencia de vehículo de emergencia. • Advertencia de situación peligrosa. • Advertencia de atasco de tráfico • Advertencia de velocidad en curva. • Advertencias de zona de trabajo y velocidad reducida. • Información detallada de caminos y carriles. • Mensaje de seguridad básico para aplicaciones de prevención de accidentes.	• Conducción cooperativa con mensaje de coordinación de maniobras. • Percepción colectiva / intercambio de sensores. • Conexión de carriles. • <i>Platooning</i>²⁸⁹. • Control de cruce adaptativo cooperativo. • Advertencia de seguridad para usuarios vulnerables de la carretera. • Advertencias de ultrapaso. • Advertencia de colisión de intersección extendida. • Aplicaciones para la infraestructura a las comunicaciones de los vehículos (semáforos). • Actualizaciones locales en tiempo real. • Otras necesidades críticas de transporte.	• Otros usos estrictamente no comerciales de la banda.

- V. Se consideran los siguientes parámetros de operación para los STI:
- PIRE máxima de 33 dBm, tanto para las RSU como para las OBU.
 - Ganancia máxima de la antena: 6 dBi, tanto para las RSU como para las OBU.
 - Altura máxima de la antena: 8 m para las RSU.
 - Ancho de banda de canal máximo de hasta 20 MHz.
- VI. Se considera óptimo habilitar a los STI bajo los estándares de DSRC o C-V2X, dado que estos estándares ya cuentan con las características técnicas necesarias para su convivencia con otros servicios que se encuentren operando en la misma banda de frecuencias o en bandas de frecuencias adyacentes. No obstante lo anterior, también se considera necesario definir un límite para las emisiones fuera de banda de los STI, para evitar que dichos sistemas interfieran perjudicialmente a los servicios satelitales que operan en las bandas de 5850 a 5925 MHz y de 5925 a 6425 MHz.

²⁸⁹ Un pelotón o *platoon* en inglés, consiste en una cadena de vehículos que se siguen con una distancia de seguridad reducida, empleando comunicaciones de baja latencia y alta confiabilidad. La cabeza del pelotón envía comandos y recibe retroalimentación de los otros vehículos para controlar el pelotón.
Harounabadi, Mehdi *et al.*, *V2X in 3GPP Standardization: NR Sidelink in Rel-16 and Beyond*, IEEE Communications Standards Magazine, 2021, p. 2.

- VII. Se considera que la modalidad de espectro sin licencia es la más adecuada para habilitar la operación de los STI, con el fin de fomentar su uso, despliegue y evolución.

4.3. Entrevistas con el sector académico.

Con la finalidad de recabar las opiniones y comentarios del sector académico acerca de los STI, se llevaron a cabo entrevistas con el Dr. Hugo Estrada Esquivel²⁹⁰ y la Dra. Alicia Martínez Rebollar²⁹¹, ambos académicos del CENIDET y con la Dra. Angélica del Rocío Lozano Cuevas²⁹² del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

4.3.1. Opiniones y comentarios del Dr. Hugo Estrada y la Dra. Alicia Martínez.

El 22 de septiembre de 2020 la Dirección General de Ingeniería del Espectro y Estudios Técnicos, a través de la Dirección de Ingeniería y Tecnología se reunió con el Dr. Hugo Estrada y la Dra. Alicia Martínez con el objetivo de recabar sus opiniones y comentarios respecto a los STI. Los doctores definen a los STI como "*sistemas capaces de conocer su contexto y actuar en consecuencia. Estos sistemas, a través de diversos tipos de sensores, deben reconocer el entorno en el que se encuentran, después analizar la información recolectada y tomar decisiones para realizar determinadas acciones*".

El Dr. Estrada y la Dra. Martínez han colaborado en diversos proyectos relacionados con los STI, por ejemplo, realizaron una aplicación de rutas verdes en la ciudad de Cuernavaca, cuyo objetivo fue diseñar y enviar rutas específicas para bicicletas, motocicletas y peatones en áreas con un bajo grado de contaminación. También participaron en el desarrollo de una aplicación móvil que monitorea y analiza la manera de conducir de los vehículos dentro de espacios determinados, como estacionamientos. Esta aplicación envía alertas de incidentes (paradas repentinas, vehículos circulando en sentido contrario o conduciendo a altas velocidades) al guardia de seguridad y al resto de personas en el estacionamiento.

El Dr. Estrada opina que los países miembros de la Unión Europea son los que llevan la delantera respecto a la implementación de los STI. Principalmente en ciudades de Portugal,

²⁹⁰ El Dr. Hugo Estrada Esquivel es Doctor en Informática por la Universidad Politécnica de Valencia, España y Doctor en Informática y Telecomunicaciones por la Universidad de Trento, Italia. Tiene como líneas de investigación: datos abiertos, *Big Data*, *Cómputo en la nube* e *internet de las cosas*.

INEGI, "DR. HUGO ESTRADA ESQUIVEL", *Instituto Nacional de Estadística y Geografía*, México, 2017. Consultado el 30 de agosto de 2021, disponible en: https://www.inegi.gob.mx/eventos/2017/conacyt/doc/s_HugoEstrada.pdf

²⁹¹ La Dra. Alicia Martínez Rebollar es Doctora en Informática por la Universidad Politécnica de Valencia España y Doctora en Investigación y Telecomunicaciones por la Universidad de Trento, Italia. Actualmente es Profesora-Investigadora del Departamento en Ciencias Computacionales en el área de Sistemas Distribuidos (2009- a la fecha). Sus líneas de especialización son: sistemas distribuidos/cómputo inteligente, *Internet de las cosas*, *Cómputo Afectivo*.

CENIDET, "Dra. Alicia Martínez Rebollar", *Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico*, México, 2019, p. 1. Consultado el 30 de agosto de 2021, disponible en: <https://www.cenidet.edu.mx/archivos/cv/computacion/Alicia%20Martinez%20Rebollar.pdf>

²⁹² La Dra. Angélica Del Rocío Lozano Cuevas es Doctora en Investigación de Operaciones por la Universidad de Roma La Sapienza, Italia. Su investigación está enfocada en el Análisis de Sistemas de Transporte, en las áreas de tránsito vehicular, diseño de redes multimodales de transporte, transporte urbano de carga, transporte de materiales peligrosos, sistemas avanzados de información al viajero y sistemas inteligentes de transporte.

UNAM, "Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería de Sistemas", *Universidad Nacional Autónoma de México*, México, 2017, p. 1. Consultado el 30 de agosto de 2021, disponible en: <https://www.ingenieria.unam.mx/sistemas/PDF/Semblanzas/ALC.pdf>

España y Alemania²⁹³, los STI se usan en el monitoreo del tránsito vehicular, paradas de autobuses con horarios programados, estacionamientos que indican en tiempo real los lugares disponibles, recolectores de basura que realizan mediciones de los contenedores para optimizar las rutas, entre otras. La Dra. Martínez afirma que también en Estados Unidos existe un avance en el uso de los STI, y reitera que su adopción depende de las necesidades propias de cada país. Por ejemplo, en Europa los STI se aplican tanto a autobuses como a trenes, siendo que en Estados Unidos es más notable su uso en los autobuses.

Respecto a la implementación de los STI en México, los doctores opinan que nuestro país se encuentra muy atrasado en comparación con el desarrollo que existe en Europa. De acuerdo con ellos, algunos de los retos y dificultades más importantes al implementar los STI en México son:

- La falta de conectividad que aún existe en las zonas rurales del país.
- Los centros de investigación difícilmente cuentan con acceso en tiempo real a los datos de movilidad de las ciudades.
- La gran posibilidad de que los sensores y dispositivos sean dañados o robados si se encuentran en lugares públicos.
- La falta de regulación en el transporte público.
- Sólo los vehículos de gama alta cuentan con conectividad propia.

Por citar un caso, el Dr. Estrada participó en la realización de una plataforma para la movilidad del transporte de mercancías en el Istmo de Tehuantepec. Este sistema tenía como objetivo analizar las posibles ocurrencias en la ruta que pudiesen causar retrasos en las entregas de la mercancía. Sin embargo, el equipo se encontró con que había grandes tramos de la ruta que no contaban con ningún acceso a internet, por lo que no era posible mantener un monitoreo constante del vehículo. Esto dejaba solo dos posibles soluciones: que se instalaran más antenas de telefonía celular o que se usara tecnología satelital. No obstante, ninguna de ellas resultó ser viable para el proyecto.

