



CENID CENTRO DE
INTELIGENCIA DIGITAL
PROVINCIA DE ALICANTE

5G y Conducción Autónoma para la Digitalización de la Movilidad

Universidad Miguel Hernández de Elche (UMH)

Autores: Baldomero Coll Perales, Javier Gozávez Sempere, Miguel Sepulcre Ribes y María del Carmen Lucas Estañ

19 de noviembre de 2021

Contenido

Listado de acrónimos	4
Listado de Figuras	6
Listado de Tablas	8
1 Introducción	9
1.1 Objetivos	11
1.2 Difusión y publicidad	12
2 Estado de la tecnología 5G NR V2X.....	13
2.1 Evolución hacia 5G NR V2X.....	13
2.2 LTE-V2X	14
2.3 Servicios 5G NR V2X	16
2.4 Arquitectura de 5G para comunicaciones V2X	18
2.5 Capa física	19
2.6 Gestion de recursos radio.....	20
2.6.1 Modo 1.....	20
2.6.2 Modo 2.....	22
3 Simulador de comunicaciones 5G NR V2X	28
3.1 Implementación de 5G NR V2X	29
3.1.1 Módulos	29
3.1.2 Arquitectura de la implementación en la plataforma software	29
3.1.3 Capa MAC.....	32
3.1.4 Implementación de la capa PHY NR V2X	47
3.1.5 Implementación de canal radio NR V2X	54
3.1.6 Configuración de las simulaciones	57
3.2 Evaluación del rendimiento de 5G NR V2X.....	59
3.2.1 Parámetros de evaluación.....	60
3.2.2 Métricas	60
3.2.3 Impacto del tipo de tráfico	61
3.2.4 Impacto de re-evaluation	64
4 Prototipo de comunicaciones 5G NR V2X OAI	71
4.1 Arquitectura de la implementación en la plataforma hardware	72

4.2	Implementación del scheduler 5G NR V2X.....	74
4.2.1	Integración en OAI y flujo de datos.....	74
4.2.2	Scheduler: sensing-based semi-persistent scheduling.....	78
4.3	APP.....	87
4.4	Módulo Proxy.....	87
4.4.1	Módulo de recepción.....	89
4.4.2	Módulo de replicación.....	90
4.4.3	Módulo de decisión y transmisión.....	90
4.5	Validación y evaluación.....	91
4.5.1	Herramientas de validación.....	91
4.5.2	Validación.....	97
4.5.3	Evaluación de 5G NR V2X en OAI utilizando Lightweight UE.....	106
5	Conclusiones.....	111
	Referencias.....	114

Listado de acrónimos

3GPP	3rd Generation Partnership Project
5GAA	5G Automotive Association
5GC	5G Core
5GS	5G System
AMF	Access and Mobility Management Function
AS	Application Server
BLER	Block Error Ratio
BSM	Basic Safety Messages
BW	BandWidth
CAM	Cooperative Awareness Messages
CBR	Channel Busy Ratio
CG	Configured Grant
CLR	Collision Losses Ratio
C-V2X	Cellular V2X
DL	Downlink
DS	Dynamic Scheme
E2E	End-to-End
HPLMN	Home Public Land Mobile Network
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
ITS	Intelligent Transportation Systems
LOS	Line-Of-Sight
LTE	Long Term Evolution o también conocida como tecnología 4G
LTE-V	LTE-Vehicular
LUE	Lightweight UE
LUT	LookUp Table
MAC	Medium Access Control
MCS	Modulation and Coding Scheme
NEF	Network Exposure Function
NF	Network Functions
NG-RAN	Next Generation Radio Access Network
NLOS	Non-Line-Of-Sight
NLOSv	NLOS vehicular
NR	New Radio
NRF	Network Repository Function
NWDAF	Network Data Analytics Function
OAI	Open Air Interface

PCF	Policy Control Function
PDB	Packet Delay Budget
PDCP	Packet Data Convergence Protocol
PHY	Physical
PLR	Propagation Losses
ProSe	Proximity Services
RC	Reselection Counter
RB	Resource Block
RLC	Radio Link Control
RRI	Resource Reservation Interval
RSRP	Received Signal Received Power
RSSI	Receive Signal Strength Indicator
RSU	RoadSide Unit
RX	Receiver
SC-FDMA	Single-Carrier Frequency Division Multiple Access
SDR	Software Defined Radio
SNR	Signal to Noise Ratio
TB	Transport Block
TX	Transmitter
UE	User Equipment
SCS	Sub Carrier Spacing
SCI	Sidelink Control Information
SL	Sidelink
SMF	Session Management Function
SR	Scheduling Request
SPS	Semi-Persistent Scheduling
UDR	Unified Data Repository
UDM	Unified Data Management
UL	Uplink
UPF	User Plane Function
V2I	Vehicle-to-Infrastructure
V2P	Vehicle-to-Pedestrian
V2V	Vehicle-to-Vehicle
V2X	Vehicle-to-Everything
VPLMN	Visited Public Land Mobile Network

Listado de Figuras

Figura 1. Estructura tiempo-frecuencia de la capa física de LTE-V2X y ejemplo del uso del mecanismo de scheduling <i>sensing-based SPS</i> de modo 4.	16
Figura 2. Arquitectura 5G para comunicaciones V2X basadas en la interfaz PC5 y Uu.....	19
Figura 3. Ejemplos de recursos asignados a un UE utilizando el mecanismo <i>configured grant</i> del modo 1 de gestión de recursos radio de 5G NR V2X.	21
Figura 4. Comparativa entre los mecanismos de gestión de recursos del modo 1 de 5G NR V2: <i>dynamic grant</i> y <i>configured grant</i>	22
Figura 5. Representación de las ventanas de selección (<i>selection window</i>) y de sensado (<i>sensing window</i>) del modo 2 de asignación de recursos de 5G NR V2X (ejemplo para el caso de que $T_2 = PDB$).	24
Figura 6. Proceso de selección de recursos radio para las N transmisiones (transmisión inicial y $N-1$ retransmisiones) en modo 2.	26
Figura 7. Nueva ejecución del paso 2 cuando se detecta <i>re-evaluation</i> en el modo 2 de gestión de recursos de 5G NR V2X.	27
Figura 8. Arquitectura de la implementación de 5G NR V2X en ns-3.....	30
Figura 9. Modelo de paquete NR-V2X (SCI + TB) en ns-3.	32
Figura 10. Diagrama general de la implementación de la capa MAC de 5G NR V2X en ns-3.	34
Figura 11. Diagrama de flujo NR-V2X-Mac::ResourceAllocation (SPS).....	37
Figura 12. Diagrama de flujo NR-V2X-Mac::ResourceAllocation (Dynamic Scheme).....	38
Figura 13. Implementación del paso 1 de 5G NR V2X Modo 2.....	40
Figura 14. Implementación del paso 2 de 5G NR V2X Modo 2.....	42
Figura 15. Implementación del mecanismo de re-evaluation de 5G NR V2X Modo 2.....	44
Figura 16. Implementación de la función NR-V2X-Mac::ReceiveAndReserve.....	46
Figura 17. Diagrama general de la capa NR-V2X-Phy.....	48
Figura 18. Diagrama general de la función NR-V2X-Phy::Numerology.....	49
Figura 19. Diagrama de flujo de la función NR-V2X-Phy::RxMiddle.....	50
Figura 20. Diagrama de flujo de la función NR-V2X-Phy::MarkPacket_OK_Error.....	53
Figura 21. Diagrama general de NR-V2X-Channel.....	54
Figura 22. Representación gráfica del escenario de simulación [28].....	58
Figura 23. PDR general o a nivel de aplicación den función a la distancia entre el transmisor y el receptor (Densidad de vehículos de 120 veh/km).....	63
Figura 24. Errores en las transmisiones debido a pérdidas de propagación (PLR) y por colisiones (CLR) (Densidad de vehículos de 120 veh/km).....	64
Figura 25. PDR General para tráfico ‘PeriodicFixedSize’ con y sin re-evaluation (Densidad de vehículos de 120 veh/km y RRI variable).....	66
Figura 26. PDR específica para tráfico ‘PeriodicFixedSize’ de los paquetes en los que ha actuado re-evaluation (Densidad de vehículos de 120 veh/km y RRI variable).....	66
Figura 27. PDR General para tráfico ‘Aperiodic’ con y sin re-evaluation (Densidad de vehículos de 120 veh/km y RRI variable).....	67
Figura 28. PDR específica para tráfico ‘Aperiodic’ de los paquetes en los que ha actuado re-evaluation (Densidad de vehículos de 120 veh/km y RRI variable).....	68
Figura 29. PDR General para tráfico ‘Aperiodic’ con y sin re-evaluation con 2 tx/TB (Densidad de vehículos de 50 veh/km y RRI fijo).....	69

Figura 30. PDR específica para tráfico ‘Aperiodic’ de la primera y de la segunda transmisión con y sin re-evaluation (Densidad de vehículos de 50 veh/km y RRI fijo)	70
Figura 31. Modelado de los diferentes agentes o capas utilizando plataforma de simulación, emulación, y prototipado.	72
Figura 32. Arquitectura software general del prototipo implementado y su plataforma de emulación... ..	74
Figura 33. Flujo de datos e interfaz del scheduler 5G NR V2X con OAI.	76
Figura 34. Validación funcional mediante generación de tráfico de datos.	92
Figura 35. Generación de patrones de tráfico.	92
Figura 36. Flujo de ejecución de la herramienta de validación.	94
Figura 37. Emulación mediante un OAI UE y múltiple Lightweight UEs.	97
Figura 38. Validación de los resultados obtenidos frente a los teóricos.	99
Figura 39. PDR en función a la distancia para densidades de vehículos de 60 veh/km y 120 veh/km.	101
Figura 40. PDR en función a la distancia para densidades de vehículos de 60 veh/km y tasa de generación de tráfico de 10 pkts/s y 50 pkts/s.	102
Figura 41. PDR en función a la distancia para densidades de vehículos de 60 veh/km y tráfico periódico y aperiódico (tasa de generación de tráfico de 10 pkts/s).	103
Figura 42. PDR en función a la distancia para densidades de vehículos de 60 veh/km cuando el mecanismo de reevaluación está activado y desactivado (tasa de generación de tráfico de 10 pkts/s y tráfico periódico).	104
Figura 43. PDR en función a la distancia para densidades de vehículos de 60 veh/km cuando se realizan NTx = {1:9} transmisiones del mismo paquete (tasa de generación de tráfico de 10 pkts/s).	105
Figura 44. PDR a nivel de APP en función a la distancia para densidades de vehículos de 60 veh/km cuando se realizan NTx = {1:9} transmisiones del mismo paquete (tasa de generación de tráfico de 10 pkts/s).	106
Figura 45. PDR a nivel de APP en función a la distancia para densidades de vehículos de 120 veh/km cuando se realizan NTx = {1:9} transmisiones del mismo paquete (tasa de generación de tráfico de 10 pkts/s).	106
Figura 46. Porcentaje de CPU empleada frente al número de LUEs.	108
Figura 47. Tiempo de procesamiento frente al número de clientes externos o LUEs.	109
Figura 48. Tiempo de transmisión de paquetes de solicitud frente al número de clientes externos o LUEs.	109
Figura 49. Tiempo de transmisión de paquetes de respuesta en función del número de clientes externos o LUEs.	110

Listado de Tablas

Tabla 1. Objetivos del proyecto y grado de consecución de los mismos	11
Tabla 2. Rango de requisitos para los grupos de casos de uso identificados por el 3GPP [7]	18
Tabla 3. Probabilidad de estados LOS y NLOSv	55
Tabla 4. Pathloss y pérdidas NLOSv para el canal 5G NR V2X	56
Tabla 5. Modelos de tráfico del 3GPP implementados [27]	58
Tabla 6. Parámetros de evaluación utilizados en la plataforma de simulación ns3	60
Tabla 7. Comparativa de la eficiencia en la utilización de los recursos radio.....	64
Tabla 8. Impacto del tipo de tráfico en el Re-evaluation Detection Ratio (Densidad de vehículos de 120 veh/km)	65
Tabla 9. Tipos de estructuras de datos creadas para el nr_v2x_scheduler	77
Tabla 10. Hilos de ejecución, funciones y archivos del OAI UE donde se encuentra la implementación ..	78
Tabla 11. Parámetros de entrada y de salida de la función nr_v2x_scheduler	79
Tabla 12. Tasa de selección de recursos libres por el scheduler: esperada y obtenida	98
Tabla 13. Parámetros de evaluación utilizados en la plataforma hardware OAI	100
Tabla 14. Tasa de selección de recursos libres por el scheduler: esperada y obtenida	107

1 Introducción

La tecnología 5G es una herramienta clave para la transformación digital de nuestra economía y sociedad, mejorando la productividad, calidad de vida y sostenibilidad. 5G ha sido diseñada desde un principio para actuar como catalizador de la transformación digital de la industria, e introduce capacidades de comunicación (robustez, baja latencia, altas tasas de comunicación y capacidad de reconfiguración) necesarias para dar soporte a sectores críticos, como es el caso de la automoción y la movilidad conectada y autónoma. El sector de la automoción y la movilidad se caracteriza actualmente por crecientes niveles de conectividad, y en un futuro próximo se caracterizará por crecientes niveles de autonomía. La introducción del vehículo autónomo permitirá notables mejoras en la seguridad, eficiencia y confort de la movilidad. También será clave en la transformación de la movilidad, permitiendo el paso de los modelos actuales de propiedad individual de los vehículos a modelos más centrados en el uso compartido de vehículos. La introducción de los vehículos autónomos, junto a la conectividad y la digitalización de los servicios y plataformas de movilidad, transformarán la industria, y en concreto, los fabricantes de vehículos que no serán exclusivamente proveedores de vehículos sino también de servicios de movilidad. Esta transformación ya ha empezado, por ejemplo, con MOIA para el caso de Volkswagen (<https://www.moia.io/en>) que ofrece un servicio de vehículo autónomo y un uso bajo demanda y compartido por los usuarios. Esta transformación del cambio de modelo de negocio y movilidad, que introducirá la conducción autónoma soportada en la tecnología 5G, es clave para los objetivos de sostenibilidad marcados por Naciones Unidas (y el *European Green Deal*) en entornos urbanos caracterizados por crecientes niveles de densificación.

La introducción de la movilidad conectada y autónoma a gran escala requiere garantizar la fiabilidad y robustez de los vehículos autónomos en cualquier escenario de conducción. Dichos vehículos basan su funcionamiento en sistemas de percepción y control que utilizan diversos sensores (cámaras, radares, LIDAR, etc.) para conocer el entorno del vehículo y controlar de forma autónoma su conducción. A pesar de las crecientes capacidades de dichos sensores, éstos pueden ver su percepción limitada por obstáculos físicos que obstruyen la visión sensorial o condiciones meteorológicas adversas. En este contexto, los sistemas de comunicación V2X (*Vehicle to Everything*) entre vehículos permiten complementar las capacidades de los sensores embebidos gracias al intercambio de datos entre vehículos y entre vehículos y la infraestructura (incluida la nube). Este intercambio de datos de sensores (denominado sentido cooperativo) permitirá que los vehículos autónomos sean capaces de detectar otros vehículos o nodos/usuarios más allá del 'rango de visión' de sus propios sensores, lo cual mejorará su percepción y por ende la conducción. Dicha conducción se verá también

facilitada gracias a las comunicaciones V2X que permitirán que los vehículos intercambien información sobre sus maniobras de tráfico de forma que puedan coordinarse (denominado conducción cooperativa) para evitar accidentes y mejorar la fluidez del tráfico (y por ende su impacto medioambiental). Alcanzar estos objetivos requiere de sistemas de comunicación V2X capaces, no sólo de proporcionar altos niveles de fiabilidad y baja latencia, sino también de alcanzar importantes tasas de transmisión dada la creciente digitalización del vehículo autónomo.

La primera tecnología de comunicación V2X está basada en adaptaciones de la tecnología Wi-Fi. Esta tecnología se conoce como IEEE 802.11p o ITS-G5. Sin embargo, son varios los estudios que han demostrado que IEEE 802.11p puede tener dificultades para garantizar estrictos niveles de calidad de servicio a medida que aumenta la densidad de vehículos y sus niveles de automatización. Una alternativa al uso de IEEE 802.11p es la tecnología Celular V2X, C-V2X o LTE-V. C-V2X adapta LTE (tecnología móvil 4G) para dar soporte a las comunicaciones V2X utilizando la banda sub-6GHz, e introduce modos de transmisión que permiten las comunicaciones V2V con o sin cobertura y gestión por parte de la red celular. C-V2X ha sido desarrollada por la industria de las telecomunicaciones en el marco del foro de estandarización 3GPP, y forma parte del Release 14 del 3GPP. Esta tecnología ha sido (levemente) evolucionada en Release 15, donde también se analiza cuáles serían los posibles casos de uso más avanzados para la conducción autónoma. Estos análisis han puesto de manifiesto que IEEE 802.11p y C-V2X no son capaces de satisfacer los requisitos de los servicios de vehículo conectado y autónomo más avanzados. Esto ha dado lugar a la reciente adaptación de la tecnología 5G al entorno vehicular, adaptación conocida a nivel técnico como 5G NR V2X.

La tecnología 5G NR V2X aporta importantes novedades técnicas que permitirán la comunicación directa entre vehículos autónomos, incluso sin cobertura 5G por parte de la infraestructura celular. Esto se conoce como comunicación V2V (Vehicle-to-Vehicle), o de una forma más técnica como comunicación *Sidelink* (SL) o basada en la interfaz PC5. La comunicación V2V sin cobertura celular 5G será posible gracias a que serán los propios vehículos autónomos los que configuren y gestionen de forma distribuida sus comunicaciones (denominado técnicamente como Modo 2). Esta capacidad de gestión autónoma es fundamental para garantizar de forma ubicua las comunicaciones V2X de los vehículos autónomos, y por lo tanto los servicios de percepción y conducción cooperativa. Sin embargo, garantizar la calidad de las comunicaciones 5G NR V2X en entornos distribuidos es altamente complejo, y más aún en el caso de la tecnología 5G NR V2X que ofrece una gran flexibilidad e introduce importantes posibilidades tecnológicas que no han sido evaluadas y optimizadas todavía. Esto requiere del diseño de soluciones inteligentes y adaptativas capaces de soportar de manera eficiente los requisitos de comunicación de los servicios de vehículo conectado y autónomo. En este contexto, es de crucial importancia el diseño de soluciones de comunicación 5G NR V2X inteligentes y la optimización de las mismas, para lo cual es de gran utilidad la utilización de los datos que generará un vehículo autónomo y de los datos que a su vez recibe de otros vehículos autónomos por la capacidad de comunicación V2X.

1.1 Objetivos

El presente proyecto está estructurado en torno a 5 objetivos principales que se resumen en la Tabla 1 y que persiguen estudiar, evaluar y optimizar la tecnología 5G NR V2X para garantizar su capacidad de ofrecer comunicaciones entre vehículos autónomos fiables, de baja latencia y altas tasas de transmisión. La Tabla 1 muestra además el grado de consecución de cada uno de los objetivos, así como las secciones del presente informe de justificación donde se recogen las evidencias de la consecución de los objetivos.

Para lograr los objetivos perseguidos, el proyecto ha desarrollado una plataforma de simulación 5G NR V2X pionera necesaria para el diseño y la optimización de las comunicaciones V2X entre vehículos autónomos. Dicha plataforma ha sido utilizada en el marco del presente proyecto para evaluar y optimizar soluciones 5G NR V2X para vehículo autónomo. Además, en el marco del proyecto se ha implementado un prototipo experimental único de nodo de comunicaciones 5G NR V2X para vehículo autónomo conectado. El prototipo ha sido desarrollado utilizando el laboratorio de tecnología SDR (*Software Defined Radio*) que el grupo de investigación de este proyecto posee para el diseño de redes 5G experimentales. El laboratorio incluye 6 nodos SDR de alto rendimiento con dos transceptores de banda ancha full-duplex, que cubren frecuencias de 10 MHz a 6 GHz con hasta 160 MHz de ancho de banda. El laboratorio utiliza OAI (*Open Air Interface*), la mayor plataforma de código abierto experimental del mundo para redes móviles que permite emular dispositivos de una red móvil celular (nodos móviles y estaciones base) así como nodos de la red troncal. Utilizando este laboratorio, el presente proyecto ha implementado el primer prototipo conocido de comunicaciones 5G NR V2X para vehículo autónomo que permitirá evaluar y testear experimentalmente las soluciones y capacidades de comunicación que la tecnología 5G NR V2X ofrece al vehículo autónomo.

Tabla 1. Objetivos del proyecto y grado de consecución de los mismos

#	Objetivo	Grado de consecución	Evidencias de la consecución de los objetivos
1	Estudio del estado de la tecnología 5G NR V2X para dar soporte a los requisitos de la movilidad conectada y autónoma.	100%	Sección 2
2	Desarrollo y validación del simulador con la integración de las principales funcionalidades de 5G NR V2X.	100%	Secciones 3 y 3.1
3	Diseño de arquitectura, módulos y componentes del prototipo de comunicaciones 5G NR V2X.	100 %	Secciones 4, 4.1, 4.2, 4.3 y 4.4
4	Evaluación y optimización de la tecnología 5G NR V2X mediante simulación.	100 %	Sección 3.2
5	Implementación de prototipo de comunicaciones 5G NR V2X	100 %	Sección 4.5

Para cumplir estos objetivos, el equipo de investigación ha contactado con la colaboración de los investigadores contratados Gokulnath Thandavarayan y Jesus Mena Oreja, y con la colaboración del estudiante en prácticas Kaiming Chen.

1.2 Difusión y publicidad

Las actividades de investigación que lleva a cabo el equipo del presente proyecto son difundidas y publicadas frecuentemente tanto en medios y ámbitos científicos como divulgativos. De entre los medios divulgativos cabe destacar la continua participación de los miembros del equipo de trabajo en las Jornadas de Puertas Abiertas organizadas en la UMH para promover las titulaciones de la Escuela Politécnica Superior de Elche (<https://epse.umh.es/jornada-de-puertas-abiertas/>). También es importante señalar su continua participación en la Feria de Ciencias y Tecnologías de Elche (FECITELX, <http://mireumh.edu.umh.es/es/disfruta-de-actividades-en-nuestro-campus/fecitelx-feria-de-ciencias-y-tecnologias-de-elche/>). Desafortunadamente, estas Jornadas y Ferias están suspendidas desde 2020 por la situación de pandemia actual. El compromiso del grupo de investigación del presente proyecto es continuar difundiendo y publicando sus actividades en estos eventos cuando vuelvan a celebrarse.

En el ámbito científico, el grupo de trabajo mantiene continuamente actualizada su página web, incluida una sección específica destinada a publicar los resultados científicos: <http://www.uwicore.umh.es/publications-all.html>. Además, el grupo de investigación también hace uso del Depósito Digital de la UMH (REDIUMH) (<http://dspace.umh.es/>) para todas aquellas publicaciones cuya política de editorial lo permite. Actualmente, el equipo de investigación está preparando dos publicaciones científicas que recogen los principales resultados obtenidos durante la ejecución del presente proyecto:

- **Publicación 1:**
 - Autores: A. Molina, L. Lusvargui, J. Gozalvez, B. Coll-Perales, M. Lucas-Estañ y G. Thandavarayan
 - Título: “On the impact of the re-evaluation mechanism on the performance of 5G NR V2X”
 - Revista (tentativa): IEEE Transactions on Vehicular Technology (IF: 5.978, Q1)
- **Publicación 2:**
 - Autores: G. Gallud, K. Cheng, M. Sepulcre, B. Coll-Perales, y J. Mena-Oreja
 - Título: “5G NR V2X emulation over OAI: architecture, design and validation”
 - Revista (tentativa): IEEE Transactions on Wireless Communications (IF: 7.016, Q1)

2 Estado de la tecnología 5G NR V2X

El primer estándar para comunicaciones V2X (Vehicle-to-Everything) basado en la nueva interfaz radio NR (*New Radio*) de 5G fue publicado a mediados de 2020 por el organismo de estandarización 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*) en su *Release 16* (<https://www.3gpp.org/release-16>). La tecnología 5G NR V2X presenta funcionalidades avanzadas con el objetivo de dar soporte a servicios críticos de vehículo autónomo conectado que están caracterizados por estrictos requisitos en términos de latencia, fiabilidad y ancho de banda, entre otros. Esta sección se centra en describir las funcionalidades incorporadas en 3GPP *Release 16* para comunicaciones 5G NR V2X. La *Release 16* de 3GPP introduce funcionalidades para permitir el establecimiento de comunicaciones V2X entre vehículos o V2V (*Vehicle-to-Vehicle*), entre vehículos y la red o V2N (*Vehicle-to-Network*), entre vehículos y la infraestructura o V2I (*Vehicle-to-Infrastructure*) y entre vehículos y otros usuarios de la red como peatones o V2P (*Vehicle-to-Pedestrians*). Esta sección se centra especialmente, por ser el principal foco de desarrollo de 5G NR V2X *Release 16*, en las funcionalidades y tecnologías que han sido desarrolladas para 5G NR V2V. En la terminología de 3GPP, V2V también es conocido como comunicaciones *Sidelink* o SL o comunicaciones basadas en la interfaz PC5.

La tecnología 5G NR V2X y sus funcionalidades se basan en desarrollos realizados en anteriores *Releases* de 3GPP. La Sección 2.1 presenta la evolución de la tecnología para el desarrollo de 5G NR V2X. Por tratarse de su antecesor, las comunicaciones V2X basadas en LTE presentan similitudes con respecto a 5G NR V2X. Para una mejor comprensión de 5G NR V2X, la Sección 2.2 presenta un resumen de la tecnología LTE V2X. Además, es importante señalar que 5G NR V2X ha sido diseñada para complementar y no reemplazar a LTE V2X [1]. En concreto se espera que LTE V2X de soporte a servicios V2X básicos, mientras que 5G NR V2X lo haga para servicios avanzados de vehículo autónomo conectado. La Sección 2.3 presenta los grupos servicios V2X a los que 5G NR V2X debe dar soporte. Finalmente, para dar soporte a estos servicios, 5G NR V2X ha introducido importantes cambios tanto a nivel de arquitectura de comunicaciones (Sección 2.4), como en los procesos que se encargan de la gestión de las comunicaciones a nivel de capa física (Sección 2.5) como en la gestión de los recursos radio (Sección 2.6).

2.1 Evolución hacia 5G NR V2X

La *Release 12* del 3GPP fue el primer estándar en introducir comunicaciones directas entre dispositivos o UEs, también conocida como comunicaciones D2D (*Device-to-Device*). Esta tecnología está basada en LTE y fue introducida para dar soporte a servicios

de proximidad (ProSe, *Proximity Services*) [2]. Aunque la aplicación comercial de LTE D2D no es parte de los objetivos de la 3GPP Release 12, se esperaba que su uso sirviese como impulso para el desarrollo de aplicaciones de redes sociales que requieren del descubrimiento de usuarios que se encuentran próximos entre sí.

Los avances en LTE D2D sentaron las bases para desarrollar LTE V2X, que representa el primer estándar para comunicaciones V2X basado en tecnologías celulares; de ahí también que estas tecnologías sean conocidas generalmente como *Cellular V2X* o *C-V2X*. LTE V2X se desarrolló como parte de la *Release 14* del 3GPP y fue posteriormente evolucionada en la *Release 15* del 3GPP [3]. Esta *Release 15* del 3GPP también introduce por primera vez una nueva interfaz radio conocida como *New Radio (NR)*, aunque su uso estaba limitado a comunicaciones con la red y no a comunicaciones directas entre vehículos. Ha sido ya en la *Release 16* cuando el 3GPP ha desarrollado un nuevo estándar para comunicaciones V2X utilizando la interfaz radio 5G NR. Esta *Release 16* soporta comunicaciones V2V o SL que permiten que los UEs comuniquen de forma directa sin que los datos pasen por la red celular. En terminología de 5G NR V2X Rel. 16, los UEs pueden ser vehículos, infraestructura vial situada en la carretera (*RoadSide Units* o RSU) o dispositivos móviles transportados por peatones.

2.2 LTE-V2X

LTE-V2X es el estándar que permite el establecimiento de comunicaciones V2X basadas en la tecnología LTE. LTE V2X ha sido diseñada para operar en la banda de frecuencia de 5.9 GHz, la cual está reservada en la mayor parte de regiones del mundo para su uso en servicios de ITS (*Intelligent Transportation Services*). Estos servicios se basan en la transmisión en modo broadcast de mensajes de tamaño reducido, tales como CAM (*Cooperative Awareness Messages*) o BSM (*Basic Safety Messages*). A través de estos mensajes, los vehículos son capaces de intercambiar información básica como la posición, dirección de movimiento, velocidad y aceleración, que es de gran utilidad para implementar servicios de seguridad vial cooperativos.

Para ajustarse a las necesidades y particularidades de las comunicaciones V2X, LTE-V2X define con respecto a LTE una nueva capa física y capa MAC. La capa física está basada en la tecnología SC-FDMA (*Single-Carrier Frequency Division Multiple Access*) que estructura los recursos radio en una forma de rejilla en tiempo y frecuencia. Estos recursos radio de LTE-V2X se conocen como *Resource Blocks (RBs)*. Un RB está formado por 12 sub-portadoras de ancho de banda fijo de 15 kHz. En el dominio del tiempo, la división es en sub-tramas de una duración de 1 ms. La Figura 1 muestra un ejemplo de la estructura tiempo-frecuencia de la capa física de LTE-V2X. Como se puede ver en la figura, un conjunto de RBs da lugar a lo que se conoce como un sub-canal que es utilizado para transmitir tanto los mensajes o *Transport Blocks (TBs)*, como la información de control asociada a dicha transmisión o *Sidelink Control Information (SCI)*. El SCI siempre ocupa 2 RBs que se sitúan en la parte superior del primer sub-canal utilizado.

A nivel MAC, LTE-V2X incluye dos modos (modos 3 y 4) de asignación de recursos o subcanales para realizar las comunicaciones V2V. En el modo 3, la estación base LTE (eNB) se encarga de gestionar los recursos. Por lo tanto, este modo sólo puede ser utilizado cuando los vehículos están dentro del radio de cobertura de la estación base LTE. En cambio, el modo 4 puede funcionar aunque los vehículos estén fuera de la cobertura de las estaciones base LTE. De hecho, en el modo 4 los vehículos seleccionan de forma autónoma sus recursos radio para realizar la transmisión de los mensajes V2X. Para el modo 4, el estándar LTE-V2X incluye un mecanismo de selección de recursos conocido como *sensing-based Semi-Persistent Scheduling (sensing-based SPS)* (ver Figura 1). Con el modo 4 de gestión de recursos radio, los vehículos pueden seleccionar recursos para transmisiones futuras. De hecho, la selección de los recursos radio se mantiene de forma semipersistente para un número concreto de transmisiones consecutivas (*Reselection Counter*). Esta selección semipersistente pretende ajustarse a las necesidades del tráfico V2X previsto para LTE-V2X que, en determinadas aplicaciones (p.ej., *Coopeartive Awareness Services*), está caracterizado por la transmisión de mensajes periódicos (p.ej., CAMs). El proceso de selección de un nuevo recurso en modo 4 se resume en la Figura 1. Supongamos un vehículo que genera un nuevo paquete en el instante de tiempo t_G para el cuál no tiene ningún recurso previamente seleccionado. El vehículo entonces define una ventana de selección (*selection window*) que incluye todos los recursos libres, es decir, que no están siendo ocupados por otros vehículos, y que cumplen un requisito de máxima latencia desde la generación del paquete. Este requisito de máxima latencia se utiliza para definir el límite superior de la *selection window* ($t_G + T_2$ en la Figura 1). Para detectar los recursos libres dentro de la *selection window* se define una ventana de sensado (*sensing window*). Dentro de la *sensing window* los vehículos escuchan o sensan las transmisiones de los otros vehículos en cada uno de los sub-canales. Si detectan alguna transmisión, los vehículos utilizan la información de control incluida en el SCI para identificar las reservas realizadas por los vehículos para recursos futuros (ver recurso marcado en violeta en la Figura 1). Además, también se sensa la potencia recibida en cada uno de los recursos para comprobar su nivel de ocupación (ver recurso rayado en rojo en la Figura 1). Como se puede ver en la Figura 1, la *sensing window* es anterior a la *selection window* y tiene una duración de 1 segundo. De los recursos que se detectan libres (no reservados) dentro de la *selection window*, se escoge un recurso de forma aleatoria. Esta selección se hace a posteriori de una preselección de un 20% de los recursos que están disponibles y que presentan una menor potencia media recibida durante la *sensing window*. El recurso seleccionado se reserva de forma semipersistente de modo que los siguientes paquetes generados (hasta un límite de *Reselection Counter*) puedan usar el mismo recurso.

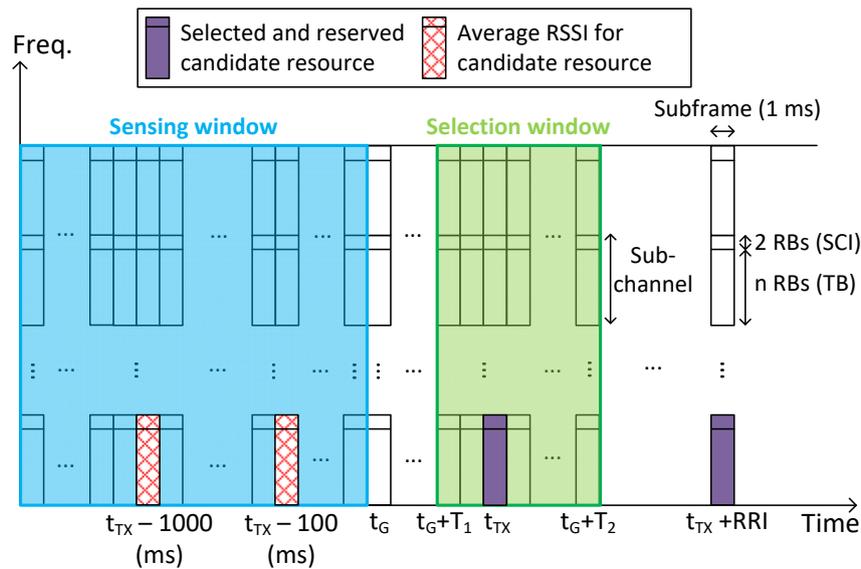


Figura 1. Estructura tiempo-frecuencia de la capa física de LTE-V2X y ejemplo del uso del mecanismo de scheduling *sensing-based SPS* de modo 4.

2.3 Servicios 5G NR V2X

La tecnología 5G NR V2X ha sido diseñada para complementar a LTE V2X. Mientras que LTE V2X da soporte a servicios básicos de gestión de tráfico y seguridad vial, las mejores prestaciones ofrecidas por 5G NR V2X permiten el soporte de servicios más avanzados caracterizados por niveles de automatización más altos. Los servicios a los que 5G NR V2X debe dar soporte han sido definidos por grupos de expertos del 3GPP y de 5GAA (*5G Automotive Association*) en [4] y [5], respectivamente. En el caso del 3GPP, los servicios V2X a los que 5G NR V2X debe dar soporte han sido agrupados de la siguiente manera:

- 1) *Platooning*: este grupo incluye servicios que permiten la formación dinámica y la gestión de grupos de vehículos o *platoons*. Los vehículos dentro de un *platoon* tienen que intercambiar información de manera periódica para garantizar el correcto funcionamiento del *platoon*. Aspectos como la distancia entre los vehículos que forman el *platoon* puede depender de la calidad de las comunicaciones entre los vehículos.
- 2) *Advanced driving*: este grupo incluye servicios que permiten una conducción semiautónoma o totalmente autónoma. Dentro de este grupo se incluyen servicios en los que los vehículos comparten sus trayectorias y sus intenciones de movimiento para coordinar sus maniobras, aumentando así la seguridad y mejorando la eficiencia del tráfico.
- 3) *Extended sensors*: dentro de este grupo se incluyen servicios en los que los vehículos comparten los datos obtenidos por sus sensores (p.ej., cámaras, RADAR, etc.) con los vehículos situados a su alrededor para contribuir de este modo a la denominada percepción cooperativa.
- 4) *Remote driving*: en este grupo se incluyen servicios diseñados para permitir que un operador o una aplicación tomen el control de un vehículo desde un centro de control

remoto. Los principales servicios dentro de este grupo son la asistencia a conductores que no pueden conducir por sí mismos, el control de vehículos en zonas de peligro (p. ej., áreas de construcción o localizaciones con condiciones climáticas adversas), y para situaciones complejas en las que los vehículos autónomos no pueden conducir de manera segura.

La Tabla 2 muestra los requisitos y el rango de valores de estos requisitos para los grupos de servicios V2X identificados por 3GPP:

- Tamaño de los mensajes o *payload* (bytes): indica la cantidad de datos generados por el servicio que se incluye en un paquete.
- Tx rate (paquetes/seg): indica el número de paquetes por unidad de tiempo que genera el vehículo transmisor.
- Latencia máxima extremo a extremo (E2E) (ms): es el tiempo máximo permitido entre la generación de un paquete en la aplicación del transmisor y la recepción del paquete en la aplicación del receptor.
- Fiabilidad (%): se define como la probabilidad de que un paquete transmitido se reciba correctamente dentro de una latencia máxima E2E y sujeto a otros requisitos relevantes (por ejemplo, *payload*, rango de comunicación, etc.).
- Tasa de transmisión (Mbps): representa la cantidad total de datos que debe recibir el receptor por unidad de tiempo. Está relacionado directamente con el *payload* y la tasa de transmisión, y también está sujeto a otros requisitos (por ejemplo, latencia, fiabilidad, etc.).
- Rango de comunicación (metros): especifica la distancia mínima entre transmisor y receptor que debe soportar la comunicación dadas unas condiciones marcadas por el *payload*, latencia E2E máxima, fiabilidad y tasa de datos.

La Tabla 2 muestra los requisitos por grupo de servicios V2X para comunicaciones V2V basadas en el enlace *SideLink* (SL) y/o para comunicaciones V2N que utilizan el enlace ascendente/descendente (UL/DL). El rango de valores que se muestra en la Tabla 2 ha sido establecido considerando que los grupos de servicios V2X pueden implementarse con diferentes niveles de automatización siguiendo la clasificación SAE en [6]. En general, los valores más estrictos corresponden a los niveles de automatización más altos. Por ejemplo, en el grupo de servicios V2X “*advanced driving*” se incluye el servicio “*cooperative lane change*” (cambio de carril cooperativo) en el que los vehículos intercambian sus trayectorias o sus intenciones de conducción/maniobras para coordinar un cambio de carril. En la implementación del servicio con los niveles más bajos de automatización (niveles SAE 0-2), el conductor es el principal responsable de monitorizar el entorno de conducción. En este caso, 3GPP indica en [7] que los vehículos deben intercambiar paquetes de 300 a 400 bytes en menos de 25 ms de latencia E2E y con una fiabilidad del 90%. Con niveles de automatización más altos (niveles SAE 3-5), el software de conducción autónoma del vehículo es el responsable de monitorizar el entorno de conducción. En este caso, 3GPP aumenta los requisitos indicando que los

vehículos deben intercambiar paquetes de 12000 bytes en menos de 10 ms de latencia E2E y con una fiabilidad del 99.99%.

Tabla 2. Rango de requisitos para los grupos de casos de uso identificados por el 3GPP [7]

Grupo	Tamaño de los mensajes (Bytes)	Tx rate (Paquetes/Seg)	Max Latencia E2E (milisegundos)	Fiabilidad (%)	Tasa de transmisión (Mbps)	Rango de comunicación (metros)
<i>Platooning</i>	50-6000	2-50	10-25	90-99.99	<= 65	80-350
<i>Advanced Driving</i>	SL: 300-12000 UL: 450	SL: 10-100 UL: 50	10-100	90-99.999	SL: 10-50 UL: 0.25-10 DL: 50	360-700
<i>Extended Sensors</i>	1600	10	3-100	90-99.999	10-1000	50-1000
<i>Remote Driving</i>	16000-41700	33-200	5	99.999	UL: 25 DL: 1	1000+

Nota: SL, DL, UL indica que el requisito es específico para comunicaciones *SideLink*, *DownLink* o *UpLink*, respectivamente. Si no se especifica, el requisito aplica a las tres conexiones (SL, DL y UL).