Según los doctores, en la Ciudad de México, alrededor de 600 unidades del sistema de transporte público Metrobús ya cuentan con sistemas de geolocalización y que, para convertirse en STI, se requiere que los datos se generen en tiempo real y que además se encuentren disponibles para el público en general para el desarrollo de otras aplicaciones. Por lo anterior, subrayan la importancia de promover el desarrollo de los STI en México, siempre tomando en cuenta las necesidades y la cultura del país. Por ejemplo, los sistemas con un histórico de eventos serían muy útiles en la recolección y análisis de datos para sistemas de predicción de incidentes.

En cuanto a la regulación de los STI en México, el Dr. Estrada sugiere que inicialmente se lleve a cabo mediante pruebas piloto y que, posteriormente, la regulación se actualice de forma paralela al desarrollo e implementación de los STI, pues de lo contrario, podría resultar en un obstáculo más para su adopción.

²⁹³ Impulsada por la Unión Europea, FIWARE es una plataforma de código abierto, orientada al desarrollo y despliegue global de soluciones inteligentes (ciudades inteligentes, industria inteligente, agricultura inteligente, etc.), para construir un ecosistema sostenible y abierto del Internet de las Cosas.

FIWARE, "WHAT IS FIWARE?", *FIWARE*. Consultado el 30 de agosto de 2021, disponible en: <https://www.fiware.org/about-us/>

De acuerdo con los doctores, la optimización del transporte se traduciría directamente en beneficios económicos y ambientales. Por ejemplo, al disminuir las aglomeraciones de vehículos se reducirían los tiempos de llegada, así como, las emisiones de carbono. El Dr. Estrada espera que, a partir de la implementación de los STI en el país, aumente la cantidad de vehículos que cuenten con sensores y conectividad propia. Además, La Dra. Martínez afirma que todo lo anterior impactaría positivamente en la calidad de vida de las personas al brindarles información clara sobre la mejor manera de trasladarse.

El Dr. Estrada y la Dra. Martínez señalan que, a fin de que los usuarios adopten las tecnologías STI en México, es necesario desarrollar aplicaciones robustas, gratuitas, útiles y convenientes para su vida diaria, además de que se les dé la certeza de que los datos que proporcionen permanecerán protegidos y a salvo en todo momento.

Acerca de las consideraciones que deben tomarse para las aplicaciones relacionadas con la seguridad, el Dr. Estrada recomienda usar mecanismos de identificación y verificación de los usuarios basados en *tokens*²⁹⁴. Puso como ejemplo la aplicación de rutas verdes, donde era necesario que todos los usuarios iniciaran sesión, y que mediante un "*token* de ingreso" se comprobara que la aplicación estuviera autorizada para acceder y usar los datos. Además, este mecanismo se usó para asegurarse de que era una persona y no un robot quien requería el acceso a la información. Otro mecanismo de autenticación utilizado fue solicitar las identificaciones oficiales a los usuarios, para garantizar que sólo personas reales accedieran a los datos. Desde el punto de vista de los doctores, en México la regulación en temas de seguridad de datos aún se encuentra muy rezagada, por lo que consideran crucial el progreso en este tema para poder implementar los STI en el país.

4.3.2. Opiniones y comentarios de la Dra. Angélica Lozano.

El 1 de octubre de 2020 la Dirección General de Ingeniería del Espectro y Estudios Técnicos, a través de la Dirección de Ingeniería y Tecnología se reunió con la Dra. Angélica Lozano con el objetivo de recabar sus opiniones y comentarios respecto a los STI. De acuerdo con la Dra. Lozano, los STI son "*sistemas que permiten usar de manera más eficiente los recursos de la infraestructura y de los servicios de transporte, para obtener un mejor servicio al menor costo y reduciendo el impacto final*". En opinión de la Dra. Lozano, los STI hacen uso de una amplia variedad de sensores, y que, dependiendo del objetivo del sistema, los STI podrían calcular el peso de un camión, contar el número de vehículos que pasan por cierto punto, medir la velocidad con la que circulan, hallar un consumo excesivo de combustible, o detectar si sucedió un accidente. Según la Dra. Lozano, las mediciones y la recolección de información siempre deben realizarse acorde al propósito de cada sistema. Actualmente, la Dra. Lozano trabaja en un STI con el cual, mediante sensores se recolecta información de vehículos y de la infraestructura de las carreteras (semáforos o postes de luz, etc.). Esta información es llevada hacia los centros de control a través de enlaces inalámbricos o de fibra óptica.

²⁹⁴ Un token es un dispositivo físico (hardware) o digital (software) que permite el acceso a un recurso restringido en lugar de usar una contraseña, firma digital o dato biométrico; es decir, actúa como una llave con la que acceder a un recurso. INCIBE, "Glosario de términos de ciberseguridad", INSTITUTO NACIONAL DE CIBERSEGURIDAD, España, 2021. Consultado el 30 de agosto de 2021, disponible en: https://www.incibe.es/sites/default/files/contenidos/guias/doc/guia_glosario_ciberseguridad_2021.pdf

La Dra. Lozano afirma que los STI pueden incluir sistemas que comunican señalamientos o semáforos con centros de control, para tener un registro semafórico en tiempo real, o un sistema que monitorea continuamente la ubicación de un autobús para que los usuarios puedan consultar esta información desde su teléfono celular o desde las propias paradas. También pueden encontrarse sistemas para carreteras o para transportes interurbanos, los cuales son muy similares a los que se usan en las zonas urbanas, pero más simples.

La Dra. Lozano opina que la mayor dificultad a la que se ha enfrentado trabajando con STI es mantener la comunicación desde los sensores hasta los centros de control en todo momento. La pérdida de la conexión dificulta la recolección de datos en tiempo real, una característica que la doctora considera crucial en los STI. Por otra parte, la Dra. Lozano señala no estar familiarizada con las bandas de espectro radioeléctrico idóneas para la operación de los STI, no obstante, considera necesaria su regulación para evitar un uso inadecuado y que se ponga en peligro a las personas o usuarios que hacen uso de estos sistemas.

Además, la Dra. Lozano afirma que, en países desarrollados como Japón, los STI ya se encuentran implementados, por lo que, sería recomendable seguir sus pasos y fomentar el desarrollo de aplicaciones STI en México. En opinión de la Dra. Lozano, con los STI es posible mejorar los servicios de transporte haciendo uso de la infraestructura existente, sin tener que hacer más obras viales. Sin embargo, se requiere tener presentes las características y necesidades que diferencian a México de estos países, puesto que no es posible ejecutar estos proyectos de manera exitosa sin antes adaptarlos al contexto sociocultural y los requerimientos de cada país. Por ejemplo, la Dra. Lozano trabajó en un sistema enfocado al transporte público, en el que fue necesario considerar que no existen rutas fijas ni paradas específicas en el recorrido del transporte. Lo anterior se debe a que es común que existan variaciones derivadas de accidentes, cierre de calles, etc. Estas situaciones tan comunes en México forman parte de las características a tomar en cuenta al momento de adoptar los sistemas usados por otros países.

De acuerdo con la Dra. Lozano, la incorrecta implementación de los STI implica un gran riesgo para su adopción, pues no se alcanzarían los objetivos del proyecto o se alcanzarían a un costo muy alto, haciendo que las personas pierdan el interés en estos sistemas. A partir de una adecuada implementación de los STI en México, la Dra. Lozano señala que su uso resultaría en:

- Sistemas de transporte más eficientes.
- Disminución del tránsito vehicular.
- Un menor número de accidentes de tránsito.
- Tiempos de traslado menores.
- Reducción del costo al usuario final.

Desde el punto de vista de la Dra. Lozano, en México sí existen investigaciones relevantes referentes a los STI, desafortunadamente, derivado del desconocimiento sobre su utilidad, existe aún poco interés en invertir en ellos, lo que impide llevar a término estos proyectos. Mientras que en relación con el papel que desempeña el sector académico en la implementación de los STI en el país, la Dra. Lozano asegura que hay muchos grupos

dedicados a la investigación de estos sistemas y que cada uno de ellos se desarrolla en diferentes especialidades. Por ejemplo, se llevan a cabo investigaciones que se enfocan en los algoritmos de los sistemas y hay otras que se enfocan en la parte electrónica y de hardware. Desafortunadamente, estas investigaciones no se realizan de manera conjunta y no existe colaboración entre los distintos grupos de investigación.

4.4. Propuestas para la regulación de los STI en México.

Una vez observado lo expuesto en este y capítulos precedentes, se propone que, para el caso de los STI, su regulación se pueda analizar en dos vertientes: las características técnicas de operación y los aspectos normativos necesarios para su uso, los cuales se describen en los numerales a continuación.

4.4.1. Características técnicas de operación.

Entre las características técnicas de operación para el uso de los STI en México se proponen la banda de frecuencias de operación y su canalización asociada, las potencias de operación de los dispositivos, máscaras de emisión, la convivencia con otros servicios dentro de la banda de frecuencias propuesta y en bandas de frecuencias adyacentes, y la interoperabilidad entre tecnologías.

4.4.4.1. Banda de frecuencias de operación y canalización.

Se recomienda que los STI sean habilitados en toda la banda de frecuencias de 5850 a 5925 MHz, con anchos de canal de 10 o 20 MHz, de acuerdo con el plan de canalización que se muestra en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3. Plan de canalización propuesto²⁹⁵.

Número de canal	Rango de frecuencias [MHz]	Uso del canal
170	5850-5855	Reservado
172	5855-5865	Canal de Servicio
174	5865-5875	Canal de Servicio
175	5865-5885	Canal de Servicio de 20 MHz constituido por la unión de los canales 174 y 176
176	5875-5885	Canal de Servicio
178	5885-5895	Canal de Control
180	5895-5905	Canal de Servicio
181	5895-5915	Canal de Servicio de 20 MHz constituido por la unión de los canales 180 y 182
182	5905-5915	Canal de Servicio
184	5915-5925	Canal designado para aplicaciones de seguridad pública.

²⁹⁵ Elaboración propia.

En donde, el canal 170 se mantiene reservado, es decir, por su ancho de banda no se prevé su uso, el canal 178 se utiliza para el control de los dispositivos asociados dentro del STI, el canal 184 se considera para uso exclusivo de aplicaciones relacionadas con la seguridad pública y el resto de los canales pueden ser utilizados para proveer las distintas aplicaciones de los STI. Cabe mencionar que el plan de canalización que se recomienda posibilita el uso de cualquiera de las tecnologías expuestas en este estudio, con lo cual se cumple el principio de neutralidad tecnológica que debe procurar el IFT. No obstante, debe valorarse también la importancia de la interoperabilidad de las tecnologías, toda vez que los vehículos pueden circular en todo el país, y si existen zonas con diferentes tecnologías, debe asegurarse que son interoperables para no generar interferencias perjudiciales o bien que cierta tecnología no opere adecuadamente por cuestiones de incompatibilidad técnica. En tal caso, sería recomendable, que previa valoración técnica, económica y de costo-beneficio, se tome una decisión de política pública para elegir la tecnología que garantice el desarrollo y funcionamiento óptimo de los STI en todo el país. Asimismo, resultará relevante el evaluar la necesidad de establecer los acuerdos internacionales necesarios para asegurar el funcionamiento óptimo de los sistemas de STI de México con los de otros países con los que se comparten fronteras, especialmente con los Estados Unidos, dada la intensa actividad económica entre ambas naciones, donde existe un intenso y constante flujo de vehículos de carga y pasajeros entre ambos países (más de 300,000 vehículos en un día²⁹⁶).

4.4.4.2. Potencias de operación de los dispositivos.

En el caso de las potencias de operación de los dispositivos, se recomienda que existan diferentes clases de RSU, las cuales determinen sus potencias nominales de transmisión en relación con la distancia máxima necesaria para transmitir información, tal y como en el caso de la regulación emitida por FCC. Lo anterior se describe en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4. Clases de RSU²⁹⁷.

Clase de RSU	Potencia nominal de transmisión [dBm]	Distancia de comunicación máxima [m]
A	0	15
B	10	100
C	20	400
D	28.8	1000

En lo que respecta a la PIRE, se recomienda que tanto las OBU como las RSU no sobrepasen un valor de 33 dBm. Mientras que para la altura sobre el nivel de piso de las antenas de las RSU no sobrepasen los 8 m.

4.4.4.3. Convivencia con otros servicios y máscara de emisión.

Como se observó en el numeral 4.1 de este capítulo, la banda de frecuencias de 5850 a 5925 MHz, se encuentra atribuida a los servicios fijo, móvil y fijo por satélite (Tierra-espacio) a

²⁹⁶ El Economista, "La frontera México-Estados Unidos, una región clave", *El Economista*, México, 2022. Consultado el 13 de junio de 2025, disponible en: <https://www.eleconomista.com.mx/opinion/La-frontera-Mexico-Estados-Unidos-una-region-clave-20220919-0048.html>

²⁹⁷ Elaboración propia.

título primario y al servicio de aficionados a título secundario. En lo que respecta a los servicios fijo por satélite (Tierra-espacio) y aficionados, de acuerdo con lo expuesto en la Tabla 3.12 del presente estudio, la CEPT concluye que los STI no presentan problema alguno para la operación de dichos servicios y, al contrario, el servicio fijo por satélite podría causar afectaciones a los STI si no se encuentran separados geográficamente lo suficiente. Para el caso de los servicios fijo y móvil, no se encontró registro de usuarios que hagan uso de esta banda tanto en el RPC, como en el Sistema Integral de Administración del Espectro Radioeléctrico.

En lo que respecta a las bandas de frecuencias adyacentes, por debajo de 5850 MHz, se encuentra el segmento de frecuencias de 5725 a 5850 MHz, el cual está clasificado como espectro libre. Por ello se recomienda mantener el canal 170 como reservado, el cual pueda funcionar como banda de guarda para evitar que los dispositivos que operan en el segmento de espectro libre y los STI se interfieran perjudicialmente entre sí.

Por otra parte, en la banda de frecuencias adyacente superior, la banda de 5925 a 6700 MHz, se encuentra atribuida al servicio fijo por satélite (Tierra-espacio) a título primario y al servicio fijo a título secundario. Como se mencionó con anterioridad, los STI no presentan problema alguno para el servicio fijo por satélite. No obstante, para el servicio fijo, de acuerdo con la Tabla 3.12, se podrían prever afectaciones en caso de que los STI generen emisiones no deseadas con una potencia mayor a -65 dBm/MHz.

Debido a las consideraciones anteriores, se recomienda establecer una máscara de emisión para los dispositivos de los STI. Para ello, se recomienda utilizar las máscaras de emisión propuestas por FCC o Anatel (la cual se basa en un estándar de ETSI). Dichas máscaras de emisión se describen en las Tablas 4.5 y 4.6.

Tabla 4.5. Máscara de emisión de FCC²⁹⁸.

Nivel de señal	Segmento de frecuencia
29 dBm/100 kHz	Dentro del ancho de banda de canal asignado
-35 dBm/100 kHz	± 1 MHz antes y después del ancho de banda de canal asignado
-43 dBm/100 kHz	± 10 MHz antes y después del ancho de banda de canal asignado
-53 dBm/100 kHz	± 20 MHz antes y después del ancho de banda de canal asignado

Tabla 4.5. Máscara de emisión de Anatel²⁹⁹.

Nivel de señal	Segmento de frecuencia
0 dBc	Medida en la portadora de la señal
0 dBc	± 4.5 MHz antes y después de la portadora de la señal
-26 dBc	± 5 MHz antes y después de la portadora de la señal

²⁹⁸ FCC, "Use of the 5.850-5.925 GHz Band", *Federal Register*, Estados Unidos, 3 de mayo de 2021. Consultado el 9 de octubre de 2023, disponible en: <https://www.federalregister.gov/documents/2021/05/03/2021-08801/use-of-the-5850-5925-ghz-band>

²⁹⁹ ETSI, "ETSI EN 302 571 Intelligent Transport Systems (ITS); Radiocommunications equipment operating in the 5 855 MHz to 5 925 MHz frequency band; Harmonised Standard covering the essential requirements of article 3.2 of Directive 2014/53/EU", *European Telecommunications Standards Institute*, Francia, 6 de febrero de 2017, p. 12. Consultado el 9 de octubre de 2023, disponible en: https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302500_302599/302571/02.01.01_60/en_302571v020101p.pdf

Nivel de señal	Segmento de frecuencia
-32 dBc	± 5.5 MHz antes y después de la portadora de la señal
-40 dBc	± 10 MHz antes y después de la portadora de la señal
-50 dBc	± 15 MHz antes y después de la portadora de la señal

4.4.2. Aspectos normativos.

Entre los aspectos normativos aplicables para la regulación de los STI en México, se encuentran el uso de la banda de frecuencias propuesta y la homologación de los dispositivos de los STI.