2.4 Arquitectura de 5G para comunicaciones V2X

La arquitectura de 5G representa las entidades físicas y lógicas, al igual que las interfaces entre éstas, que permiten que se lleven a cabo las comunicaciones [8][9]. Esta arquitectura, para el caso de 5G V2X, se representa en la Figura 2. La arquitectura representada es para el caso en el que el vehículo o UE está conectado a una red distinta a la del operador que le da servicio (es un visitante). Por eso, la conexión del UE a la red está bajo el VPLMN (*Visited Public Land Mobile Network*) y existe una conexión hacia la red HPLMN (*Home Public Land Mobile Network*). La conexión entre ambas redes se realiza a través de los nodos de red UPF (*User Plane Function*) que son los encargados de enrutar los datos por la red.

Como se puede ver en la Figura 2, la arquitectura 5G V2X permite dos modos de comunicación entre los vehículos: uno de comunicación directa a través de la interfaz PC5 y otro a través de la red utilizando la interfaz Uu. La interfaz PC5 es por lo tanto la utilizada para soportar comunicaciones V2V o SL en 5G NR V2X. Por otro lado, las comunicaciones V2X sobre el interfaz Uu permiten el establecimiento de conexiones V2N para la transmisión de datos en el enlace ascendente (UL o *Uplink*) y/o descendente (DL o *Downlink*). En el estándar 3GPP *Release 16*, la comunicación V2X a través de la interfaz Uu solo permite transmisiones unicast (es decir, no soporta transmisiones *groupcast* o *broadcast* como en el enlace SL o la interfaz PC5). Las mejoras de la arquitectura 5G para permitir estos otros modos de transmisión se espera que estén disponibles en la *Release 17* [10].

Como muestra la Figura 2, dentro de la arquitectura 5G, el sistema 5G (*5G System* o 5GS) incluye los dominios de la red de acceso (*Next Generation Radio Access Network* o NG-RAN) y el de la red troncal 5G (*5G Core* o 5GC). El 5GC está formado por varias funciones de red (*Network Functions* o NF): *Access and Mobility Management Function* (AMF), *Policy Control Function* (PCF), *Network Data Analytics Function* (NWDAF), *Network*

Repository Function (NRF), Network Exposure Function (NEF), Unified Data Repository (UDR), Unified Data Management (UDM), User Plane Function (UPF) y Session Management Function (SMF). Las NF dentro del plano de control 5GC (que incluye todas las NF excepto UPF) están interconectadas a través de las interfaces Npcf, Nsmf, Nnef, Nnwdaf, etc.

En la Figura 2 se representan también las interfaces lógicas entre las aplicaciones V2X en los UE (interfaz V5), y la interfaz entre las aplicaciones V2X en el UE y el servidor de aplicaciones V2X (V2X AS) (interfaz V1). Las interfaces V5 y V1 se utilizan para intercambiar información y parámetros de configuración que son de utilidad en el UE para configurar las comunicaciones V2X.

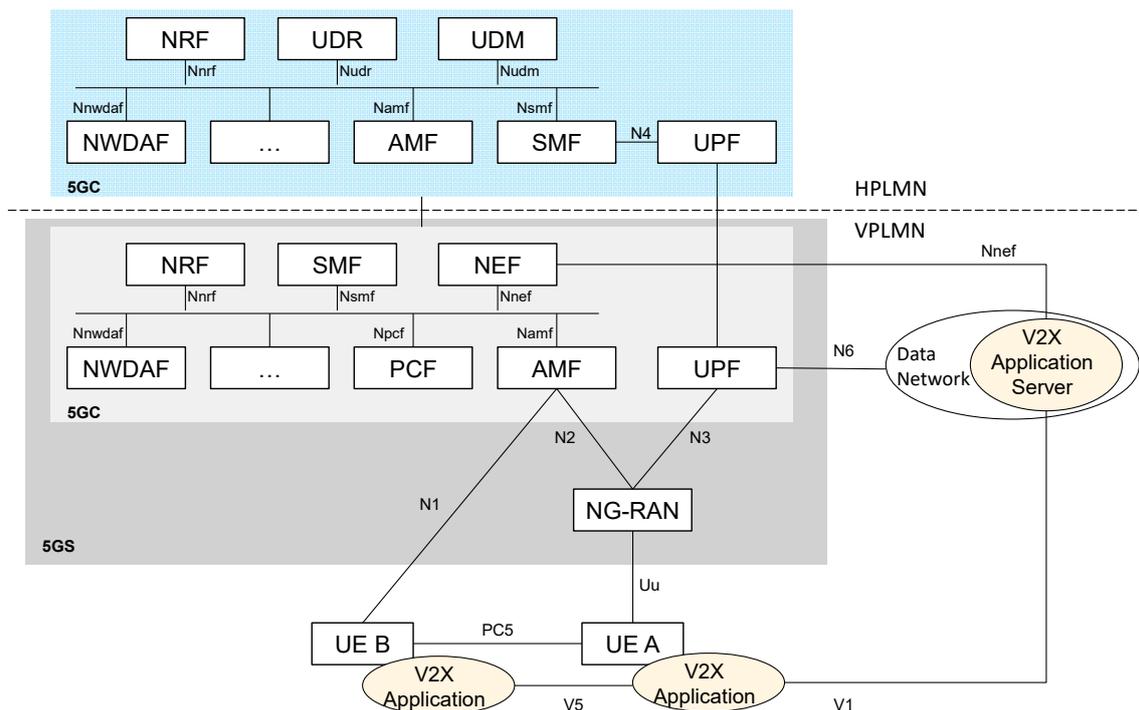


Figura 2. Arquitectura 5G para comunicaciones V2X basadas en la interfaz PC5 y Uu.

2.5 Capa física

Al igual que en LTE V2X (ver Sección 2.2), las transmisiones 5G NR V2X sidelink (SL) utilizan en la capa PHY multiplexación por división de frecuencia ortogonal (OFDM) con un prefijo cíclico (CP). La estructura de trama SL está organizada en tramas radio que tienen una duración de 10 ms. Una trama radio se divide en 10 subtramas (SF, *SubFrame*), cada una con una duración de 1 ms. A diferencia de LTE V2X, el número de slots por subtrama y el espaciado de subportadora (SCS, *Sub Carrier Spacing*) de OFDM puede ser flexible en 5G NR V2X. Para soportar diferentes requisitos y una operación en diferentes rangos de frecuencia, 5G NR V2X utiliza una numerología OFDM escalable basada en el estándar Release 15 NR Uu. Cada numerología OFDM está definida por un SCS que es un múltiplo de 15 kHz (es decir, el SCS en LTE V2X). Por tanto, las numerologías de 5G NR V2X permiten un SCS escalable que puede expresarse como

2^μ×15 kHz. En 5G NR V2X, el valor de factor de μ puede tomar valores 0,1,2 y 3, dando como resultados los siguientes SCS: 15 kHz, 30 kHz, 60 kHz y 120 KHz.

Los recursos radio a nivel PHY se agrupan en una rejilla conocida como *resource pool*. Una *resource pool* consta de *Resource Blocks* o RBs (formados a su vez por 12 subportadoras) contiguos en el dominio de la frecuencia, y de slots en el dominio del tiempo y que no tienen por qué ser contiguos. El *resource pool* resultante define los recursos que pueden ser utilizados en las transmisiones SL. En el dominio de la frecuencia, la *resource pool* se divide en un número L de subcanales contiguos, donde un subcanal consiste en un grupo de RBs consecutivos en un slot [11]. En NR V2X SL, el tamaño del subcanal puede ser igual a 10, 15, 20, 25, 50, 75 o 100 PRBs. Un subcanal representa la unidad más pequeña para una transmisión o recepción de datos SL dentro de una *resource pool*. Una transmisión SL puede usar uno o múltiples subcanales.

En NR V2X SL, los datos se transmiten en *Transport Blocks* (TBs) [11] y cada TB se asocia con un Sidelink Control Information (SCI). Un TB se transmite a través del canal físico de datos (PSSCH). El SCI contiene información sobre los recursos utilizados por el PSSCH que transporta el TB asociado, así como información adicional requerida para decodificar la TB. El SCI en NR V2X se transmite en dos etapas (1st-stage SCI y 2nd-stage SCI) en comparación con una sola etapa para LTE V2X [12]. El SCI de la primera etapa en NR V2X se transporta en el canal físico de control (PSCCH) mientras que el SCI de la segunda etapa se transporta en el PSSCH correspondiente.

2.6 Gestion de recursos radio

La Release 16 de 3GPP define dos nuevos modos (modo 1 y modo 2) para la selección de sub-canales en las comunicaciones 5G NR V2X entre vehículos (i.e. V2V) basadas en el enlace *SideLink* (SL). Estos dos modos son las equivalentes a los modos 3 y 4 definidos en LTE V2X (Sección 2.2). Sin embargo, LTE V2X solo soporta comunicaciones V2V basadas en el enlace SL de tipo broadcast, mientras que 5G NR V2X soporta además comunicaciones tipo groupcast y unicast.

2.6.1 Modo 1

En el modo 1 de gestión de recursos radio de 5G NR V2X, de forma similar al modo 3 utilizado en LTE V2X, opera de modo centralizado ya que es la estación base celular (conocida como gNB) la que asigna y gestiona los recursos radio del enlace SL que utilizan los vehículos o UEs para comunicar entre sí. Para llevar a cabo esta asignación y gestión de los recursos radio, la estación base celular utiliza el enlace de comunicación soportado sobre la interfaz radio Uu entre el gNB y el UE. Por lo tanto, los UEs deben estar dentro del área de cobertura de la estación base celular para poder operar utilizando el modo 1. El modo 3 en LTE V2X incluye dos opciones para la asignación de recursos: scheduling dinámico y scheduling semipersistente. El modo 1 mantiene el scheduling dinámico (llamado *dynamic grant*) pero reemplaza el scheduling semipersistente por un scheduling configurado (llamado *configured grant*) [12]. Cuando se utiliza el modo 1-*dynamic grant*, los UEs deben solicitar recursos a la estación base para la transmisión de cada TB (y posibles repeticiones). En concreto, el UE envía en un

canal ascendente de control (*Physical Uplink Control Channel*, PUCCH) una solicitud de scheduling o SR (*Scheduling Request*) cada vez que tenga un TB que transmitir. La estación base celular responde a esta solicitud SR utilizando un canal de control en el enlace descendente (*Physical Downlink Control Channel*, PDCCH) que incluye información de control o DCI (*Downlink Control Information*). De entre la información incluida en el DCI se incluye los recursos que el UE debe utilizar en el enlace SL, es decir el slot y subcanal asignados para la transmisión del TB (y hasta un total de 2 posibles retransmisiones de este TB). Este proceso de señalización para solicitar recursos para cada transmisión de un TB puede aumentar la latencia de comunicación. Para evitar este posible incremento de latencia, el modo 1 de 5G NR V2X también incluye el mecanismo de *scheduling configured grant*. Mediante el mecanismo *configure grant* la estación base celular puede asignar un conjunto de recursos SL (es decir, slots y sub-canales) a un UE para transmitir varios TB. Este conjunto de recursos asignados se denomina *Configured Grant* (CG). Para que la estación base celular pueda configurar el CG, el UE debe informar primero del tráfico que espera transmitir en el enlace SL: periodicidad y tamaño de los TB, y calidad de servicio requerida en las transmisiones. Esta información es utilizada por la estación base para crear el CG que satisfaga los requisitos del tráfico que se espera generar en el enlace SL. La Figura 3 muestra 2 ejemplos de asignación de recursos utilizando CG. Las dos asignaciones tienen diferente periodicidad (*Periodicity A* y *Periodicity B*) y diferentes asignaciones de recursos en tiempo-frecuencia (slots y subcanales). De este modo, el UE al que le han sido asignados los CG representados en la Figura 3 podría utilizar cada uno de ellos para transmitir los TBs generados por diferentes servicios V2X con diferentes características.

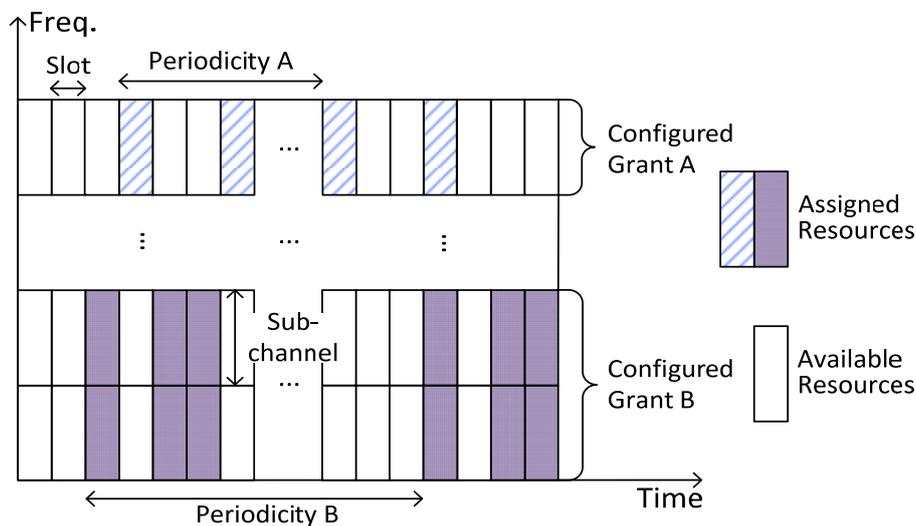


Figura 3. Ejemplos de recursos asignados a un UE utilizando el mecanismo *configured grant* del modo 1 de gestión de recursos radio de 5G NR V2X.

A modo de comparativa, la Figura 4 muestra un ejemplo del funcionamiento de los mecanismos de asignación de recursos del modo 1 de 5G NR V2X. El ejemplo muestra cómo se organizan las transmisiones y en qué momento se programan cuando se utilizan los mecanismos *dynamic grant* y *configured grant* para transmitir 2 TBs los cuales se generan en los instantes de tiempo t_0 y t_5 , respectivamente. Para el caso de *dynamic*

grant, el UE envía el SR hacia la estación base celular (gNB) en el instante de tiempo t_1 para solicitar la asignación de recursos para transmitir el TB₁. La gNB responde en el instante de tiempo t_3 con el DCI para indicar los recursos que el UE puede utilizar en su transmisión SL en el instante de tiempo t_4 . El mismo proceso tiene lugar a partir del instante de tiempo t_5 para transmitir el TB₂. Tal y como se muestra en la Figura 4, el TB₂ se transmite finalmente en el instante de tiempo t_{10} . Por otro lado, con el mecanismo *configured grant* el UE no solicita recursos, sino que espera que estos le sean asignados desde la gNB mediante un CG. En la Figura 4 se asume que el UE recibe el CG en el instante de tiempo t_4 . El CG recibido incluye un conjunto de recursos que son asignados al UE de forma periódica en los instantes de tiempo t_4 , t_8 y t_{11} . Entonces, el UE utiliza los recursos disponibles en los instantes de tiempo t_4 y t_8 para transmitir el TB₁ y TB₂, respectivamente. Como se muestra en este ejemplo, el mecanismo *configured grant* reduce el tiempo necesario para transmitir los dos TBs en comparación al mecanismo *dynamic grant*. Sin embargo, el mecanismo *dynamic grant* hace un uso más eficiente de los recursos ya que solo solicita recursos para aquellas transmisiones que se van a efectuar.

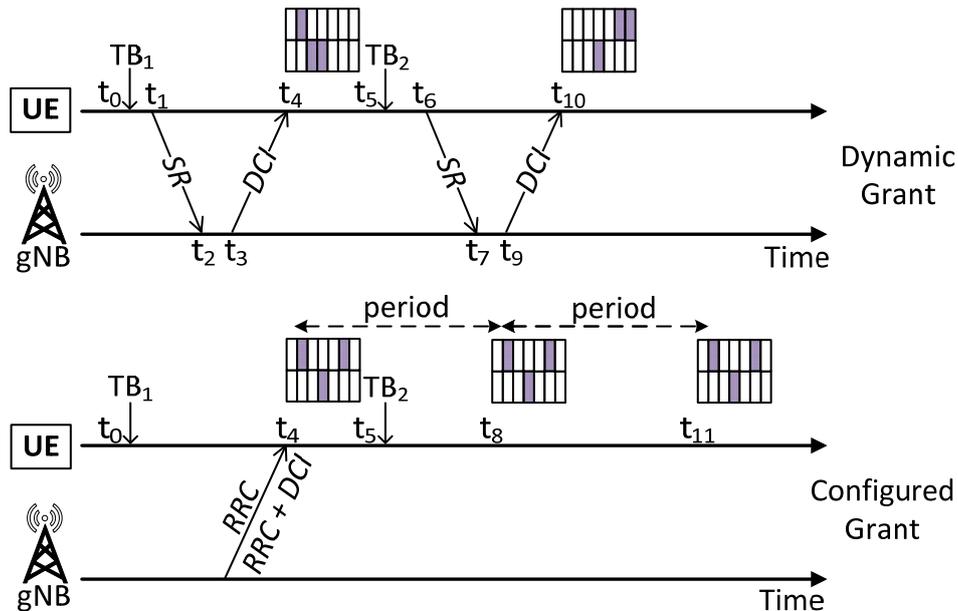


Figura 4. Comparativa entre los mecanismos de gestión de recursos del modo 1 de 5G NR V2: *dynamic grant* y *configured grant*.

2.6.2 Modo 2

Como se ha mostrado en la sección anterior, el modo 1 de asignación de recursos radio de 5G NR V2X depende de la participación de la gNB para coordinar y gestionar las transmisiones SL entre los vehículos. Por otro lado, los UEs o vehículos pueden gestionar de una manera distribuida los recursos de la comunicación SL cuando utilizan el modo 2 de asignación de recursos radio. El modo 2 permite por lo tanto que las comunicaciones 5G NR V2X SL se puedan llevar a cabo sin cobertura celular. El modo 2 de 5G NR V2X es equivalente al modo 2 de LTE V2X, aunque con ciertas diferencias. El modo 4 funciona siguiendo el esquema *sensing-based semi-persistent scheduling* (SPS) [13][14]. Por otro

lado, el modo 2 puede funcionar utilizando un esquema de scheduling dinámico o semipersistente (*dynamic* o *semi-persistent scheduling*) que son diferentes a los implementados en LTE V2X modo 4. El esquema dinámico selecciona nuevos recursos para cada TB y solo reserva recursos para las repeticiones de ese TB. El esquema de scheduling semipersistente permite a los UE reservar recursos para las transmisiones de varios TBs (el número viene definido por la variable *Reselection Counter*) y de sus retransmisiones [12]. Una distinción importante para la correcta comprensión del modo 2 es entre recursos seleccionados y recursos reservados. Los recursos son seleccionados en el modo 2 bien utilizando el esquema de scheduling dinámico o semipersistente. Un recurso seleccionado pasa a ser reservado si este es informado por el UE en un 1st-stage SCI para una transmisión futura¹.

El modo 2 utiliza prácticamente el mismo procedimiento para seleccionar recursos para los esquemas de scheduling dinámico y semipersistente [12]. La principal diferencia es que mientras que el esquema de scheduling dinámico solo selecciona recursos para la transmisión de un TB, el esquema de scheduling semipersistente lo hace para un total de *Reselection Counter* TBs. La separación temporal entre los recursos seleccionados en el esquema de scheduling semipersistente viene definida por el *Resource Reservation Interval (RRI)* que puede tomar valores de {0, [1:99], [100:100:1000]} ms. Para el procedimiento de selección de recursos (tanto en el esquema de scheduling dinámico como el semipersistente), el UE primero define la ventana de selección donde busca recursos candidatos para transmitir un TB (ver Figura 5). La ventana de selección incluye todos los recursos entre $t = n + T_1$ y $t = n + T_2$ (en slots), donde el instante de tiempo $t = n$ es el momento en el que se lanza el proceso para seleccionar nuevos recursos [11]. Esta selección puede ser activada por la generación de un nuevo TB o la necesidad de seleccionar nuevos recursos porque un nuevo TB no “cabe” en los recursos previamente reservados. T_1 es el tiempo de procesamiento requerido por un UE para identificar recursos candidatos y seleccionar nuevos recursos para la transmisión en el enlace SL. El valor de T_2 se deja a la implementación del UE, pero debe incluirse dentro del rango $T_{2min} \leq T_2 \leq PDB$, donde PDB (*Packet Delay Budget*) representa el límite de latencia para transmitir el TB, y T_{2min} se determina en función a la prioridad de la transmisión del TB. Una vez que se define la ventana de selección, el UE debe identificar los recursos candidatos dentro de la ventana de selección. Un recurso candidato se define por un slot en tiempo y un número (*LPSSCH*) contiguo de sub-canales en frecuencia que se ajusten al tamaño del TB a transmitir.

¹ En el modo 2 de 5G NR V2X la información de control se intercambia entre los vehículos utilizando el elemento SCI (Sidelink Control Information). A diferencia que en LTE V2X en el que toda la información de control está contenida en un único SCI, en 5G NR V2X la información de control se divide en 2 (1st-stage y 2nd-stage) SCIs. El 1st-stage SCI incluye información útil para decodificar el TB e información acerca de las reservas realizadas para futuras transmisiones. El 2nd-stage SCI incluye información de control que es de utilidad para dar soporte a mecanismos introducidos en 5G NR V2X para mejorar la fiabilidad de las transmisiones groupcast y unicast.

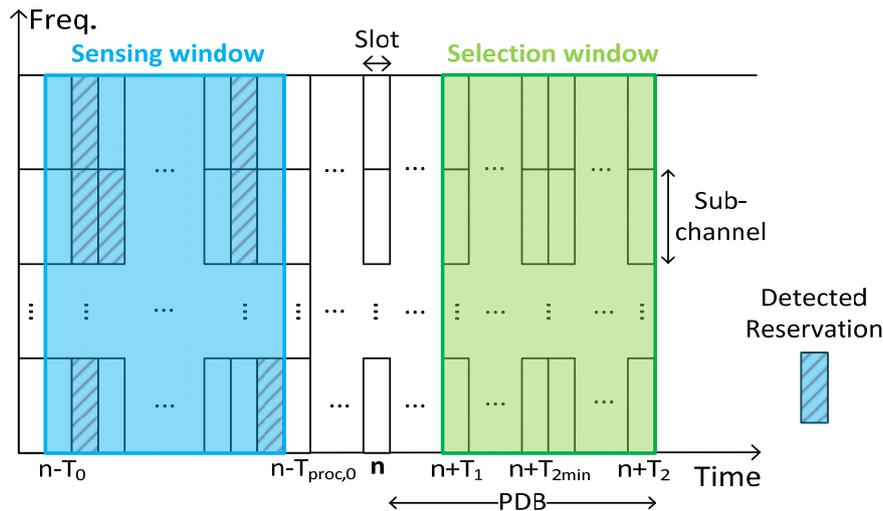


Figura 5. Representación de las ventanas de selección (*selection window*) y de sensado (*sensing window*) del modo 2 de asignación de recursos de 5G NR V2X (ejemplo para el caso de que $T_2 = PDB$).

Para identificar los recursos candidatos dentro de la ventana de selección se utiliza la información que los UEs son capaces de captar de las transmisiones de sus vecinos. De hecho, cuando un UE no está transmitiendo, éste se encuentra continuamente escuchando el canal y los recursos SL para obtener información importante que se utiliza para identificar recursos candidatos. Esto se conoce como sensado del canal y da lugar a la ventana de sensado (ver Figura 5; el tamaño de la ventana de sensado viene dado por el parámetro T_0 y puede tomar valores de 1100 ms o 100 ms). Durante el proceso de sensado, el UE decodifica la información de control incluida en el SCI (*Sidelink Control Information*) de los TBs recibidos. Los SCIs indican los recursos SL que otros UEs han reservado para las transmisiones de sus TBs. El UE que realiza el proceso de sensado también mide el nivel señal o RSRP (*Received Signal Received Power*) con el que se reciben los TBs de otros UE. El UE almacena la información recibida de otros UEs para determinar la ventana de sensado y seleccionar recursos de la ventana de selección cuando se lanza un nuevo proceso de selección de recursos.

Para seleccionar nuevos recursos, el modo 2 de gestión de recursos de 5G NR V2X define un algoritmo compuesto por 2 pasos que usan tanto el esquema de scheduling dinámico como el semipersistente.

2.6.2.1 Paso 1: exclusión de recursos en la ventana de selección

El paso 1 se centra en excluir los recursos candidatos en la ventana de selección que no deben ser utilizados por el vehículo o UE que está seleccionando nuevos recursos porque podrían causar un conflicto con los recursos utilizados por otros vehículos o UEs. En este sentido, los primeros recursos excluidos son aquellos relacionados con la operación *half-duplex* que indica que mientras que un UE está transmitiendo, éste no puede recibir. Por este motivo, un UE eliminará de la ventana de selección los recursos pudiesen haber sido reservados por otros UEs en el momento que éste estaba transmitiendo. Por ejemplo, si suponemos que el UE estaba transmitiendo en el instante de tiempo s_i de la ventana de sensado, éste deberá descartar todos los recursos de la

ventana de selección que se encuentren en el instante de tiempo $s_i + q \times RRI_i$. RRI_i representa todos los posibles valores que puede tomar el parámetro RRI y que está preconfigurado (hasta 16 valores pueden preconfigurarse). Por otro lado, el parámetro q puede tomar valores entre $1 \leq q \leq Q$. Q se define como T_2/RRI_i cuando se cumplen las siguientes condiciones: 1) $RRI_i < T_2$ (en milisegundos) y 2) $n - s_i \leq RRI_i$ (en slots), siendo n el instante en el que se ejecuta el proceso de selección de recursos. Si no se cumplen estas condiciones, entonces Q es igual a 1. De este modo Q es utilizado para estimar el número de transmisiones periódicas de otros vehículos que podrían colisionar con los recursos que se encuentran dentro de la ventana de selección. En caso de que el vehículo que está realizando el proceso de selección de recursos esté empleando el mecanismo de scheduling SPS, también tienen que excluirse de la ventana de selección los recursos que se encuentran en el slot s_j , si se cumple que $s_j + j \times RRI_{TX}$ coincide con $s_i + q \times RRI_i$. En este caso, RRI_{TX} es el RRI utilizado por el UE que está realizando el proceso de selección de recursos, y j es entero definido como $1 \leq j \leq 10 \times ReselectionCounter - 1$.

El UE también tiene que excluir todos los recursos candidatos de la ventana de selección que hayan sido reservados por otros UEs (utilizando el 1st-stage SCI). En este caso, los recursos reservados por otros UEs se excluyen de la lista de recursos candidatos de la ventana de selección si el nivel de señal o RSRP medido en el SCI recibido es mayor que un determinado umbral. Formalmente, este proceso se puede expresar del siguiente modo. Supongamos que se ha recibido un 1st-stage SCI (con un nivel de señal mayor que el umbral de RSRP) en el slot s_k de la ventana de sensado. Este SCI está reservando un recurso que se encuentra en el slot $s_k + RRI_{RX}$. RRI_{RX} es el RRI indicado en el 1st-stage SCI. Entonces, el UE que está realizando el proceso de selección de recursos excluye todos los recursos dentro de la ventana de selección que coinciden con $s_k + q \times RRI_{RX}$, puesto que las transmisiones asociadas al SCI recibido podrían ser periódicas. Además, el UE que está realizando el proceso de selección de recursos deberá eliminar los recursos dentro de la ventana de selección que coincidan con posibles transmisiones futuras (fuera de la ventana de selección) del UE del que se ha recibido el SCI. Es decir, recursos en los que se cumpla que $s_p + j \times RRI_{TX}$ coincida con $s_k + q \times RRI_{RX}$, siendo j y q las variables definidas anteriormente.

Al final este proceso de exclusión de recursos, el porcentaje de recursos candidatos disponibles en la ventana de selección debe ser superior a un umbral que puede configurarse en 20%, 35% o 50%. Si no es el caso, el UE repite el proceso de exclusión incrementando el umbral de RSRP que es necesario para excluir los recursos reservados por otros UE en 3dB. Este proceso se repite de forma continua hasta satisfacer la condición del porcentaje de recursos candidatos disponibles en la ventana de selección.

2.6.2.2 Paso 2: selección de recursos

Una vez que el proceso de exclusión de recursos del paso 1 ha concluido, el UE procede a seleccionar un recurso de entre los que hay disponibles. La selección se hace de forma aleatoria.

2.6.2.3 Retransmisiones

En modo 2, un UE puede seleccionar hasta un total de N recursos candidatos ($N \leq N_{MAX}$ con $1 \leq N_{MAX} \leq 32$) dentro de la misma ventana de selección para la transmisión inicial de un TB y sus $N-1$ retransmisiones. El proceso para seleccionar N recursos candidatos se aplica tanto al *dynamic scheme* como al *semi-persistent scheme* de modo 2 y sigue el algoritmo de 2 pasos de modo 2 que se ha mostrado en la sección anterior. La selección de N depende de la implementación del UE y debe ser inferior al número de recursos candidatos disponible después del paso 1 de modo 2. Por otro lado, el valor de N_{MAX} podría ajustarse según la carga del canal. Para la selección de los N recursos, también deben tenerse en cuenta ciertas limitaciones que tienen que ver con la capacidad del SCI de informar sobre los recursos reservados. En particular, un SCI solo puede notificar sobre reservas de recursos ubicadas dentro de una ventana W de 32 slots. Por lo tanto, la separación máxima entre dos recursos seleccionados debe ser inferior a 32 slots (ver Figura 6).

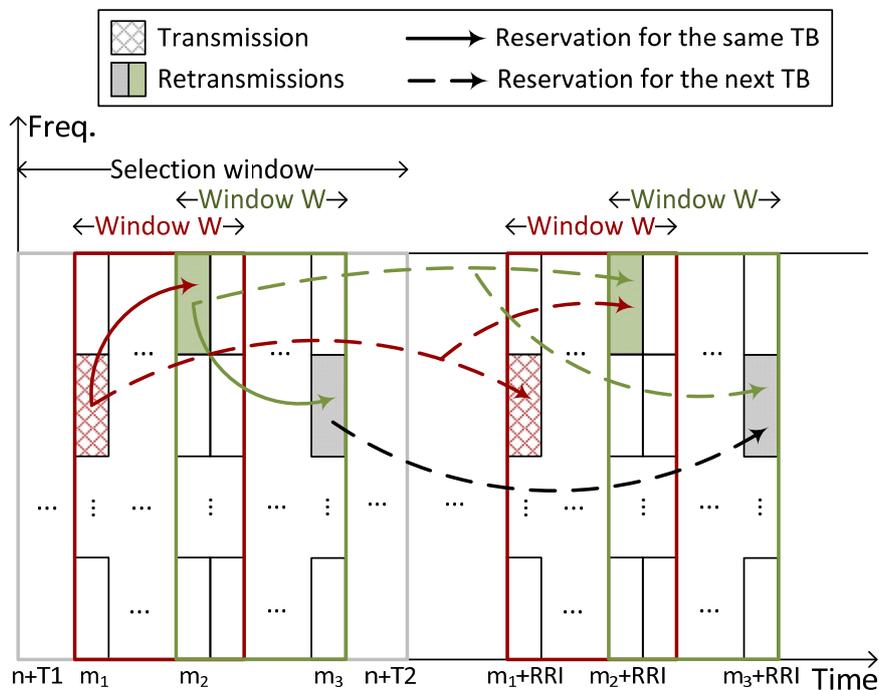


Figura 6. Proceso de selección de recursos radio para las N transmisiones (transmisión inicial y $N-1$ retransmisiones) en modo 2.

2.6.2.4 Re-evaluation

Un UE que ha seleccionado un nuevo recurso SL (por ejemplo, en el slot m) continuará detectando las transmisiones de otros UE durante la ventana de selección. Un UE puede decidir si ejecutar de nuevo el paso 1 para comprobar si el recurso seleccionado todavía está disponible. El UE puede ejecutar de nuevo el paso 1 en el slot $m-T_3$ o antes. T_3 es el tiempo máximo permitido para que un UE (en slots) complete el proceso de selección de recursos. El proceso para ejecutar nuevamente el paso 1 se muestra en la Figura 7. En la Figura 7, n' representa el slot en el que un UE inicia una nueva ejecución del paso 1. El UE define una nueva ventana de selección SW' que comienza en el slot $n'+T_1$ y termina en el slot $n'+T_2'$. T_2' debe estar dentro del rango $T_{2min} \leq T_2' \leq PDB - (n'-n)$; siendo

n el instante en el que se inició el proceso de selección de recursos (ver Figura 5). El UE ejecuta entonces el paso 1 sobre los recursos candidatos en SW' para identificar qué recursos están disponibles dentro de esa ventana. Si el recurso seleccionado en el slot m está ahora excluido, entonces el UE ha detectado lo que se llama en los estándares 3GPP un *re-evaluation* [11]. La detección de *re-evaluation* podría darse tanto en el esquema de scheduling dinámico o semipersistente. Una vez que se detecta *re-evaluation*, el UE procede a ejecutar de nuevo el paso 2 (ver Sección 2.6.2.2) para seleccionar un nuevo recurso SL entre los recursos que hay disponibles en la ventana SW' [15]. El UE no ejecuta el paso 2 de nuevo si el recurso seleccionado inicialmente (en el slot m) sigue disponible cuando se vuelve a lanzar el paso 1.

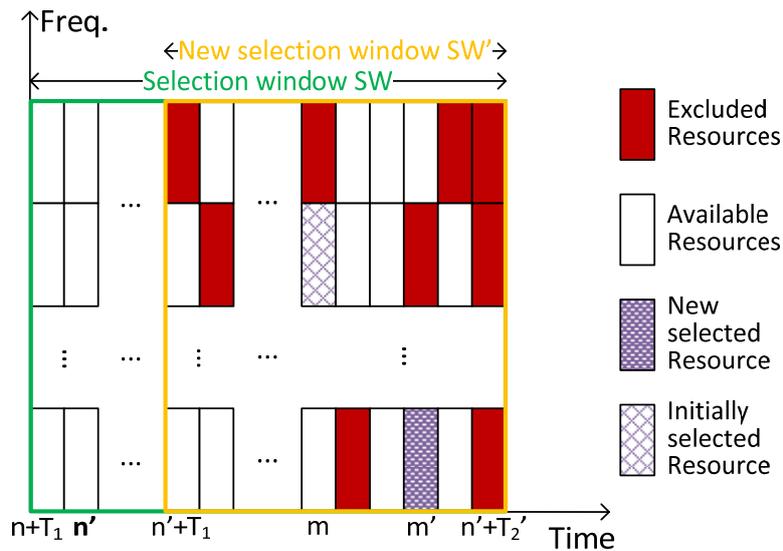


Figura 7. Nueva ejecución del paso 2 cuando se detecta *re-evaluation* en el modo 2 de gestión de recursos de 5G NR V2X.

3 Simulador de comunicaciones 5G NR V2X

La plataforma de simulación elegida para realizar la implementación de 5G NR V2X en el marco del presente proyecto ha sido ns-3. Ns-3 es un simulador de red de eventos discretos. Este simulador ha sido desarrollado con objetivos docentes y especialmente para la investigación en protocolos de red. Ns-3 un proyecto de software libre, con licencia GNU GPLv2 [16].

Ns-3 está desarrollado sobre un núcleo (*core*) y un conjunto de capas que añaden funcionalidad de red al simulador. Este simulador proporciona una pila de protocolos de Internet con implementaciones de protocolos como TCP y UDP, así como protocolos de más bajo nivel como IEEE 802.11. Diferentes componentes y aplicaciones pueden añadirse a los nodos para que puedan comunicarse entre ellos. Es destacable su uso intensivo con redes móviles *ad-hoc*. Ns-3 utiliza C++ como lenguaje de programación, aunque también permite emplear Python.

El simulador ns-3 ha sido diseñado con el objetivo de ser lo más compatible posible con los sistemas y los protocolos de red reales. Por ejemplo, el tráfico de red generado por ns-3 puede ser recogido en un fichero de trazas *pcap*. Dicho fichero puede ser analizado en herramientas como *Wireshark* [17]. También es posible ejecutar una instancia de ns-3 en una red e interactuar con dispositivos reales. Es decir, ns-3 aparte de ser un simulador, también puede realizar funciones de emulador en casos necesarios.

El simulador ns-3 es mantenido y evolucionado gracias a la contribución de tres entidades principalmente: desarrolladores ns-3, mantenimiento de ns-3 y consorcio ns-3. Como parte de la planificación a largo plazo y el constante crecimiento y mantenimiento de ns-3, INRIA² y la Universidad de Washington han formado un consorcio que sirve como soporte para el proyecto ns-3. De hecho, estas instituciones organizan anualmente un *Workshop on NS-3* (WNS3). El objetivo de estos eventos es reunir a usuarios y desarrolladores de la comunidad de ns-3 para compartir ideas y discutir sobre posibles avances futuros del simulador.

Ns-3 se encuentra en continuo cambio y adaptación a nuevos dispositivos, redes y modelos que van emergiendo por el avance de las tecnologías de red. Cada cierto período de tiempo (3 veces al año) se publica una nueva versión (*Release*) de ns-3 que incluye nuevos avances realizados por la amplia comunidad de usuarios y desarrolladores que tiene este simulador. Todas las versiones y documentación de ns-3 pueden encontrarse en [18].

² INRIA: Institut National de Recherche en Informatique en Automatique (FR).

3.1 Implementación de 5G NR V2X

En esta sección se describen de forma detallada todos los aspectos relacionados con la implementación software del estándar 3GPP 5G NR V2X (ver Sección 2) en el simulador ns-3.

3.1.1 Módulos

Los módulos constituyen un componente fundamental del proyecto software ns-3. Los módulos son directorios que están incluidos dentro de la carpeta “src” (*source code*) de ns-3. Dichos directorios realizan la función de “contenedor” de ficheros de código fuente que implementan funcionalidades asociadas a diferentes protocolos y estándares de red en ns-3. Cada módulo se asocia a una tecnología de red y normalmente incluye un tipo de interfaz de red (*NetDevice*) perteneciente a la misma tecnología. Esto permite organizar los ficheros fuente por tecnologías de red. Esta organización hace más simple la instalación de dichas tecnologías en los diferentes nodos configurados en la simulación. Cabe destacar que en ns-3 se pueden instalar todas las interfaces de red que sean necesarias en los nodos.

Cada módulo tiene en su interior un conjunto de subdirectorios. Los principales subdirectorios son *model*, *helper* y *examples*. *Model* es posiblemente el elemento más importante de los módulos de ns-3 ya que incluye toda la funcionalidad asociada a cada tecnología de red. En dicho subdirectorio se incluyen las capas de red, la interfaz de red y las entidades necesarias para el correcto funcionamiento del protocolo implementado. *Helper* contiene ficheros que ayudan a la instalación de las interfaces de red en cada nodo. *Examples* contiene ejemplos para testear el funcionamiento implementado en cada módulo. Dichos ejemplos realmente son ficheros de configuración que se deben incluir en el directorio *scratch* para su ejecución.

Algunos módulos incluidos en el proyecto ns-3 son:

- Wifi [19]
- LTE [20]
- WAVE³ [21]

Con el presente proyecto se ha creado y definido un nuevo módulo NR-V2X de ns-3 que implementa funcionalidades de red asociadas a la tecnología 5G NR V2X.

3.1.2 Arquitectura de la implementación en la plataforma software

La Figura 8 muestra el diagrama general o arquitectura de la implementación de 5G NR V2X realizada en ns-3. Este diagrama representa principalmente las diferentes capas y entidades de red, así como los procesos y el flujo que sigue cada paquete que es enviado y recibido por cada uno de los nodos (en este caso vehículos) de la red.

³ Wave es el acrónimo de *Wireless Access in Vehicular Environments*.