4.4.2.1. *Uso de la banda de frecuencias.*

Con base en el funcionamiento de los STI y en los comentarios expuestos en la CPI, se proponen dos esquemas para el uso de la banda de frecuencias de 5850 a 5925 MHz:

- a. Identificar el segmento de frecuencias de 5850 a 5915 MHz como espectro libre: a través de este mecanismo cualquier interesado puede hacer uso del segmento referido, siempre y cuando cumpla con lo establecido en el Acuerdo de uso libre que se llegase a emitir, incluyendo aquellas condiciones que determinen que los dispositivos de los STI no tendrán protección contra interferencias perjudiciales y no deberán interferir perjudicialmente a los sistemas de los servicios de radiocomunicaciones autorizados previamente. Sin embargo, con este mecanismo se prevé que el IFT no tendría conocimiento acerca de la infraestructura montada para la operación de los STI. En el caso del segmento de 5915 a 5925 MHz, se propone identificarlo como espectro protegido, o bien, para uso público exclusivamente, debido a que estaría destinado a aplicaciones relacionadas con seguridad pública (cuyos STI sean operados por alguna entidad pública a nivel nacional/estatal) y que los demás servicios de radiocomunicaciones que operen en este segmento no podrán interferir perjudicialmente a las comunicaciones de los STI.
- b. Habilitar el uso de los STI a través de una autorización emitida por el IFT: a través de este mecanismo cualquier interesado en operar STI puede aplicar para obtener dicha autorización, siempre y cuando cumpla con los requisitos y características establecidos por el IFT para ello. En dicha autorización se recomienda que se establezca que el interesado podrá hacer uso del segmento de frecuencias de 5850 a 5915 MHz en una modalidad de uso compartido del espectro a título secundario a nivel nacional, regional, estatal o municipal, y que el interesado deberá entregar periódicamente los datos técnicos de sus RSU, como lo son su ubicación, cobertura, potencias de operación, anchos de banda de canal, entre otros. En el caso del segmento de 5915 a 5925 MHz, al igual que en el esquema anterior, se propone identificarlo como espectro protegido, o para uso público exclusivamente, debido a que estaría destinado a aplicaciones relacionadas con seguridad pública (cuyos STI sean operados por alguna entidad pública a nivel nacional/estatal) y que los demás servicios de radiocomunicaciones que operen

en este segmento no podrán interferir perjudicialmente a las comunicaciones de los STI.

Cabe destacar que el contar con la información de la infraestructura desplegada para los STI, le daría la posibilidad al IFT de implementar un sistema automático de coordinación de frecuencias para la administración del espectro, con lo cual evitar posibles interferencias entre los usuarios que operen STI.

4.4.2.2. Homologación de los dispositivos de los STI.

En lo que respecta a la homologación de los dispositivos de los STI, se recomienda que las características técnicas de operación, junto con los métodos de medición y evaluación de la conformidad para llevar a cabo las comprobaciones de dichas características, sean establecidos en una Disposición Técnica, con el fin de que el proceso de homologación pueda realizarse a través de un Laboratorio de Pruebas, de conformidad con lo establecido en el Procedimiento para la Homologación Tipo A de los Lineamientos para la homologación de productos, equipos, dispositivos o aparatos destinados a telecomunicaciones o radiodifusión³⁰⁰.

4.4.3. Consideraciones adicionales para la regulación de los STI en México.

Además de lo expuesto en el presente capítulo y una vez que se haya habilitado el uso de los STI en el país, el IFT deberá valorar si la operación de dichos sistemas es suficiente, baja o nula en comparación con la cantidad de espectro habilitado para tal uso, puesto que en caso de que no exista interés en los servicios que se pueden ofrecer a través de los STI, el IFT estaría en la posibilidad de reducir la cantidad de espectro para el uso de los STI y reasignar el espectro restante para otro uso, como en el caso de Estados Unidos, donde después de varios años de haber habilitado el DSRCS, la FCC decidió establecer el segmento de 5850 a 5895 MHz para el uso de dispositivos sin licencia.

Por otra parte, cabe mencionar la preocupación expuesta por las Dras. Martínez y Lozano, y el Dr. Estrada, con respecto de la tener una red segura y confiable desde las comunicaciones inalámbricas que puedan existir entre las RSU y las OBU, hasta el servidor donde se alberguen los datos recopilados por dicha red. Si bien se espera que en parte esto pueda ser mitigado con la infraestructura propia de los interesados en operar STI, dichos interesados también deberán implementar las estrategias y acciones en materia de ciberseguridad para evitar que la información transmitida, almacenada y gestionada por su red pueda ser sustraída, eliminada o modificada por terceros ajenos a la organización, especialmente cuando el contenido de dicha información esté relacionado con la seguridad pública o con datos e información personales.

Algo que se deberá tener a consideración en caso de que así se determine, será la convivencia entre los STI y los dispositivos que operen en los posibles segmentos de frecuencias por encima de 5925 MHz que sean identificados como espectro libre. Lo anterior es de vital

³⁰⁰ IFT, "ACUERDO mediante el cual el Pleno del Instituto Federal de Telecomunicaciones expide los Lineamientos para la homologación de productos, equipos, dispositivos o aparatos destinados a telecomunicaciones o radiodifusión.", *Instituto Federal de Telecomunicaciones*, México, 29 de diciembre de 2021. Consultado el 21 de junio de 2022, disponible en: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5639645&fecha=29/12/2021#gsc.tab=0

importancia debido al canal reservado para las aplicaciones de seguridad pública (canal 184, de 5915 a 5925 MHz), el cual se encuentra adyacente a estos segmentos que puedan ser identificados como espectro libre, y cuyos dispositivos que operen en dicho segmento puedan causar interferencias perjudiciales a los STI.

Además, se deberán observar los avances en la implementación de los STI a nivel internacional y la evolución de las tecnologías con los que operan con la finalidad de aprovechar la experiencia y aprendizajes obtenidas por otros órganos reguladores con la implementación y operación de los STI, así como aprovechar los beneficios del eventual desarrollo de economías de escala de los equipos con los que operan los STI.

Por último, se recomienda que se promueva la implementación de pruebas experimentales para validar la operación de los STI acorde con las características de diferentes tipos de vialidades, y las particularidades de la infraestructura vial y parque vehicular del país, con pruebas específicas para las aplicaciones de seguridad pública y atención de emergencias. Para ello, es necesario el acercamiento y la colaboración entre las partes que conforman el ecosistema de los STI: Gobiernos, agencias reguladoras del transporte, agencias de seguridad pública y atención de emergencias, fabricantes de vehículos, academia, fabricantes de equipos y el regulador de telecomunicaciones, no sólo para llevar a cabo las pruebas, sino también para abordar soluciones y propuestas para avanzar en la implementación de los STI en México, a partir de lo cual se podrán identificar acciones a corto, mediano y largo plazo, así como los instrumentos regulatorios, legislativos, y demás normativa de carácter federal, estatal o local que deban ser modificados o emitidos para la efectiva implementación de los STI en el país.

[Hoja intencionalmente en blanco]

Referencias

1. 3GPP, "3GPP TS 38.101-1 V17.5.0 (2022-03) 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; NR; User Equipment (UE) radio transmission and reception; Part 1: Range 1 Standalone (Release 17)", *3rd Generation Partnership Project*, Francia, 2022. Consultado el 2 de mayo de 2022, disponible en: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3283>
2. 3GPP, "3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Services and System Aspects; Release 16 Description; Summary of Rel-16 Work Items (Release 16)", *3rd Generation Partnership Project*, Estados Unidos, enero de 2021. Consultado el 2 de mayo de 2022, disponible en: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3493>
3. 3GPP, "3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Services and System Aspects; Release 14 Description; Summary of Rel-14 Work Items (Release 14)", *3rd Generation Partnership Project*, Francia, 17 de septiembre de 2014. Consultado el 14 de 2021, disponible en: <https://www.3gpp.org/3gpp-calendar/44-specifications/releases>
4. 3GPP, "3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Services and System Aspects; Release 14 Description; Summary of Rel-14 Work Items (Release 14)", *3rd Generation Partnership Project*, Francia, 17 de septiembre de 2014, Consultado el 14 de 2021, disponible en: <https://www.3gpp.org/3gpp-calendar/44-specifications/releases>
5. 5GAA, "Mode Switching Strategies in Cellular-V2X", *5G Automotive Association*, Alemania, 13 de junio de 2019. Consultado el 2 de mayo de 2022, disponible en: https://5gaa.org/wp-content/uploads/2019/07/5GAA_191906_WP_CV2X_UCs_v1-3-1.pdf
6. 5GAA, "White Paper C-V2X Use Cases Methodology, Examples and Service Level Requirements", *5G Automotive Association*, Alemania, 13 de junio de 2019. Consultado el 2 de mayo de 2022, disponible en: https://5gaa.org/wp-content/uploads/2019/07/5GAA_191906_WP_CV2X_UCs_v1-3-1.pdf
7. Abbasi, Mahmoud et al., "Synchronization Techniques in "Device to Device- and Vehicle to Vehicle-Enabled" Cellular Networks: A survey", *Elsevier*, 2021. Consultado el 2 de mayo de 2022, disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045790620308016>
8. Abeldime M.S., Abdelgader y Wu, Lenan., "The Physical Layer of the IEEE 802.11p WAVE Communication Standard: The Specifications and Challenges", *Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science 2014 Vol II*, Estados Unidos, octubre de 2014. Consultado el 10 de febrero del 2022, disponible en: http://www.iaeng.org/publication/WCECS2014/WCECS2014_pp691-698.pdf
9. ACMA "Class Licences", *Australian Communications and Media Authority*, 5 de febrero de 2018. Consultado el 21 de mayo de 2020, disponible en: <https://www.acma.gov.au/class-licences>

10. ACMA, "Australian radiofrequency spectrum allocations chart", *Australian Communications and Media Authority*, Australia, 2019. Consultado el 21 de mayo de 2020, disponible en: <https://www.acma.gov.au/sites/default/files/2019-10/Australian%20radiofrequency%20spectrum%20allocations%20chart.pdf>
11. ACMA, "Radiocommunications (Intelligent Transport Systems) Class License 2017", *Australian Communications and Media Authority*, Australia, 5 de febrero de 2018. Consultado el 21 de mayo de 2020, disponible en: <https://www.legislation.gov.au/Details/F2018L00026>
12. ACMA, "Radiocommunications (Intelligent Transport Systems) Standard 2018", *Australian Communications and Media Authority*, Australia, 3 de diciembre de 2018. Consultado el 15 de mayo del 2020, disponible en: <https://www.legislation.gov.au/Details/F2018L01658>
13. ACMA, "Radiocommunications (Mind-West Radio Quiet Zone)", *Australian Communications and Media Authority*, Australia, 11 de Julio de 2011. Consultado el 21 de mayo de 2020, disponible en: <https://www.legislation.gov.au/Details/F2011L01520>
14. ACMA, "Radiocommunications Act 1992, N° 174, 1992", *Australian Department of Infrastructure, Transport, Regional Development and Communications*, Australia, 11 de septiembre de 2019. Consultado el 19 de Mayo de 2020, disponible en: <https://www.legislation.gov.au/Details/C2019C00262>
15. Alessandrini, et al., Adriano, *Automated Road Transport Systems (ARTS)–The Safe Way to Integrate Automated Road Transport in Urban Areas*, Estados Unidos, Springer, 2015.
16. Alnasser, Aljawharah et al., "Cyber security challenges and solutions for V2X communications: A survey", *Elsevier*, 14 de marzo de 2019. Consultado el 10 de mayo de 2022, disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1389128618306157>
17. Anatel, "Anexo I requisitos técnicos para a avaliação da conformidade de equipamentos de radiocomunicação de radiação restrita", Agência Nacional de Telecomunicações, 4 de diciembre de 2017. Consultado el 7 de diciembre de 2020, disponible en: <https://www.anatel.gov.br/legislacao/atos-de-certificacao-de-produtos/2017/1139-ato-14448#anexoI>
18. Anatel, "Ato nº 4776, de 01 de setembro de 2020", Agência Nacional de Telecomunicações, 1 de septiembre de 2020. Consultado el 7 de diciembre de 2020, disponible en: <https://www.anatel.gov.br/legislacao/es/atos-de-certificacao-de-produtos/2020/1467-ato-4776>
19. Anttalainen, Tramo y Jaäskeläinen, Ville, *Introduction to communication networks*, 1ª ed, Estados Unidos, Artech House, 2014.
20. Anwar, Waqar et al., *Physical Layer Evaluation of V2X Communications Technologies: 5G NR-V2X, LTE-V2X, IEEE 802.11bd, and IEEE 802.11p*, Estados Unidos, IEEE 90th Vehicular Technology Conference, 2019.
21. ARPANSA, "Radiation Protection Standard for Maximum Exposure Levels to Radiofrequency Fields – 3 kHz to 300 GHz", *Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency*, 2002. Consultado el 21 de Mayo de 2020, disponible en: <https://www.arpansa.gov.au/sites/default/files/legacy/pubs/rps/rps3.pdf>

22. ASTM E2213-03, "Standard Specification for Telecommunications and Information Exchange Between Roadside and Vehicle Systems—5 GHz Band Dedicated Short Range Communications (DSRC) Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications", *ASTM International*, septiembre de 2013. Consultado el 14 de Mayo de 2020, disponible en: <https://www.astm.org/READINGLIBRARY/VIEW/E2213-03.html>
23. ASTM E2665-08, "ASTM E2665-08 - Standard Specifications for Archiving ITS-Generated Traffic Monitoring Data", *U.S. DOT*, Estados Unidos, 28 de septiembre de 2009. Consultado el 21 de febrero de 2022, disponible en: <https://www.standards.its.dot.gov/Factsheets/PrintFactsheet/74>
24. ASTM, "Standard Specification for Telecommunications and Information Exchange Between Roadside and Vehicle Systems – 5 GHz Band Dedicated Short Range Communications (DSRC) Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications", *American Society for Testing and Materials*, Estados Unidos, 2018.
25. Baldini, Gianmarco *et al.*, "Regulated applications for the road transportation infrastructure: The case study of the smart tachograph in the European Union", *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, Italia, junio de 2018.
26. Buford, John *et al.*, *P2P Networking and Applications*, 1ª ed, Estados Unidos, Morgan Kaufmann, 2008.
27. CENIDET, "Dra. Alicia Martínez Rebollar", Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, México, 2019. Consultado el 30 de agosto de 2021, disponible en: <https://www.cenidet.edu.mx/archivos/cv/computacion/Alicia%20Martinez%20Rebollar.pdf>
28. CEPT y ECC, "ECC Decision (08)01, The harmonised use of Safety-Related Intelligent Transport Systems (ITS) in the 5875-5935 MHz frequency band", *Electronic Communications Committee*, Dinamarca, 6 de marzo de 2020. Consultado el 12 de agosto de 2020, disponible en: <https://www.ecodocdb.dk/download/b470d271-048b/ECCDEC0801.PDF>
29. CEPT, "CEPT Report 71 Report from CEPT to the European Commission in response to the Mandate to study the extension of the Intelligent Transport Systems (ITS) safety-related band at 5.9 GHz", *Electronic Communications Committee*, Bélgica, 8 de marzo de 2019. Consultado el 5 de octubre de 2023, disponible en: <https://docdb.cept.org/download/126>
30. Chen, Shuai *et al.*, "Key Indices Analysis of IEEE 802.11p Based Vehicle to Infrastructure System in Highway Environment", *Elsevier*, China, 2013. Consultado el 29 de abril de 2022, disponible en: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S1877042813021514?token=B75CC0060DD82367F875DF47884A4867CA38BD9DF89E90B520112C3EDD9AFB04FD144CFFD3AC93603CD709B23C0800C5>
31. Dahlman, Erik *et al.*, *4G LTE-Advanced Pro and The Road to 5G*, 3a ed., Reino Unido, Academic Press, 2016.
32. ECC, "ECC REPORT 101 COMPATIBILITY STUDIES IN THE BAND 5855– 5925 MHz BETWEEN INTELLIGENT TRANSPORT SYSTEMS (ITS) AND OTHER SYSTEMS", *European Conference of Postal and Telecommunications Administrations*, Suiza,