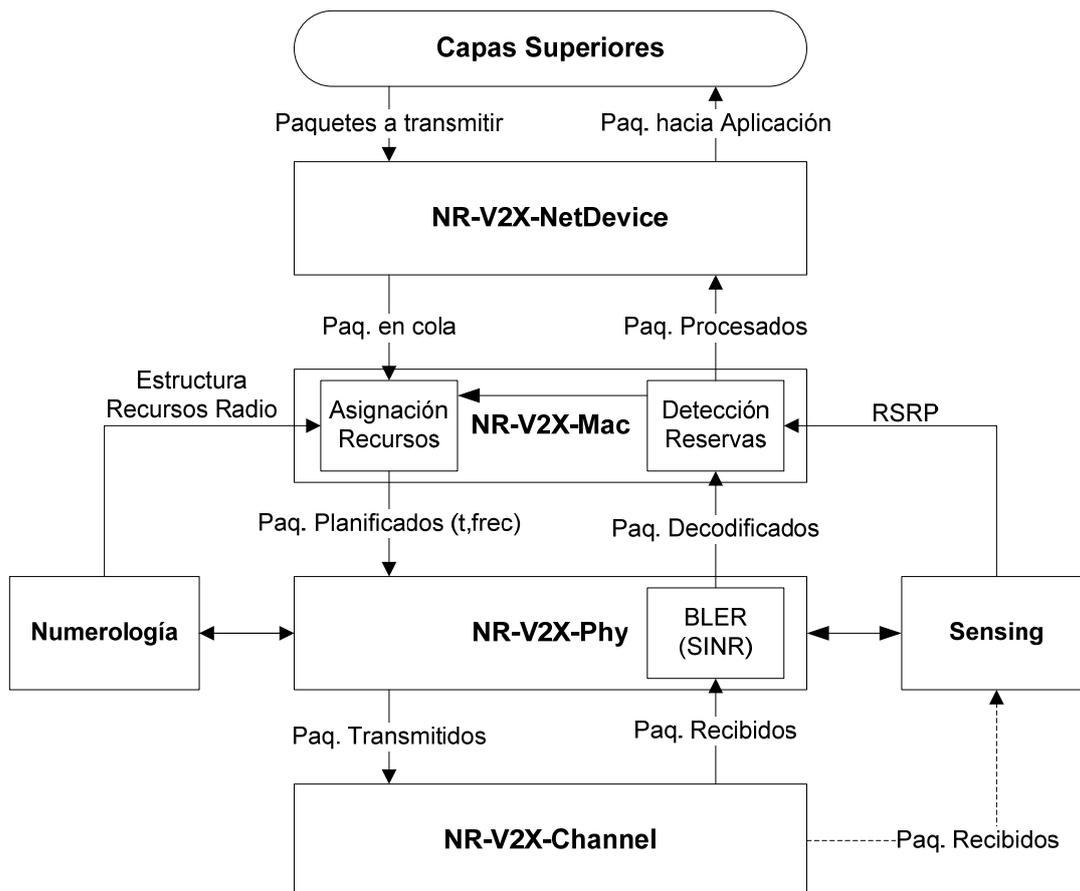


Figura 8. Arquitectura de la implementación de 5G NR V2X en ns-3.

Las capas que han sido implementadas en el marco del presente proyecto son:

- Capa MAC: NR-V2X-Mac
- Capa PHY: NR-V2X-Phy

Además, se han implementado dos entidades que son necesarias en el entorno de simulación de ns-3:

- Interfaz de Red: NR-V2X-NetDevice
- Canal Radio: NR-V2X-Channel

Para la explicación de las capas y entidades desarrolladas se seguirá el flujo que siguen los paquetes dentro del diagrama de la Figura 8. La entidad *NR-V2X-NetDevice* realiza las funciones de interfaz de red entre las capas superiores (aplicación, transporte, red, etc.) y las capas inferiores (acceso al medio, física, etc.) asociadas a una tecnología en concreto. Por ejemplo, en ns-3, si se necesita que los nodos sean capaces de comunicarse entre ellos empleando la tecnología Wi-Fi, estos han de configurarse con la interfaz *WifiNetDevice*. Otros ejemplos de interfaces disponibles en ns-3 son *LteNetDevice*, *WaveNetDevice*, etc. En el marco del presente proyecto se ha definido e implementado una nueva interfaz asociada a la tecnología 5G NR V2X que ha sido llamada NR-V2X-NetDevice.

A continuación, en la capa de acceso al medio se ha implementado *NR-V2X-Mac* (Figura 8). Esta capa implementa el modo 2 de gestión de recursos radio 5G NR V2X (ver Sección 2.6). Su función principal es la gestión de recursos radio (tiempo, frecuencia) para que todos los vehículos puedan transmitir sus paquetes al medio de forma coordinada y distribuida, es decir, sin asistencia por parte de la infraestructura de red. De la capa *NR-V2X-Mac* destacan dos funciones: “*Asignación Recursos*” y “*Detección Reservas*” (Figura 8). El algoritmo “*Asignación Recursos*” gestiona la selección y la reserva de los recursos de cada vehículo basándose en los recursos que detecta disponibles. Para saber los recursos disponibles, el vehículo tiene en cuenta las reservas realizadas por otros vehículos. Las reservas de recursos realizadas por otros vehículos son detectadas mediante el módulo “*Detección Reservas*”.

La capa *NR-V2X-Phy* se encarga de configurar los parámetros de transmisión como potencia de transmisión, modulación (por ejemplo, QPSK, 16-QAM, etc.) y tasa de codificación (por ejemplo, $r0.5$, $r0.7$, etc.). En la parte de recepción, esta capa tiene la tarea de decodificar los paquetes recibidos. Para ello, gestiona el nivel de señal recibido, el ruido y las interferencias. Además, en 5G NR V2X la capa física realiza otra función importante: el *Sensing* (Figura 8). El *Sensing* aporta información actualizada del estado del canal, que es útil para la capa *NR-V2X-Mac*. En concreto, la funcionalidad de *Sensing* se encarga de proporcionar información acerca de la potencia recibida por los paquetes transmitidos por otros vehículos/nodos a la capa MAC. Esta información se recoge en la métrica *Reference Signal Received Power* (RSRP) y se asocia a cada uno de los paquetes que han sido recibidos.

Dentro de la arquitectura presentada en la Figura 8, la entidad que se encuentra más abajo es la asociada al canal radio *NR-V2X-Channel*. Esta entidad se encarga de entregar los paquetes enviados por un vehículo a todos los vehículos que estén configurados como receptores. En la implementación del canal se han incluido los modelos de *pathloss* y de *shadowing* correlado que indica el estándar 3GPP 5G NR V2X, los cuales serán detallados en la Sección 3.1.5.

Utilizando el esquema de la Figura 8, los siguientes puntos resumen los procesos por los que pasa un paquete desde que es generado en las capas superiores (capa de aplicación) de un vehículo hasta que es recibido en la capa de aplicación de otro vehículo.

Transmisión:

- Generación del paquete en “Capas Superiores” del vehículo transmisor.
- Procesado del paquete en capas de Transporte y de Red.
- El paquete para transmitir (“Paquetes a transmitir”) llega a la *NR-V2X-NetDevice* y se introduce en una cola (“Paq. en cola”) antes de ser procesado por *NR-V2X-Mac*.
- *NR-V2X-Mac* aplica el algoritmo “*Asignación Recursos*”, gracias a la información de “*Sensing*” recibida anteriormente desde la capa *NR-V2X-Phy* y teniendo en cuenta las reservas detectadas de otros vehículos con “*Detección Reservas*”. Además, también tiene en cuenta la estructura de recursos a utilizar, la cual es

configurada mediante el módulo “Numerología” de la capa *NR-V2X-Phy*. Tras aplicar “Asignación Recursos” se obtiene una planificación del paquete para su transmisión en un recurso radio (tiempo, frecuencia) concreto [“Paq. Planificados (t, frec)”].

- El paquete se envía a la capa *NR-V2X-Phy* para que lo envíe al canal *NR-V2X-Channel* (“Paq. Transmitidos”) con unos parámetros concretos de transmisión.

Canal:

- Al paquete, y concretamente a sus parámetros de transmisión asociados, se les aplica el modelo de canal en cuanto a pérdidas por propagación (pathloss), shadowing y delay (retardo).

Recepción:

- El paquete es recibido por la capa *NR-V2X-Phy* en primer lugar (“Paq. Recibidos”). Esta capa comprueba si con los parámetros de recepción (potencia recibida, modulación, codificación, interferencias) es capaz de decodificar el paquete y/o la información de control incluida en el SCI.
- El paquete pasa a la capa *NR-V2X-Mac* y se comprueba si se ha decodificado correctamente (“Paq. Decodificados”). Si no es el caso se descarta. También comprueba si se ha decodificado correctamente el SCI. Si el SCI se ha decodificado correctamente, el vehículo comprueba si el SCI contiene alguna reserva de recursos mediante el módulo “Detección Reservas”. Si es así, el vehículo reenvía esta información de las reservas al módulo “Asignación Recursos” para que lo tenga en cuenta para la siguiente asignación de recursos.
- El paquete, si ha sido correctamente recibido (“Paq. Procesados”), se reenvía a la *NR-V2X-NetDevice* que se encarga de entregárselo a las capas superiores (“Paq. hacia Aplicación”).

Cabe destacar que, según el estándar 3GPP 5G NR V2X [22], el SCI y el TB son dos transmisiones diferenciadas a nivel de capa PHY. En ns-3, por simplicidad de implementación, se han incluido ambas transmisiones (SCI+TB) en una misma instancia de paquete ns-3. El SCI realiza la función de *header* y el TB de *payload* (Figura 9). A nivel de funcionalidad, esta implementación no representa ninguna modificación del estándar, ya que *header* y *payload* del paquete son tratados de forma independiente como dos entidades diferentes. De esta manera, se puede recibir el SCI correctamente, habiéndose producido un error en la recepción del TB, y viceversa.



Figura 9. Modelo de paquete NR-V2X (SCI + TB) en ns-3.

3.1.3 Capa MAC

En sección se centra en describir el diagrama general de las funciones que conforman la implementación de la capa *NR-V2X-Mac* (Figura 10).

Antes de comenzar la descripción de la capa MAC, es importante destacar la nomenclatura empleada en ns-3 para representar a qué capa o entidad de red pertenece una función. Esta nomenclatura, heredada del lenguaje de programación C++, va a ser utilizada a lo largo de estas explicaciones. La nomenclatura seguida por ns3 es: (nombre capa/entidad)::(nombre función).

En la Figura 10 se representa el diagrama general de la capa MAC. La parte del diagrama que comienza por el bloque *NR-V2X-NetDevice::Send* y que termina en *NR-V2X-Phy::SendPhy* representa la sección empleada para la **transmisión** de paquetes. La sección que empieza por el bloque *NR-V2X-Phy::RxEnd* y que finaliza con el bloque *NR-V2X-NetDevice::Receive* se asocia a la **recepción**. La parte del diagrama que comienza por el bloque *NR-V2X-Phy::SensingRSRP* y que termina en la función *ResourceAllocation* se asocia con el procedimiento de **Sensing** donde se reciben datos de sensado desde la capa *NR-V2X-Phy*.

En la sección de **transmisión**, se observa que los paquetes generados llegan a esta capa desde la función *NR-V2X-NetDevice::Send* y van a parar a la función *ResourceAllocation*. En esta función se aplica el esquema de asignación de recursos de 5G NR V2X Modo 2 que esté activo (*Semi-persistent Scheme*, SPS; o *Dynamic Scheme*, DS) y se planifica el envío de los paquetes para un slot o ranura temporal y uno (o más) subcanal(es) en la transmisión ([Slot, Subcanal] de TX). Para ello se hace uso de información de sensado procedente de la capa *NR-V2X-Phy* (reservas detectadas en el SCI y nivel de señal de RSRP). El siguiente paso consiste en realizar la configuración de la capa PHY mediante la función *configPhy*. Con esta configuración se definen unos parámetros de transmisión asociados al paquete que servirán posteriormente para simular cómo los paquetes viajan a través del canal radio *NR-V2X-Channel*. La función *configPhy* comunica con *rbsPerPacket* para saber los *Resources Block* (RBs) que precisa emplear el vehículo para transmitir un paquete de un tamaño concreto. La función *rbsPerPacket* tiene en cuenta la configuración de recursos radio (es decir, duración del slot e intervalo frecuencial de RB) definida mediante el *subcarrier spacing* (SCS) en la capa PHY con la función *NR-V2X-Phy::Numerology*; además también considera un determinado modo de transmisión (MCS). Tras la ejecución de estas dos funciones, el paquete se redirige hacia la función *NR-V2X-Phy::SendPhy*. Previamente, si el mecanismo de gestión de recursos radio empelado es SPS, el *Reselection Counter* o contador de las transmisiones seleccionadas de forma semipersistente se decrementa en uno (*resCounter--*).

En la parte de **recepción** del diagrama de la Figura 10, los paquetes son recibidos por la función *NR-V2X-Phy::RxEnd* y se procesan en la función *ReceiveAndReserve*. En la implementación desarrollada en el marco del presente proyecto, la capa *NR-V2X-Phy*, entre otras funciones, se encarga de comprobar si los paquetes son recibidos correctamente o no, y así los marca con un *flag*. La función *ReceiveAndReserve* comprueba ese *flag* y descarta o no el paquete. Además, esta misma función registra la reserva de recursos con la información recibida en el SCI asociado al paquete (TB). Esta información se envía a la función *ResourceAllocation* para que el vehículo lo tenga en cuenta para la siguiente selección de recursos.

Por último, la funcionalidad asociada al **Sensing** se encarga de proporcionar la función *ResourceAllocation* la información del nivel de RSRP de los paquetes recibidos desde la capa *NR-V2X-Phy*. Esta métrica es de utilidad para la selección de recursos en 5G NR V2X Modo 2.

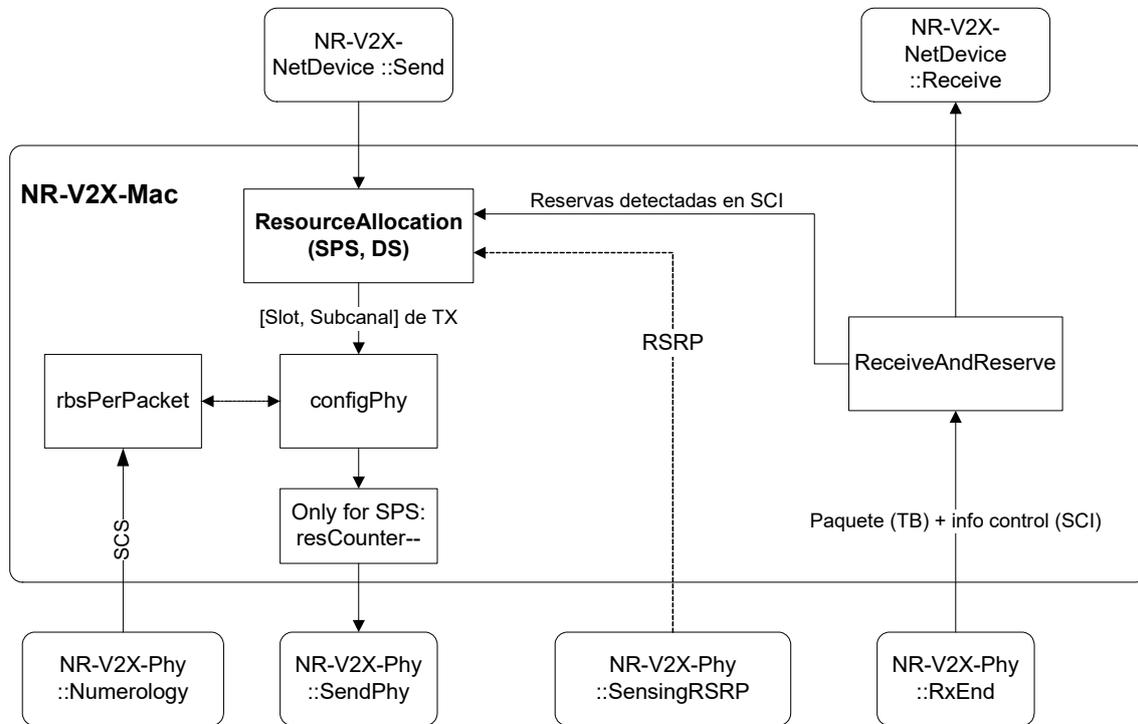


Figura 10. Diagrama general de la implementación de la capa MAC de 5G NR V2X en ns-3.

3.1.3.1 Asignación de recursos radio

3.1.3.1.1 Semi-persistent scheme

NR-V2X-Mac::ResourceAllocation se encarga principalmente de ejecutar el algoritmo de gestión de recursos radio distribuido y sin asistencia por parte de la infraestructura de red (Modo 2). De tal manera que cada vez que llega un paquete, se le asocian unos recursos radio para su transmisión.

En la Figura 11 se representa el diagrama de flujo que realiza la función *NR-V2X-Mac::ResourceAllocation* cuando el mecanismo *semi-persistent scheme* (SPS) está ejecutándose. Los paquetes son recibidos por esta función desde *NR-V2X-NetDevice::Send*. Suponiendo que ya se ha ejecutado anteriormente el mecanismo SPS y existen ciertos recursos radio seleccionados, lo primero que se comprueba en la función *NR-V2X-Mac::ResourceAllocation* es si se debe realizar una reelección por tamaño. Es decir, si el número de subcanales necesarios para el paquete generado (*Nsch* en Figura 11) es mayor al número de subcanales elegidos en la anterior transmisión (prev_Nsch en Figura 11). A la vez también se comprueba si se debe realizar una reelección por latencia (*Resel. Lat* en Figura 11). Es decir, si el slot de los recursos

asignados no cumple con el requisito de latencia del paquete generado ($Slot-Slot_now > PDB$, en Figura 11). Si es así, han de seleccionarse nuevos recursos. A continuación, también se comprueba el estado del *reselection counter* (*resCounter* en Figura 11), que representa el número de transmisiones para las cuales se va a utilizar el mismo recurso radio para transmitir. Cuando el *reselection counter* es igual a 0 han de seleccionarse también nuevos recursos. Además, en el algoritmo se incluye una probabilidad de selección de mismos recursos (*mismos recursos* (P) en Figura 11). Si se genera un número aleatorio que sea inferior a P , entonces se configura la selección de los mismos recursos. Es decir, los slots de transmisión empleados (*Slots* en Figura 11) son los mismos que los utilizados en el paquete anterior (*prev_Slots* en Figura 11); los subcanales de transmisión escogidos son el mismo que en el paquete anterior (*prev_Schs* en Figura 11); y el número de subcanales seleccionados es el mismo que el correspondiente al paquete anterior (*prev_Nsch* en Figura 11).

El diagrama del algoritmo de asignación de nuevos recursos también se muestra en la Figura 11, y comienza por la definición de la Ventana de selección ($[n+T1, n+T2]$). El PASO 1 (Figura 11) se utiliza para excluir los recursos que se consideran no disponibles de la ventana de selección, normalmente porque son reservados por otros vehículos. Los recursos no excluidos se introducen en una lista L1, que debe contener como mínimo el X% de la totalidad de los recursos de la ventana de selección ($L1 = Rec. no excluidos$ en Figura 11). Si al finalizar el paso 1 del algoritmo, la lista L1 no tiene al menos el X% de los recursos, el umbral o *threshold* RSRP se aumenta en 3dB y el paso 1 debe ejecutarse iterativamente hasta obtener como mínimo el X%. X puede ser igual a 20, 30 o 50 según el estándar 3GPP 5G NR V2X (ver Sección 2.6).

Al finalizar el paso 1 del algoritmo, el vehículo tiene en L1 al menos el X% de recursos de la ventana de selección disponibles para realizar una selección definitiva sobre el recurso o los N recursos a emplear para la transmisión. Dicha selección se realiza de forma aleatoria si $N=1$, mientras que si $N>1$ esta selección debe cumplir unas restricciones tal y como se explica en la descripción de la implementación del paso 2 en Sección 3.1.3.1.4. A continuación, se programa una llamada a re-evaluation en el slot $m1-T3$. Donde $m1$ es el slot del recurso que va antes en tiempo de todos los seleccionados. Re-evaluation se encarga de comprobar si los recursos seleccionados siguen disponibles unos slots antes de la 1ª transmisión en $m1$. Si no siguen disponibles, re-evaluation permite seleccionar nuevos recursos ejecutando de nuevo el paso 2. Por ejemplo, sustituyendo el recurso cuyo slot estaba situado en $m1$, con una nueva selección situándose ahora en el slot $m1'$. Si re-evaluation realiza un cambio de recursos seleccionados, entonces se puede volver a programar una llamada a re-evaluation (si las restricciones temporales de T3 lo permiten) considerando la nueva localización en tiempo de los recursos (por ejemplo en el slot $m1'$). Cuando re-evaluation no cambia los recursos seleccionados, o cuando re-evaluation no puede volver a ejecutarse por restricciones temporales (T3), la salida de éste se trata de los N recursos finales de transmisión ($N Rec. de transmisión$ en Figura 11). Junto con dicha selección de subcanal(es) y slots se obtiene un nuevo valor entero de *reselection counter* entre $5*C$ y $15*C$ ($resCounter \in [5*C, 15*C]$ en Figura 11). Por tanto, la selección final de recursos se mantendrá un número de transmisiones igual al

nuevo valor de *reselection counter*, a no ser que se produzca una reelección por latencia o por tamaño antes (Figura 11).

Tras el PASO 2 y Re-evaluation (ver Figura 11), se genera el SCI y se introduce en él información de *scheduling* del paquete. Esta información es la siguiente:

- Primer subcanal seleccionado para la transmisión donde se transmite el SCI
- Número de subcanales
- *Resource Reservation Interval* (RRI)
- Reservar retransmisión/es (variable booleana)
- Diferencia de slots con 1ª retransmisión siguiente, o 1ª y 2ª retransmisiones siguientes desde el slot donde se transmite el SCI.
- Primer subcanal seleccionado para 1 ó 2 retransmisiones siguientes

Por último, en la Figura 11, se programa la llamada a la función *NR-V2X-Mac::configPhy* con un *delay* (retardo) igual a la planificación realizada con el mecanismo *semi-persistent scheme*. Este delay depende de los slots que falten para cada una de las transmisiones programadas del paquete.

3.1.3.1.2 *Dynamic scheme*

Dynamic scheme es un esquema de asignación de recursos de 5G NR V2X modo 2 que utiliza gran parte del mismo procedimiento de selección de recursos que *semi-persistent scheme*. La principal diferencia es que *dynamic scheme* no selecciona ni reserva recursos para la transmisión de un paquete futuro que aún no haya sido generado. Entonces, *dynamic scheme* seleccionan nuevos recursos para cada paquete generado. Esto hace que *dynamic scheme* no implemente funcionalidades como reelección por tamaño, reelección por latencia o el *reselection counter* introducidas en *semi-persistent scheme* (ver Figura 11). La Figura 12 muestra el algoritmo de asignación de recursos de *dynamic scheme*. Por las razones explicadas anteriormente, es importante señalar que los bloques que conforman la implementación de *dynamic scheme* son un subconjunto de los bloques que conforman la implementación de *semi-persistent scheme* (Figura 11).

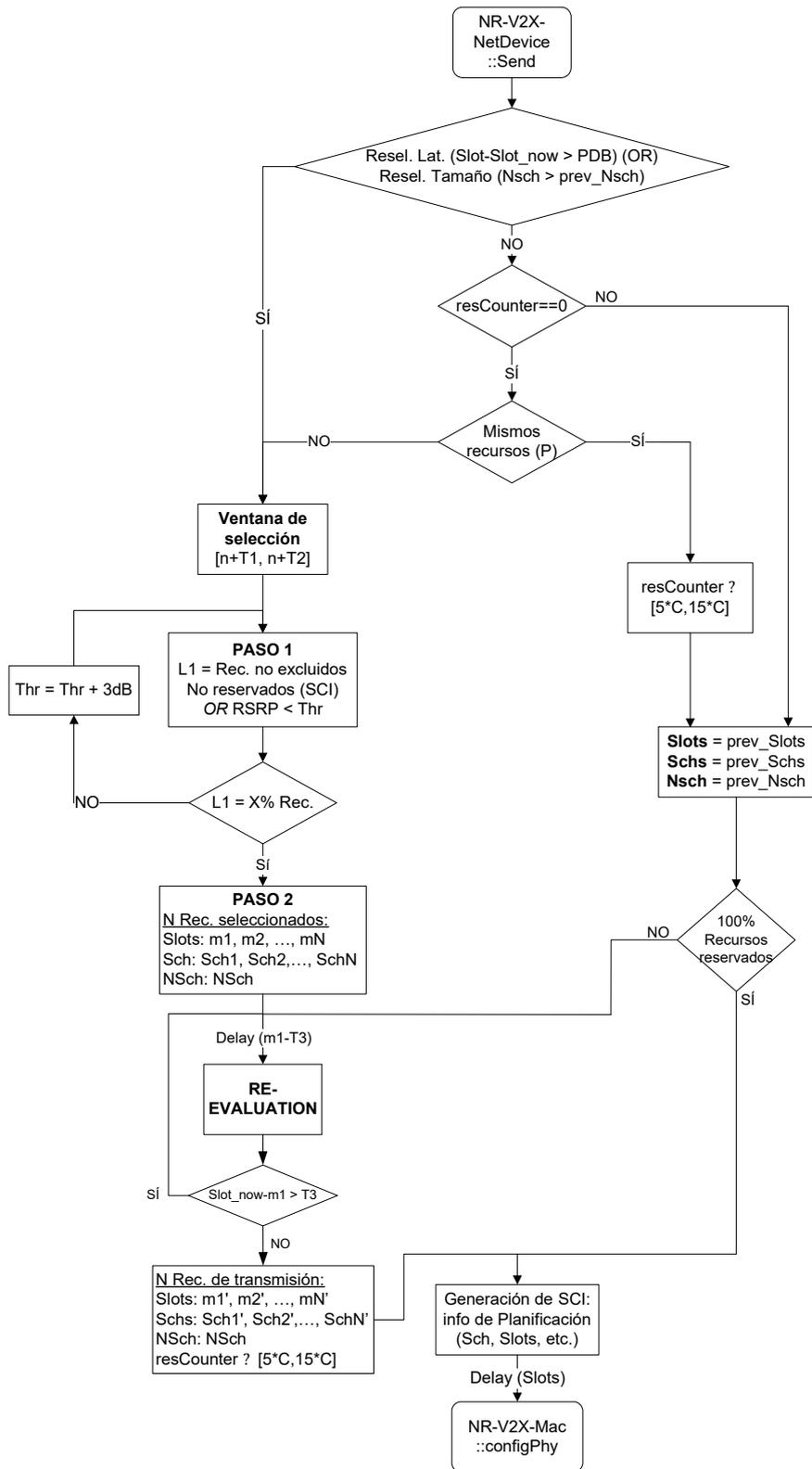


Figura 11. Diagrama de flujo NR-V2X-Mac::ResourceAllocation (SPS)

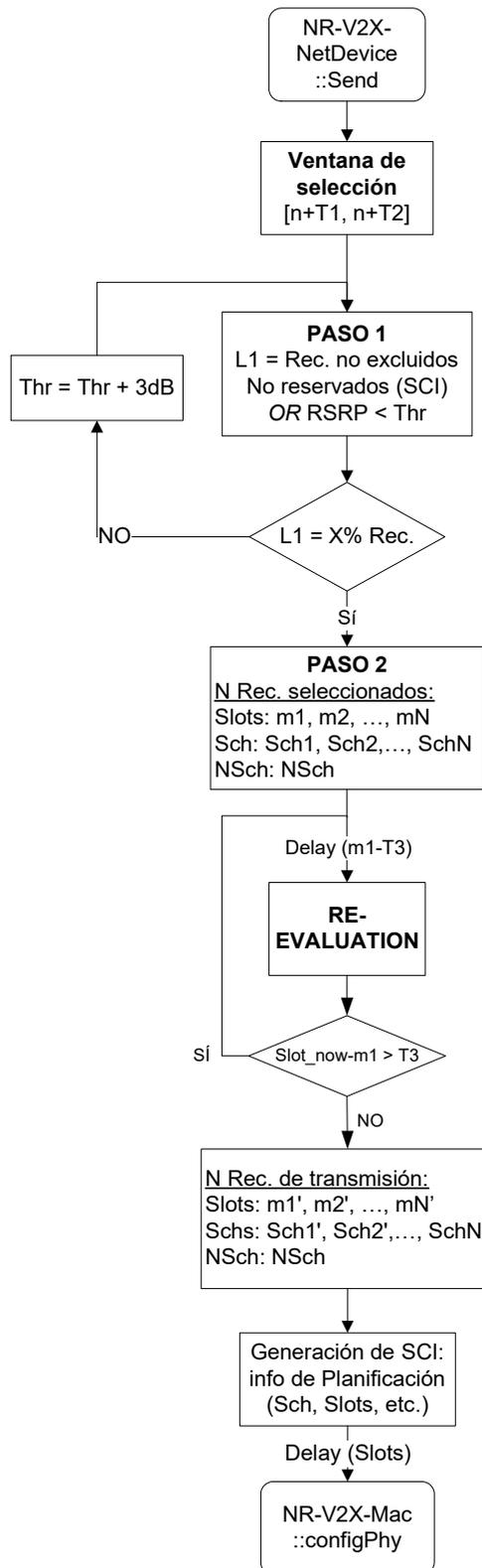


Figura 12. Diagrama de flujo NR-V2X-Mac::ResourceAllocation (Dynamic Scheme)

3.1.3.1.3 Paso 1

En la Figura 13 se representa detalladamente el procedimiento realizado en el paso 1 del algoritmo de asignación de recursos de 5G NR V2X Modo 2, aplicable para dynamic scheme y semi-persistent scheme. En el paso 1 se realiza una evaluación de todos los recursos candidatos de la ventana de selección definida en el intervalo de slots $[n+T1, n+T2]$. Al principio se inicializa el contador (k) que se asocia al índice de los recursos candidatos. También se inicializan los contadores asociados a los índices de subcanal (i) y slot (j) asociados al recurso candidato k . Para realizar la evaluación de los recursos (*Evaluación Rec[k]* en Figura 13), se evalúan todos los slots (*Slot[j]* en Figura 13) y subcanales (*Sch[i]* en Figura 13) pertenecientes a los recursos candidatos de la ventana de selección. Un recurso candidato está formado por 1 slot en tiempo y un número de subcanales ($Nsch$) en frecuencia. Para cada recurso candidato se comprueba primero si debe ser excluido por Half-duplex considerando los slots de la sensing window donde ha transmitido el vehículo previamente y los RRI's incluidos en la lista de RRI's permitidos (ver Sección 2.6.1). Si es así, el recurso se considera excluido (*Rec[k] excluido* en Figura 13). Si no es así, se hace una segunda comprobación del recurso en base a las reservas recibidas. Concretamente, se comprueba si el recurso ha sido reservado previamente por otro vehículo mediante el SCI (*Rec. Reservado* en Figura 13) y si la medida de RSRP de los RBs del TB asociado al SCI supera un cierto umbral de RSRP ($RSRP > Thr$ en Figura 13). Si esto ocurre, el recurso se excluye. Si, por el contrario, alguna de las dos condiciones de exclusión representada en la Figura 13 no se cumple, entonces el recurso no se excluye de la lista L1 de recursos candidatos no excluidos (*Rec[k] no excluido* en Figura 13). Tras la evaluación de cada recurso, se comprueba si existen más recursos candidatos en la ventana de selección para ser evaluados. Si se detecta que el slot actualmente evaluado se corresponde con el último de la ventana de selección ($Slot[j] == n+T2$ en Figura 13), entonces se comprueba el índice del subcanal actualmente evaluado. Si el slot actualmente evaluado ($Slot[j]$) no es el último de la ventana de selección ($Slot[j] == n+T2$), entonces se incrementa el contador asociado a los slots ($j++$ en Figura 13) y a los recursos candidatos ($k++$) para evaluar el siguiente recurso candidato. Si el subcanal actualmente evaluado se corresponde con el último subcanal de la ventana de selección ($Sch[i] == Sch[end]$ en Figura 13), se da por finalizada esta iteración del paso 1 del algoritmo. Si no es así, se incrementa el contador asociado al índice de los subcanales ($i++$ en Figura 13) y al índice de los recursos candidatos ($k++$) para evaluar el siguiente recurso candidato. Tras ejecutar el paso 1 del algoritmo, se obtiene una lista L1 con los recursos candidatos no excluidos ($L1 = Rec. no excluidos$ en Figura 13).

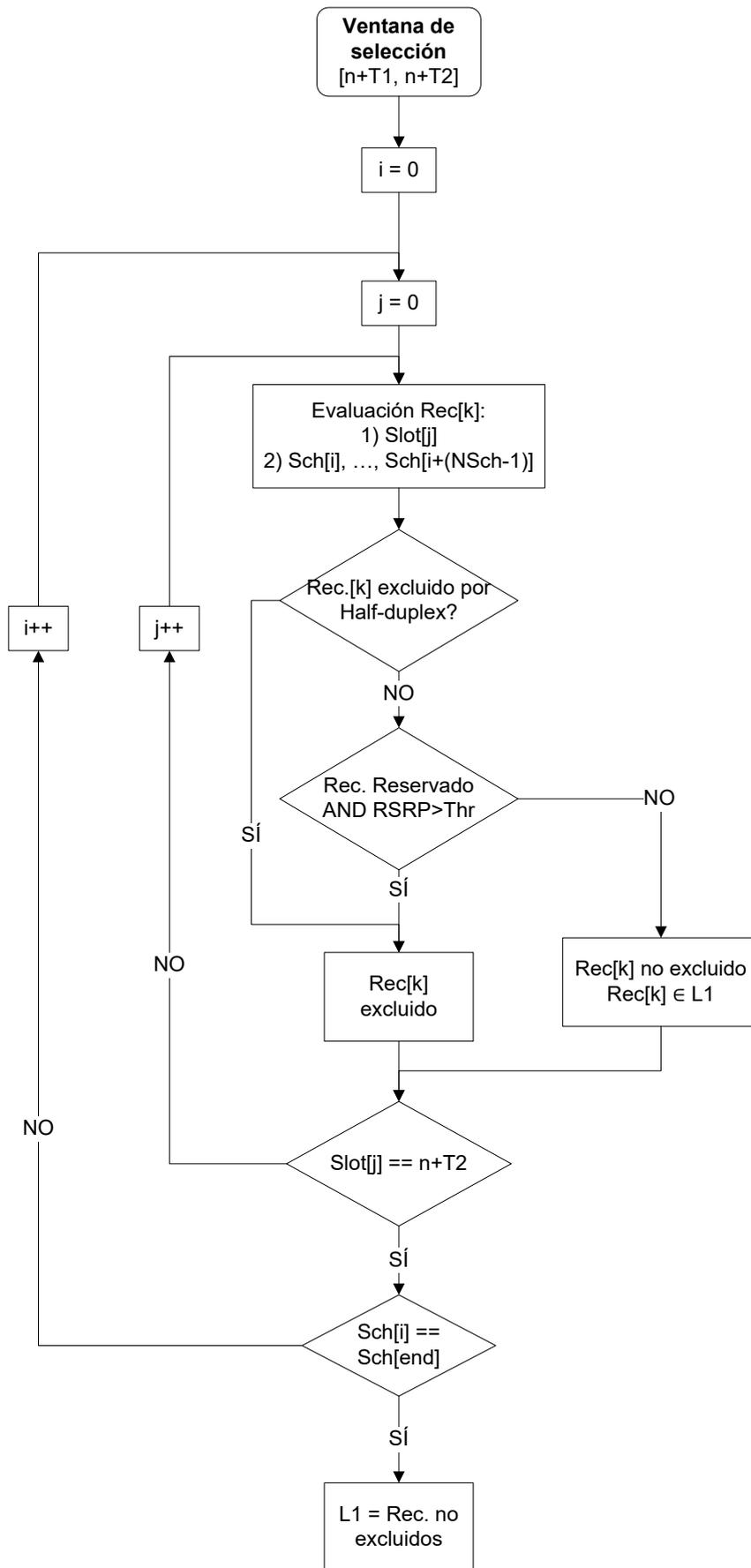


Figura 13. Implementación del paso 1 de 5G NR V2X Modo 2

3.1.3.1.4 Paso 2 (con retransmisiones)

La Figura 14 muestra el procedimiento detallado del paso 2 de 5G NR V2X modo 2 implementado para la selección de recursos radio (ver Sección 2.6.2.2 y Sección 2.6.2.3). El vehículo ejecuta el paso 2 después de que el paso 1 obtenga la lista L1 con los recursos candidatos no excluidos. El vehículo tiene que seleccionar N recursos candidatos de esa lista con el paso 2. Por tanto, N tiene que ser menor al tamaño (o número de recursos disponibles) de la lista L1. En primer lugar, el vehículo selecciona de forma aleatoria un recurso (recurso 1) considerando todos los recursos de la ventana de selección que se encuentren en L1. Por ejemplo, este recurso puede estar situado en el slot $m1$ y el subcanal Sch1. Si $N=1$ entonces el vehículo ya ha seleccionado el recurso que necesita para la transmisión. Si $N>1$ el vehículo necesita seleccionar más recursos. Para ello, el vehículo habilita el rango de slots $[m1-31, m1+31]$ para la selección del 2º recurso ($K=2$). El vehículo comprueba si hay recursos disponibles en L1 dentro del rango de slots habilitado. Si es así, el vehículo selecciona el recurso K de forma aleatoria dentro de ese rango. Por ejemplo, este recurso seleccionado está situado en el slot mK y el subcanal $SchK$. Tras esta selección, y si $K<N$, el vehículo habilita un nuevo rango de slots para la selección del siguiente recurso ($K++$). Este nuevo rango de slots es $[mK-31, mK+31]$. Si no hay recursos disponibles en los rangos de slots habilitados para algún recurso K , entonces el vehículo selecciona dicho recurso de forma aleatoria en toda la ventana de selección. El vehículo prosigue seleccionando recursos con este procedimiento hasta llegar a N recursos. En ese momento la condición $K<N$ (ver Figura 14) no se cumple, y el vehículo finaliza la selección de los N recursos.