- febrero de 2007. Consultado el 9 de octubre de 2023, disponible en: <https://docdb.cept.org/download/67742f5a-d879/ECCREP101.PDF>
33. ECC, "ECC Recommendation (08)01, Use of the band 5855-5875 MHz for Intelligent Transport Systems (ITS)", *Electronic Communications Committee*, Dinamarca, 6 de marzo de 2020. Consultado el 12 de agosto de 2020, disponible en: <https://www.ecodocdb.dk/download/798c1836-20c6/REC0801.pdf>
 34. El Economista, "La frontera México-Estados Unidos, una región clave", *El Economista*, México, 2022. Consultado el 13 de junio de 2025, disponible en: <https://www.eleconomista.com.mx/opinion/La-frontera-Mexico-Estados-Unidos-una-region-clave-20220919-0048.html>
 35. ERC, "THE EUROPEAN TABLE OF FREQUENCY ALLOCATIONS AND APPLICATIONS IN THE FREQUENCY RANGE 9 kHz to 3000 GHz (ECA TABLE)", *European Radiocommunications Committee*, 2011, Dinamarca. Consultado el 26 de agosto de 2020, disponible en: https://www.ecodocdb.dk/download/2ca5fcbd-4090/attachments/2011_ERCRep025.pdf
 36. ETSI, "ETSI EN 302 571 Intelligent Transport Systems (ITS); Radiocommunications equipment operating in the 5 855 MHz to 5 925 MHz frequency band; Harmonised Standard covering the essential requirements of article 3.2 of Directive 2014/53/EU", *European Telecommunications Standards Institute*, Francia, 6 de febrero de 2017. Consultado el 9 de octubre de 2023, disponible en: https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302500_302599/302571/02.01.01_60/en_302571v020101p.pdf
 37. ETSI, "ETSI TS 136 213 V14.2.0 (2017-04) LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures (3GPP TS 36.213 version 14.2.0 Release 14)", *European Telecommunications Standards Institute*, Francia, abril de 2017. Consultado el 2 de mayo de 2022, disponible en: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136200_136299/136213/14.02.00_60/ts_136213v140200p.pdf
 38. ETSI, "Intelligent Transport Systems (ITS); Access layer specification for Intelligent Transport Systems operating in the 5 GHz frequency band", *European Telecommunications Standards Institute*, Francia, mayo de 2019. Consultado el 2 de mayo de 2022, disponible en: https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302600_302699/302663/01.03.00_20/en_302663v010300a.pdf
 39. ETSI, "Intelligent Transport Systems (ITS); Radiocommunications equipment operating in the 5 855 MHz to 5 925 MHz frequency band; Harmonised Standard covering the essential requirements of article 3.2 of Directive 2014/53/EU", *European Telecommunications Standards Institute*, Francia, febrero de 2017. Consultado el 2 de mayo de 2022, disponible en: https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302500_302599/302571/02.01.01_60/en_302571v020101p.pdf
 40. ETSI, "ETSI EN 302 571 v2.1.1 Intelligent Transport Systems (ITS); Radiocommunications equipment operating in the 5 855 MHz to 5 925 MHz frequency band; Harmonised Standard covering the essential requirements of article 3.2 of Directive 2014/53/EU", *European Telecommunications Standards Institute*,

- febrero de 2017. Consultado el 7 de diciembre de 2020, disponible en: https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302500_302599/302571/02.01.01_60/en_302571v020101p.pdf
41. European Commission, "Support Study for the ex-post evaluation of the ITS Directive 2010/40/EU", *Publications Office of the European Union*, Luxemburgo, 2019. Consultado el 12 de agosto de 2020, disponible en: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/61597d8c-e99e-11e9-9c4e-01aa75ed71a1>
 42. European Parliament, "DIRECTIVE 2010/40/EU OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL", *European Parliament, Council of the European Union*, 2010. Consultado el 12 de agosto de 2020, disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:02010L0040-20180109>
 43. FCC, "FIRST REPORT AND ORDER, FURTHER NOTICE OF PROPOSED RULEMAKING, AND ORDER OF PROPOSED MODIFICATION", *Federal Communications Commission*, Estados Unidos, 20 de noviembre de 2020. Consultado el 22 de junio de 2022, disponible en: https://docs.fcc.gov/public/attachments/FCC-20-164A1_Rcd.pdf
 44. FCC, "Title 47, Chapter I, Subchapter D, Part 90—PRIVATE LAND MOBILE RADIO SERVICES", *Electronic Code of Federal Regulations*, Estados Unidos, 10 de febrero de 2023. Consultado el 5 de octubre de 2023, disponible en: <https://www.ecfr.gov/current/title-47/chapter-I/subchapter-D/part-90#sp47.5.90>
 45. FCC, "Amendment of Parts 2 and 90 of the Commission's Rules to Allocate the 5.850-5.925 GHz Band to the Mobile Service for Dedicated Short Range Communications of Intelligent Transportation Services", *Federal Communications Commission*, Estados Unidos, 21 de octubre de 1999. Consultado el 7 de octubre de 2021, disponible en: <https://docs.fcc.gov/public/attachments/FCC-99-305A1.pdf>
 46. FCC, "Amendment of the Commission's Rules Regarding Dedicated Short-Range Communication Services in the 5.850-5.925 GHz Band (5.9 GHz Band)", *Federal Communications Commission*, Estados Unidos, 17 de diciembre de 2003. Consultado el 7 de octubre de 2021, disponible en: <https://docs.fcc.gov/public/attachments/FCC-03-324A1.pdf>
 47. FCC, "DSRC and U-NII-4 Prototype Device Testing", *Federal Communications Commission*, Estados Unidos. Consultado el 11 de noviembre de 2021, disponible en: <https://www.fcc.gov/oet/unii-4banddevice>
 48. FCC, "Form 601, Application for Radio Service Authorization", *Federal Communications Commission*, Estados Unidos, 7 de agosto de 2016. Consultado el 24 de abril de 2020, disponible en: <https://transition.fcc.gov/Forms/Form601/601.pdf>
 49. FCC, "Title 47, Chapter I, Subchapter A, Part 1—PRACTICES AND PROCEDURE", *Electronic Code of Federal Regulations*, Estados Unidos, 14 de Agosto de 2020. Consultado el 16 de agosto de 2020, disponible en: https://www.ecfr.gov/cgi-bin/text-idx?SID=9c23ba16452c1baa6776eec2bea2b3e7&mc=true&node=se47.1.2_1803&rgn=div8
 50. FCC, "Title 47, Chapter I, Subchapter A, Part 2—FREQUENCY ALLOCATIONS AND RADIO TREATY MATTERS; GENERAL RULES AND REGULATIONS", *Electronic Code of Federal Regulations*, Estados Unidos, 23 de abril de 2020. Consultado el 8 de mayo

- de 2020, disponible en: <https://gov.ecfr.io/cgi-bin/text-idx?SID=ca4ca93aa4dabfc9a8665d1e9373a26e&mc=true&node=pt47.1.2&rgn=div5#sp47.1.2.b>
51. FCC, "Title 47, Chapter I, Subchapter D, Part 90, Subpart L- Authorization in the Band 470-512 MHz (UHF-TV Sharing)", *Electronic Code of federal Regulations*, Estados Unidos. Consultado el 24 de abril de 2020: <https://www.ecfr.gov/cgi-bin/text-idx?SID=019cdede0f1f5be7bf08d0b7c4d6ab7f&mc=true&node=pt47.5.90&rgn=div5#sp47.5.90.I>
 52. FCC, "Title 47, Chapter I, Subchapter D, Part 90—PRIVATE LAND MOBILE RADIO SERVICES, Subpart M-Intelligent Transportation Systems Radio Service", *Electronic Code of Federal Regulations*, Estados Unidos, 7 de noviembre de 2000. Consultado el 13 de octubre de 2021, disponible en: <https://gov.ecfr.io/cgi-bin/text-idx?SID=d8e30bb8cd020cb6dc3187fd40768c9b&mc=true&node=pt47.5.90&rgn=div5#sp47.5.90.a>
 53. FCC, "Title 47, Chapter I, Subchapter D, Part 95—PERSONAL RADIO SERVICES, Subpart L-DSRCS On-Board Units", *Electronic Code of Federal Regulations*, Estados Unidos, 3 de mayo de 2021. Consultado el 5 de octubre de 2023, disponible en: <https://www.ecfr.gov/current/title-47/chapter-I/subchapter-D/part-95/subpart-L>
 54. FCC, "Use of the 5.850-5.925 GHz Band", *Federal Communications Commission*, Estados Unidos, 18 de noviembre de 2020. Consultado el 13 de octubre de 2021, disponible en: <https://docs.fcc.gov/public/attachments/FCC-20-164A1.pdf>
 55. FCC, "Use of the 5.850-5.925 GHz Band", *Federal Register*, Estados Unidos, 3 de mayo de 2021. Consultado el 29 de septiembre de 2021, disponible en: <https://www.federalregister.gov/documents/2021/05/03/2021-08801/use-of-the-5850-5925-ghz-band>
 56. Fernandes, Bruno et al., *Implementation and Analysis of IEEE and ETSI Security Standards for Vehicular Communications*, Springer, 2018.
 57. FHA, *NATIONAL PROGRAM PLAN FOR INTELLIGENT VEHICLE-HIGHWAY SYSTEM (IVHS)*, 1ª ed., Estados Unidos, Federal Highway Administration, 1993.
 58. Fischer-Hübner, Simone, *Encyclopedia of Database Systems*, 1a ed., Estados Unidos, Springer, 2009.
 59. FIWARE, "WHAT IS FIWARE?", *FIWARE*. Consultado el 30 de agosto de 2021, disponible en: <https://www.fiware.org/about-us/>
 60. Haidine, Abdelfatteh, *An LTE-Direct-Based Communication System for Safety Services in Vehicular Networks*, Reino Unido, IntechOpen, 2021.
 61. Harounabadi, Mehdi et al., *V2X in 3GPP Standardization: NR Sidelink in Rel-16 and Beyond*, IEEE Communications Standards Magazine, 2021.
 62. Hedge, A. and Festag, A., "Mode Switching Strategies in Cellular-V2X", *Elsevier*, 2019. Consultado el 2 de mayo de 2022, disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896319303829>
 63. IEEE, *ISO/IEC 8802-2:1998 Information technology— Telecommunications and information exchange between systems— Local and metropolitan area networks— Specific requirements— Part 2: Logical Link Control*, 3a ed., Estados Unidos, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1998.