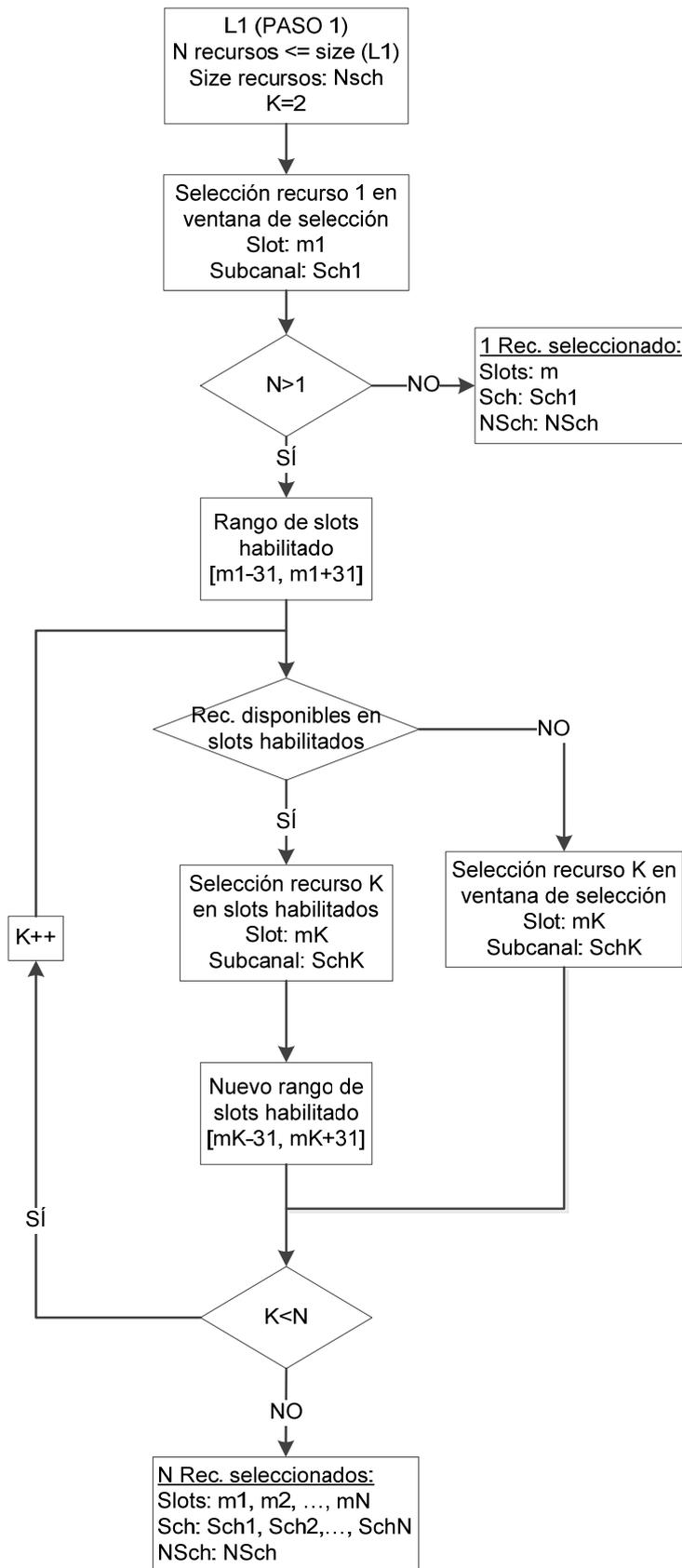


Figura 14. Implementación del paso 2 de 5G NR V2X Modo 2

3.1.3.1.5 Re-evaluation

La Figura 15 muestra el procedimiento detallado del mecanismo de re-evaluation implementado. Tras ejecutar el paso 2 de Modo 2 y seleccionar N recursos iniciales, el vehículo programa un el instante para iniciar el mecanismo de re-evaluation $T3$ slots antes del 1er recurso seleccionado ($Delay(m1-T3)$ en Figura 15). El mecanismo de re-evaluation comienza con una ejecución de paso 1. Con el paso 1 el vehículo actualiza la lista $L1$ ($L1'$ en Figura 15) de recursos candidatos no excluidos. El vehículo comprueba para cada recurso K inicialmente seleccionado si se encuentra dentro de $L1'$, y por tanto si el recurso sigue considerándose no excluido. Si un recurso K ahora no está dentro de $L1'$, entonces este recurso queda marcado para ser reevaluado. Con cada recurso K comprobado se incrementa en uno el valor de K ($K++$ en Figura 15). Esta comprobación se realiza para los N recursos hasta que la condición $K \leq N$ (Figura 15) no se cumple. A continuación, el vehículo ejecuta de nuevo el paso 2 sólo para los recursos marcados, de tal manera que el vehículo obtiene la nueva localización del recurso en términos de slots (mK') y de subcanal ($SchK'$). El tamaño del recurso en número de subcanales se mantiene igual ($Nsch$). Con la nueva ejecución del paso 2 es posible que el primer recurso esté localizado en un slot distinto ($m1'$) al que estaba con la selección inicial ($m1$). El vehículo toma este nuevo slot $m1'$ como referencia para comprobar si tiene tiempo suficiente desde el slot actual ($Slot_now$ en Figura 15) para ejecutar una nueva iteración completa del mecanismo de re-evaluation. Es decir, comprueba si la condición $m1' - Slot_now \geq T3$ se cumple (ver Figura 15). Si se cumple, el vehículo ejecuta una nueva iteración de re-evaluation programada en el slot $m1' - T3$. Si no se cumple la condición, el vehículo considera definitiva la selección de recursos para utilizarlos para su transmisión (N Rec. de transmisión en Figura 15).

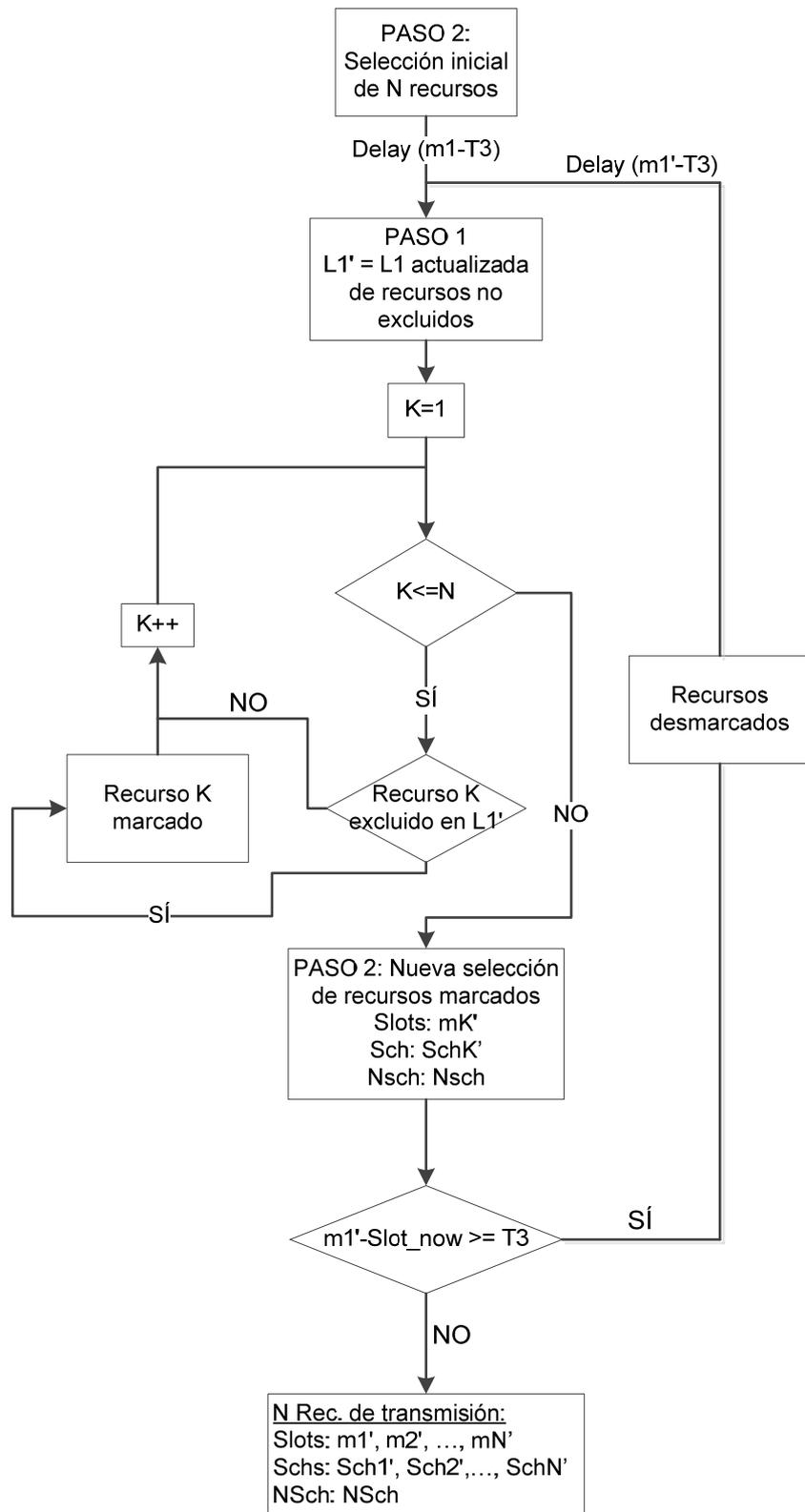


Figura 15. Implementación del mecanismo de re-evaluation de 5G NR V2X Modo 2

3.1.3.1.6 Reservas de recursos radio

En la Figura 16 se muestra un diagrama de flujo de la función *NR-V2X-Mac::ReceiveAndReserve*. Esta función se encarga de registrar las reservas de recursos radio y de redirigir el paquete correctamente recibido a capas superiores. Los paquetes

(*Paquete[i]* en Figura 16) llegan a esta función desde *NR-V2X-Phy::RxEnd*. La capa *NR-V2X-Phy* se ha encargado de marcar los paquetes que han sido decodificados correctamente y los que no. Concretamente, según la implementación de paquete NR-V2X de este trabajo (ver Figura 9 en la Sección 3.1.2), se realiza un marcado independiente para el SCI y el TB. El SCI contiene información crítica para decodificar correctamente el TB, por tanto, si no se ha recibido un marcado de "OK" en SCI (*SCI RX OK* en Figura 16), el paquete directamente se descarta por considerarse erróneo. Si se recibe el SCI correctamente, entonces se puede acceder a la información de scheduling que contiene. Si el campo del SCI *Reservar retransmisión/es* (*ReserveReTx* en Figura 16) es igual a *true*, se inicia el proceso de reserva de los recursos para las retransmisiones incluidos en el SCI recibido. Primero se inicia el proceso de reserva del recurso de la 1ª retransmisión ($M=1$ en Figura 16). A continuación, se comprueba si el número de recursos reservados es menor al número máximo de recursos que puede reservar el SCI ($M < N_{sci}$ en Figura 16). Si es así, se reserva el recurso de la retransmisión M . A continuación, se repite el proceso para la siguiente retransmisión ($M++$ en Figura 16). Se repite el proceso sucesivamente hasta que la condición $M < N_{sci}$ no se cumple. Cuando esto ocurre, se comprueban las reservas del SCI para la transmisión del siguiente paquete nuevo que se genere. Para ello, se comprueba si $RRI=0$ (Figura 16). Si es así, el vehículo no tiene que realizar reservas para el siguiente paquete nuevo. En cambio, si RRI no es igual a 0, entonces el vehículo tiene que realizar reservas para el siguiente paquete nuevo considerando el valor de RRI incluido en el SCI. Concretamente el vehículo reserva recursos para la 1ª transmisión (TX) del siguiente paquete nuevo que se genere, y para sus posibles retransmisiones (ReTX) configuradas en el SCI recibido ($Slots_{M+RRI}$ en Figura 16). Posteriormente, la capa MAC contacta con la capa PHY para que proporcione el valor calculado de RSRP de los RBs empleados para el TB (*obtener RSRP TB* en Figura 16) del paquete recibido. El valor de RSRP es asignado a todas las reservas registradas con el SCI recibido. Si el TB ha sido recibido correctamente (*TB RX OK* en Figura 16), el paquete se reenvía a capas superiores mediante la función *NR-V2X-NetDevice::Receive*. Por el contrario, si la capa PHY ha detectado algún error, el paquete se descarta.

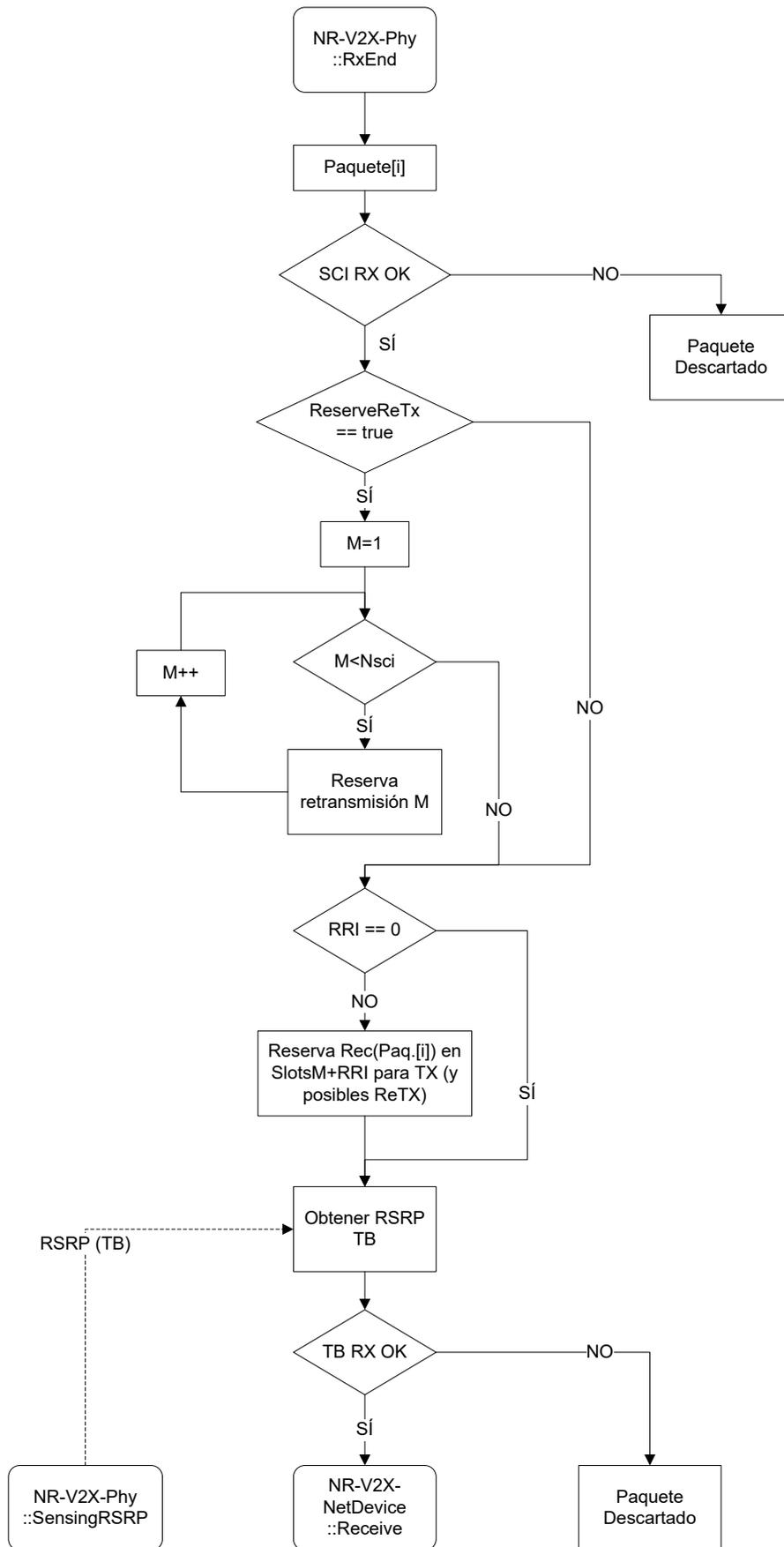


Figura 16. Implementación de la función NR-V2X-Mac::ReceiveAndReserve

3.1.4 Implementación de la capa PHY NR V2X

En la Figura 17 se representa el diagrama general de la capa PHY. En la parte del diagrama que comienza por el bloque *NR-V2X-Mac::configPhy* y que termina con *NR-V2X-Channel::Send*, se representa la sección empleada para la transmisión de paquetes. La zona del diagrama que comienza por el bloque *NR-V2X-Channel::Receive* y finaliza con *NR-V2X-Mac::ReceiveAndReserve*, empleando flechas con línea continua, simboliza la recepción. La parte del diagrama que comienza con *NR-V2X-Channel::Receive* y que termina con el bloque *NR-V2X-Mac::ResourceAllocation*, utilizando flechas con línea discontinua, se asocia con el procedimiento de *Sensing*. También se representa una máquina de estados de la capa *NR-V2X-Phy*, donde se aprecian dos estados, transmisión (*TX*) y recepción (*RX*). Asimismo también se incluye el bloque de la función *NR-V2X-Phy::Numerology*. Esta función se encarga de configurar los recursos radio en base a la numerología configurada.

Comenzando por la transmisión, se observa una única función, *SendPhy* (Figura 17). Esta función se encarga de reenviar hacia el canal radio los paquetes que le llegan desde la capa MAC. Para ello utiliza la configuración de transmisión indicada por la capa MAC mediante la función *NR-V2X-Mac::configPhy*. Antes de enviar el paquete hacia el canal radio, con el objetivo de gestionar la comunicación *half-duplex*, esta función cambia el estado de la capa *NR-V2X-Phy* de *RX* a *TX* y programa el cambio ha estado *RX* al final del slot en el que se ha realizado la transmisión.

En la parte de recepción asociada a la Figura 17, se observa, por un lado la función que recibe los paquetes directamente desde el canal (*NR-V2X-Channel::Receive*) *RxStart*. Esta función se ejecuta al comienzo del slot (sólo posee el retardo del canal) en el que se recibe una transmisión. En esta función se almacenan los paquetes que posteriormente van a intentar ser decodificados en *RxMiddle*, ya a mitad de la duración del slot. En *RxMiddle* se comunica con la función *blockSuccessRate* cuya utilidad es la obtención de un valor de *Block Error Rate* (BLER) en función de la SINR medida con el paquete. Para saber la relación entre BLER y SINR, el simulador implementa unas lookup tables (LUTs) proporcionadas en [23][24] para el TB y en [25] para el SCI. El objetivo final de la función *RxMiddle* consiste en realizar un marcado al SCI y al TB asociados al paquete, para indicar si se han recibido correctamente o no. Una vez realizado el marcado, se pasan cada uno de los paquetes a la función *RxEnd* que se ejecuta al final del slot. *RxEnd* tiene como objetivo pasar los paquetes hacia la capa MAC y eliminar los paquetes almacenados para este slot.

Finalmente, la Figura 17 incluye también las funciones de *Sensing* de esta capa. Esta función se encarga de sensar el canal para obtener el nivel de señal o RSRP de los paquetes recibidos. Para obtener el RSRP únicamente se sensan los RBs asociados a los TBs, cuyos SCIs han sido recibidos correctamente. Por tanto, sólo se mide el nivel de señal correspondiente a un paquete (*Paq. RX* en Figura 17); el que se esté decodificando en cada momento.

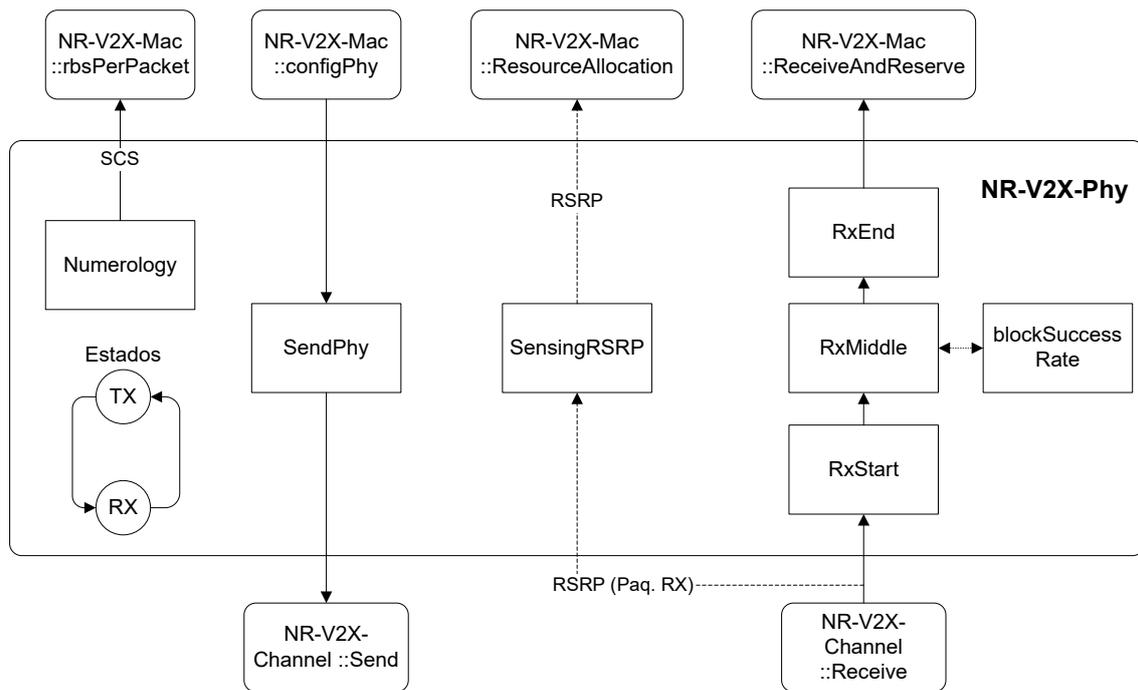


Figura 17. Diagrama general de la capa NR-V2X-Phy

3.1.4.1 Numerologías: configuración de recursos radio

La función *NR-V2X-Phy::Numerology* se encarga de configurar los recursos radio que son utilizados por los vehículos con 5G NR V2X Modo 2. La Figura 18 representa el diagrama de esta función. Para la configuración de recursos radio esta función toma como entrada el valor de μ (identificador de la numerología), y como resultado calcula los valores para un conjunto de variables miembro de la capa física que son las encargadas de definir la configuración de los recursos radio. Estas variables son: μ , duración del slot (ms), *subcarrier spacing* (SCS), ancho de banda (BW), tamaño de subcanal (subchannel size), ancho de banda del RB (BW(RB)), Número de RBs/BW y número de subcanales en la *resource pool*. Esta configuración de recursos radio realizada por esta función es utilizada por la función *NR-V2X-Mac::rbsPerPacket* de la capa MAC, la cual calcula el número de RBs que son necesarios para transmitir un paquete. Si bien, en general, estas variables también se utilizan para configurar los recursos que los vehículos seleccionan en capa MAC (Figura 8). En concreto, las variables definidas en esta función afectan a la implementación de elementos de la capa MAC dependientes de la configuración de los recursos radio como por ejemplo la ventana de selección, la ventana de sensado o el RRI.

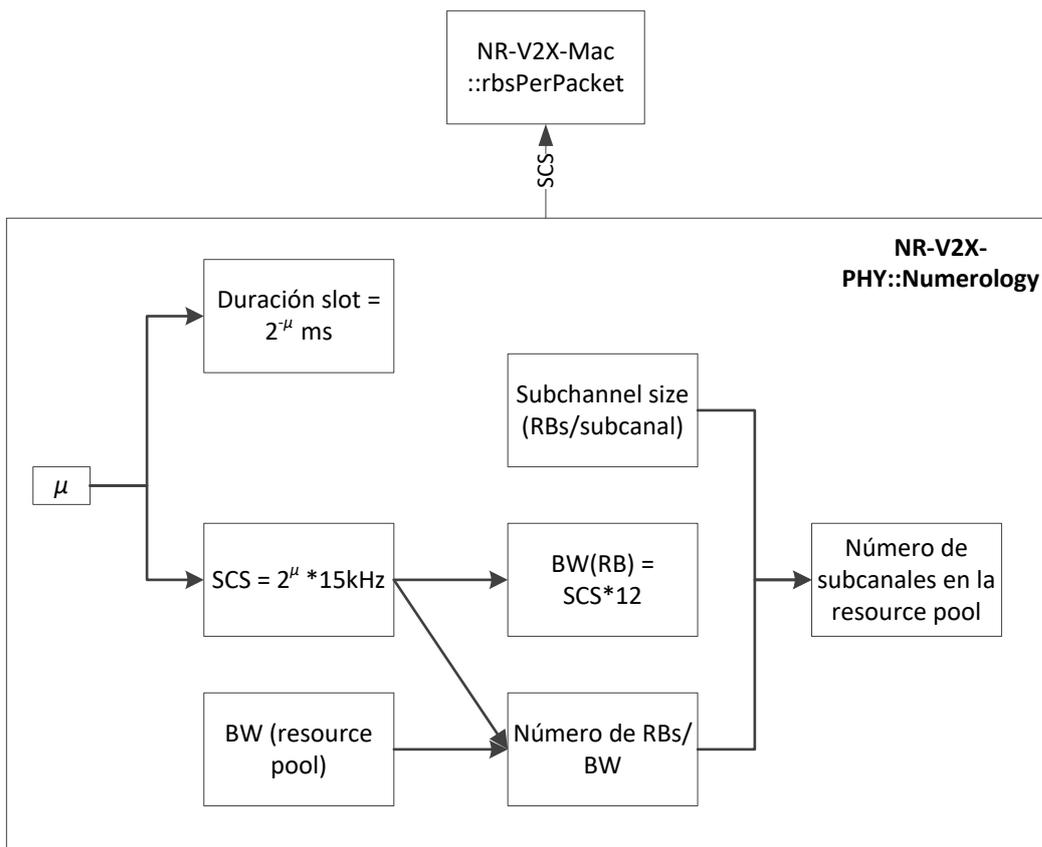


Figura 18. Diagrama general de la función NR-V2X-Phy::Numerology

3.1.4.2 Recepción y decodificación de paquetes de red

La recepción y decodificación de paquetes de red está principalmente implementada en la función *NR-V2X-Phy::RxMiddle*. A nivel de implementación, el objetivo principal de *NR-V2X-Phy::RxMiddle* consiste en realizar el marcado de los paquetes que han llegado en un slot. Este marcado se realiza mediante *flags* incluidos en el paquete. Los *flags* son variables destinadas a informar a la capa MAC si un SCI y/o TB ha sido decodificado correcta o erróneamente.

En la Figura 19 se representa el diagrama de flujo correspondiente a *NR-V2X-Phy::RxMiddle*. Como se puede observar, se comienza inicializando un contador (*i*) a 0. Este contador se encarga de identificar cada uno de los paquetes que han sido almacenados por la función *NR-V2X-Phy::RxStart*. *RxMiddle* se encarga de iterar por todos los paquetes recibidos anteriormente en la función *NR-V2X-Phy::RxStart*. Posteriormente, se hace uso de una función auxiliar (*MarkPacket_OK_Error(Paquete[i])*) para procesar cada uno de los paquetes de forma individual. A estos paquetes se les efectúa una marca de recepción correcta o incorrecta. Para realizar este marcado se utiliza la función *NR-V2X-Phy::MarkPacket_OK_Error* que recibe como parámetro un paquete para ser marcado. Al final de la función, cuando ya no hay paquetes por procesar (*Más paquetes* en Figura 19), se llama a la función *NR-V2X-Phy::RxEnd* con un determinado *Delay* que depende de la numerología configurada (se programa la ejecución de *NR-V2X-Phy::RxEnd* prácticamente al final del slot).

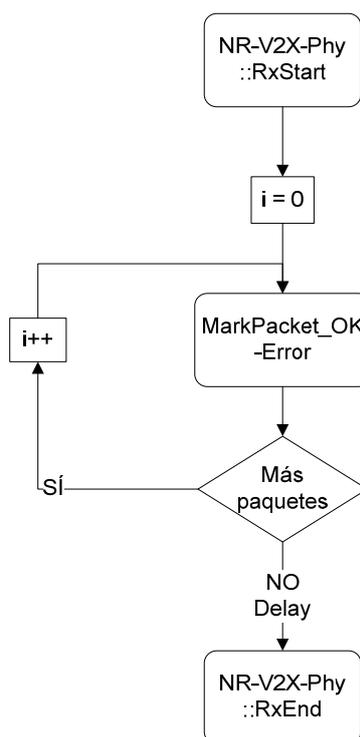


Figura 19. Diagrama de flujo de la función NR-V2X-Phy::RxMiddle

En la Figura 20 se representa el diagrama de flujo correspondiente a la función *NR-V2X-Phy::MarkPacket_OK_Error*. Esta función es una de los más importantes de la implementación porque es la que se encarga de realizar la decisión de si el SCI y el TB asociados al paquete son marcados como erróneos o correctos. Además, en la implementación propuesta para esta función, se pueden clasificar los errores. Esto es de gran utilidad para obtener estadísticas asociadas a los diferentes tipos de errores que se producen.

La clasificación de los tipos de error se ha realizado siguiendo el procedimiento empleado en [13]. Los errores se han clasificado de la siguiente manera:

- Error half-duplex: un TB no puede ser recibido porque el receptor está transmitiendo en la misma subtrama.
- Error de propagación: el TB ha sido recibido con una potencia recibida por debajo del umbral de sensibilidad o con insuficiente SNR (sin considerar interferencias ni colisiones). Este tipo de error excluye los cuantificados en 1).
- Error por interferencias y colisiones: el TB ha sido recibido con insuficiente SINR debido a interferencias y/o colisiones de transmisiones de otros vehículos. Este tipo de error excluye los cuantificados en 1) y en 2).
- Error por no SCI: Para decodificar correctamente un TB, es necesario decodificar el SCI asociado. Este error cuantifica las ocasiones en las que la transmisión de un TB no experimentó ningún error de los descritos en los apartados 1) 2) y 3),

sin embargo, el TB no puede ser decodificado porque el SCI asociado ha experimentado un error en la transmisión.

Si ninguno de los 4 errores considerados es detectado, se considera que el TB ha sido correctamente recibido. El mismo procedimiento se usa para los SCI, excepto el paso 4) que sólo tiene significado para el TB.

En el diagrama de la Figura 20, en primer lugar se comprueba el estado de la capa PHY (*Estado(PHY)* en Figura 20). Si el estado es TX, el paquete completo (TB y SCI) se marca como erróneo por *half-duplex*. Si el estado es RX, el paquete se intenta decodificar. Para ello, mediante los parámetros de recepción almacenados y asociados (*Parám.Rx[i]: RB[low], RB[high]*⁴ en Figura 20) al “Paquete Actual” (*Paquete[i]* en Figura 20), se comprueban cuáles son los RBs que fueron empleados por el vehículo transmisor en la transmisión. Posteriormente, se calcula el nivel de señal (1) *Nivel Señal* en Figura 20) como el promedio de la potencia recibida por cada uno de los RB de transmisión. También se calcula el ruido térmico (2) *Nivel Ruido* en Figura 20) utilizando la expresión (3-1). Con estos datos se realiza el cálculo de la relación señal a ruido (3) *SNR* en Figura 20).

$$\text{ruido}_t(\text{dBm}) = -174 + 10 * \log_{10}(\text{numRBs} * \text{BW}(\text{RB})(\text{Hz})) + \text{Figura Ruido}(\text{dB}) \quad (3-1)$$

En el siguiente paso representado en la Figura 20, se realiza la comprobación de si el nivel de señal recibido es mayor o igual al nivel de sensibilidad ($N.\text{Señal} \geq \text{Sensib.}$ en Figura 20) [26]. Si es así, se continúa intentando decodificar el paquete. Si no, se contabiliza un error por propagación para el SCI y/o TB y se realiza un marcado de error del paquete (*Error Propagación 1* en Figura 20). Después se comprueba si existen más paquetes aparte del que se está procesando ($\text{Más PaqsRx} \neq \text{paquete}[i]$ en Figura 20). Si es así, se calculan las interferencias causadas por el resto de paquetes, así como el valor de SINR. Si no existen más paquetes, no hay interferencias, y por lo tanto el valor de SINR es el mismo que el de SNR ($\text{SINR} = \text{SNR}$ en Figura 20). A continuación, se obtiene el valor de BLER haciendo uso de la función auxiliar *blockSuccessRate*. Dicha función contiene las *lookup tables* de [23][24] para el TB y en [25] para el SCI con las cuales se obtiene un valor de BLER (entre 0.0 y 1.0) en función del nivel de SNR o SINR. Las tablas del TB están definidas para un tipo de MCS y SCS. Las tablas del SCI dependen del formato utilizado de SCI. Por tanto, se obtiene un BLER para el TB y otro BLER distinto para el SCI. Una vez que se ha obtenido el valor de BLER para el valor de SNR, es decir, sin considerar interferencias, se comprueba si el paquete (TB y SCI) se ha recibido correctamente (*RxOK(SNR)* en Figura 20). Para ello, se genera un número aleatorio empleando una distribución uniforme con valores entre 0.0 y 1.0. Si el valor que se obtiene es menor o igual al valor generado, se considera que el TB y/o el SCI han pasado este filtro de recepción correcta. Si los dos o alguno de ellos (SCI o TB) falla, se les marca como erróneos por no recibirse con suficiente SNR (*Error Propagación 2* en Figura 20).

⁴ RB[high] y RB[end] representan el mismo RB.

El siguiente paso en la Figura 20 es el cálculo del BLER, pero esta vez utilizando el valor de SINR (considerando las posibles interferencias). Utilizando el mismo número aleatorio que se había generado anteriormente para la SNR se realiza la misma comprobación, pero en este caso usando el SINR ($RxOK(SINR)$ en Figura 20). Si el número aleatorio está por encima del BLER calculado, se considera que se ha producido un error por interferencia o por colisión (*Error Interferencia/Colisión* en Figura 20). Por último, sólo para el caso del TB, se comprueba si el SCI se ha recibido correctamente (SCI_OK en Figura 20). Si no es el caso, el TB no puede decodificarse, ya que el SCI contiene información crítica para la decodificación del TB asociado. Por tanto, se marca el TB como erróneo debido a un error producido por no recibir correctamente el SCI (*Error (TB) NO SCI* en Figura 20). Si no se detecta este último error en el TB, se considera que el paquete completo (SCI y TB) ha sido recibido con éxito.

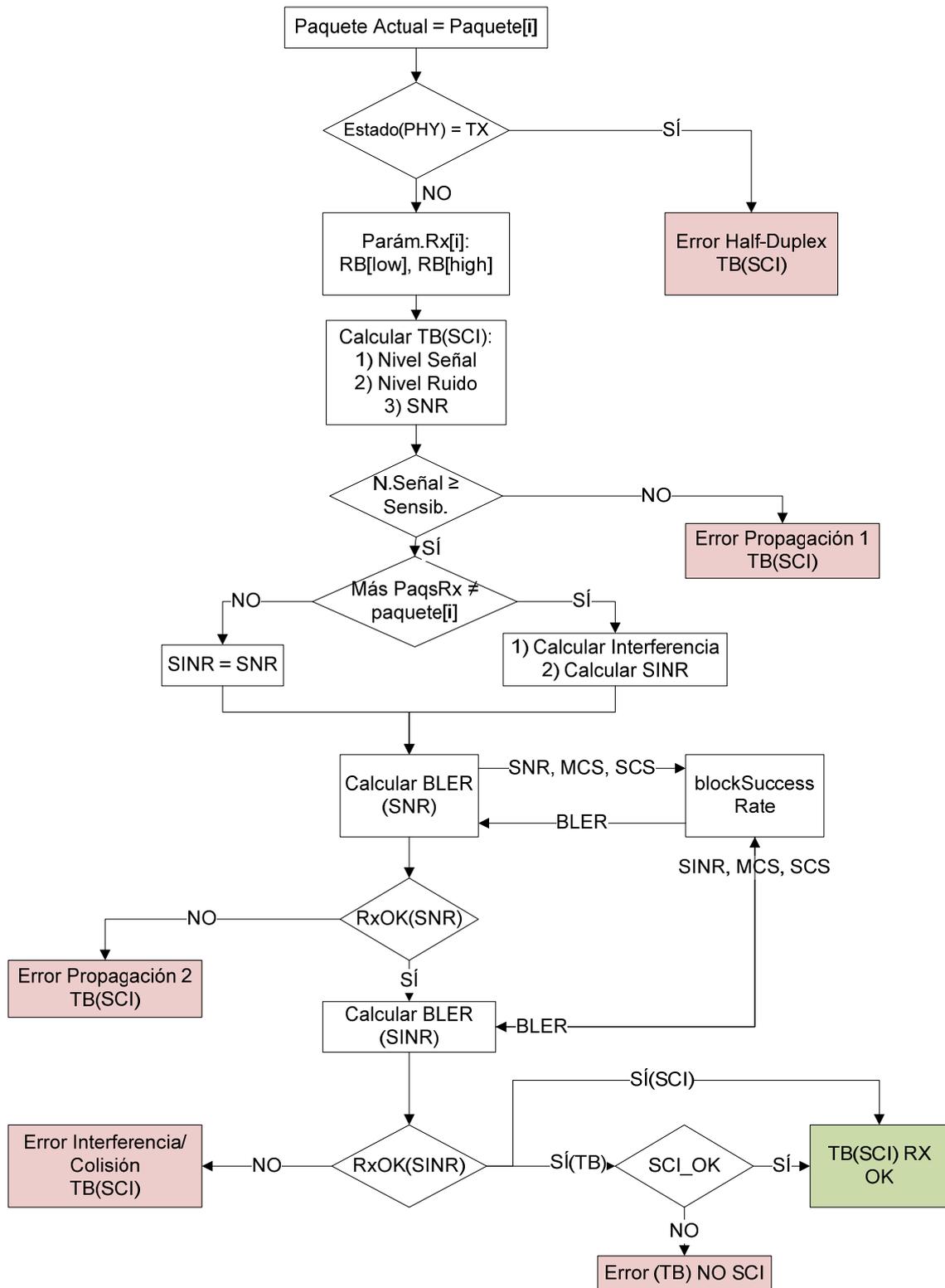


Figura 20. Diagrama de flujo de la función NR-V2X-Phy::MarkPacket_OK_Error

3.1.5 Implementación de canal radio NR V2X

En la Figura 21 se representa el diagrama general de la entidad *NR-V2X-Channel*. El diagrama comienza con el envío de un paquete hacia el canal desde la capa física, concretamente desde la función *NR-V2X-Phy::SendPhy*. Los paquetes llegan en primer lugar a la función *NR-V2X-Phy::Send*, que se encarga de programar el envío del paquete hacia todos los receptores cuyas capas PHY están “conectadas” al *NR-V2X-Channel*.

Los paquetes que se encuentran en la función *NR-V2X-Channel::Send* (Figura 21) son procesados empleando el modelo de canal. Este modelo de canal procesa cada paquete mediante el modelo de canal propuesto por el 3GPP en TR 37.885 [27] para la evaluación de 5G NR V2X. Este modelo de canal contiene a su vez modelos de *pathloss* y de *shadowing* log-normal correlado espacialmente. Este modelo de canal además modela las pérdidas Non-Line-of-Sight-vehicular (NLOSv) o dicho de otro modo, las pérdidas de señal producidas por un vehículo situado entre el transmisor y el receptor. En conjunto, el procesado realizado por el modelo de canal se realiza a los parámetros de transmisión asociados a cada paquete. Estos parámetros son los RBs empleados para la transmisión y la potencia asociada a cada uno de los RBs. Además, se aplica un retardo (Delay) asociado a la propagación y que depende de la distancia entre transmisor y receptor. Transcurrido dicho retardo, se ejecuta la función *NR-V2X-Channel::Receive* para el envío de los paquetes recibidos hacia la capa PHY de cada vehículo receptor. Esto se realiza mediante la llamada a la función *NR-V2X-Phy::RxStart*.

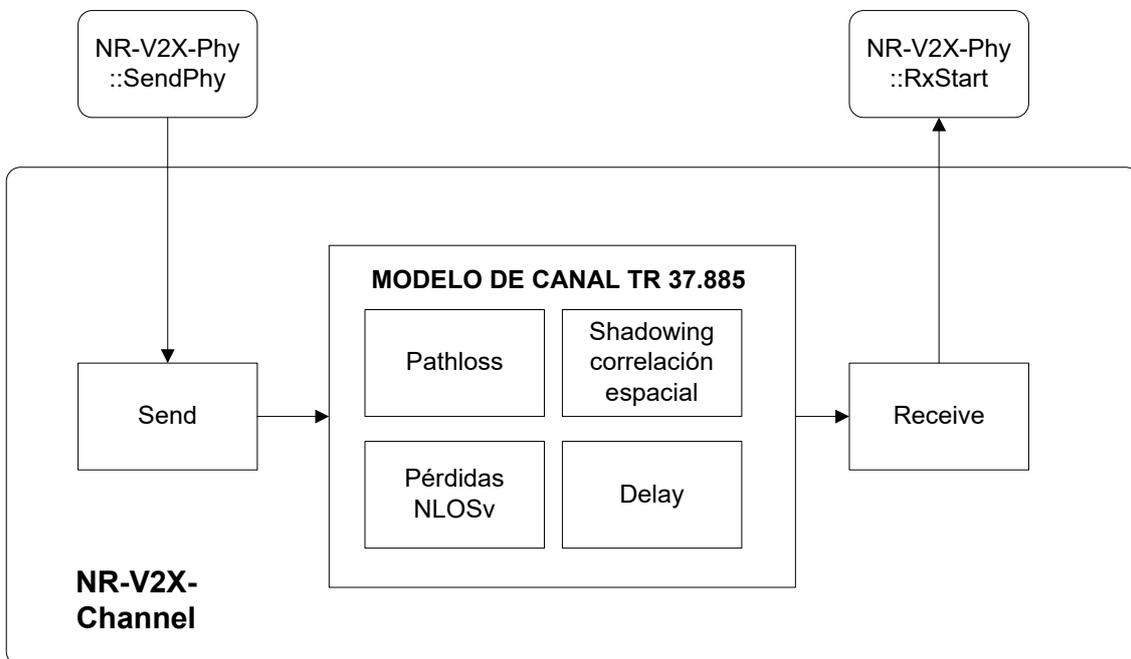


Figura 21. Diagrama general de NR-V2X-Channel

3.1.5.1 Modelado del canal

El modelado del canal está implementado principalmente mediante la función *NR-V2X-Channel::Send*. Esta función tiene dos objetivos fundamentales:

- Enviar el paquete que se está transmitiendo por el canal a todos los nodos, excepto al vehículo transmisor.
- Aplicar el modelo de canal a los parámetros de transmisión asociados al paquete que se está transmitiendo.

Para el primer objetivo, es decir, para entregar el paquete a cada receptor en un momento dado, se aplica el modelo de *delay* en la propagación de ns-3. Calculando la distancia entre el transmisor y cada uno de los receptores, se aplica un retardo variable a la recepción del paquete en función de la distancia.

Para el segundo objetivo se aplica el modelo de *pathloss* para estimar las pérdidas de señal por propagación y el modelo de *shadowing* correlado espacialmente. El *shadowing* aplica una variación al *pathloss* modelando la variabilidad de los obstáculos del canal entre cada par de vehículos transmisor-receptor. El modelo de *pathloss* de TR 37.885 [27] no estaba incluido en la clase donde se definen los diferentes modelos de propagación disponibles en ns-3, *ns3::PropagationLossModel*. En esta implementación se ha incluido el modelo de *pathloss* de TR 37.885 en dicha clase para poder asociarlo al modelo de canal *NR-V2X-Channel*. Cabe destacar que este modelo contempla dos posibles estados de enlace entre cada par de vehículos transmisor-receptor. Estos dos estados son: *Line-of-Sight*(LOS) y *Non-Line-of-Sight-vehicular* (NLOSv). El modelo define una probabilidad para que un enlace esté en estado NLOSv en función de la distancia entre transmisor y receptor. Para la implementación de este modelo se han empleado las fórmulas incluidas en la Tabla 3, las cuales dependen de la distancia entre transmisor y receptor. Utilizando estas probabilidades, la implementación puede modelar el estado de cada uno de los enlaces en cada momento. La Tabla 4 muestra los detalles de este modelado. Ambos estados de enlace (LOS o NLOSv) utilizan el mismo modelo de *pathloss*. Sin embargo, si el estado de enlace es NLOSv, el modelo incorpora unas pérdidas adicionales.

Tabla 3. Probabilidad de estados LOS y NLOSv

Estado de enlace	Cálculo de P(NLOSv) y P(LOS)
LOS	$d \leq 475 \text{ m: } P(\text{LOS}) = \min\{1, ad^2 + bd + c\}$ donde $a=2.1013 \cdot 10^{-6}$, $b=-0.002$ y $c=1.01093$ $d > 475 \text{ m: } P(\text{LOS}) = \max\{0, 0.54 - 0.001(d-475)\}$
NLOSv	$P(\text{NLOSv}) = 1 - P(\text{LOS})$

Donde:

- d es la distancia entre los vehículos transmisor y receptor (metros).
- P(LOS) es la probabilidad de que el enlace esté en estado LOS.
- P(NLOSv) es la probabilidad de que el enlace esté en estado NLOSv.

- a, b y c son constantes.

Tabla 4. Pathloss y pérdidas NLOSv para el canal 5G NR V2X

Estado de enlace	Pathloss [dB]	Pérdidas NLOSv [dB]
LOS		0
NLOSv	$PL = 32.4 + 20 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f_c)$	Variable aleatoria normal: - Media = $5 + \max(0, 15 * \log_{10}(d) - 41)$ dB - Desviación típica = 4 dB

Donde:

- PL es el pathloss.
- d es la distancia entre los vehículos transmisor y receptor (metros).
- f_c es la frecuencia de operación (Hz).

El *shadowing* que propone el estándar en [27] se basa en una distribución log-normal de media 0 y desviación típica 3 (valor de desviación típica para el escenario autovía). Además, es un modelo correlado espacialmente, es decir, depende de la distancia entre los vehículos, y más concretamente de la velocidad relativa entre cada par de vehículos.

En el instante inicial de simulación se realiza una inicialización de los valores de *shadowing* entre cada par de vehículos. Para ello, se genera un número empleando la distribución log-normal. O lo que es lo mismo, empleando una distribución normal de media 0 dB y desviación típica 3 dB. Este primer valor se denota como $S(0)$. Cada 100 ms se actualiza el valor del *shadowing* ($S(n)$) empleando el modelo correlado espacialmente según:

$$S(n) = e^{-\frac{D(m)}{25}} * S(n - 1) + \sqrt{1 - e^{-\frac{2D(m)}{25}}} * val_{LN}(n) \quad (3-2)$$

En (3-2), D representa el valor absoluto de la diferencia de distancia (en metros) entre cada par de vehículos entre el instante n y el instante $n - 1$. Es decir, la diferencia de distancia una vez han transcurrido 100 ms desde el instante $n - 1$. Y $val_{LN}(n)$ representa una nueva generación de un número empleando la distribución log-normal de media 0 y desviación típica 3. Si la distancia entre 2 vehículos no ha variado durante los 100 ms, entonces $D = 0$. En ese caso la actualización del valor de *shadowing* correlado puede representarse como:

$$S(n) = S(n - 1) \quad (3-3)$$

Cuando D no es igual a 0, se aplica la actualización (3-2). Este valor de D hace que el *shadowing* no se modele de forma puramente aleatoria según una distribución de probabilidad, si no que dependa de la velocidad relativa de los vehículos.

En definitiva, aplicando el *pathloss*, las pérdidas NLOSv y el *shadowing*, la potencia recibida viene dada por:

$$P_{Rx}(dBm) = P_{Tx}(dBm) - [PL(dB) + NLOSv_{LOSS}(dB) + Shad(dB)] \quad (3-4)$$

Donde:

- P_{Rx} es la potencia recibida.
- P_{Tx} es la potencia transmitida.
- $NLOSv_{LOSS}$ son las pérdidas NLOSv
- $Shad$ es el *shadowing*.

3.1.6 Configuración de las simulaciones

Dentro del proyecto software de ns-3 existen un conjunto de directorios que contienen todos los componentes software necesarios para ejecutar las simulaciones. Una de estas carpetas es "*scratch*", la cual contiene los ficheros de configuración global de las simulaciones.

Gracias a los ficheros de la carpeta *scratch* se pueden configurar los siguientes aspectos en cada simulación:

- Número de nodos.
- Interfaces de red instaladas en los nodos.
- Aplicaciones ns-3 instaladas en los nodos.
- Movilidad de los nodos.
- Configuración inicial de la simulación.
- Tiempo de simulación.
- Escenario de simulación.
- Recogida de datos.
- Etc.

En la Sección 3.1.6.1 se detallan los parámetros utilizados en el fichero de *scratch* configurado para la implementación de 5G NR V2X (también conocido como NR-V2X) en ns-3.

3.1.6.1 Fichero de configuración scratch

En las secciones anteriores (3.1.3, 3.1.4 y 3.1.5) se ha explicado la implementación del nuevo módulo NR-V2X que se ha desarrollado para ns-3 con sus capas y entidades de red para simular el comportamiento de 5G NR V2X. Para la ejecución de simulaciones en ns-3 necesitamos módulos e interfaces asociadas a diferentes tecnologías que se instalan en los nodos de red configurados. Por otro lado, también se necesita una

configuración global del entorno de simulación mediante un fichero que se encuentra dentro del directorio *scratch* de ns-3.

Para ejecutar las simulaciones se ha programado un fichero de configuración dentro del directorio *scratch* llamado NRV2X.cc. Con este fichero se han gestionado y configurado aspectos de la simulación como: la generación de tráfico de red (Sección 3.1.6.2), los escenarios (Sección 3.1.6.3), o los parámetros de configuración de 5G NR V2X modo 2 (Sección 3.1.6.4).

3.1.6.2 Generación de tráfico de red

En este fichero de configuración se configura la generación del tráfico de red que transmiten los vehículos. En particular este fichero configura la generación de tráfico de acuerdo a los modelos de tráfico periódico y aperiódico del 3GPP [27], los cuales están incluidos en la Tabla 5. Si bien, el fichero de configuración permite configurar los tamaños de paquete y el *inter-packet arrival time* modificando los valores definidos en los modelos del 3GPP. El fichero de configuración también permite una configuración de tráfico mixto, es decir que los vehículos utilicen diferentes tipos de tráfico en el escenario. Además, cabe destacar que el tamaño máximo de paquete considerado está limitado a las transmisiones que se pueden realizar en 1 slot.

Tabla 5. Modelos de tráfico del 3GPP implementados [27]

Tráfico	Periódico	Aperiódico
Modelo	Modelo 1 (intensidad baja de tráfico)	Modelo 1 (intensidad media de tráfico)
Inter-packet arrival time (ms)	100 ms	50 ms + variable aleatoria exponencial de media 50 ms
Tamaño de paquete (bytes)	Patrón de {300 bytes, 190 bytes, 190 bytes, 190 bytes} con punto de inicio aleatorio para cada vehículo	Variable aleatoria uniforme en el rango entre 200 bytes y 2000 bytes con paso de cuantización de 200 bytes.
Requisito de latencia (ms)	100 ms	50 ms

3.1.6.3 Escenario

El escenario implementado es de tipo autovía (*highway*) y se ha configurado según indica el 3GPP [27]. El escenario posee 6 carriles, 3 dedicados para un sentido y los otros 3 para el sentido contrario. Cada carril tiene 4 metros de ancho tal y como se representa en la Figura 22.

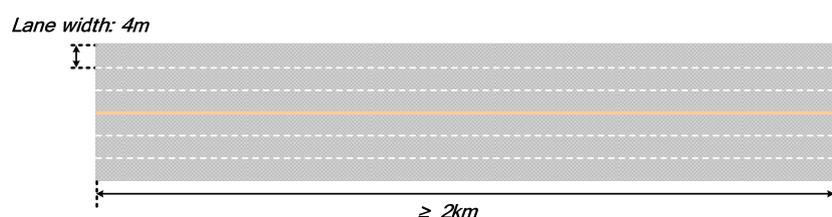


Figura 22. Representación gráfica del escenario de simulación [28]

El escenario tiene una longitud de 5 kilómetros, si bien los datos para la evaluación de rendimiento se recogen en los 2 kilómetros centrales (Figura 22) para evitar el efecto

borde. El efecto borde ocurre en los extremos del escenario y es debido a que en estas zonas los vehículos con su rango de cobertura tienen conectividad con un menor número de vehículos. En cambio, en una zona central del escenario, es más probable que el rango de cobertura abarque un número mayor de coches a ambos lados (zona delantera y trasera) del vehículo. Esto tiene consecuencias en cuanto al nivel de interferencia experimentado por un vehículo cuando está recibiendo un paquete. El efecto borde hace que dicho nivel de interferencia sea menor. Además, también se ha gestionado el escenario de simulación cíclico para cumplir con las especificaciones del 3GPP [27]. Si un vehículo, al desplazarse por el escenario, sobresale por uno de los dos extremos (0 km ó 5 km), éste es posicionado en el otro extremo (5 km ó 0 km, respectivamente) funcionando como un escenario cíclico. Además, el fichero de configuración también se encarga de configurar la densidad de vehículos en este escenario, la posición inicial de los vehículos y su velocidad y sentido.

3.1.6.4 Parámetros de configuración de nr-v2x modo 2

En el fichero de scratch también se gestiona la configuración de parámetros de 5G NR V2X modo 2. Estos parámetros son los siguientes:

- Parámetros de configuración de capa MAC: T0, T1, T2, X (porcentaje mínimo de recursos tras ejecutar paso 1), threshold RSRP, número de transmisiones por paquete, estrategia de selección de RRI y P.
- Parámetros de configuración de capa PHY: ancho de banda, SCS, subchannel size (RBs/subcanal), MCS, formato de SCI, sensibilidad y potencia de transmisión.
- Parámetros de configuración de canal radio: frecuencia de operación.

3.1.6.5 Otras configuraciones de la simulación

El fichero de scratch permite configurar otras funciones auxiliares que son necesarias para la simulación de 5G NR V2X modo 2. Estas funciones auxiliares son:

- Configuración del tiempo de simulación.
- Instalación de interfaces de red (*NetDevices*) NR-V2X en los vehículos.
- Asignación de direcciones de red a las interfaces.
- Obtención de datos de los vehículos durante la simulación para posteriormente obtener métricas.

3.2 Evaluación del rendimiento de 5G NR V2X

Utilizando la implementación de 5G NR V2X modo 2 descrita en la Sección 3.1, esta sección se centra en evaluar su rendimiento. Para ello, la Sección 3.2.1 describe los parámetros de evaluación que han sido configurados en la plataforma de simulación desarrollada. La Sección 3.2.2 describe las métricas sobre las que se basa el análisis de rendimiento de 5G NR V2X. Finalmente, las Secciones 3.2.3 y 3.2.4 muestran los resultados obtenidos. La Sección 3.2.3 se centra en analizar el rendimiento de 5G NR V2X bajo diferentes fuentes de tráfico de red: periódico y aperiódico (ver Sección

3.1.6.2). La Sección 3.2.4 se centra en el análisis del mecanismo de *re-evaluation* por ser una de las principales novedades introducidas en 5G NR V2X.

3.2.1 Parámetros de evaluación

Tabla 6. Parámetros de evaluación utilizados en la plataforma de simulación ns3

Escenario y modelo de tráfico	
Escenario	Autopista 3GPP
Densidad de vehículos [veh. /km]	60 – 120
Modelos de tráfico	Periódico (con tamaño variable y tamaño fijo) y aperiódico
Configuración del resource pool	
Ancho de banda (BW)	20MHz
SCS	30kHz
RBs/BW	51 RBs
Tamaño del subcanal	12 RBs/subcanal
MAC (Resource Allocation)	
T0 (sensing Window)	1100ms
Tproc,0 (sensing Window)	1 slot (SCS 30 kHz)
T1 (selection Window)	2 slots
Tproc,1 (selection Window)	5 slots (SCS 30 kHz)
T2 (selection Window)	PDB
% min. recursos	20
Umbral RSRP	-128dBm
RRI	100 ms
Probabilidad P	0
PHY	
MCS	16QAM-r0.5
1st-stage SCI	12 RBs and 2 symbols
2nd-stage SCI	48 bits (Huawei, R1-2005796)
In band	TS 38.101-1, section 6.4.2.3
LUTs TB	Huawei: R1-1900852 & R1-1901542 [23][24]
LUTs SCI (1st&2nd stage)	Ericsson: R1-1903180 [25]
Sensibilidad	-89-4 dBm (30 kHz & 20 MHz)
Tx Power	23 dBm
Ruido (dBm)	$-174 + 10 * \log_{10}(BW_RX) + noiseFigure$
Noise Figure	9 dBm
Modelo de antena	Omnidireccional, Ganacia: 0dB
Channel model	
Pathloss & shadowing	TR 37.885
Frecuencia	5.9 GHz
Distancia de correlación	25 meters
Fast fading	LUTs

3.2.2 Métricas

El análisis del rendimiento de 5G NR V2X se ha basado en las siguientes métricas, las cuales están agrupadas por efectos:

PDR (*Packet Delivery Ratio*): ratio de paquetes correctamente recibidos.

- *PDR general*: PDR medida a nivel de aplicación.

- *PDR of 1st/2nd transmission*: PDR medida a nivel MAC y en la que se distingue entre paquetes transmitidos (*1st transmission*) y retransmitidos (*2nd transmission*).
- *PDR specific of packets with re-evaluation*: PDR de aquellos paquetes cuyos recursos han sido reseleccionados por haberse detectado utilizando el mecanismo de re-evaluation.

Errores:

- *Specific Collision Losses Ratio (CLR)*: fracción de paquetes (TBs) que se descartan porque han sufrido una colisión, i.e., un nivel de SINR insuficiente para ser recibidos correctamente.
- *Specific Propagation Losses Ratio (PLR)*: fracción de paquetes (TBs) que se descartan por propagación, i.e., por un nivel de SNR insuficiente.

Re-evaluation:

- *Re-evaluation detection ratio*: fracción de paquetes para los que se detecta la necesidad de reseleccionar recursos por el mecanismo re-evaluation.

Utilización de recursos radio:

- *Counter reselection ratio*: fracción de paquetes para los que es necesario realizar una reelección de recursos radio porque se ha agotado el *Reselection Counter*.
- *Size reselection ratio*: fracción de mensajes que producen un reelección de recursos radio porque el paquete generado es de mayor tamaño que los recursos seleccionados/reservados.
- *Latency reselection ratio*: fracción de mensajes que producen una reelección de recursos porque el recurso reservado no cumple con los criterios de latencia del paquete generado.
- *Total reselection ratio*: fracción de mensajes que producen una reelección de recursos por alguna de las 3 razones anteriores (counter, size or latency). Es importante señalar que esta métrica es distinta a la suma de las 3 métricas anteriores ya que es posible que ciertas reelecciones estén provocadas por más de una de las causas anteriores.
- *Ratio of unused sub-channels*: fracción de sub-canales que a pesar de haber sido reservados por un SCI no son finalmente utilizados para transmitir un TB (no se incluyen las causas anteriores).
- *Ratio of unutilized reservations*: fracción de recursos reservados que no se utilizan del total de reservas realizadas (no se incluyen las causas anteriores).

3.2.3 Impacto del tipo de tráfico

Esta primera sección se centra en analizar el rendimiento de 5G NR V2X modo 2 en función al tipo de tráfico generado por las aplicaciones V2X. Para ello, se ha simulado que los vehículos generan las dos fuentes de tráfico definidas por el 3GPP para evaluar el rendimiento de 5G NR V2X (ver Sección 3.1.6.2). Estas dos fuentes de tráfico son 'Periodic' y 'Aperiodic'. Además, se ha considerado una fuente de tráfico adicional que genera tráfico con una frecuencia periódica. La diferencia con 'Periodic' es que ésta

nueva fuente de tráfico 'PeridociFixedSize' genera todos los paquetes del mismo tamaño e igual a 190 bytes. La fuente de tráfico 'Periodic' genera cadenas de paquetes de {300, 190, 190, 190, 190} bytes.

La Figura 23 muestra la PDR general o a nivel de aplicación cuando los vehículos generan los paquetes con las tres fuentes de tráfico consideradas. Los resultados obtenidos muestran un mejor rendimiento de 5G NR V2X modo 2 cuando la fuente de tráfico es más estable. Esto no es de extrañar teniendo en cuenta que el mecanismo de gestión de recursos *semi-persistent scheduling* (SPS) reserva los recursos de forma semipersistente para un número consecutivo de transmisiones. En concreto, los resultados obtenidos muestran que cuando la distancia que separa al transmisor y receptor es de 300 metros, la PDR medidas para tráfico 'PeriodicFixedSize', 'Periodic' y 'Aperiodic' es del 83%, 74%, y 44%, respectivamente.

La Figura 24 muestra los diferentes tipos de errores que han sufrido las transmisiones de los vehículos según la fuente de tráfico utilizada por los vehículos. La Figura 24 muestra que la principal diferencia entre las diferentes fuentes de tráfico reside en los errores por colisiones (CLR). Para las tres fuentes de tráfico analizadas los errores por propagación (PLR) son iguales. Esto es debido a que estos errores están relacionados con la distancia entre el transmisor y receptor y las pérdidas de propagación que se producen en la transmisión; en los 3 escenarios se utiliza el mismo modelo de canal (Sección 3.1.5). Por el contrario, los diferentes errores por colisiones (CLR) medidos en la Figura 24 son el origen de las diferencias en la PDR mostrada en la Figura 23. Los errores por colisiones en el mecanismo de gestión de recursos SPS de 5G NR V2X modo 2 se dan cuando más de 1 vehículo utiliza el mismo recurso radio (sub-canal(es) y slot) para realizar sus transmisiones. El mecanismo SPS trata de evitar estas colisiones en el paso 1 del modo 2 descartando del conjunto de recursos radio que van a utilizar aquellas reservas que han realizado otros vecinos. Sin embargo, cuando varios vecinos están seleccionando recursos de forma simultánea y sus ventanas de selección solapan, no es posible que estos vehículos sepan mutuamente qué recursos está seleccionando los otros. Por lo tanto, una de las principales fuentes de errores por colisiones es la ejecución del paso 1 de selección de recurso en modo 2.

La Tabla 7, a través de la métrica '*Counter Reselection Ratio*', muestra que cuando se utiliza la fuente de tráfico 'PeriodicFixedSize' los vehículos agotan las reservas de los recursos radio para realizar sus transmisiones. Esto puede apreciarse porque esta métrica muestra un 10% que se corresponde con el valor medio del *Reselection Counter* (10). Es decir, los vehículos tienen que volver a seleccionar recursos (y volver a ejecutar el paso 1 del modo 2 de 5G NR V2X) en 1 de cada 10 paquetes generados puesto que los restantes son enviados en las reservas realizadas. La Tabla 7 muestra que para esta misma fuente de tráfico no se producen nuevas reselecciones de recursos por la estabilidad del tráfico generado. Si nos fijamos ahora en la fuente de tráfico 'Periodic', los resultados de la Tabla 7 muestran que hay una fracción de paquetes del 7% que tienen que ejecutar el proceso de reselección de recursos radio porque el tamaño del paquete generado no se ajusta al de la reserva realizada ('*Size Reselection Ratio*').

Además, un 37% de los sub-canales reservados no son finalmente utilizados (*'Unused Subchannels Ratio'*). Esto es debido a que con el patrón de paquetes generado ($\{300, 190, 190, 190, 190\}$ bytes), cuando las *Counter Reselection* reservas se realizan para la transmisión de un paquete de 300 bytes (que requieren 2 sub-canales), las transmisiones de los paquetes de 190 bytes solo utilizan 1 de los 2 sub-canales. Esos sub-canales que no están siendo utilizados no pueden utilizarse por los otros vehículos puesto que han sido reservados. Esto contribuye a que el número de sub-canales disponibles para realizar las selecciones de recursos sea menor, y por lo tanto a que exista una mayor probabilidad de colisiones entre las selecciones que se realizan en el paso 1 del modo 2 de 5G NR V2X. Finalmente, la Tabla 7 muestra como para el caso de la fuente de tráfico *'Aperiodic'*, todas las métricas de reselección de recursos muestran valores más elevados. Esto es debido a las características de los paquetes generados con *'Aperiodic'* que fluctúan en tamaño y en tiempo entre paquetes en cada generación de un nuevo paquete a transmitir. Por este motivo, las *Counter Reselection* reservas periódicas realizadas con el mecanismo SPS de modo 2 de 5G NR V2X son poco eficientes para ajustarse a las características del tráfico *'Aperiodic'*. Esto resulta en que con muy alta frecuencia los vehículos tienen que realizar una nueva selección de recursos y ejecutar el paso 1 del modo 2 de 5G NR V2X. De ahí los mayores errores por colisiones (CLR) que se experimentan cuando la fuente de tráfico que implementan los vehículos es *'Aperiodic'* (ver Figura 24), y el menor rendimiento en términos de PDR (ver Figura 23).

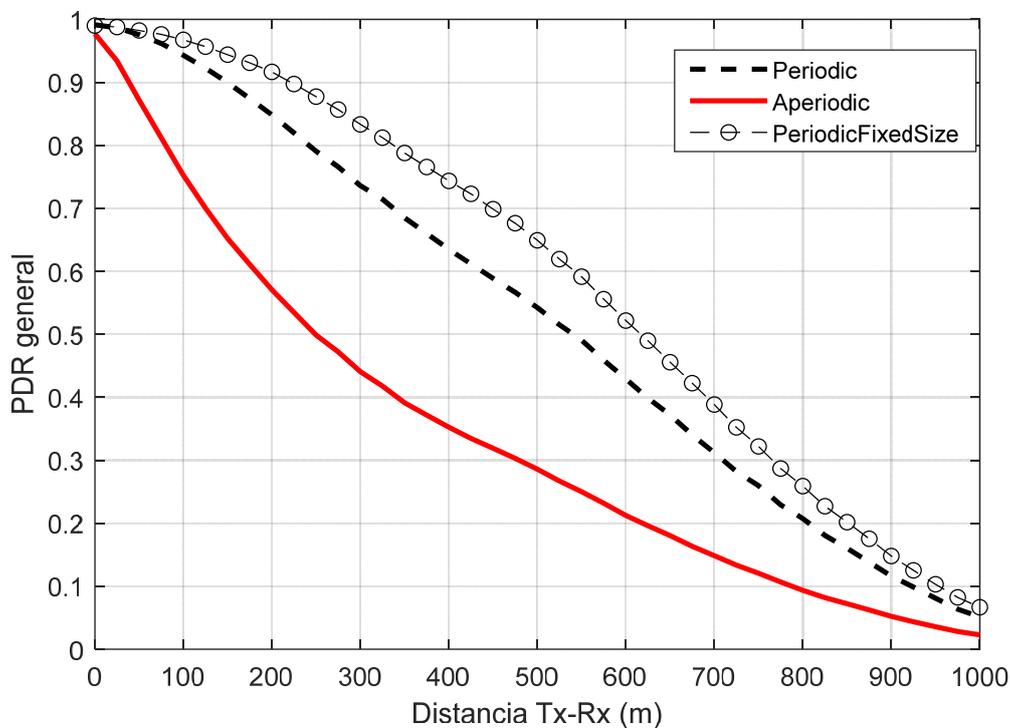


Figura 23. PDR general o a nivel de aplicación en función a la distancia entre el transmisor y el receptor (Densidad de vehículos de 120 veh/km)

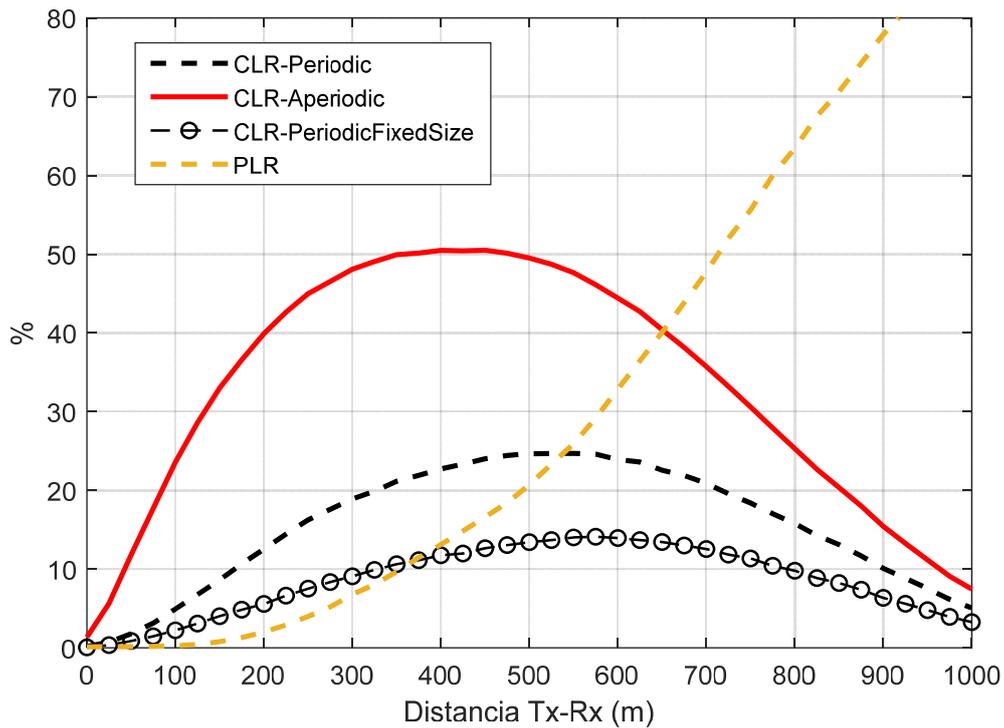


Figura 24. Errores en las transmisiones debido a pérdidas de propagación (PLR) y por colisiones (CLR) (Densidad de vehículos de 120 veh/km)

Tabla 7. Comparativa de la eficiencia en la utilización de los recursos radio

Tráfico	Counter Reselection Ratio	Size Reselection Ratio	Latency Reselection Ratio	Total Reselection Ratio	Unutilized Reservations Ratio	Unutilized Subchannels Ratio
Periodic FixedSize	0.10	0.0	0.0	0.10	0.0	0.0
Periodic FixedSize (RRI variable)	0.04	0.0	0.0	0.04	0	0
Periodic	0.09	0.07	0.0	0.15	0.0	0.37
Aperiodic	0.002	0.27	0.55	0.67	0.04	0.27

3.2.4 Impacto de re-evaluation

La sección anterior ha puesto de manifiesto que las comunicaciones 5G NR V2X pueden verse afectadas por la gestión de los recursos radio, y que la fuente de tráfico que utilizan los vehículos para generar sus paquetes tiene un fuerte impacto en la efectividad de esta gestión de recursos. En concreto, los resultados han evidenciado que el mecanismo SPS de modo 2 de 5G NR V2X puede ocasionar múltiples colisiones de paquetes cuando el tráfico transmitido es 'Aperiodic'. El modo 2 de 5G NR V2X introduce mecanismo de re-evaluation para intentar evitar las colisiones de los recursos seleccionados por los vehículos. Esta sección analiza el impacto de re-evaluation en el rendimiento de 5G NR V2X. El análisis se centra primero en un escenario en el que los vehículos realizan una transmisión por capa nuevo paquete generado (Sección 3.2.4.1),

y a continuación en un escenario en el que se realizan 2 transmisiones por capa paquete generado (Sección 3.2.4.2).

3.2.4.1 1 transmisión por paquete (TB)

La Tabla 8 muestra la fracción de paquetes en los que se ha realizado un re-evaluation, es decir, se ha detectado que el recurso seleccionado colisionaba con un recurso reservado por otro vehículo (ejecutando el paso 1 de modo 2 de 5G NR V2X T3 slots/ms antes del slot seleccionado), y se ha seleccionado un nuevo recurso (ejecutando el paso 2 de 5G NR V2X). Los resultados de la Tabla 8 muestran que con tráfico 'PeriodicFixedSize' esto ocurre en una fracción muy pequeña de paquetes: 0.0001. Esto es debido a que, cuando el tráfico es periódico, las colisiones que se producen son principalmente debidas a problemas en las comunicaciones (hidden-terminal) que no pueden detectarse con el mecanismo de re-evaluation. Si consideramos un escenario con tráfico 'PeriodicFixedSize' en el que la mitad de los vehículos utilizan un intervalo de selección de recursos (RRI) de 100ms y la otra mitad utilizan un RRI de 20ms, la fracción de colisiones que pueden detectarse con re-evaluation sube ligeramente a 0.003. Aun así, está fracción es muy baja y por lo tanto el impacto de re-evaluation en el rendimiento de 5G NR V2X se esperaría que fuese también bajo. La Figura 25 muestra como a nivel de PDR general, el impacto de utilizar re-evaluation es poco significativo por el bajo número de paquetes en los que ha actuado re-evaluation. Sin embargo, un análisis más detallado de esa pequeña fracción de paquetes en los que ha actuado re-evaluation permite observar los beneficios que podría introducir. La Figura 26 muestra la PDR específica de los paquetes en los que ha actuado re-evaluation y se puede apreciar una mejora significativa con respecto a la PDR experimentada por esos mismos paquetes cuando no se aplicó re-evaluation. Por ejemplo, cuando los vehículos están separados 300 metros, la PDR pasa a ser del 78% (con re-evaluation) frente al 51% (sin re-evaluation).

Tabla 8. Impacto del tipo de tráfico en el *Re-evaluation Detection Ratio* (Densidad de vehículos de 120 veh/km)

Tráfico	Re-evaluation Detection Ratio
Periodic FixedSize	0.0001
Periodic FixedSize (RRI variable)	0.003
Aperiodic	0.015
Aperiodic (RRI variable)	0.14

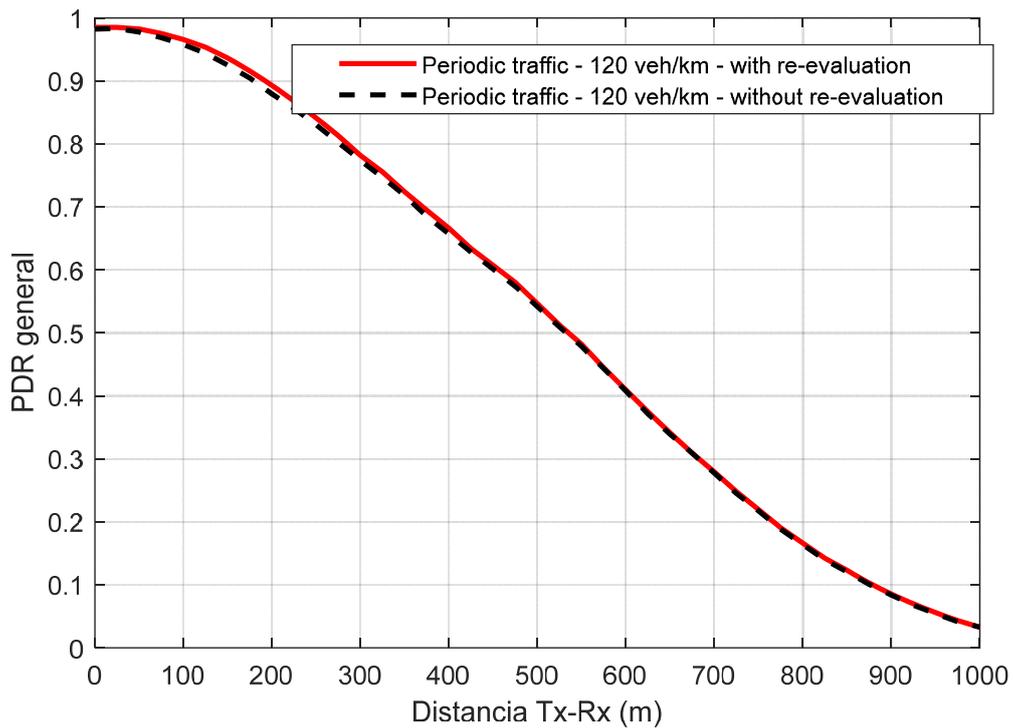


Figura 25. PDR General para tráfico 'PeriodicFixedSize' con y sin re-evaluation (Densidad de vehículos de 120 veh/km y RRI variable)

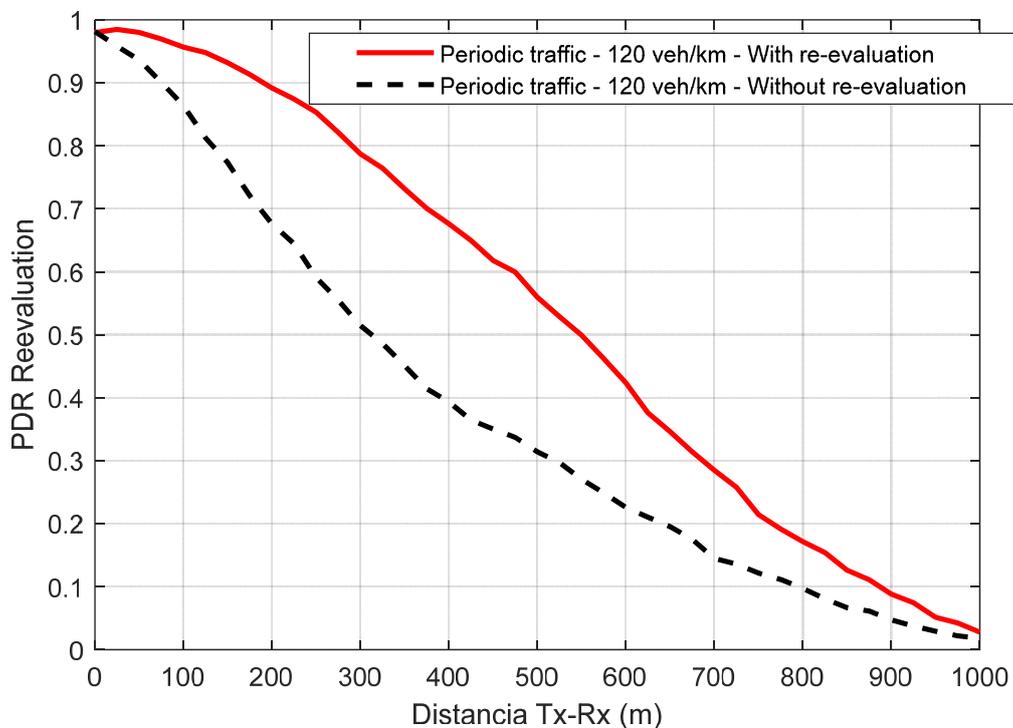


Figura 26. PDR específica para tráfico 'PeriodicFixedSize' de los paquetes en los que ha actuado re-evaluation (Densidad de vehículos de 120 veh/km y RRI variable)

Los resultados de la Tabla 8 muestran que la fracción de tráfico sobre el que actúa re-evaluation se incrementa para tráfico 'Aperiodic'. Esto es así por la mayor frecuencia de re-selección de recursos que ocurre cuando el tráfico es 'Aperiodic' como se ha analizado en la Sección 3.2.3. Los recursos re-seleccionados por cualquiera de las causas mostradas en la Tabla 7 dan lugar a que sean re-evaluados antes de ser reservados por la primera transmisión. La fracción de tráfico sobre el que actúa re-evaluation asciende al 14% cuando se considera tráfico 'Aperiodic' y un escenario en el que la mitad de los vehículos utilizan un intervalo de selección de recursos (RRI) de 100ms y la otra mitad utilizan un RRI de 20ms. A pesar de esta elevada fracción de paquetes en los que actúa re-evaluation por haber detectado una colisión, los resultados de la Figura 27 muestran que esto no se traduce en una mejora en términos de PDR del rendimiento de 5G NR V2X. La Figura 27 muestra las curvas de PDR para escenarios en los que los vehículos tienen activado el mecanismo de re-evaluation y en los que no. De hecho, la PDR específica de los paquetes en los que ha actuado re-evaluation (Figura 28), muestran que en este caso re-evaluation ha empeorado el rendimiento de esas transmisiones. Un cuidadoso análisis de estos resultados ha desvelado que con tráfico 'Aperiodic' las colisiones que re-evaluation intenta evitar son provocadas por reservas que con un elevado porcentaje no llegan a producirse porque se produce una re-selección de recursos por size o latency de dicha reserva (Tabla 7). Esto resulta en que la colisión de los paquetes no se produciría finalmente (de ahí la mejora en términos de PDR de la Figura 28 cuando no se utiliza re-evaluation), y además se realizan nuevas re-selecciones de recursos por dos vehículos diferentes con el posible riesgo de que las nuevas selecciones de recursos sí que colisionen.