64. IFT, "ACUERDO mediante el cual el Pleno del Instituto Federal de Telecomunicaciones modifica el Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias", *Diario Oficial de la Federación*, México, 10 de septiembre de 2024. Consultado el 9 de mayo de 2025, disponible en: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5738653&fecha=10/09/2024#gs.c.tab=0radioelectrico/cuadro-nacional-de-atribucion-de-frecuencias-cnaf
65. IFT, "ACUERDO mediante el cual el Pleno del Instituto Federal de Telecomunicaciones expide los Lineamientos para la homologación de productos, equipos, dispositivos o aparatos destinados a telecomunicaciones o radiodifusión.", *Instituto Federal de Telecomunicaciones*, México, 29 de diciembre de 2021. Consultado el 21 de junio de 2022, disponible en: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5639645&fecha=29/12/2021#gs.c.tab=0https
66. IFT, "INFORME DE CONSIDERACIONES DE LOS COMENTARIOS, OBSERVACIONES, PROPUESTAS Y/O APORTACIONES RECIBIDAS DURANTE LA CONSULTA PÚBLICA DE INTEGRACIÓN DEL "CUESTIONARIO SOBRE NECESIDADES DE ESPECTRO PARA SISTEMAS DE TRANSPORTE INTELIGENTE EN LA BANDA 5850-5925 MHz"", *Instituto Federal de Telecomunicaciones*, México, 25 de octubre de 2021. Consultado el 8 de junio de 2022, disponible en: <http://www.ift.org.mx/sites/default/files/industria/temasrelevantes/17437/documentos/informedeconsideracionescpi-sti-5ghz002.pdf>
67. IFT, "Registro Público de Concesiones", *Instituto Federal de Telecomunicaciones*, México. Consultado el 9 de junio de 2022, disponible en: <https://rpc.ift.org.mx/vrpc>
68. INCIBE, "Glosario de términos de ciberseguridad", *INSTITUTO NACIONAL DE CIBERSEGURIDAD*, España, 2021. Consultado el 30 de agosto de 2021, disponible en: https://www.incibe.es/sites/default/files/contenidos/guias/doc/guia_glosario_ciberseguridad_2021.pdf
69. INEGI, "DR. HUGO ESTRADA ESQUIVEL", *Instituto Nacional de Estadística y Geografía*, México, 2017. Consultado el 30 de agosto de 2021, disponible en: https://www.inegi.gob.mx/eventos/2017/conacyt/doc/s_HugoEstrada.pdf
70. ISED, "Canadian Table of Frequency Allocations (2018 Edition)", *Innovation, Science and Economic Development Canada*, Canadá, abril de 2018. Consultado el 13 de mayo de 2020, disponible en: [https://www.ic.gc.ca/eic/site/smt-gst.nsf/vwapj/SMSE-07-18-CTFA-2018.pdf/\\$file/SMSE-07-18-CTFA-2018.pdf](https://www.ic.gc.ca/eic/site/smt-gst.nsf/vwapj/SMSE-07-18-CTFA-2018.pdf/$file/SMSE-07-18-CTFA-2018.pdf)
71. ISED, "Radiocommunication Regulations", *Innovation, Science and Economic Development Canada*, Canadá, 2014. Consultado el 13 de mayo de 2020, disponible en: <https://laws-lois.justice.gc.ca/eng/regulations/sor-96-484/FullText.html>
72. ISED, "RSS-137: Location and Monitoring Service in the Band 902-928 MHz", *Innovation, Science and Economic Development Canada*, Canadá, febrero de 2009. Consultado el 14 de mayo de 2020, disponible en: <https://www.ic.gc.ca/eic/site/smt-gst.nsf/eng/sf01521.html>
73. ISED, "RSS-252: Intelligent Transportation Systems – Dedicated Short Range Communications (DSRC) – On-Board Unit (OBU)", *Innovation, Science and Economic Development Canada*, Canadá, septiembre de 2017. Consultado el 29 de abril de 2020, disponible en: <https://www.ic.gc.ca/eic/site/smt-gst.nsf/eng/sf11325.html>

74. ISED, "RSS-252: Intelligent Transportation Systems – Dedicated Short Range Communications (DSRC) – On-Board Unit (OBU)", *Innovation, Science and Economic Development Canada*, Canadá, septiembre de 2017. Consultado el 29 de abril de 2020, disponible en: [https://www.ic.gc.ca/eic/site/smt-gst.nsf/vwapj/RSP-100-issue11.pdf/\\$file/RSP-100-issue11.pdf](https://www.ic.gc.ca/eic/site/smt-gst.nsf/vwapj/RSP-100-issue11.pdf/$file/RSP-100-issue11.pdf)
75. ISED, "RSS-Gen: General Requirements for Compliance of Radio Apparatus", *Innovation, Science and Economic Development Canada*, Canadá, marzo de 2019. Consultado el 29 de abril de 2020, disponible en: [https://www.ic.gc.ca/eic/site/smt-gst.nsf/vwapj/RSS-Gen1amend12019-04EN.pdf/\\$FILE/RSS-Gen1amend12019-04EN.pdf](https://www.ic.gc.ca/eic/site/smt-gst.nsf/vwapj/RSS-Gen1amend12019-04EN.pdf/$FILE/RSS-Gen1amend12019-04EN.pdf)
76. ISED, "SAB-001-17 – Displacement of Existing Fixed Service Assignments in the Frequency Band 5850–5925 MHz", *Innovation, Science and Economic Development Canada*, Canadá, febrero de 2017. Consultado el 13 de mayo de 2020, disponible en: <http://www.ic.gc.ca/eic/site/smt-gst.nsf/eng/sf11264.html>
77. ISED, "Spectrum Outlook 2018 to 2022", *Innovation, Science and Economic Development Canada*, Canadá, 6 de junio de 2018. Consultado el 14 de mayo de 2020, disponible en: <http://www.ic.gc.ca/eic/site/smt-gst.nsf/eng/sf11403.html>
78. ISED, "Technical and Licensing Requirements to Introduce Dedicated Short-Range Communications-based Intelligent Transportation Systems Applications in the Band 5850-5925", *Innovation, Science and Economic Development Canada*, Canadá, octubre de 2004. Consultado el 13 de mayo de 2020, disponible en: [https://www.ic.gc.ca/eic/site/smt-gst.nsf/vwapj/consultation-shorrange-e.pdf/\\$FILE/consultation-shorrange-e.pdf](https://www.ic.gc.ca/eic/site/smt-gst.nsf/vwapj/consultation-shorrange-e.pdf/$FILE/consultation-shorrange-e.pdf)
79. ITU-R, "Report ITU-R M.2520-0 The use of the terrestrial component of International Mobile Telecommunications for the Cellular-Vehicle-to-Everything", *Unión Internacional de Telecomunicaciones. Sector de Radiocomunicaciones*, Suiza, 2023. Consultado el 13 de abril de 2023, disponible en: https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2520-2022-PDF-E.pdf
80. Jao, David, *Handbook of Information and Communication Security*, 1ª ed., Alemania, Springer, 2010.
81. Jiang, Daniel y Delgrossi, Luca, *IEEE 802.11p: Towards an International Standard for Wireless Access in Vehicular Environments*, Singapur, IEEE Vehicular Technology Conference, 2008.
82. Karoui, Mouna et al., *Performance comparison between LTE-V2X and ITS-G5 under realistic urban scenarios*, Bélgica, *IEEE VTC-spring*, 2020.
83. Kumar Gulia, Aman, "A Simulation Study on the Performance Comparison of the V2X Communication Systems: ITSG5 and C-V2X", *KTH VETENSKAP OCH KONST*, Suiza, 2020. Consultado el 2 de mayo de 2022, disponible en: <http://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:1422828/FULLTEXT01.pdf>
84. Ling, Yun, et al., *RSA-based secure electronic cash payment system*, Singapur, 2007 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, 2007.
85. Martin, Klapez, "Minimization of IEEE 802.11p Packet Collision Interference through Transmission Time Shifting", *Journal of Sensor and Actuator Networks*, Italia, 2020.