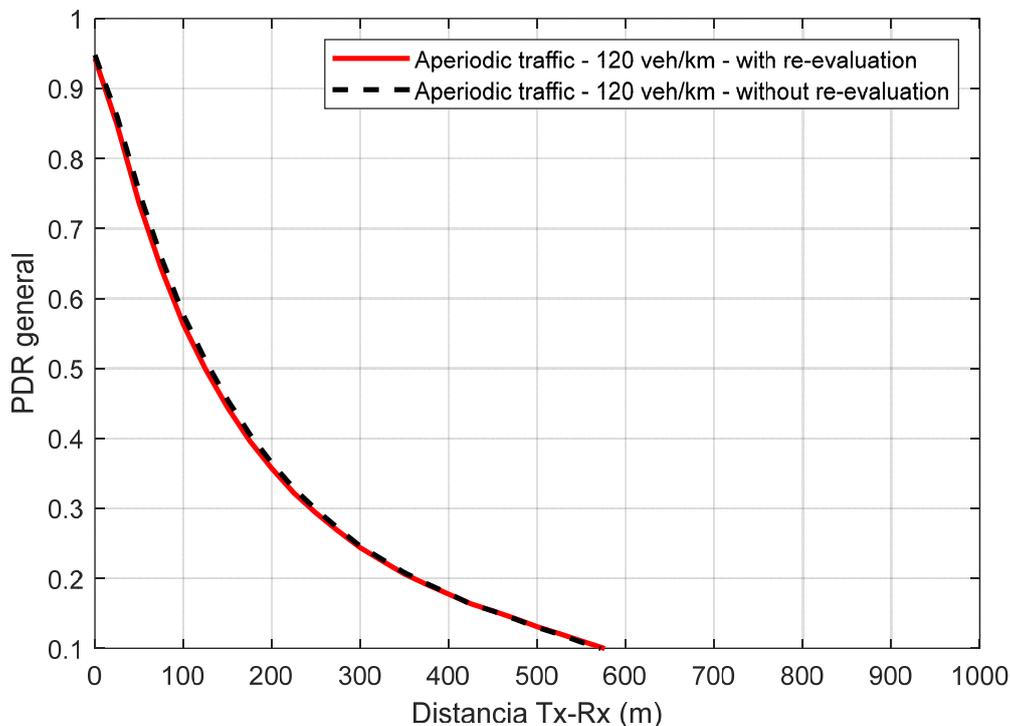


Figura 27. PDR General para tráfico 'Aperiodic' con y sin re-evaluation (Densidad de vehículos de 120 veh/km y RRI variable)

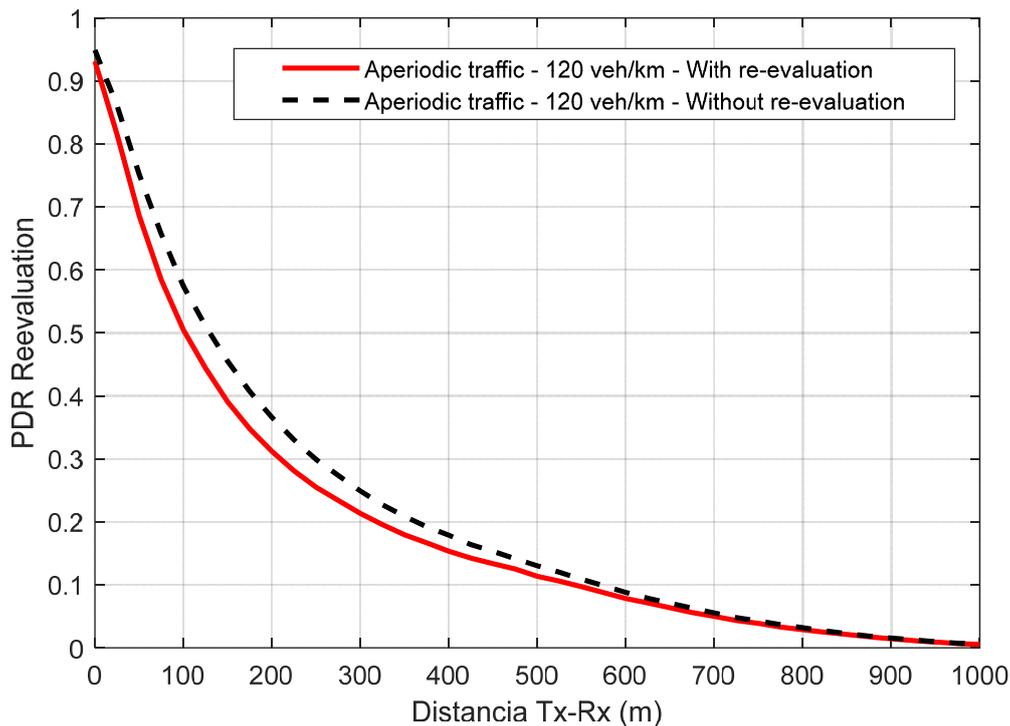


Figura 28. PDR específica para tráfico ‘Aperiodic’ de los paquetes en los que ha actuado re-evaluation (Densidad de vehículos de 120 veh/km y RRI variable)

3.2.4.2 2 transmisiones por paquete (TB)

La sección anterior ha demostrado que cuando los vehículos realizan 1 transmisión/TB, el mecanismo de re-evaluation de modo 2 de 5G NR V2X actúa mejorando el rendimiento de los paquetes generados cuando el tráfico es ‘Periodic’. En cambio, para tráfico ‘Aperiodic’ los resultados han mostrado un empeoramiento del rendimiento por la inestabilidad del tráfico y la mayor frecuencia con la que se reseleccionan recursos. Esta sección profundiza en el análisis del tráfico ‘Aperiodic’ pero considerando en este caso que por cada paquete generado se realizan 2 transmisiones (se envían 2 réplicas del mismo paquete utilizando el mecanismo de retransmisión de 5G NR V2X - Sección 2.6.2.3-: primera transmisión y retransmisión).

La Figura 29 muestra la PDR general medida a nivel aplicación cuando el mecanismo de re-evaluation de 5G NR V2X está activo y cuando no. Es importante recordar que para el caso de realizar 2 transmisiones por cada nuevo paquete generado es suficiente con que 1 de las 2 transmisiones se reciba correctamente para determinar que el paquete se ha recibido correctamente. En este caso, la Figura 29 muestra que re-evaluation mejora la PDR a pesar de que el tráfico es ‘Aperiodic’ (comparar con los resultados de la Figura 27). En este escenario, las colisiones detectadas por el mecanismo de re-evaluation pueden ser causadas tanto por las reservas de los recursos para la primera transmisión del paquete como para su retransmisión. Para el tráfico aperiódico existe una gran diferencia entre ambos casos. Esto es debido a que una reserva para la primera transmisión se produce a partir de la transmisión del paquete anterior, con una separación entre reservas de RRI (ver Sección 2.6.2.3). Sin embargo, las características

del tráfico (tamaño, latencia) pueden cambiar en ese intervalo y la reserva realizada no ser válida para transmitir el nuevo paquete generado. Por el contrario, las reservas de la segunda transmisión se realizan en el SCI de la primera transmisión, con la certeza de que los recursos reservados serán utilizados porque la transmisión a realizar es de una réplica de la primera transmisión. Por este motivo, los resultados de la Figura 30 muestran que, para la PDR de las primeras transmisiones, la activación o no del mecanismo de re-evaluation tiene poco impacto. Sin embargo, la curva de PDR de la segunda transmisión mejora sensiblemente cuando se utiliza re-evaluation. Estas transmisiones se ven favorecidas por el hecho de que los recursos seleccionados que iban a causar una colisión con las reservas para la segunda transmisión hayan sido re-evaluados.

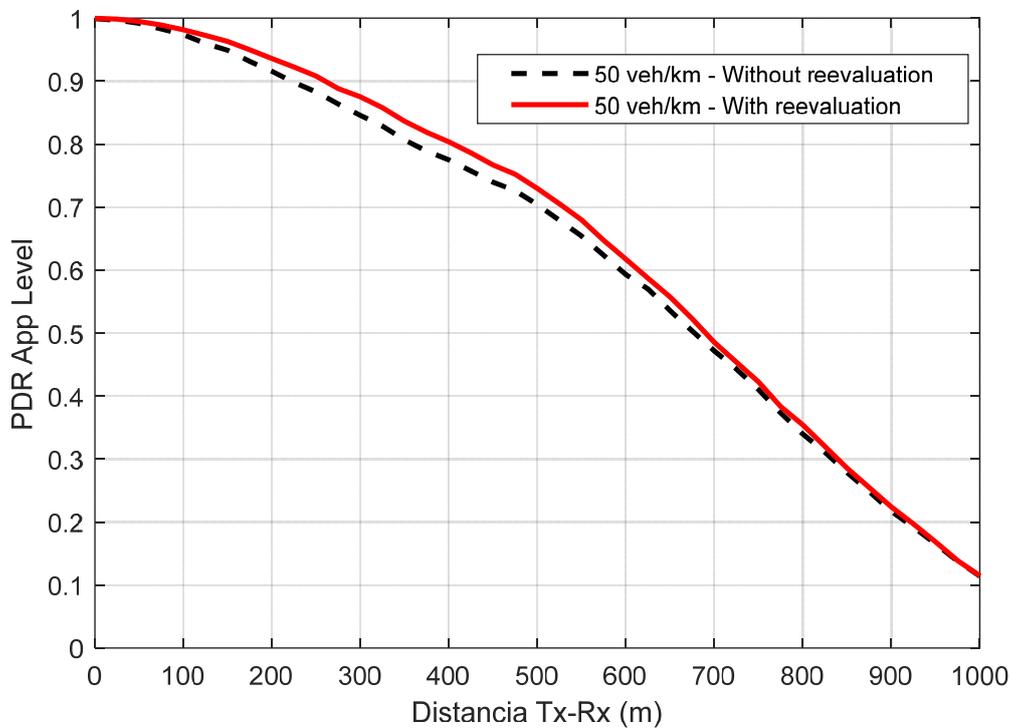


Figura 29. PDR General para tráfico 'Aperiodic' con y sin re-evaluation con 2 tx/TB (Densidad de vehículos de 50 veh/km y RRI fijo)

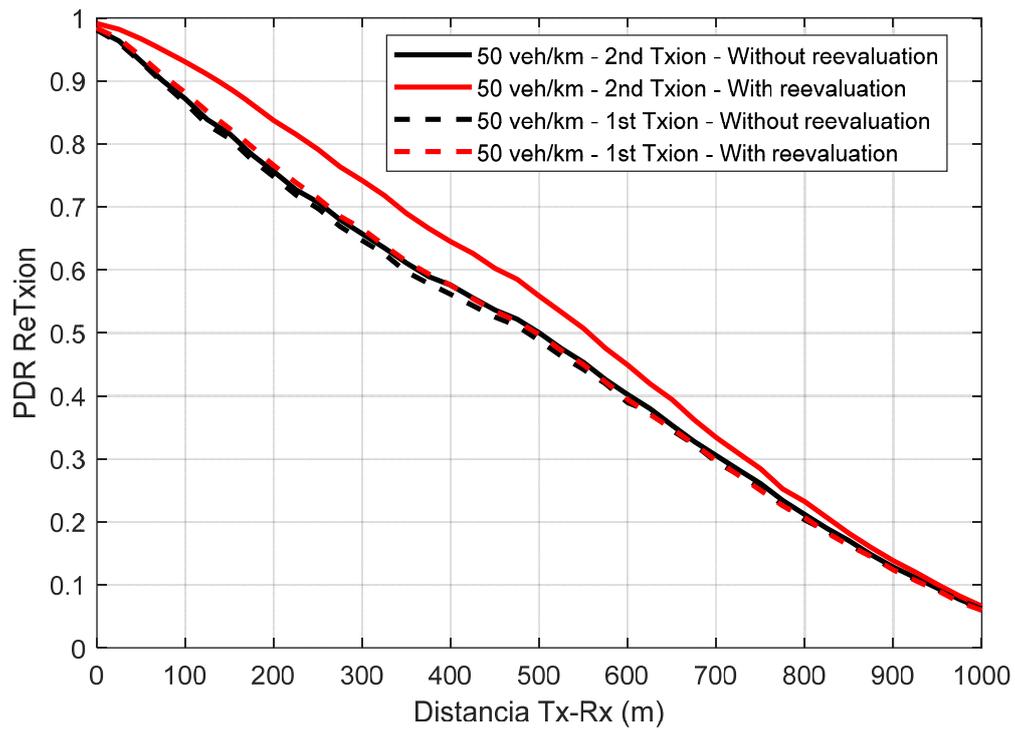


Figura 30. PDR específica para tráfico 'Aperiodic' de la primera y de la segunda transmisión con y sin reevaluation (Densidad de vehículos de 50 veh/km y RRI fijo)

4 Prototipo de comunicaciones 5G NR V2X OAI

OpenAirInterface (OAI) es un proyecto de código abierto que proporciona una plataforma configurable y flexible para el desarrollo de 4G LTE y 5G New Radio (NR) [29]. La plataforma OAI puede ejecutarse en ordenadores de uso común o propósito general de arquitectura x86 que tienen que estar equipados con tarjetas radio definidas por software (*Software Defined Radio* o SDR). Una de las tarjetas radio más comunes para ser usadas en la plataforma OAI es el periférico USRP (*ETTUS Universal Software Radio Peripheral*) [30]. La plataforma OAI es muy utilizada por la comunidad investigadora para la realización de experimentos y pruebas de campo de la red de acceso radio de las tecnologías 4G y 5G, y está continuamente siendo evolucionada para incorporar las funcionalidades necesarias para realizar testeos de comunicaciones C-V2X [31][32].

Como se ha presentado en la Sección 3, el uso de herramientas de simulación software para el desarrollo, validación y testeo de tecnologías de comunicación inalámbrica es muy habitual por su elevada versatilidad y configurabilidad. Sin embargo, los estudios de simulación están basados en suposiciones y simplificaciones introducidas durante el modelado del sistema de comunicaciones, lo cual puede llevar a conclusiones que no se ajustan a la realidad. La Figura 31 resume el modelado de los diferentes agentes o capas de un sistema de comunicación en función a la plataforma utilizada: simulación y prototipado. Como se puede ver en la Figura 31, solo los estudios basados en prototipos permiten la evaluación en condiciones reales de cada una de las capas del sistema de comunicaciones. Sin embargo, la utilización de prototipos no está exenta de retos, los cuales están relacionados con las limitaciones existentes de los productos disponibles (por ejemplo, de cómputo) y con las dificultades de realizar testeos a gran escala (incluidas las económicas).

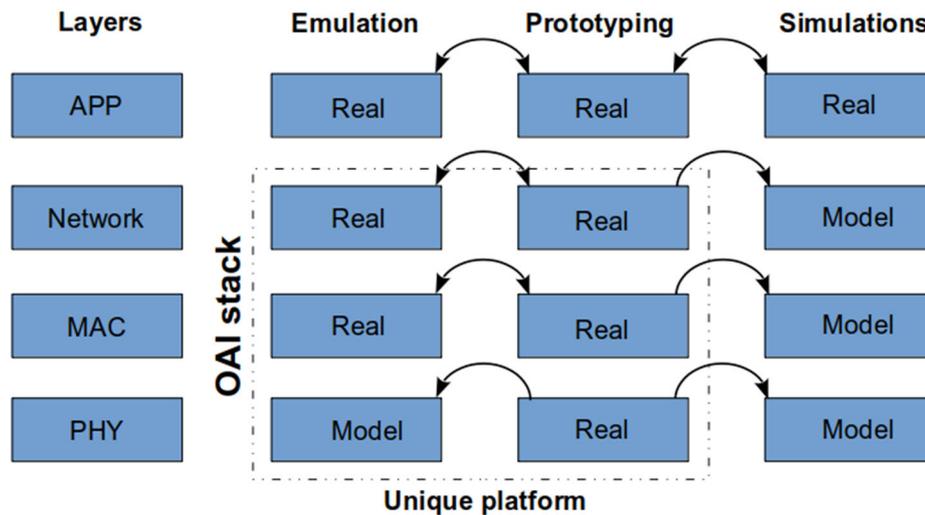


Figura 31. Modelado de los diferentes agentes o capas utilizando plataforma de simulación, emulación, y prototipado.

En este contexto, el objetivo perseguido en este proyecto es desarrollar una plataforma que tenga en cuenta los compromisos existentes en las plataformas de simulación y de prototipado. Con este objetivo, se propone una plataforma de emulación (ver Figura 31) basada en OAI en la que todas las capas del sistema de comunicaciones son implementadas para su utilización en sistemas reales, excepto la capa PHY que es modelada. Esta arquitectura híbrida entre prototipado y simulación ha sido diseñada con el objetivo de obtener una plataforma lo suficientemente flexible para evaluar el rendimiento de 5G NR V2X en diferentes condiciones, permitiendo su desarrollo y evaluación en pruebas de laboratorio.

La Sección 4.1 muestra la arquitectura de la implementación propuesta para el estudio y validación de la implementación de la tecnología 5G NR V2X. Una de las principales aportaciones dentro de esta implementación es el desarrollo del mecanismo de gestión de recursos radio o scheduler de 5G NR V2X (ver Sección 2.6). Los detalles de la implementación de este mecanismo se presentan en la Sección 4.2. El mecanismo de gestión de recursos es el encargado de seleccionar recursos radio de 5G NR V2X cuando los vehículos tienen mensajes (o paquetes) que transmitir. La implementación del tráfico de paquetes que generan los vehículos se detalla en la Sección 4.3. Como se ha señalado en la Figura 31, una de las principales características de la plataforma de emulación propuesta es el modelado de la capa física (PHY). Este modelado se ha llevado a cabo a través de un Proxy cuya implementación se detalla en la Sección 4.4. Finalmente, la Sección 4.5 se centra en describir las plataformas de validación y evaluación que han sido desarrolladas para analizar el comportamiento de la implementación 5G NR V2X realizada en el marco de este proyecto, al igual que en mostrar los resultados obtenidos en las pruebas realizadas.

4.1 Arquitectura de la implementación en la plataforma hardware

La Figura 32 muestra la arquitectura general del prototipo implementado y la plataforma de emulación sobre la que se ejecuta. Cada uno de los *Transceiver* que se observan en

la figura es un nodo UE (*User Equipment*) implementado en OAI, de forma que cada uno de ellos es un vehículo dentro de nuestro sistema. El OAI UE original implementa en su pila de protocolos las capas PDCP (*Packet Data Convergence Protocol*), RLC (*Radio Link Control*) y MAC (*Medium Access Control*), pero no soporta comunicaciones vehiculares. Para que el OAI UE pueda soportar comunicaciones vehiculares V2V o sidelink utilizando el interfaz PC5 ha sido necesario implementar en la capa MAC el scheduler V2X que definen los estándares del 3GPP para comunicaciones vehiculares usando la tecnología 5G NR V2X. Este scheduler es clave para el correcto funcionamiento del sistema, dado que influye en la gestión de los recursos radio que realizan los vehículos. El scheduler de 5G NR V2X es por lo tanto una de las principales aportaciones del presente proyecto al desarrollo de OAI para soportar comunicaciones vehiculares 5G.

En las capas inferiores, el OAI UE también implementa la capa PHY (*Physical*) de 5G NR, pero no incluye los desarrollos relativos a 5G NR V2X. Esta capa PHY de 5G NR V2X será implementada por la comunidad de OAI. Para poder validar y testear las implementaciones de capa MAC realizadas en el presente proyecto para comunicaciones vehiculares, ha sido implementado un módulo que permite la abstracción de dicha capa PHY, denominado *Proxy* o *Channel Abstraction*, representado en la Figura 32. Este módulo permite comunicar múltiples OAI UE e implementa la lógica necesaria para emular un canal radio y las correspondientes capas PHY de cada nodo. Gracias a este módulo Proxy, ha sido posible emular la comunicación entre varios cientos de nodos, dado que no está limitada por el número de equipos USRP (hardware) disponibles en el laboratorio.

Otro aspecto importante de la arquitectura es la interfaz que ha sido implementada para el intercambio de paquetes entre el Proxy y los múltiples UEs. Dicha interfaz está basada en el broker de mensajes Eclipse Mosquitto, haciendo uso además del formato de texto para intercambio de mensajes JSON, el cual ofrece una gran flexibilidad.

La arquitectura cuenta también con una aplicación V2X externa para la generación de mensajes, y un módulo para el control de la emulación, que permite, entre otras cosas, sincronizar el reloj interno del Proxy con el de las aplicaciones V2X.

La Figura 32 pretende dar una visión a alto nivel y no exhaustiva de cada uno de los módulos implementados en el presente proyecto. El trabajo realizado para implementar y poner en marcha todos estos módulos se describe en las siguientes subsecciones.

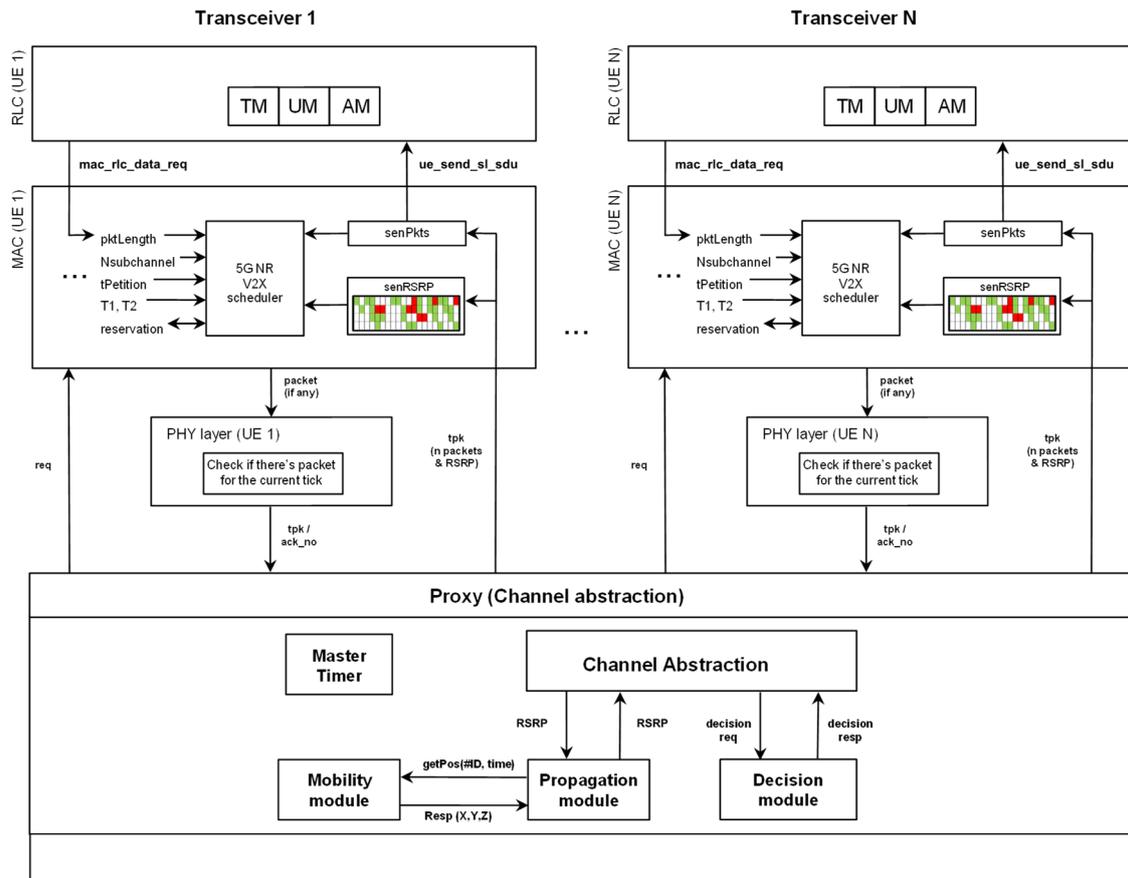


Figura 32. Arquitectura software general del prototipo implementado y su plataforma de emulación.

4.2 Implementación del scheduler 5G NR V2X

4.2.1 Integración en OAI y flujo de datos

El scheduler 5G NR V2X se encuentra integrado en la capa MAC de OAI (ver Figura 32). Cuando dicha capa recibe algún paquete procedente de capas superiores, a través de la función `mac_ric_data_req`, el scheduler deberá indicar en qué recursos radio deberá transmitirse dicho paquete, teniendo en cuenta si ya tiene una reserva activa o no (realizada para paquetes anteriores), y si no la tiene, analizando los datos de la ventana de sensado para encontrar un recurso que no colisione con los que otros vehículos han seleccionado.

Este proceso se ha implementado utilizando una estructura de hilos de ejecución que se ejecutan en paralelo. Los hilos principales son `mqtt_thread`, `timer_thread` y `UE_phy_stub_single_thread_rxn_txn4`. A continuación, se describe el flujo de ejecución a través de estos hilos. Esta explicación utiliza como referencia el diagrama de la Figura 33 y las estructuras, funciones e hilos de las Tabla 9 y Tabla 10, que incluyen a modo de referencia las estructuras de datos, hilos y archivos empleados en la implementación:

1. En una primera instancia, el hilo `mqtt_thread` se queda esperando algún mensaje procedente del Proxy, puesto que es éste quien controla y gestiona cuándo la capa MAC podrá enviar paquetes a las capas inferiores para que sean

- transmitidos. Dicho mensaje puede ser de tipo `req` (request) o de tipo `tpk` (paquete), tal y como se observa en la Figura 33. En el momento en que llegue un mensaje al OAI UE, este será procesado por la función `on_message`.
2. Al inicio de la ejecución, lo primero que el OAI UE recibirá será un mensaje `req` procedente del Proxy preguntándole si tiene algún paquete que transmitir. En ese momento, el OAI UE ejecutará la función `on_message` y aprovechará para eliminar los paquetes obsoletos de la lista de paquetes, mediante la función `removeFromListResources`, y para actualizar contadores internos. Posteriormente, enviará una señal de activación a `timer_thread`, tal y como se observa en la Figura 33.
 3. El hilo `timer_thread` actualiza en ese momento varios contadores locales, encargados de comprobar que la capa física y la MAC están sincronizadas. Después, envía una señal de activación al hilo `UE_phy_stub_single_thread_rxn_txn4`, el cual a su vez llamará a la función `phy_procedures_UE_SL_TX`. Esta función se encarga, en primer lugar, de llamar al scheduler (función `nr_v2X_scheduler`, detallada en la Sección 4.2.2) en caso de haber algún paquete que transmitir desde capas superiores. En ese caso, se ejecutará el algoritmo y se identificarán los recursos para dicho paquete.
 4. Tras la llamada al scheduler, `phy_procedures_UE_SL_TX` comprueba si el instante actual está reservado para el envío de algún paquete, generado por las capas superiores en algún instante anterior y puesto en cola hasta la llegada de los recursos para su transmisión. Si efectivamente hay un paquete que transmitir, se le envía al Proxy para que este lo difunda al resto de OAI UEs. Dicho paquete es transmitido mediante un mensaje tipo `tpk`. En caso de no haber paquete, responde con un mensaje tipo `ack_no`.
 5. Una vez todos los OAI UEs hayan respondido con su correspondiente `tpk/ack_no`, el Proxy procede a procesar todas estas respuestas. En primer lugar, el paquete enviado por cada OAI UE es replicado al resto de OAI UEs con su determinado nivel de RSRP. Posteriormente, se decide en función del RSRP frente al SINR qué paquetes llegan correctamente y cuáles son descartados. Entonces, el Proxy envía a cada OAI UE los paquetes que le corresponden recibir, así como los niveles de RSRP que debe haber sentido. Este proceso que lleva a cabo el Proxy se detalla en la Sección 4.4.
 6. Entonces, cada OAI UE recibe un mensaje tipo `tpk` por parte del proxy. Dicho mensaje recae en el hilo `mqtt_thread`, hilo que también recibía los mensajes de tipo `req`. Igual que antes, dicho hilo llama a la función `on_message`, la cual recorre todos los paquetes que el OAI UE ha recibido correctamente para el instante actual. Dichos paquetes son, primero, transmitidos a capas superiores a través de `ue_send_sl_sdu` y, después, añadidos a la lista de paquetes del scheduler mediante `addListResourcesBySS`. Además, se guarda en la tabla RSSI del scheduler los niveles de señal sentidos para el instante actual.

7. Tras esto, el proxy envía los mensajes `req` para el instante siguiente y, entonces, el OAI UE repite el proceso anterior. Tras un número suficiente de milisegundos, el OAI UE habrá acumulado en `senPkts` los paquetes recibidos durante los últimos 1100 ms (configurable en 5G NR V2X ya que también puede ser 100 ms), así como los niveles de señal en `senRSSI`. Llegado el momento, se recibirá un paquete de capas superiores y `phy_procedures_UE_SL_TX` llamará al scheduler. Este recibirá como entrada la ventana de sensado, consistente en la lista de paquetes recibidos y en la matriz con valores RSSI de los últimos 1100 milisegundos (configurable). También recibirá los parámetros que definen la ventana de selección. Además, recibirá el tamaño del paquete que se va a enviar, y la información de la reserva anterior. Finalmente, el scheduler nos devolverá la información relativa a la reserva. La implementación interna del scheduler se detalla en la Sección 4.2.2.

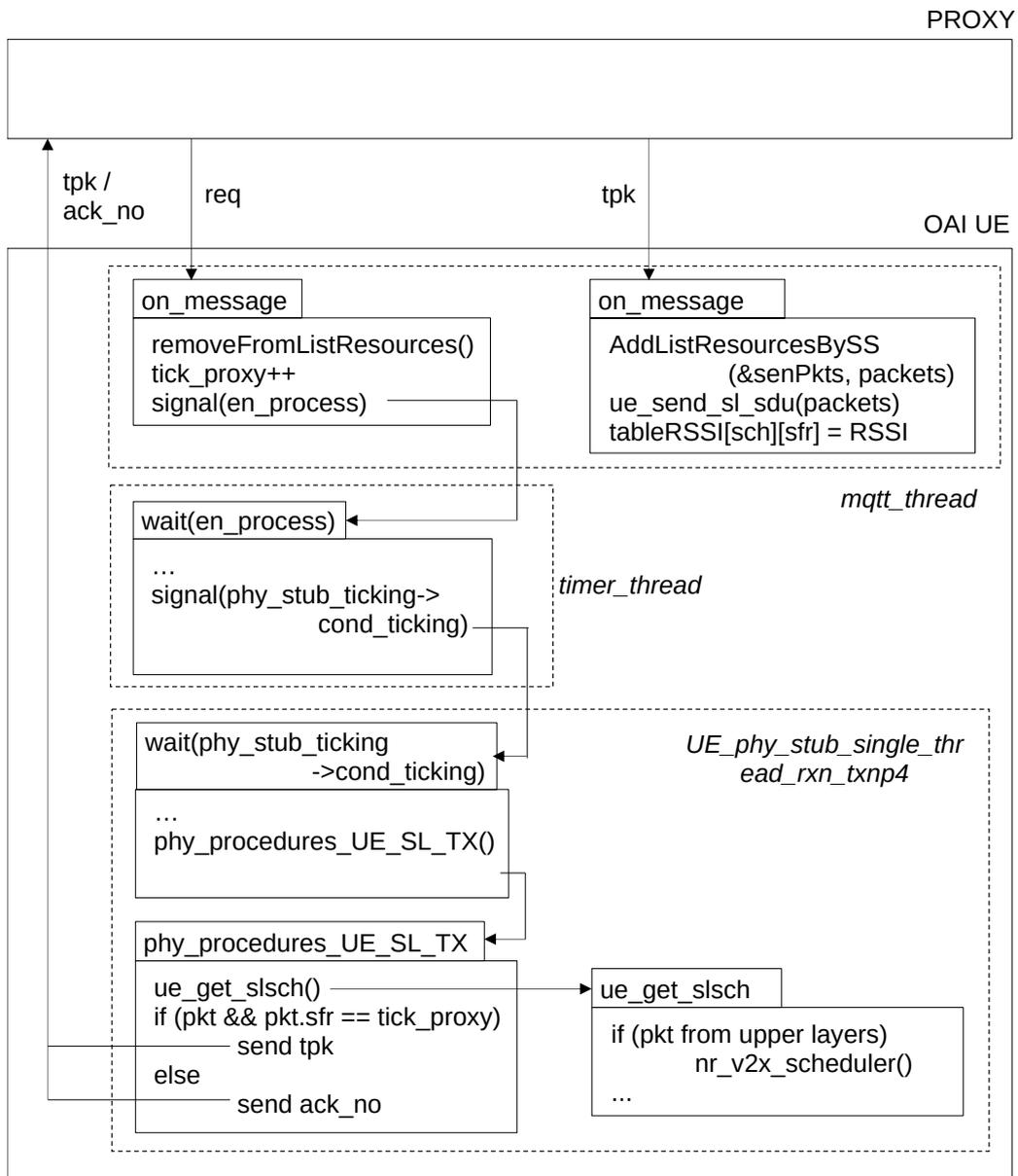


Figura 33. Flujo de datos e interfaz del scheduler 5G NR V2X con OAI.

A modo de referencia para la explicación anterior del flujo de datos, los tipos de datos creados para el scheduler se listan en la Tabla 9 y se encuentran declaradas en el fichero `transport_common.h` del OAI UE. Las funciones correspondientes al scheduler se listan en la Tabla 10 y están declaradas en `mac_proto.h` y definidas en `pre_v2x_processor.c` del OAI UE. Además, la Tabla 10 también muestra los principales ficheros del OAI UE en los que se han realizado las implementaciones descritas: `phy_procedures_5g_ue.c`, `5g_ue.c` y `ue_procedures.c`. El primero es el encargado de transmitir los paquetes desde capas superiores hasta la capa PHY, el segundo procesa la recepción de paquetes de otros UEs, y `ue_procedures.c` contiene las funciones propias de la capa MAC.

Tabla 9. Tipos de estructuras de datos creadas para el `nr_v2x_scheduler`

Nombre de la estructura	Datos en la estructura
<code>resource_t</code>	<code>int subchannel[NTRANSMISIONES];</code> <code>int subframe[NTRANSMISIONES];</code> <code>int RRI;</code> <code>int length;</code> <code>double RSRP;</code> <code>double RSSI; #no se utiliza</code> <code>int txID;</code> <code>int sizeSub;</code> <code>int priority;</code>
<code>listResource</code>	<code>resource_t *list;</code> <code>int size;</code>
<code>reservation_t</code>	<code>int RRI;</code> <code>int RC;</code> <code>int sizeSub;</code> <code>int length;</code> <code>int PDB;</code> <code>int priority;</code> <code>int subchannel[NTRANSMISIONES];</code> <code>int subframe[NTRANSMISIONES];</code>
<code>stRetransmission</code>	<code>int subframe;</code> <code>int subchannel;</code>
<code>listRetransmission</code>	<code>stRetransmission *list;</code> <code>int size;</code>
<code>stSelectionWindow</code>	<code>bool occupied;</code> <code>bool included;</code> <code>int subchannel;</code> <code>int subframe;</code> <code>double RSSI ; #no utilizado</code>
<code>RSSI_t</code>	<code>int subchannel;</code> <code>int subframe;</code> <code>double RSSI;</code>

Tabla 10. Hilos de ejecución, funciones y archivos del OAI UE donde se encuentra la implementación

Hilos de ejecución y funciones	Archivos de OAI UE relacionados
mqtt_thread	5g_ue.c
timer_thread	5g_ue.c
UE_phy_stub_single_thread_rxn_txn4	5g_ue.c
phy_procedures_UE_SL_TX()	phy_procedures_5g_ue.c
ue_get_slsch()	ue_procedures.c

4.2.2 Scheduler: sensing-based semi-persistent scheduling

La implementación en OAI se ha centrado en el mecanismo de scheduling de 5G NR V2X *sensing-based semi-persistent*⁵. Esta implementación se ha realizado en la función `nr_v2x_scheduler`. Como se puede ver en la Figura 32, que representa la arquitectura del prototipo implementado, esta función está integrada en la capa MAC de OAI. La función `nr_v2x_scheduler` puede ser llamada en dos casos en la implementación propuesta. En el primer caso, la función `nr_v2x_scheduler` es llamada cuando llega una petición de reservar recursos desde capas superiores a la capa MAC para realizar la primera transmisión y las retransmisiones de un nuevo paquete. En el segundo caso, la función `nr_v2x_scheduler` es llamada cuando se ejecuta el mecanismo de reevaluación para identificar la disponibilidad de los recursos seleccionados previamente en el primer caso. Este segundo caso se produce cuando el instante actual (representado en la implementación de OAI mediante la variable `tActual`) coincide con el instante de reevaluación (representado en la implementación de OAI mediante la variable `tRe-evaluation`). Los detalles de la implementación del mecanismo de reevaluación se presentan en la Sección 4.2.2.4.

La función `nr_v2x_scheduler` recibe catorce parámetros de entrada los cuales se pueden agrupar según su uso/significado en los siguientes grupos (Tabla 11):

- Las variables `tPetition`, `tActual` y `tRe-evaluation` son el instante de petición de nuevos recursos, el instante actual y el instante de reevaluación de recursos seleccionados, respectivamente.
- Las estructuras `sensingWindow`, `reservation`, `retransmissions`, `retransmissionsPrevious`: el primero guarda los paquetes recibidos de otros vehículos, el segundo guarda el siguiente paquete a transmitir, el tercero guarda la lista de recursos seleccionados para las transmisiones de los paquetes y el último guarda los recursos ya transmitidos de la lista anterior.
- Las variables `T1`, `T2` y `T3` almacenan valores relativos que se utilizan para: los dos primeros delimitan la ventana de selección (en la magnitud tiempo) a partir de `tActual` como referencia [`tActual + T1`, `tActual + T2`], el tercero

⁵ Recordar que en la Sección 2.6 se indicó que 5G NR V2X incluye 2 mecanismos de scheduling para 5G NR V2X modo 2: *sensing-based semi-persistent scheduling* y *dynamic scheduling*.

permite calcular el instante último de reevaluación de un recurso seleccionado a partir de su instante de transmisión (i.e., `retransmissions->list[re-evaluationX].subframe - T3`).

- Las variables `re-evaluationX` y `retransmissionX` indican las posiciones de los recursos de la lista `retransmissions` para su reevaluación y la siguiente transmisión del paquete, respectivamente.
- Por último, las variables `packetLength` y `Nsubchannel` que hacen referencia al tamaño del paquete en sub-canales y el número de sub-canales configurados en la capa MAC de 5G NR V2X.

Por otro lado, la función `nr_v2x_scheduler` devuelve el instante de reevaluación de los recursos seleccionados (i.e., `tRe-evaluation`). Además, dentro de la función se actualiza la lista de recursos disponibles para transmitir los paquetes.

Tabla 11. Parámetros de entrada y de salida de la función `nr_v2x_scheduler`

Tipo Dato	Parámetro	Funciones	Uso/Significado
int	tPetition	nr_v2x_scheduler,	Instante de petición de nuevos recursos
int	tActual	nr_v2x_petition,	Instante actual
int	tRe-evaluation	newResourcesNeeded, nr_v2x_selector	Instante de reevaluación de recursos
listResource*	sensingWindow	nr_v2x_scheduler,	Lista de paquetes recibidos
reservation_t*	reservation	nr_v2x_petition,	Siguiente paquete para transmitir
listRetransmission*	retransmissions	newResourcesNeeded, nr_v2x_selector	Lista de recursos seleccionados
listRetransmission*	retransmissionsPrevious	nr_v2x_scheduler	Lista de recursos seleccionados ya transmitidos
int	T1		Ranura inicial de la ventana de selección (valor relativo)
int	T2	nr_v2x_scheduler, nr_v2x_petition, newResourcesNeeded, nr_v2x_selector	Ranura final de la ventana de selección (valor relativo)
int	T3	nr_v2x_scheduler,	Indica el instante relativo en el que se ejecuta reevaluación
int*	re-evaluationX	nr_v2x_petition,	Posiciones de los recursos de la lista retransmissions
int	re-evaluationX	newResourcesNeeded, nr_v2x_selector	-
int*	retransmissionX	nr_v2x_scheduler,	Posiciones del recurso de retransmisión en la

			lista retransmissions
int	retransmissionX	nr_v2x_petition,	-
int	packetLength	newResourcesNeeded, nr_v2x_selector	Tamaño del paquete en subcanales
int	Nsubchannel	nr_v2x_scheduler,	Número de subcanales
stSelectionWindow**	selectionWindow	nr_v2x_petition,	Ventana de selección
bool	reev	newResourcesNeeded, nr_v2x_selector	Instante de petición de nuevos recursos

La implementación dentro de la función `nr_v2x_scheduler` identifica primero la razón o el caso por el que la función ha sido llamada, es decir, se comprueba si es una petición de recursos para la transmisión de un nuevo paquete o una reevaluación de recurso. Si se trata de una petición para la transmisión de un nuevo paquete (i.e., `tActual != tRe-evaluation`), entonces se ejecuta la función `nr_v2x_petition`. La función `nr_v2x_petition` comprueba primero si existen recursos seleccionados anteriormente que puedan ser utilizados para la transmisión del paquete actual (tanto para su primera transmisión como para sus retransmisiones, si es el caso). En la implementación realizada, este hecho se identifica utilizando el contador *reselection counter* (identificado con la variable `RC` dentro de la estructura `reservation`, i.e., `reservation->RC`). En concreto, debe cumplirse que este contador sea mayor que cero (i.e., `reservation->RC > 0`). También es importante notar que para poder utilizar los recursos seleccionados anteriormente, el tamaño del nuevo paquete debe ser menor o igual que el tamaño de las reservas previas (i.e., `packetLength <= reservation->length`).

Si se cumple todas las condiciones anteriores, los recursos seleccionados anteriormente pueden utilizarse para la transmisión del paquete actual. Esto implica la realización de las siguientes operaciones: se actualiza el subframe⁶ (slot o ranura de transmisión) de cada recurso con el anunciado en la reserva (`retransmissions->list[i].subframe += RRI_packet`, siendo $0 \leq i < \text{retransmissions->size}$), en la estructura `reservation` se actualizan los vectores `subframe` y `subchannel` (primer subcanal usado para la transmisión) con los NSCI primeros recursos de `retransmissions`, siendo $1 \leq \text{NSCI} \leq 3$, y se ponen a cero las variables `retransmissionX` y `re-evaluationX`. Además, también se comprueban las restricciones que impone el 1st-stage SCI para la reserva de recursos, es decir, que la separación entre los mismos sea inferior a 32 slots o ranuras temporales (i.e. `subframe[i] <= subframe[i - 1] + 31`). Como solo

⁶ En la implementación se ha utilizado la nomenclatura `subframe` para referirse a instantes temporales. Sin embargo, es importante señalar que la granularidad en 5G NR V2X es de slots o ranuras. El número de slots en un subframe (1 ms) depende de la numerología utilizada.

pueden anunciarse 2 retransmisiones en el SCI, esta condición debe cumplirse cuando i es igual a 1 y cuando i es igual a 2.

Por el contrario, si la lista de recursos seleccionados anteriormente (i.e., `retransmissions`) está vacía, o no se cumplen todas las condiciones señaladas anteriormente, la función `nr_v2x_petition` llama a la función `newResourcesNeeded`. Esta última función reserva e inicializa una matriz de tipo `stSelectionWindow` y de tamaño `Nsubchannel` x `T2` para crear la ventana de selección de recursos. Una vez creado la ventana de selección, la función `newResourcesNeeded` llama a la función `nr_v2x_selector`, que es la encargada de seleccionar aleatoriamente los recursos para la transmisión del nuevo paquete generado (y sus posibles retransmisiones). Para realizar esta selección de recursos se emplea el algoritmo de dos pasos definido en 5G NR V2X Modo 2 (ver Sección 2.6.2). En el primer paso se descartan los recursos que otros vehículos ya han reservado, y en el segundo paso se realiza la selección aleatoria de recursos de entre los recursos que nos han sido descartados. Para la ejecución del primer paso se han implementado las siguientes funciones: `calculateQ`, `nr_v2x_halfduplex`, `discard_overlapping_resources`, `nr_v2x_discard_reserved_resources`, `nr_v2x_discard_occupied_resources` y `nr_v2x_remaining_available_resources`. Y para la ejecución del paso 2 o selección aleatoria de recursos se han implementado las funciones: `randomSelection`, `destroyListRetransmission`, `newListRetransmission`, `addListResourcesBySSRetrans`, `removeIndexFromListResourcesRetrans`. Los detalles de la implementación y la descripción de cada una de estas funciones se presentan en las siguientes secciones.

4.2.2.1 Paso 1 - Exclusión de recursos

Dentro del paso 1 de modo 2 de 5G NR V2X existen dos casos que dan lugar a la exclusión de recursos candidatos dentro de la ventana de selección. Estos casos son la operación half-duplex de 5G NR V2X y la exclusión de los recursos anunciados en las reservas de otros vehículos.

Para la implementación en OAI de la exclusión de recursos por half-duplex, primero se ejecuta una función que calcula el valor de Q para cada posible valor de la lista de RRI preconfigurada en los UE en 5G NR V2X. La función `calculate_vectorQ`, recorre el vector RRI (apuntado por el puntero `pRRI`) desde la posición 0 hasta la posición 16 (tamaño máximo definido en el estándar) y comprueba si se cumple las siguientes condiciones: `pRRI[i]` es menor que `T2` (en ms) y `tPetition - subframe` es menor o igual que `pRRI[i]` (medido en slots). La variable i es el contador del bucle for que toma los valores $0 \leq i < 16$ y `subframe` es un parámetro de la función `calculate_vectorQ`, que representa el subframe de uno de los recursos de la lista `retransmissionsPrevious`. Si se cumplen las dos condiciones, se guarda en la posición i del vector Q el valor $T2/pRRI[i]$ en slots, en caso contrario se guarda el valor 1 en esa posición.

A la vez que se calculan los valores del vector Q , se llama también a la función `nr_v2x_halfduplex`. Esta función se llama dentro del bucle que recorre cada recurso de la lista `retransmissionsPrevious`, de forma que en cada iteración se calcula una lista de valores para el vector Q en función del subframe de cada recurso de la lista `retransmissionsPrevious`. El vector Q se pasa como parámetro a la función `nr_v2x_halfduplex`. La función `nr_v2x_halfduplex` se encarga de descartar todos los recursos que hayan podido reservar los demás vehículos en los instantes de tiempo en los que el propio vehículo estaba transmitiendo y por lo tanto no pudo reservar las reservas de otros vehículos. En concreto, la implementación realizada en la función `nr_v2x_halfduplex` calcula el índice `tIndex` dentro de la matriz `selectionWindow` (i.e., se calcula el instante de tiempo dentro de la ventana de selección) a partir de la expresión $s_i + q * RRI_i$ y después llama a la función `discard_resources`, que es la encargada de marcar como ocupados los recursos indicados para la ventana de selección. Siendo s_i el subframe de cada recurso de la lista `retransmissionsPrevious`, que es pasado como parámetro a la función `nr_v2x_halfduplex` en cada iteración del bucle que recorre los elementos de la lista `retransmissionsPrevious`, y q se define como una variable que puede tomar valores $1 \leq q \leq Q[i]$. Entonces, utilizando las funciones `discard_resources` se comprueba si el índice `tIndex` (medido en slots) se sitúa dentro de la ventana de selección (i.e. $T1 - 1 \leq tIndex < T2$). Si se cumple la condición, entonces se recorren todos los subcanales de ese índice ($0 \leq k < N_{subchannel}$) y se asigna el valor `true` a la variable `occupied` para indicar que los recursos han sido excluidos.

Una vez que han sido excluidos los recursos por halfduplex que caen dentro de la ventana de selección (a partir de la expresión $s_i + q * RRI_i$), la función `discard_overlapping_resources` se utiliza para calcular los recursos que deben excluirse en la ventana de selección porque su selección coincidiría con reservas fuera de la ventana de selección. Esto se hace comparando si coinciden los índices de la expresión $s_j + j * RRITX$ con los de $s_i + q * RRI_i$ (i.e. $s_i + q * RRI_i = s_j + j * RRITX$). La variable s_j es cualquier ranura de la ventana de selección, la variable j puede tomar los valores $1 \leq j \leq 10 * RC - 1$ y $RRITX$ es el RRI (en ranuras) del vehículo que está seleccionando nuevos recursos. Los valores de $RRITX$ y RC se obtienen de la estructura `reservation` (i.e. `reservation->RRI` y `reservation->RC`). Para calcular las ranuras en las que se superponen, se despeja s_j de la expresión anterior. La implementación de `discard_overlapping_resources` recibe el índice los índices de $s_i + q * RRI_i$. Primero comprueba si dichos índices son mayores que el primer índice de la ventana de selección (i.e., $T1 - 1$). Si se cumple, entonces la diferencia entre esos dos índices es dividida por $RRITX$ y el valor obtenido se guarda en la variable j_{Max} . Si j_{Max} supera el valor máximo $10 * RC - 1$, entonces se actualiza su valor a $10 * RC - 1$. También se comprueba si el índice que se le pasa a la función `discard_overlapping_resources` es mayor que el último índice de la ventana de selección (i.e., $T2 - 1$). Si se cumple, entonces la diferencia entre estos 2 índices es

dividida por RR_{ITX} y el valor obtenido se guarda en la variable j_{Min} . En caso contrario se guarda el valor 1 en j_{Min} . Tanto j_{Max} como j_{Min} son utilizados para indicar los valores máximo y mínimo respectivamente de j en la expresión resultante de despejar s_j en la ecuación de superposición ($s_i + \alpha * RRI_i - j * RR_{ITX} = s_j$). En la ventana de selección se marcan como ocupados todos los subcanales de las ranuras resultantes de la expresión $s_i + \alpha * RRI_i - j * RR_{ITX}$ para $j_{Min} \leq j \leq j_{Max}$. En un bucle se recorre todos los subcanales (primer índice) de la ventana de selección para cada ranura s_j y se marcan los recursos como ocupados (i.e., `selectionWindow[k][tIndex_selWin].occupied = true`), para `firstSubchannel ≤ k < lastSubchannel`. k es el contador del bucle del número de subcanales dentro de la ventana de selección que, `firstSubchannel` toma el valor 0 y `lastSubchannel` el valor `Nsubchannel`, `tIndex_selWin` es una ranura s_j pasado al índice correspondiente.

Una vez excluidos los recursos por half-duplex, la función `nr_v2x_discard_reserved_resources` se utiliza para excluir los recursos reservados por otros vehículos. En la implementación de la función `nr_v2x_discard_reserved_resources` se recorre en un bucle cada elemento de la lista de paquetes recibidos de la ventana de detección (`sensingWindow->list`). Los paquetes de la ventana de detección están ordenados de menor a mayor en función del subframe (ranura) de transmisión (`subframe[0]`) de los paquetes y en segundo lugar ordenado en función del subcanal usado (`subchannel[0]`). Antes de recorrer los elementos de la ventana de detección, se calcula cuál es el último índice de dicha lista cuya ranura de transmisión es igual o menor que la ranura `tActual - Tproc0[mu]`. `Tproc0` es un vector con los valores {1, 1, 2, 4} que depende de la numerología μ que puede tomar los valores {0, 1, 2, 3}. Por lo tanto, `Tproc0[mu]` es el tiempo necesario para completar el procedimiento de detección para la numerología configurada. El índice calculado se guarda en la variable `postTproc0`. Los paquetes transmitidos en una ranura posterior a `tActual - Tproc0[mu]` no han tenido tiempo suficiente para ser procesados completamente y por lo tanto esos paquetes no se tienen en cuenta en el proceso de descarte de recursos reservados por otros vehículos.

Una vez calculado `postTproc0`, se analizan los paquetes recibidos en la ventana de detección desde la posición 0 hasta la posición `postTproc0` (i.e. `sensingWindow->list[res]`, para `0 ≤ res ≤ postTproc0`). Para cada paquete, primero se comprueba si su RSRP (potencia recibida de la señal de referencia) es mayor que `RSRPthreshold` (umbral de RSRP de referencia) (i.e. `sensingWindow->list[res].RSRP > RSRPthreshold`), si no se cumple la condición se pasa al siguiente paquete de la lista. Si el nivel de señal RSRP del paquete recibió es superior al umbral, al igual que con los paquetes descartados por halfdúplex, se llama a las funciones `discard_resources` y `discard_overlapping_resources` para el descarte de recursos. Por cada paquete de `sensingWindow`, se recorre en otro bucle (interno) sus vectores `subframe` (ranura) y `subchannel` (subcanal) desde la

posición 0 hasta la posición `sensingWindow->list[res].sizeSub`, para $0 \leq i < \text{sizeSub}$, siendo `sizeSub` el tamaño de los vectores. En la posición 0 de los vectores están el subframe y el subcanal de la transmisión del paquete y los siguientes subframes (en valor absoluto) y subcanales de los vectores son los reservados para las siguientes retransmisiones del mismo paquete. A diferencia que en halfdúplex, que descartaba todos los subcanales, ahora solo se descartan los subcanales reservados por el paquete recibido. Cada valor `i` del vector `subchannel` indica el primer subcanal (parámetro `firstSubchannel`) que se usa para transmitir en la ranura `subframe[i]`. Y para calcular el valor del parámetro `lastSubchannel`, se suma `subchannel[i]` con la variable `length` (tamaño) del paquete recibido. Entonces en la dimensión frecuencia se descartará los subcanales desde `subchannel[i]` hasta `subchannel[i] + length - 1`. Esto se realiza de este modo tanto en la función `discard_resources` como en la función `discard_overlapping_resources`. En cada iteración del bucle `sizeSub`, primero se descarta la ranura `sk` (`subframe[i]` pasado a índice, para $i > 0$) en la función `discard_resources`. Después se descartan los recursos de las ranuras $sk + q * \text{RRIRX}$ utilizando la función `discard_resources`. Finalmente se descartan los recursos de las ranuras `sp` si se cumple que $sp + j * \text{RRITX} = sk + q * \text{RRIRX}$ en la función `discard_overlapping_resources`. La variable `sk` es cada uno de los valores del vector `subframe`, `RRIRX` (`sensingWindow->list[res].RRI`) es el RRI (en ranuras) indicado en el paquete, la variable `sp` es cualquier ranura de la ventana de selección, `RRITX` es el RRI (en ranuras) seleccionado por el vehículo que está seleccionando nuevos recursos. La variable `q` toma los valores $1 \leq q \leq Q$.

4.2.2.2 Paso 2 - Selección de recursos

Tras completar el paso 1 de la sección anterior, se obtiene la lista de recursos candidatos (`listCSR`). Esta lista tiene que tener un $X\%$ mínimo del total de recursos de la ventana de selección. X puede ser igual a 20, 35 ó 50, según la prioridad del paquete a transmitir. Si no se cumple esta condición, entonces se repite el paso 1 reduciendo el umbral de RSRP en 3dB.

Cuando se cumple la condición del $\%$ de recursos candidatos mínimo, se procede a realizar la selección de recursos para la transmisión del paquete y de sus posibles retransmisiones (el número de retransmisiones es una variable de configuración). Primero se selecciona aleatoriamente un recurso de la lista `listCSR`. Este primer recurso se tomará como referencia (no será necesariamente el recurso de la primera transmisión del paquete) para seleccionar los demás recursos intentando que se cumpla las restricciones del SCI.

La función `randomSelection` recibe los parámetros `listCSR` y `retransmissions` (recursos seleccionados para las transmisiones del paquete actual). En esta función se genera un número aleatorio entre 0 y el tamaño de `listCSR - 1` (i.e., $[0, \text{listCSR->size} - 1]$), que será el índice del recurso en la lista

`listCSR` que se seleccione. A continuación, se llama a la función `addListResourcesBySSRetrans` para agregar el recurso seleccionado a la lista `retransmissions`. Finalmente, dentro de esta función se llama a la función `removeRepeatedSubframes` para eliminar los recursos de la lista `listCSR` cuyo subframe coincide con el del recurso que se ha añadido a `retransmissions`. Esto último se hace para evitar que 2 (o más) recursos de la lista utilizados para transmitir un paquete tengan el mismo instante (o ranura) de transmisión.

Si las retransmisiones están activadas (`retransmissionActivated == true`), se crea otra lista vacía `listRandom`, que contendrá los recursos que cumplen las restricciones del SCI. Para la selección de los recursos de las retransmisiones se realizan los siguientes pasos. En un bucle se recorre cada elemento de la lista `listCSR` y el subframe del elemento (i.e. `listCSR.list[i].subframe`, siendo `i` el índice o posición del recurso en el vector `listCSR`). Se compara con el subframe de cada recurso (en otro bucle interno) de la lista `retransmissions`. Si se cumple $subframe2 - 31 \leq subframe \leq subframe2 - tGAP$ o $subframe2 + tGAP \leq subframe \leq subframe2 + 31$, entonces se añade dicho recurso (`listCSR.list[i]`) a la lista `listRandom`, siendo la variable `subframe` el subframe del elemento de `listCSR`, `subframe2` el subframe de cualquier recurso de `retransmissions` y `tGAP` el intervalo de tiempo mínimo (en ranuras) entre cualquier par de recursos seleccionados consecutivos para las retransmisiones. El recurso seleccionado se elimina de `listCSR`. Después de recorrer todos los elementos de la lista `listCSR`, se procede a seleccionar un recurso aleatoriamente de `listRandom`, llamando a la misma función `randomSelection`. Después de actualizar la lista `retransmissions` con un nuevo recurso, se repiten los pasos anteriores volviendo a recorrer cada elemento de `listCSR`. Se repiten hasta que el número de recursos en `retransmissions` (`retransmissions->size`) coincida con `NMAX` (número máximo de recursos para las retransmisiones que ha sido configurado) o hasta que el tamaño de `listRandom` sea 0. Si el número de recursos seleccionado para las retransmisiones es inferior a `NMAX` (i.e. `retransmissions->size < NMAX`) y quedan recursos en `listCSR` (i.e. `listCSR.size > 0`), se selecciona aleatoriamente un nuevo recurso en cada iteración para las retransmisiones (función `randomSelection`), aunque no cumpla con las restricciones del SCI.

4.2.2.3 Retransmission

La lista `retransmissions` guarda los recursos seleccionados para las retransmisiones del paquete actual. Los recursos ya transmitidos de la lista se copian a la lista `retransmissionsPrevious`, esta última lista es usada en el paso 1 (descarte de recursos), para las exclusiones o descartes por halfduplex. En la implementación de la función `nr_v2x_selector`, que es la encargada de llamar a las funciones pertinentes para los pasos 1 y 2 en la selección de recursos, primero borra los recursos antiguos de `retransmissionsPrevious`, aquellos cuyo $subframe + RRImax < tActual + T1$, siendo `RRImax` el mayor RRI posible (i.e., 1000 ms pasado a ranuras). Es decir, se borran aquellos recursos que no tendrían efecto en la

operación halfdúplex, porque los índices calculados en la operación se quedarían fuera de la ventana de selección. Hay dos variables que van asociadas a la lista `retransmissions`: `retransmissionX` y `re-evaluationX`. Estas variables indican las posiciones del siguiente recurso a transmitir y a reevaluar respectivamente en la lista. Después de seleccionar nuevos recursos en una petición de recursos (i.e., `tPetition == tActual`), cuando los recursos previos de `retransmissions` no son válidos para las retransmisiones del nuevo paquete (función `nr_v2x_petition`), la variable `retransmissionX` se actualiza para que tome el valor 0. Entonces la estructura `reservation`, que guarda el subframe y el subchannel del siguiente recurso a transmitir, guarda en la posición 0 (`retransmissionX`) de los vectores `subframe` y `subchannel` el primer recurso de la lista `retransmission`, y en las posiciones siguientes de los vectores (las reservas de las siguientes retransmisiones) guarda el subframe y el subchannel de los siguientes recursos de la misma lista si cumplen con las restricciones del SCI (i.e. `retransmissions->list[i].subframe <= reservation->subframe[0] + 31`). En estos vectores, por limitaciones del SCI, se pueden guardar hasta un máximo de 3 subframes y subchannels (la variable `sizesub` indica el tamaño de estos vectores).

Cada vez que se transmite un paquete, es decir en el instante `tActual == reservation->subframe[0]`, se incrementa en 1 el valor de `retransmissionX`. Además, se actualizan los vectores `subframe` y `subchannel` de la estructura `reservation`. En este caso, se almacenan desde la posición 0 los recursos desde la posición `retransmissionX` de la lista `retransmissions`.

4.2.2.4 Re-evaluation

Re-evaluation es un mecanismo de verificación de la disponibilidad de un recurso seleccionado. Los recursos seleccionados se almacenan en la lista `retransmissions`. Suponiendo que un recurso de `retransmissions` está situado en la ranura de transmisión m , el instante para su reevaluación es $m - T_3$, siendo T_3 es el tiempo máximo para la selección de recursos.

Hay varios casos que dan lugar a que un recurso pueda ser reevaluado. El primero de ellos se produce al seleccionar nuevos recursos (los cuales son guardados en la lista `retransmissions`), provocado por la petición de transmitir un nuevo paquete. Esta sería la primera razón por la que es llamada la función `nr_v2x_scheduler`. Otro caso que da lugar a que un recurso seleccionado pueda ser reevaluado se da cuando en la lista `retransmissions` se produce que un recurso no cumple con las restricciones del SCI con respecto al recurso anterior en la lista, es decir, `subframe > subframe_previo + 31`, siendo `subframe` la ranura de transmisión del recurso a reevaluar y `subframe_previo` la ranura de transmisión del recurso anterior en la lista `retransmissions`. Esto es así porque el recurso no ha podido ser informado en el SCI y por lo tanto no ha sido reservado.

En cualquiera de estos casos, la función `nr_v2x_scheduler` devuelve el instante de reevaluación del siguiente recurso a reevaluar, o devuelve 0 si no hay recursos para

reevaluar. También devuelve 0 si el instante de reevaluación del último recurso a reevaluar es menor o igual que el instante actual (i.e., $m - T3 \leq tActual$). El siguiente instante de reevaluación se guarda en la variable `tRe-evaluation` y la posición del recurso dentro de la lista `retransmissions` en la variable `re-evaluationX`. El instante de reevaluación devuelto es recibido en la función `nr_v2x_petition`, que a su vez devuelve dicho valor a la función `nr_v2x_scheduler`. Cuando `tActual` coincide con `tRe-evaluation`, si se comprueba que el recurso seleccionado ya no está disponible (ejecutando el Paso 1 – ver Sección 4.2.2.1), la función `nr_v2x_scheduler` se utiliza para seleccionar un nuevo recurso (ejecutando el Paso 2 – ver Sección 4.2.2.2). En este caso, hay que tener en cuenta que la selección debe realizarse dentro de una ventana de selección más reducida. Para ello, el nuevo valor de PDB se calcula sumando el instante de la última petición de recursos con $T2$ menos el nuevo instante de reevaluación (i.e. $reservation \rightarrow PDB = tPetition + T2 - new_tRe-evaluation$). Es importante señalar que, si el valor calculado para PDB es menor que $T1$, entonces no es posible definir la nueva ventana. En este caso `nr_v2x_scheduler` devuelve 0 y `re-evaluationX` se iguala a 0. $T1$ es el tiempo de procesamiento en ranuras requerido por un vehículo para identificar los recursos candidatos ($tActual + T1$ es la primera ranura de la ventana de selección).

4.3 APP

La generación de tráfico dentro de la implementación propuesta permite establecer un patrón periódico o aperiódico del mismo. En ambos casos, la variable `tPetition` almacena el instante en el que se genera el siguiente paquete. Así, cuando `tActual` coincide con `tPetition`, se llama a la función `nr_v2x_scheduler` para seleccionar o utilizar los recursos seleccionados para la transmisión de los paquetes. Para aleatorizar la generación de tráfico en los diferentes nodos/vehículos de la plataforma OAI, la primera petición de recursos se de forma aleatoria entre `tActual` y `tActual + petitionInterval - 1`.

En el caso de tráfico periódico, el valor de `tPetition` se actualiza sumando la constante `petitionInterval`. La variable `petitionInterval` representa el intervalo de generación de paquetes (medido en ranuras temporales). El valor de `tPetition` se actualiza después de la ejecución de la función `nr_v2_scheduler`.

En el caso de tráfico aperiódico, se ha implementado el modelo 1 del 3GPP. Por lo tanto, el valor `tPetition` se actualiza sumando 50 ms y una variable aleatoria que sigue una distribución exponencial con media 50 ms. Los valores en ms calculados son pasados a ranuras antes de almacenarlos en `tPetition`.

4.4 Módulo Proxy

En su estado de desarrollo actual, la capa PHY de 5G implementada en OAI no incluye los desarrollos relativos a 5G NR V2X. Por tanto, ha sido necesario implementar el nodo Proxy, que sirve de abstracción de dicha capa PHY y además permite emular diferentes

aspectos como la movilidad de los nodos o el canal radio y sirve para sincronizar los diferentes relojes en los diferentes nodos UE. El nodo Proxy comunica a los diferentes OAI UEs, actuando como emulador del canal radio inalámbrico, y por tanto les permite intercambiar mensajes.

Para comunicar a los diferentes OAI UEs⁷ a través del Proxy, nos hemos basado en Eclipse Mosquitto y JSON. De esta forma, tanto el Proxy como el OAI UE son clientes Mosquitto que intercambian entre sí mensajes que siguen el formato de texto JSON. Para la comunicación entre el Proxy y los OAI UEs utilizando Mosquitto, han sido definidos los asuntos o *topics* RxUE_n y TxUE_n. Para el caso de TxUE_n, los UEs actúan de publicadores y el Proxy de suscriptor. Es decir, los OAI UEs transmiten sus paquetes al Proxy a través de TxUE_n. En cambio, a través de los *topics* RxUE_n, es el Proxy el que publica mensajes que reciben los OAI UEs, los cuales actúan de suscriptores.

El funcionamiento general del sistema, centrándonos en el Proxy, sería el siguiente:

1. En primer lugar, se lanza para cada uno de los OAI UEs un hilo de ejecución `listenning`. Dichos hilos lanzan, para cada uno de los OAI UEs, un cliente Mosquitto distinto que se suscribe a su vez a su propio *topic* TxUE_n. Por otro lado, el Proxy escucha a cada uno de los OAI UEs creando un cliente que se suscribe al *topic* TxUE_n. Por ejemplo, el Proxy escuchará al primer OAI UE a través del *topic* TxUE₀ creado por éste mismo. El segundo UE será escuchado por el Proxy a través del *topic* TxUE₁, y así sucesivamente.
2. Una vez el Proxy se haya suscrito a TxUE₀, TxUE₁, ..., TxUE_n, se ejecuta `ue_transmission_requests()`. Esta función se encarga de mandar a los OAI UEs los `req`, con los que les pide que transmitan sus paquetes en caso de haberlos. Para ello, dicha función crea, dentro del Proxy, un cliente por cada OAI UE. Cada uno de estos clientes publican sus `req` en los *topics* RxUE₀, RxUE₁, ..., RxUE_n. Al otro lado, los OAI UEs se suscriben a sus respectivos *topics* y reciben los `req`. Ante la llegada de los `req`, los OAI UEs responden al Proxy transmitiéndoles un `tpk/ack_no` a través de sus respectivos TxUE_n. Por lo tanto, el envío de los `req` y la respuesta con los `tpk/ack_no` de los OAI UEs constituyen el **módulo de recepción** del proxy.
3. Posteriormente se lanza `Trigger_Tx`. Este hilo se encarga de bloquear la ejecución hasta que todos los `listenning` hayan recibido de sus OAI UEs los correspondientes `tpk/ack_no`. Los `tpk/ack_no` recibidos por los `listenning` son procesados por `on_message`. Esta función se encarga de almacenar en una lista los paquetes recibidos para el instante actual.
4. Tras haber recibido todos los `tpk/ack_no`, `Trigger_Tx` reanuda la ejecución despertando a `Process_Msg`. Dicho hilo procesa cada uno de los paquetes recibidos, replicándolo a todos los demás OAI UEs. Para cada uno de estos paquetes, en el **módulo de replicación**, se calcula su nivel de RSRP. Además, se

⁷ Es importante tener en cuenta que alguno de los OAI UEs podría tratarse de Lightweight UE.

- calcula su contribución al RSSI en el resto de OAI UEs que detecten estos paquetes.
5. Posteriormente, en el **módulo de decisión** se descartan los paquetes que no se hayan recibido correctamente y se transmiten los correctos. El módulo de decisión se coloca en el lado del transmisor, y no en el lado receptor de cada OAI UE, para reducir la cantidad de información transmitida por sockets y la información a procesar.
 6. Finalmente, en el módulo de transmisión, se transmiten los `tpk` a todos los OAI UEs en el **módulo de transmisión**. También se les transmite los mensajes `req` del siguiente tick, y se vuelve a entrar en `Trigger_Tx`. En este estado de bloqueo se queda a la espera de recibir la respuesta de cada OAI UE para el nuevo ciclo. Hasta que no se reciban estas respuestas no se reanuda la ejecución a través del paso a `Process_Msg`.

A continuación, se explican con más detalle el módulo de recepción (pasos 2 y 3), el de replicación (paso 4) y los de decisión y transmisión (pasos 5 y 6).

4.4.1 Módulo de recepción

Para un determinado ciclo, el proxy envía los `req` y se queda a la espera de que los UEs (ya sean OAI UEs o Lightweight UEs) le respondan. Entonces, los `listening` quedan a la espera de que alguno de los UEs responda. La función `on_message` de dicho UE es llamada. En caso de que el Proxy reciba un `ack_no`, la variable `num_recvacks` se incrementa en 1. La variable `recvacks` es un contador de paquetes recibidos. En caso de recibir un `tpk`, se extrae del mensaje JSON todos los campos del paquete en cuestión: su RRI, el subcanal que ocupa, la longitud en subcanales, y también su ID. A través del ID se puede extraer la posición del UE en el escenario. La información extraída del paquete es introducida en `packetList` y el ID del UE transmisor es registrado en `list_tx_aux`. `packetList` es una estructura de datos que contiene un array y un entero. El array, `packetList.list`, es el vector en el cual se almacenan todos los paquetes recibidos. Dicho vector consiste en un array estático que se va llenando por orden de llegada. Es decir, si el primer paquete que llega es el del UE con ID 32, éste no se almacena en la posición 31 del vector, sino en la 0. Por otro lado, el entero de `packetList`, `packetList.numPackets`, indica cuántos paquetes han llegado hasta el momento para el tick actual. Esta variable se incrementa en 1 por cada paquete que llegue. Por otro lado, `list_tx_aux` es un array estático en el cual se marcan a `true` las celdas cuyo índice coincida con el ID de los UEs que hayan transmitido un paquete al proxy. Gracias a como `packetList` está diseñado, no hace falta destruir y volver a construir la lista de paquetes entre ciclo y ciclo del proxy, basta con reescribir los campos desde 0 hasta `packetList.numPackets`, sin necesidad de modificar el resto del array, que almacenará paquetes de ticks anteriores. La necesidad de contar con `list_tx_aux` la veremos más adelante.

4.4.2 Módulo de replicación

Una vez todos los paquetes están registrados, éstos son replicados en cada UE. Para ello, en primer lugar, se recorre el vector `packetList.list` que incluye todos los paquetes recibidos por el Proxy hasta el instante actual (`packetList.list` se recorre desde la posición 0 hasta `packetList.numPackets`). Por cada uno de los paquetes, se identifican aquellos UEs que no han transmitido en el instante actual. Para ello se recorre `list_tx_aux`. Para cada celda a true de esta lista, se calcula la distancia entre el UE que ha transmitido el paquete en cuestión y el UE receptor. En función a dicha distancia, se calcula el nivel de RSRP del paquete para el receptor en cuestión y se añade a `list_RSRP`. Además, este valor de RSRP se añade a la lista `list_RSSI` correspondiente al UE receptor. `list_RSRP` es un array bidimensional estático cuyas filas representan los transmisores y cuyas columnas son los receptores. Entonces, cuando el proxy recibe un paquete, por ejemplo del UE con ID 70 (transmisor), y se quiere registrar el nivel de RSRP en otro UE, por ejemplo con ID 5 (receptor), se hace en la celda `list_RSRP[69][4]`. Por otro lado, `list_RSSI` es un array bidimensional cuyas filas son los receptores y cuyas columnas constituyen los subcanales. Entonces, si el paquete del ejemplo anterior tuviese una longitud de dos subcanales y el primer subcanal ocupado fuese el número 3, tendríamos que sumar el nivel de RSRP del paquete a las celdas `list_RSSI[69][3]` y `list_RSSI[69][4]`. Por cómo está diseñado `listRSRP`, no hace falta resetear cada una de las celdas en cada nuevo del ciclo del proxy. Basta con sobrescribir solo aquellas celdas usadas en el instante actual.

4.4.3 Módulo de decisión y transmisión

El módulo de decisión se inicia comprobando qué UEs han transmitido y cuales no durante el instante actual. Esto se identifica utilizando la lista `list_tx_aux` y mirando los que están marcados como true (han transmitido) o false (no han transmitido). Para los UEs que no han transmitido, se recorre la lista `packetList.list`, que contiene todos los paquetes transmitidos al canal y que el UE ha recibido. Para cada paquete, se extrae el nivel de RSRP almacenado en `list_RSRP[txIdx][rxIdx]`. También se extrae el nivel máximo de RSSI de todos aquellos subcanales ocupados por el paquete. Es decir, el RSSI máximo de `list_RSSI[rxIdx][fIdx+k]`, donde k va desde 0 hasta `packetList.list[i].length`, siendo i el índice del paquete en cuestión. Se coge el nivel máximo de RSSI de los subcanales ocupados por el paquete para así obtener el nivel mínimo de SINR. Dicho SINR será el cociente entre el RSRP del paquete y el nivel máximo de RSSI. Entonces, si el paquete tiene un SINR suficiente y, además, el RSRP del paquete supera un determinado umbral, el paquete se considera que debe ser recibido correctamente por el UE. En este caso, el paquete es transmitido desde el Proxy al UE. Para entender cómo se da esta transmisión, basémonos en un sencillo ejemplo. Imaginemos que, de toda la lista, un UE sólo debe recibir correctamente tres paquetes. El primero ocupa solo el subcanal 0, el segundo paquete ocupa los subcanales 1 y 2, y el tercero, el subcanal 4. Enviar cada uno de los paquetes, uno detrás de otro, en conexiones de mosquito distintas, no sería una buena opción, ya que se reduciría considerablemente la eficiencia. Por ello, se ha optado por incluir todos los paquetes recibidos correctamente en una conexión de mosquito. Para incluir en el mensaje JSON

la información de todos estos paquetes, se sigue el siguiente formato. En primer lugar, `numPkts` indica el número de paquetes recibidos correctamente. Para el ejemplo considerado serían 3. Por cada uno de estos paquetes existe un campo llamado `txID`, otro llamado `subchannel`, otro con `subframe` y por último `RRI`. En el ejemplo, estas variables serían `txID0`, `txID1`, y `txID2`, e igual para el resto de las variables. Además de estas variables, el mensaje JSON incluye otros campos que se transmiten siempre, aunque `numPkts` sea 0. Dichos campos son `currentSfr`, que contiene el tick actual; y `rsi0`, `rsi1`, ..., hasta `rsi4`, en función de `Nsubchannel`, el número máximo de subcanales del canal.

4.5 Validación y evaluación

En esta sección se presentan las herramientas y procedimientos de validación que se han desarrollado y utilizado para verificar que el prototipo implementado sigue los estándares del 3GPP. Esta validación es clave para una correcta emulación y la generación de resultados válidos. Además, en esta sección se presentan los resultados que muestran el rendimiento del prototipo y resultados que analizan el rendimiento de la tecnología 5G NR V2X empleando el prototipo propuesto.

4.5.1 Herramientas de validación

Se han desarrollado 3 herramientas de validación diferentes y complementarias. En primer lugar, se han desarrollado una serie de módulos que permiten la validación funcional mediante diferentes tests unitarios. En segundo lugar, se ha implementado una herramienta de validación completa que permite verificar el correcto funcionamiento del scheduler 5G NR V2X sin el empleo de OAI. En tercer lugar, se ha desarrollado un nodo de comunicaciones denominado Lightweight UE que permite ejecutar emulaciones a gran escala empleando OAI. Todas estas herramientas desarrolladas se describen a continuación.

4.5.1.1 Test de validación funcional

Para probar la correcta implementación del prototipo implementado, en primer lugar, se han diseñado diferentes tests unitarios que verifican el correcto funcionamiento del scheduler 5G NR V2X. Para ello, se ha diseñado y desarrollado un generador de patrones de tráfico que emula de forma artificial el tráfico de datos generado por un elevado número de vehículos. Este módulo se conecta al Proxy para transmitir los paquetes generados artificialmente, de forma que serán recibidos por un OAI UE también conectado al Proxy, tal y como se ilustra en la Figura 34. De esta manera, el OAI UE experimentará una cierta carga, generada por el generador de patrones de tráfico, y seleccionará los recursos radio que debe utilizar en consecuencia. Variando la configuración del generador de patrones de tráfico, podremos analizar diferentes situaciones y si la implementación del OAI UE responde de forma adecuada seleccionando los recursos correctos.

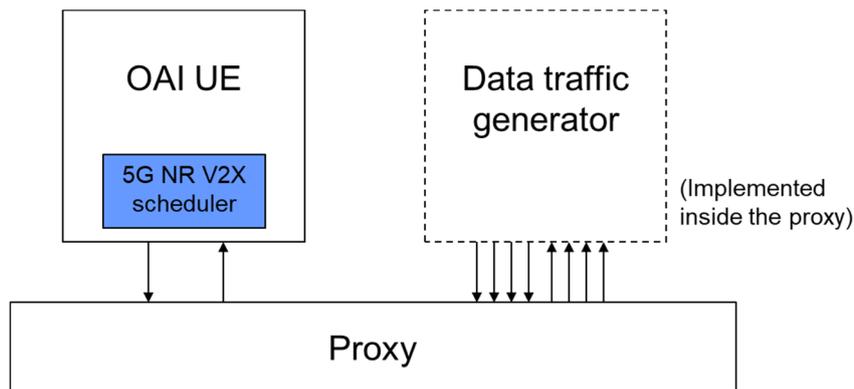


Figura 34. Validación funcional mediante generación de tráfico de datos.

El patrón de tráfico generado artificialmente es un tráfico que ocupa recursos seleccionados de forma aleatoria en una ventana preconfigurada, con una determinada carga del canal, y dicha ventana se repite periódicamente emulando la periodicidad con la que los vehículos reservan los recursos en 5G NR V2X cada RRI. Para simplificar la generación, el patrón generado no considera que las reservas de recursos cambian durante la ejecución (como podría ocurrir con tráfico aperiódico), puesto que el objetivo es observar cómo reacciona el scheduler de 5G NR V2X ante el tráfico generado de manera puntual en el tiempo, ante una carga de canal preconfigurada.

Para realizar las pruebas, es suficiente con un PC, en el cual se ejecuta un OAI UE, la aplicación de envío de mensajes hacia el OAI UE, y el Proxy con el generador de patrones integrado. Dicho generador creará al inicio un patrón de paquetes para los próximos 100 milisegundos (configurable), que es la ventana preconfigurada anteriormente mencionada. Este patrón se replicará a lo largo de 1100 milisegundos (configurable a 100 milisegundos en 5G NR V2) hasta completar la ventana de sensado del scheduler 5G NR V2X en el OAI UE, tal y como se ilustra en la Figura 35. Entonces, el scheduler seleccionará recursos en la ventana de selección y se almacenarán los resultados para su posterior análisis.

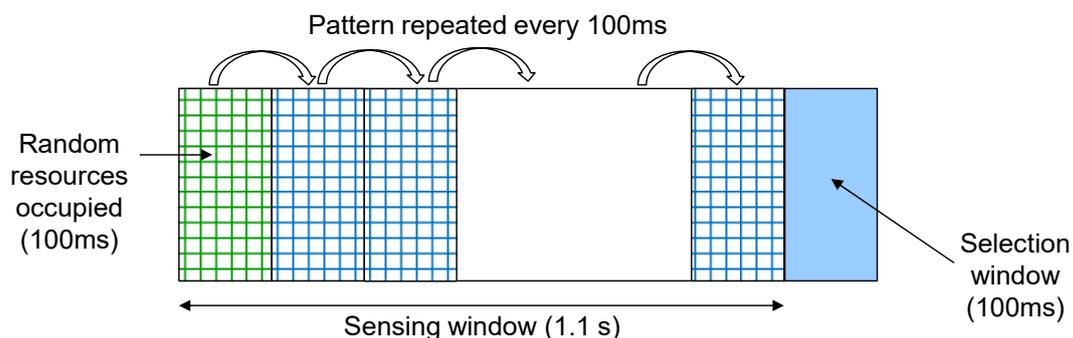


Figura 35. Generación de patrones de tráfico.

Para la generación del patrón de tráfico, en primer lugar se crea un vector cuyos elementos contienen un recurso radio, desde el recurso con subtrama 0 y subcanal 0, hasta el de subtrama 99 y subcanal $N_{\text{subchannel}}$. A continuación, se desordena dicho vector de forma aleatoria. Por otro lado, se crea una matriz que representa el patrón de tráfico, cuyas columnas serán los milisegundos, de 0 a 99, y cuyas filas serán los

subcanales, desde 0 hasta $N_{\text{subchannel}}$. Inicialmente, todos sus elementos se marcan como desocupados. Entonces, se recorre el vector de recursos antes mencionado, desde su primera posición. En función del índice que indiquen sus elementos, se van marcando como ocupados los recursos de la matriz del patrón de tráfico. El proceso anterior termina cuando llegamos a la carga de canal (CBR) que hemos configurado. De este modo, los recursos libres del patrón quedarán distribuidos de manera aleatoria y homogénea a lo largo de la matriz.