Consultado el 29 de abril de 2022, disponible en: <https://www.mdpi.com/2224-2708/9/2/17>

86. Mouna et al., Karoui, *Performance comparison between LTE-V2X and ITS-G5 under realistic urban scenarios*, Bélgica, IEEE VTC-spring, 2020.
87. Nardini, Giovanni *et al.*, "Cellular-V2X Communications for Platooning: Design and Evaluation", *Sensors*, 11 de mayo de 2018. Consultado el 3 de agosto de 2023, disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5981612/>.
88. NIST, "Archived NIST Technical Series Publication", *National Institute of Standards and Technology, Estados Unidos*, mayo de 2017. Consultado el 19 de abril de 2022, disponible en: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/SP/nistspecialpublication800-121r1.pdf>
89. Oliver, Yu y Cao Yuan, "Dynamic Groupcast Traffic Grooming in WDM Networks", *Institute of Electrical Electronics Engineers*, Estados Unidos, 2006.
90. Plonus, Martin, *Electronics and Communications for Scientists and Engineers*, 2a ed., Reino Unido, Butterworth-Heinemann, 2020.
91. Prabhat, Singh, Ghanshyam y Thakur, *Spectrum Sharing in Cognitive Radio Networks: Towards Highly Connected Environments*, 1a ed., Estados Unidos, Wiley, 2021.
92. Qualcomm, "Global update on 5G spectrum", *Qualcomm*, noviembre de 2019. Consultado el 2 de agosto de 2023, disponible en: <https://www.qualcomm.com/content/dam/qcomm-martech/dm-assets/documents/spectrum-for-4g-and-5g.pdf>
93. Rebbeck, Tom et al., "FINAL REPORT FOR 5GAA SOCIO-ECONOMIC BENEFITS OF CELLULAR V2X", *Analysys Mason*, Reino Unido, diciembre de 2017. Consultado el 2 de mayo de 2022, disponible en: https://5gaa.org/wp-content/uploads/2017/12/Final-report-for-5GAA-on-cellular-V2X-socio-economic-benefits-051217_FINAL.pdf
94. RIT, "Security in V2V and V2N Communication", *Rochester Institute of Technology*, Estados Unidos, 2021. Consultado el 10 de mayo de 2022, disponible en: https://www.rit.edu/wisplab/sites/rit.edu.wisplab/files/2021-10/V2V_Security_updated_10_10_2021.pdf
95. Rodríguez Saiz, Aida, "TECNOLOGÍAS C-V2X Y DSRC PARA EL VEHÍCULO CONECTADO EN REDES DE NUEVA GENERACIÓN", *Universitat Oberta de Catalunya*, España, 11 de junio de 2020. Consultado el 2 de mayo de 2022, disponible en: <http://openaccess.uoc.edu/webapps/o2/bitstream/10609/117806/6/arosa92TFM0620memoria.pdf>
96. Saad, Aws et al., "Vehicular Ad Hoc Networks: Growth and Survey for Three Layers", *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, febrero de 2017. Consultado el 29 de abril de 2022, disponible en: <http://ijece.iaescore.com/index.php/IJECE/article/view/6278>
97. SAE International, *Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles*, Estados Unidos, SAE International, 2018.
98. Schlien, J. y Roessler, A., "Device to Device Communication in LTE", *ROHDE & SCHWARZ*, Alemania, 29 de septiembre de 2015. Consultado el 2 de mayo de 2022, disponible en: <https://cdn.rohde->

- [schwarz.com/pws/dl_downloads/dL_application/application_notes/1ma264/1MA264_0e_D2DComm.pdf](https://www.schwarz.com/pws/dl_downloads/dL_application/application_notes/1ma264/1MA264_0e_D2DComm.pdf)
99. Shladover, Steven E., Advanced Vehicle Control Systems (AVCS), Estados Unidos, *IEEE International Congress on Transportation Electronics*, 2002.
 100. Shladover, Steven, et al., *Road Vehicle Automation 2*, Suiza, Springer, 2014.
 101. Tahir, Muhammad Naeem and Katz, Marcos, "Heterogeneous (ITS-G5 and 5G) Vehicular Pilot Road Weather Service Platform in a Realistic Operational Environment", *Sensors*, Suiza, 2021. Consultado el 9 de mayo de 2022, disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7957786/pdf/sensors-21-01676.pdf>
 102. UIT-R "Report ITU-R M.2445-0 (11/2018) Intelligent transport systems (ITS) usage", *Unión Internacional de Telecomunicaciones. Sector de Radiocomunicaciones*, Suiza, 2019. Consultado el 29 de abril de 2022, disponible en: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiSwuP-gbr3AhWJDkQIHdz-AV8QFnoECAQQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.itu.int%2Fdms_pub%2Fitu-r%2Fopb%2Frep%2FR-REP-M.2445-2018-PDF-E.pdf&usq=AOvVaw2_tFNh6XpVvg_QB9O_E9pf
 103. UIT-R "Rec. UIT-R M.2121-0 Harmonization of frequency bands for Intelligent Transport Systems in the mobile service", *Unión Internacional de Telecomunicaciones. Sector de Radiocomunicaciones*, Suiza, enero de 2019. Consultado el 19 de marzo de 2020, disponible en: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.2121-0-201901-!//PDF-E.pdf
 104. UIT-R "REPORT ITU-R M.2445-0-Intelligent transport systems (ITS) usage", *Unión Internacional de Telecomunicaciones. Sector de Radiocomunicaciones*, noviembre de 2018. Consultado el 29 de abril de 2022, disponible en: https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2445-2018-PDF-E.pdf
 105. UIT-R, "Manual sobre comunicaciones móviles terrestres (incluido el acceso inalámbrico) SISTEMAS DE TRANSPORTE INTELIGENTE", *Unión Internacional de Telecomunicaciones. Sector de Radiocomunicaciones*, Suiza, 2006. Consultado el 3 de abril de 2020, disponible en: https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/hdb/R-HDB-49-2006-OAS-PDF-S.pdf
 106. UIT-R, "Recommendation ITU-R M.1890-1. Operational radiocommunication objectives and requirements for advanced Intelligent Transport Systems", *Unión Internacional de Telecomunicaciones. Sector de Radiocomunicaciones*, Suiza, enero de 2019. Consultado el 23 de marzo de 2020, disponible en: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.1890-1-201901-!//PDF-E.pdf
 107. UIT-R, "Rep. ITU-R M.2228-1. Advanced intelligent transport systems radiocommunications", *Unión Internacional de Telecomunicaciones. Sector de Radiocomunicaciones*, Suiza, julio de 2015. Consultado el 19 de marzo de 2020, disponible en: https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2228-1-2015-PDF-E.pdf
 108. UIT-R, "Rep. ITU-R M.2445-0. Intelligent transport systems (ITS) usage", *Unión Internacional de Telecomunicaciones. Sector de Radiocomunicaciones*, Suiza,

- noviembre de 2018. Consultado el 17 de marzo de 2020, disponible en: https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2445-2018-PDF-E.pdf
109. UIT-R, "REPORT ITU-R M.2445-0-Intelligent transport systems (ITS) usage", *Unión Internacional de Telecomunicaciones. Sector de Radiocomunicaciones*, noviembre de 2018, consultado el 30 de mayo del 2020, disponible en: https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2445-2018-PDF-E.pdf
 110. UNAM, "Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería de Sistemas", *Universidad Nacional Autónoma de México*, México, 2017. Consultado el 30 de agosto de 2021, disponible en: <https://www.ingenieria.unam.mx/sistemas/PDF/Semblanzas/ALC.pdf>
 111. Vukadinovic, Vladimir et al., "3GPP C-V2X and IEEE 802.11p for Vehicle-to-Vehicle communications in highway platooning scenarios", *Elsevier*, 15 de mayo de 2018. Consultado el 2 de mayo de 2022, disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S157087051830057X>
 112. WiFi Alliance, "What is dynamic frequency selection (DFS)?", *WiFi Alliance*. Consultado el 19 de abril de 2022, disponible en: <https://www.wi-fi.org/knowledge-center/faq/what-is-dynamic-frequency-selection-dfs>
 113. Yu, Jiang, "An Analysis on Absolute Velocity", *Journal of Physical Mathematics*, China, 2016. Consultado el 31 de marzo de 2023, disponible en: <https://projecteuclid.org/journals/journal-of-physical-mathematics/volume-7/issue-3/An-Analysis-on-Absolute-Velocity/10.4172/2090-0902.1000188.full>
 114. Zbigniew, Oziewicz y Page, William S., "Concepts of relative velocity", *arXiv*, 29 de marzo de 2011. Consultado el 31 de marzo de 2023, disponible en: <https://arxiv.org/pdf/1104.0684.pdf>



Lujano Giron, Allan, *et al.*, *Sistemas de Transporte Inteligente*, México, Instituto Federal de Telecomunicaciones, 9 de junio de 2025.

Ciudad de México, México.
Instituto Federal de Telecomunicaciones © 2025