Una vez creada la matriz que contiene el patrón de tráfico a generar, cada milisegundo el Proxy consulta el patrón y genera los paquetes artificiales que éste le indique. Por ejemplo, si en la columna 35 del patrón hay tres subcanales ocupados, el proxy generará y enviará al OAI UE tres paquetes para el milisegundo 35, tres para el 135, el 235... y así sucesivamente hasta el milisegundo 1035 (este ejemplo asume que cada paquete ocupa un subcanal). Lógicamente, la ocupación de la ventana de sensado será equivalente a la ocupación del patrón y al CBR.

Para poder prever el resultado esperado y verificar el correcto funcionamiento del scheduler, se fijan tanto el RRI del OAI UE como el de los paquetes artificiales a 100 milisegundos. El tamaño de los paquetes artificiales es de un subcanal. Además, se fija la distancia entre el OAI UE y la fuente de los paquetes (generador de patrón de tráfico) a una determinada distancia configurable. Tomemos para el ejemplo que esta distancia es de 1 metro. De este modo, el nivel de potencia RSRP de los paquetes será suficientemente elevado como para que nunca se descarte ninguno de los paquetes por errores en el canal radio. En la realización de los tests, se preconfigura también la carga de canal o CBR y el tamaño en subcanales de los paquetes generados y transmitidos por el OAI UE, de forma que puede analizarse su comportamiento en diferentes escenarios.

Estos tests de validación han ayudado a comprobar que el prototipo y el scheduler funcionan correctamente, seleccionando recursos libres con la probabilidad esperada, dependiente del escenario de carga.

4.5.1.2 Herramienta de validación completa

Los tests funcionales anteriormente descritos analizan funcionalidades concretas del scheduler. Para su validación completa, como paso previo a su integración en OAI, ha sido desarrollada también una herramienta de simulación en la que un número preconfigurado de vehículos emplean la función de scheduler 5G NR V2X implementada. Esta función de scheduler es la descrita en la Sección 4.2 y está integrada en esta herramienta de forma modular, para que directamente pueda trasladarse al OAI UE tras su validación. La herramienta de validación desarrollada contempla los pasos ilustrados en la Figura 36. Permite configurar una gran cantidad de parámetros en el escenario de simulación (por ejemplo, número de vehículos, tiempo de simulación o parámetros del scheduler 5G NR V2X). Tras la inicialización de las variables correspondientes, la herramienta entra en un bucle temporal que en cada iteración avanza un slot o ranura temporal. Dependiendo de la numerología, esto se corresponderá con un transcurso de tiempo diferente. En el resto de la explicación y validación se asumirá que la

numerología empleada es la 0 en la que cada ranura temporal se corresponde con 1 ms. En cada iteración, aquellos vehículos que tienen un nuevo paquete a transmitir llamarán a la función de scheduler implementada para que les indique qué recursos radio deben utilizar (ver Sección 4.2). A continuación, se simula la transmisión de paquetes y la recepción de los mismos, teniendo en cuenta tanto la propagación como el efecto de las colisiones cuando un mismo recurso se utiliza por varios vehículos a la vez. Al final de la simulación, se almacenan los resultados obtenidos para su posterior análisis. Cada uno de estos procesos se detalla a continuación:



Figura 36. Flujo de ejecución de la herramienta de validación.

El escenario considerado para los test de validación es una autopista de 2km de longitud. Es posible configurar la densidad de tráfico de vehículos y, en base a esto, se genera un número diferente de vehículos, N . Todos los vehículos estarán configurados de la misma manera (misma frecuencia de generación de mensajes `msgRate`, mismo RRI, etc.). Al comenzar la simulación, cada uno de los N vehículos generan su primer mensaje en un instante de tiempo aleatorio entre 0 y `petitionInterval`. Dichos paquetes son generados por las capas superiores y entregados a la MAC para que el scheduler seleccione los recursos a utilizar para su transmisión. En un primer momento, como los vehículos no disponen de información previa del canal, la selección de recursos será, en la práctica, aleatoria en su primera transmisión.

A medida que transcurre la simulación a través del bucle temporal, cada vehículo va rellenando su lista de paquetes recibidos durante los últimos 1100ms (configurable). Dicha lista, a la cual hemos llamado `sensingPkts`, contiene la subtrama y subcanal que ocupa, su RRI y longitud, así como su nivel de RSRP. Por otro lado, para cada vehículo, también contamos con una matriz que hemos llamado `sensingRSSI`. Dicha matriz de 1100ms por N subcanales representa los niveles de RSSI sentidos por el vehículo. `sensingRSSI` contiene, por cada recurso detectado, su índice de subcanal y de subtrama, y su nivel de RSSI. La ventana de sensado de cada vehículo se construye a partir de `sensingPkts` (`sensingRSSI` es utilizado en LTE V2X, ver Sección 2.2, pero no en 5G NR V2X). El scheduler utiliza la información incluida en `sensingPkts` para seleccionar nuevos recursos. Los vehículos tienen también un objeto `reservation` que almacena los recursos que se ha reservado por última vez. `reservation` contiene el RRI de la reserva, el contador RC, la subtrama y el subcanal ocupados, y la longitud en subcanales de la reserva.

Al inicio de la ejecución no habrá ninguna reserva realizada por otros vehículos (`sensingPkts` está vacío). Por lo tanto, la primera selección de recursos del scheduler se realiza de manera aleatoria dentro de la ventana de selección establecida. Para que este hecho no afecte de forma estadística a los resultados obtenidos, los primeros 2000ms de simulación no se tienen en cuenta. A partir de ese tiempo inicial, el flujo de ejecución de la simulación se va repitiendo en el bucle temporal anteriormente mencionado. Para entonces, todos los vehículos tendrán sus `sensingPkts` repletas de paquetes sensados, sus `sensingRSSI` también reflejarán el nivel de señal de los paquetes y sus `reservation` contendrán los últimos recursos seleccionados por cada vehículo. El detalle sobre los pasos que se ejecutan en cada iteración dentro del bucle temporal de simulación es el siguiente:

Llamada al scheduler. Cada vez que un vehículo tiene un nuevo paquete a transmitir ejecutará la llamada al scheduler para que le indique los recursos a utilizar teniendo en cuenta la información recopilada en `sensingPkts` y `sensingRSSI`. Esta reserva será seleccionada un número consecutivo de veces, y estarán equiespaciadas por RRI ms. Ante la llegada de cada paquete a transmitir, se realiza una llamada a la función scheduler que devolverá los recursos a utilizar. Los paquetes que no hayan podido ser enviados por el scheduler no encontró recursos radio disponibles para realizar las transmisiones son descartados una vez que la validez de los paquetes expire (el tiempo transcurrido desde su generación supere $PDB - Packet\ Delay\ Budget$). La información incluida en `sensingPkts` y `sensingRSSI` también debe actualizarse ante cada llamada al scheduler, para que se descarten aquellos valores anteriores a la ventana de de sentido (es decir anteriores a 1100ms).

Transmisión de paquetes. El simulador identifica a todos los vehículos que tienen una transmisión programada, y recursos disponibles para ello, en el instante actual. Desde el punto de vista del transmisor, si un vehículo ha reservado previamente recursos para transmitir un paquete en el instante actual, dicho paquete será replicado y guardado en las ventanas de sentido del resto de vehículos. Lógicamente, los vehículos receptores más cercanos al transmisor recibirán correctamente el paquete con mucha mayor probabilidad que los más alejados. Este fenómeno se ve reflejado en que los receptores más cercanos guardarán dicho paquete con un nivel de RSRP elevado en sus respectivas `sensingPkts`. Además, el nivel de RSSI resultante en la `sensingRSSI` será también alto. Cabe recalcar que aquellos vehículos que estén transmitiendo en el instante actual no serán capaces de sensar el medio de manera simultánea debido al efecto Half-Duplex.

Recepción/decisión. Una vez que el proceso de transmisión ha concluido para todos los vehículos, y que las variables `sensingPkts` y `sensingRSSI` han sido actualizadas, el simulador pasa a analizar para cada vehículo, qué paquetes han sido correctamente recibidos y cuáles deben ser descartados. Para ello, imaginemos que un vehículo recibe dos paquetes que ocupan exactamente los mismos recursos. Además, uno de ellos ha sido transmitido por un vehículo que se encuentra próximo, mientras que el segundo paquete ha sido transmitido por un vehículo que se encuentra a una

distancia elevada. Probablemente, solo se reciba correctamente el paquete del primer vehículo. Esta decisión se toma en base al nivel de SINR de cada paquete. Este valor se computa como el cociente entre el nivel de RSRP del paquete recibido y el nivel de RSSI de los recursos que ocupa. En el ejemplo anterior, tanto el paquete del vehículo lejano como el cercano suman, en mayor o menor medida, al valor de RSSI de los recursos ocupados. No obstante, como el primero tendrá un valor de RSRP mucho mayor, superará con más probabilidad el umbral mínimo de SINR necesario para que pueda ser recibido. La decisión no se toma en función de un umbral de SINR mínimo, sino que se emplean curvas que relacionan el SINR con la probabilidad de recepción, y que emulan el comportamiento de la capa PHY. También hay que tener en cuenta la restricción impuesta en cuanto al umbral mínimo de RSRP para que un paquete pueda ser recibido correctamente. En definitiva, el módulo de decisión se encarga de, en función del SINR y del RSRP, dictaminar si cada paquete es recibido correctamente o debe ser descartado.

Para cada una de las iteraciones, se repiten los pasos anteriores. Para el **almacenamiento de resultados**, dentro del módulo de recepción se registran todos los paquetes recibidos por los vehículos. Esto incluye tanto los recibidos correctamente como los que posteriormente serán descartados. Estos datos se guardan en un vector cuyo índice indica la distancia de cada transmisor con respecto al receptor. A su vez, en el módulo de decisión, se guarda en un vector como el anterior, el número de paquetes recibidos correctamente por los vehículos. Al terminar la ejecución, se calcula el cociente entre cada valor del primer vector con respecto a cada valor del segundo. Es decir, calculamos la tasa de paquetes recibidos correctamente en función de la distancia entre transmisor y receptor. Esto permite obtener la curva PDR (*Packet Delivery Ratio*) en función a la distancia. Este será, precisamente, el principal resultado que genera esta herramienta para analizar el correcto funcionamiento del scheduler.

4.5.1.3 Implementación de Lightweight UE

Para validar y evaluar el correcto funcionamiento general del sistema se requiere el empleo de múltiples nodos o vehículos. Esto requeriría la ejecución de múltiples OAI UEs considerando la arquitectura propuesta. Dado que los escenarios vehiculares a gran escala pueden contener fácilmente cientos de vehículos, ha sido indispensable desarrollar una herramienta adicional que hemos denominado Lightweight UE o LUE (ver Figura 37). Un LUE actúa en la emulación como un nodo OAI UE adicional puesto que implementa toda la lógica de comunicación e intercambio de mensajes con el Proxy y el scheduler 5G NR V2x (exactamente la misma implementación que en el OAI UE). De hecho, el Proxy no diferencia el intercambio de mensajes con el OAI UE y los LUE.

El LUE se ha implementado sobre un cliente Mosquitto que, mediante su hilo `listenning`, queda a la espera de recibir algún mensaje JSON del proxy. Dicha función `listenning` equivale, por tanto, a `mqt_thread` en OAI. Igual que con `mqt_thread`, cuando `listenning` detecta la recepción de un paquete, llama a `on_message` para que lo procese. El resto de la ejecución, es decir, la llamada al scheduler, la interacción con el Proxy, el rellenado de la ventana de sensado y demás, es igual que en el OAI UE.

Una de las principales ventajas de los nodos LUE es que no presentan la complejidad de los OAI UE, y son suficientes para evaluar y emular la evaluación del scheduler. La Figura 37 muestra la configuración utilizada para la evaluación y obtención de resultados a gran escala empleando un OAI UE, múltiples LUEs (el número es configurable en base a la densidad de tráfico que se desea emular) y el Proxy.

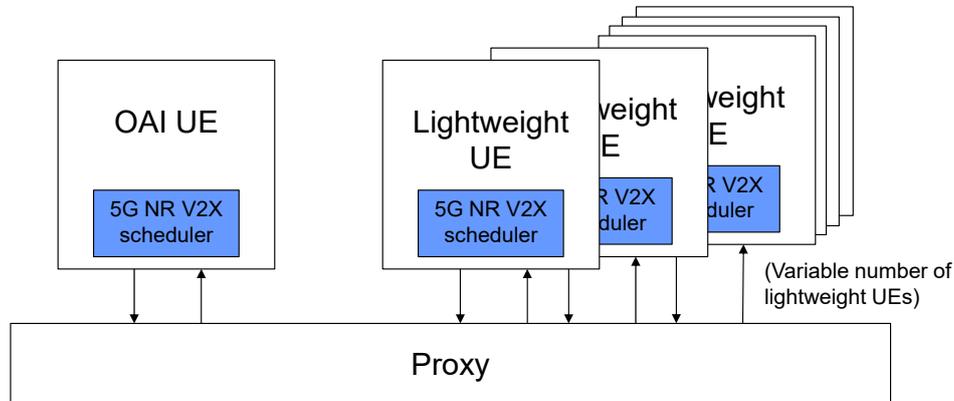


Figura 37. Emulación mediante un OAI UE y múltiple Lightweight UEs.

4.5.2 Validación

La validación del prototipo implementado se ha realizado empleando las herramientas anteriormente descritas en la Sección 4.5.1. Por un lado, se han realizado test funcionales para la validación de aspectos concretos del scheduler. Por otro, se han realizado simulaciones para analizar el comportamiento global del scheduler. Ambas validaciones se presentan a continuación.

4.5.2.1 Test funcionales

Los test funcionales realizados utilizan el generador de tráfico descrito en la Sección 4.5.1.1. Para estos tests, se ha variado tanto el nivel de carga del canal como el tamaño en subcanales de los paquetes transmitidos por OAI. Los niveles de carga (CBR) escogidos son 0.75, 0.8, 0.9 y 0.95, teniendo en cuenta que el scheduler de 5G NR V2X realiza la selección final de los recursos a utilizar de forma aleatoria entre el 20% de recursos no excluidos. En cuanto al tamaño, se configura el OAI UE para transmitir paquetes de 1 ó 2 subcanales para analizar el comportamiento del scheduler cuando el tamaño del paquete a transmitir no cabe en los huecos que pueda haber libres en la estructura de tiempo/frecuencia del canal. Para estos tests se ha considerado también que la numerología empleada en la capa PHY de 5G NR V2X se corresponde con la numerología 0.

La Tabla 12 muestra el porcentaje de veces que el scheduler ha seleccionado un recurso libre para las diferentes configuraciones de CBR y tamaños de paquetes transmitidos por el OAI UE (tamaño medido en subcanales). Esta tabla compara el porcentaje esperado teniendo en cuenta cómo se está generando el tráfico con el generador de patrones, y el porcentaje obtenido durante los tests. La tabla muestra que los resultados obtenidos son prácticamente iguales a los esperados, demostrando la validez de la implementación.

Tabla 12. Tasa de selección de recursos libres por el scheduler: esperada y obtenida

CBR	Tamaño = 1 subcanal		Tamaño = 2 subcanales	
	Esperada	Obtenida	Esperada	Obtenida
80%	98%	99.0000%	20%	20.0000%
90%	50%	48.4000%	5%	4.8333%
95%	25%	25.7961%	1.25%	1.0204%

Cuando la **carga generada por el generador de patrones es del 80%**, el 20% de los subcanales están libres. Por lo tanto, se podría esperar que el scheduler siempre pudiese escoger un recurso libre. Esto es así porque el scheduler debe escoger un recurso de forma aleatoria entre el 20% de los recursos que estén libres. Sin embargo, como se indica en los resultados mostrados en la Tabla 12, este no es exactamente el caso. Esto es así porque la ocupación se reparte de forma aleatoria a lo largo de la ventana de sensado (y por tanto también por la ventana de selección). Considerando un RRI de 100 ms, la ventana de selección tiene una longitud temporal de $T_2 - T_1$ porque empieza en T_1 y termina en T_2 , y el valor de T_2 es de 100ms. De esta forma, aunque se hayan ocupado exactamente el 80% de los recursos entre las subtramas 0 y la 100, habrá casos en los que las reservas se hayan concentrado en la ventana de selección y habrá casos en los que se hayan concentrado en los intervalos $[0, T_1]$, simplemente por la aleatoriedad de la generación. En los casos en los que se concentren las reservas en ese intervalo, la carga evaluada en la ventana de selección será menor al 80% y el scheduler será capaz de seleccionar un recurso libre siempre. Sin embargo, en los casos en los que la carga en la ventana de selección sea inferior al 80%, porque aleatoriamente se han reservado menos recursos en los intervalos de los extremos, habrá menos del 20% de recursos libres, y por tanto el scheduler tendrá una cierta probabilidad de seleccionar un recurso ocupado.

Para calcular de forma teórica el porcentaje de veces que el scheduler debería escoger un recurso ocupado, definimos N_v como el número de subcanales en la ventana de selección:

$$N_v = N_{sub} * (N_{slots} - T_1 - T_2)$$

En esta ecuación, N_{sub} es el número de subcanales en cada slot, $N_{slots}=100$ es el número de slots en cada reserva de recursos, y T_1 y T_2 son las variables que definen la ventana de selección (ver Sección 2.6). Dado un determinado CBR, sabemos que la probabilidad de que un determinado subcanal en un slot esté ocupado es igual a $p=CBR/100$. De esta forma, dado que la generación del tráfico es aleatoria e independiente, la probabilidad de que un número concreto de subcanales n esté ocupado en la ventana de selección sigue una distribución de Bernouilli y puede calcularse como:

$$P(n, N_v, p) = \text{Bernouilly}(n, N_v, p)$$

Si n es mayor al 80% de los recursos en la ventana de selección, existirá alguna posibilidad de que el scheduler seleccione un recurso ocupado. Dicha probabilidad es proporcional a $n - 0.8 \cdot N_v$. Teniendo en cuenta que el scheduler siempre escogerá aleatoriamente un recurso entre el 20% libre de la ventana de selección, la probabilidad de escoger un recurso ocupado cuando hay n ocupados es:

$$P_{ocu}(n) = \max(0, P(n, N_v, p) * (n - 0.8 * N_v) / (0.2 * N_v))$$

A partir de la ecuación anterior puede calcularse la probabilidad de escoger un recurso ocupado para un determinado CBR simplemente con el sumatorio para todos los valores posibles de n . La curva de probabilidad obtenida mediante el modelo analítico propuesto se presenta en la Figura 38 para el caso de paquetes que ocupan un único subcanal (ver Tabla 12).

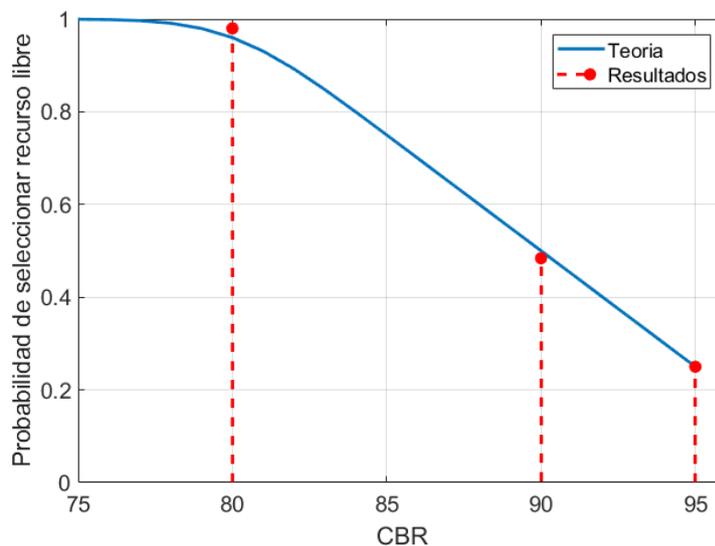


Figura 38. Validación de los resultados obtenidos frente a los teóricos.

4.5.2.2 Validación completa del scheduler 5G NR V2X

Las condiciones y parámetros de configuración con los que se ha evaluado la implementación del scheduler 5G NR V2X en la plataforma OAI se muestran en la Tabla 13. Es importante señalar que estas condiciones de evaluación se corresponden con las indicadas por el 3GPP como metodología de evaluación para simulaciones a nivel de sistema [28]. El análisis en esta sección se centra, principalmente, en la métrica PDR (*Packet Delivery Ratio*) que refleja la tasa de paquetes correctamente recibidos por los vehículos en función a la distancia entre el transmisor y el receptor. Las condiciones específicas de evaluación se indican en cada una de las siguientes subsecciones, las cuales han sido diseñadas con el objetivo de evaluar el impacto de los principales factores que pueden afectar al rendimiento de 5G NR V2X.

Tabla 13. Parámetros de evaluación utilizados en la plataforma hardware OAI

Escenario y modelo de tráfico	
Escenario	Autopista 3GPP
Densidad de vehículos [veh. /km]	60 – 120
Modelos de tráfico	Periódico y aperiódico
Configuración del resource pool	
Ancho de banda (BW)	20MHz
SCS	30kHz
RBs/BW	51 RBs
Tamaño del subcanal	12 RBs/subcanal
MAC (Resource Allocation)	
T0 (sensing Window)	1100ms
Tproc,0 (sensing Window)	1 slot (SCS 30 kHz)
T1 (select. W)	2 slots
Tproc,1 (select. Window)	5 slots (SCS 30 kHz)
T2 (selection Window)	PDB
% min. recursos	20
Umbral RSRP	-128dBm
RRI	100 ms
Probability P	0
PHY	
MCS	16QAM-r0.5
1st-stage SCI format	12 RBs and 2 symbols
2nd-stage SCI format	48 bits (Huawei, R1-2005796)
in band emissions	TS 38.101-1, section 6.4.2.3
LUTs TB	Huawei: R1-1900852 & R1-1901542
LUTs SCI (1st&2nd stage)	Ericsson: R1-1903180
Sensitivity	-89-4 dBm (30 kHz & 20 MHz)
Tx Power	23 dBm
Noise (dBm)	$-174 + 10 * \log_{10}(BW_{RX}) + noiseFigure$
Noise Figure	9 dBm
Antenna model	Omnidirectional, Gain: 0dB
Channel model	
Pathloss & shadowing models	TR 37.885
Frequency	5.9 GHz
Decorrelation distance	25 meters
Fast fading	LUTs

4.5.2.2.1 Impacto de la densidad de vehículos

Esta primera sección se centra en analizar el impacto en la PDR de 5G NR V2X del incremento de la densidad de vehículos. Para ello, tomando como referencia las condiciones de evaluación mostradas en la Tabla 13, la Figura 39 compara la PDR cuando en el escenario hay una densidad de 60 veh./km y 120 veh./km. Los resultados obtenidos muestran como la PDR se ve afectada por la mayor densidad de vehículos en el escenario. Por ejemplo, los resultados muestran que con una densidad de vehículos de 60 veh./km, la PDR que experimentan dos vehículos separados 300m es de 94%, ésta se reduce al 88% para la misma distancia de separación cuando la densidad de vehículos es de 120 veh./km. Esta reducción en la PDR a medida que se incrementa la densidad de vehículos es un resultado esperable por varias razones. La primera de ellas es por la

mayor carga del canal, como se ha analizado en los tests funcionales de la Sección 4.5.2.1 utilizando las herramientas de generación de tráfico artificial mostradas en la Sección 4.5.1.1. En estos test funcionales solo se analizaba el rendimiento del scheduler 5G NR V2X cuando un vehículo seleccionaba recursos. En este caso, diferentes vehículos pueden estar seleccionando recursos de manera simultánea. De hecho, a mayor densidad de vehículos es más probable que varios de vehículos estén realizando simultáneamente el proceso de selección de recursos. Esto resulta en que las ventanas de selección de estos vehículos solapen y que por lo tanto elijan el mismo recurso para realizar sus transmisiones. Estas transmisiones colisionarán y no serán recibidas correctamente por los vehículos de su entorno.

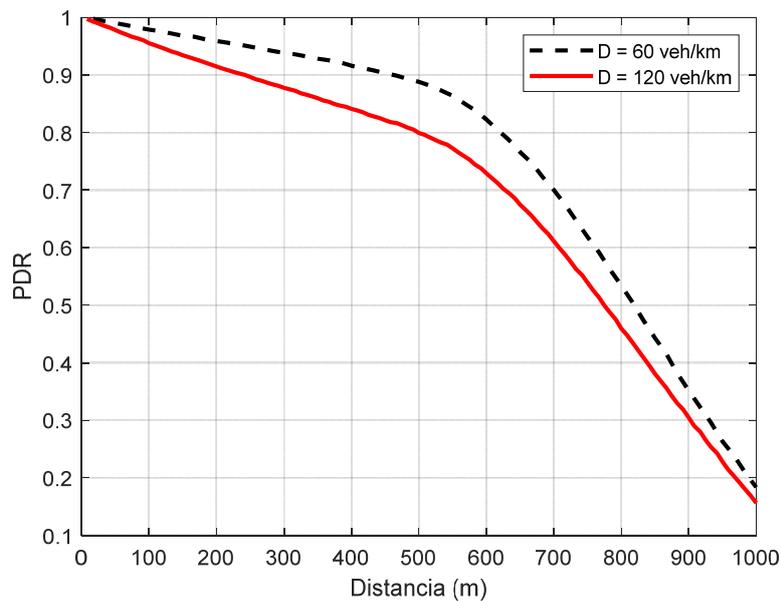


Figura 39. PDR en función a la distancia para densidades de vehículos de 60 veh/km y 120 veh/km.

4.5.2.2.2 Impacto de la tasa de generación de tráfico

Efectos similares a los señalados en la sección anterior al incrementar la densidad de vehículos se dan cuando los vehículos generan tráfico a una tasa más elevada. En este caso, la Figura 40 compara las PDR medidas en escenarios en los que los vehículos generan paquetes a tasas de 10 paquetes/segundo y 50 paquetes por segundo. Los resultados de la Figura 40 se corresponden con una densidad de vehículos de 60 veh./km en ambos casos. En este caso, el mayor incremento en la carga del canal con respecto al análisis realizado en la sección anterior resulta en que la PDR medida a una distancia de 300m se reduce al 83%. Nótese que, en la sección anterior, al doblar la densidad de vehículos, y manteniendo la misma tasa de generación de tráfico de 10 paquetes/segundo, la PDR medida a 300 metros era del 88%. Los resultados mostrados en la Figura 40 muestran que, al quintuplicar la tasa de generación de paquetes, la PDR a 300 metros se reduce del 94% al 83%.

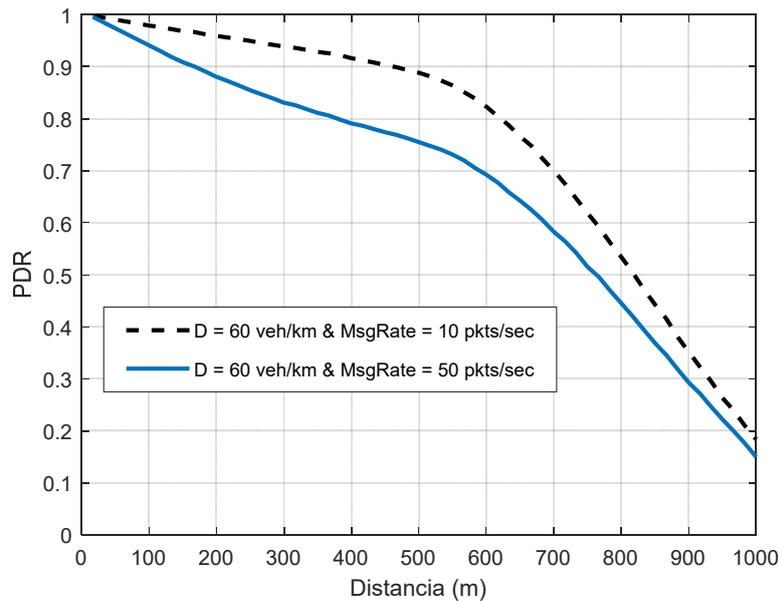


Figura 40. PDR en función a la distancia para densidades de vehículos de 60 veh/km y tasa de generación de tráfico de 10 pkts/s y 50 pkts/s.

4.5.2.2.3 Impacto del tipo de tráfico

Otro aspecto clave para el rendimiento de 5G NR V2X es, además de la carga de tráfico, es el tipo de tráfico que generan los vehículos. Nótese que los esquemas de gestión de recursos utilizados en 5G NR V2X seleccionan recursos de manera periódica (separando los diferentes recursos seleccionados por RRI). Esta gestión y selección de recursos radio se ajusta obviamente mejor a un patrón de tráfico generado por las aplicaciones V2X que sea periódico. Sin embargo, los servicios V2X avanzados a los que 5G NR V2X ha sido diseñado para dar servicio no generan un tráfico periódico. Por eso, el 3GPP también recomienda evaluar el rendimiento de 5G NR V2X asumiendo que la fuente de tráfico puede ser aperiódica. El modelo concreto ha sido descrito en la Sección 4.3. Como ya ha sido demostrado en trabajos anteriores realizados por el grupo de investigación sobre el comportamiento de LTE V2X [33], la selección de recursos radio de forma semipersistente y periódica (como es el caso del modo 2 de 5G NR V2X) no soporta de forma eficiente la generación de tráfico aperiódico. Los resultados obtenidos con la implementación realizada sobre la plataforma OAI confirma este comportamiento. Como se puede ver en la Figura 41, la PDR obtenida es inferior cuando el tráfico generado en el escenario de evaluación es aperiódico. En este caso la PDR medida a 300 metros se reduce al 89%. Este peor comportamiento está asociado con la baja eficiencia en la utilización de los recursos reservados utilizando el mecanismo SPS de modo 2 de 5G NR V2X cuando el tráfico es aperiódico. Los constantes cambios de tamaño de los paquetes generados, al igual que la aperiodicidad de la generación de los mismos, resulta en que un gran número de reservas realizadas no pueden ser utilizadas. Por lo tanto, los vehículos se ven en la necesidad de realizar nuevas selecciones de recursos, en cuyo proceso es posible seleccionar el mismo recurso que otro vehículo que esté realizando el mismo proceso, y que por lo tanto sus transmisiones colisionen.

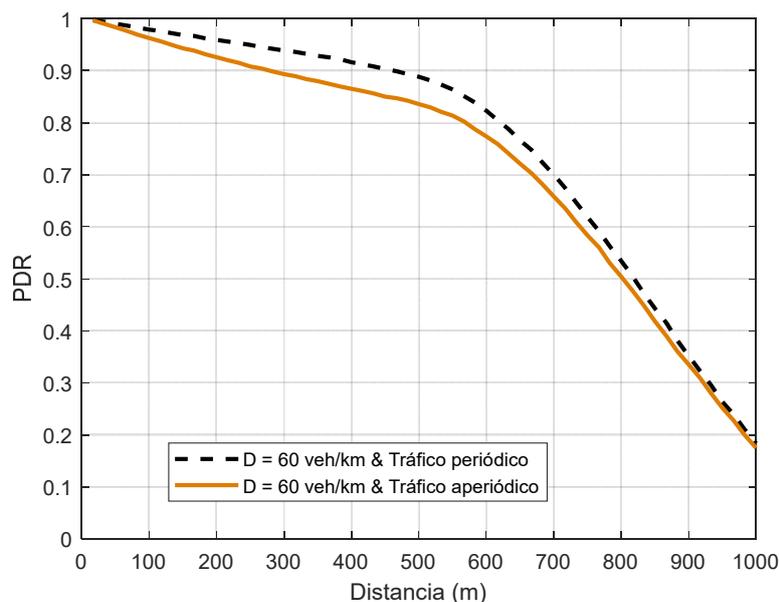


Figura 41. PDR en función a la distancia para densidades de vehículos de 60 veh/km y tráfico periódico y aperiódico (tasa de generación de tráfico de 10 pkts/s).

4.5.2.2.4 Impacto del mecanismo de reevaluación

El comportamiento del mecanismo de reevaluación de 5G NR V2X ha sido analizado con mucha profundidad en la Sección 3.2 utilizando la herramienta de simulación software desarrollada en ns3. Esta sección por lo tanto pretende ofrecer un análisis complementario mediante el análisis del rendimiento del mecanismo de reevaluación utilizando la implementación realizada sobre la plataforma OAI. Para ello se ha escogido un escenario con una densidad de vehículos de 60 veh./km y se ha analizado el rendimiento de 5G NR V2X cuando el mecanismo de retransmisión está activado y cuando está desactivado. La Figura 42 muestra los resultados obtenidos, los cuales están en línea y confirman las tendencias de los resultados obtenidos en la Sección 3.2. Como se puede ver en la figura, la activación del mecanismo de reevaluación ayuda a detectar que determinados recursos seleccionados por los vehículos están en conflicto con otras reservas de otros vehículos. El cambio en la selección de estos recursos favorece en la correcta recepción de los mismos, y por tanto en el incremento de la PDR. De hecho, los resultados mostrados en la Figura 42 muestran que para una distancia de separación de 300m entre el transmisor y el receptor, la PDR se incrementa desde un 94% a un 97% cuando el mecanismo de reevaluación pasa de no estar activado a estarlo, respectivamente.

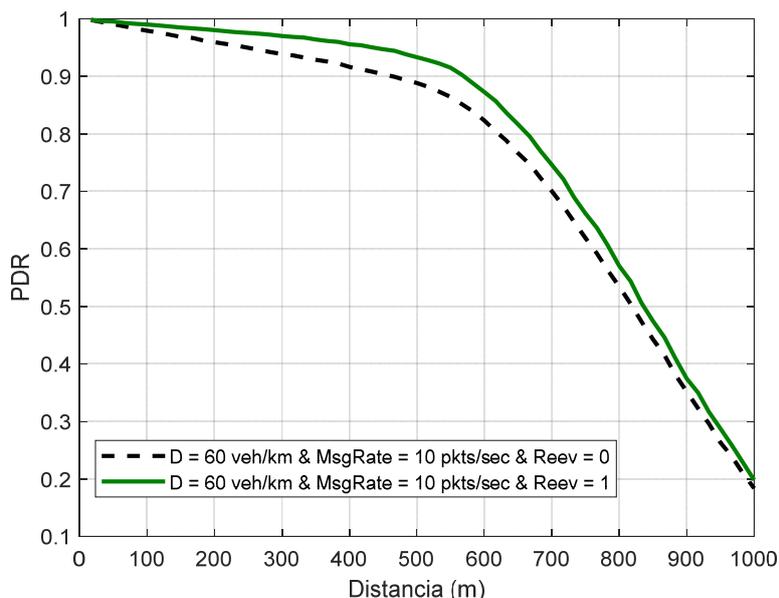


Figura 42. PDR en función a la distancia para densidades de vehículos de 60 veh/km cuando el mecanismo de reevaluación está activado y desactivado (tasa de generación de tráfico de 10 pkts/s y tráfico periódico).

4.5.2.2.5 Impacto del número de retransmisiones

Finalmente, en esta sección se analiza el impacto de las retransmisiones en el rendimiento de 5G NR V2X. Como se indicó en la Sección 4.2.2, la implementación del mecanismo de scheduler modo 2 de 5G NR V2X permite la realización de hasta un total de 32 retransmisiones. Esto implica que, ante la generación de un nuevo paquete para ser transmitido, el scheduler de 5G NR V2X reserva hasta 32 recursos en los que se transmite, tanto el nuevo paquete generado, como las réplicas del mismo. Todas estas transmisiones se realizan en un intervalo inferior a RRI que es el periodo en el que se repiten las reservas realizadas. El mecanismo de retransmisión persigue por lo tanto maximizar la posibilidad de que los paquetes generados (al menos 1 de las 32 transmisiones) sean recibidos correctamente. En la evaluación que se realiza en esta sección se compara el rendimiento del mecanismo de gestión de recursos de 5G NR V2X cuando se llevan a cabo $NTx = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9\}$ transmisiones por cada paquete nuevo generado. La Figura 43 muestra la PDR que se mide en cada uno de estos escenarios. Es importante señalar que la PDR que se muestra en la Figura 43 se denomina PDR a nivel MAC. La PDR a nivel MAC mide la ratio de paquetes correctamente recibidos independientemente de que varias transmisiones pertenezcan al mismo paquete. Por lo tanto, el efecto a nivel MAC de realizar varias transmisiones por cada paquete generado es similar a los analizados en las Secciones 4.5.2.2.1 y 4.5.2.2.2. Es decir, las retransmisiones de los paquetes generados resultan en un incremento de la carga del canal que deteriora el rendimiento de 5G NR V2X. Esto puede apreciarse en la Figura 43 en la que se muestra como a medida que se incrementa el número de retransmisiones, la PDR medida es inferior. Por ejemplo, para una distancia de separación entre el transmisor y receptor de 300m, la PDR medida cuando el número de

transmisiones es $NTx = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9\}$ es $\{95.5, 92.1, 89.0, 85.5, 82.3, 78.6, 75.3, 72.2, 69\}\%$, respectivamente.

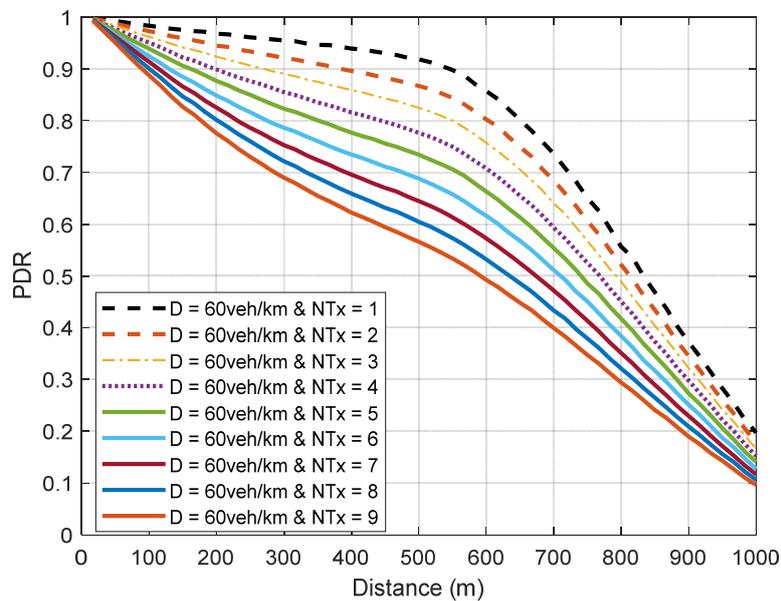


Figura 43. PDR en función a la distancia para densidades de vehículos de 60 veh/km cuando se realizan $NTx = \{1:9\}$ transmisiones del mismo paquete (tasa de generación de tráfico de 10 pkts/s).

Sin embargo, como cada una de las NTx transmisiones se corresponde con una réplica del paquete generado, a nivel de aplicación es suficiente con que se reciba correctamente solo 1 de las NTx transmisiones para determinar que el paquete se ha recibido correctamente. Esta medida se realiza con la PDR a nivel de aplicación que se muestra en la Figura 44. En este caso, los resultados obtenidos muestran como al incrementar NTx es más probable que la transmisión se reciba correctamente. De hecho, todas las curvas obtenidas para $NTx > 1$ incrementan el valor de PDR medido a medida que se incrementa NTx . Los resultados de la Figura 44 se corresponden con un escenario en el que hay una densidad de vehículos de 60 veh./km. La Figura 45 muestra también la PDR a nivel de aplicación, pero en este caso cuando la densidad de vehículos en el escenario es de 120 veh./km. Como se puede ver en la figura, en este caso la PDR medida cuando $NTx > 1$ es también superior al caso en el que no se realizan retransmisiones (i.e. $NTx = 1$). Sin embargo, se alcanza un punto óptimo en el número de retransmisiones a realizar. Para las condiciones de la Figura 45 el número de transmisiones óptimo por cada paquete generado es de 4. Este es el caso porque al incrementar la densidad de vehículos, el canal está más sobrecargado cuando cada uno de los vehículos realiza un número elevado de retransmisiones.

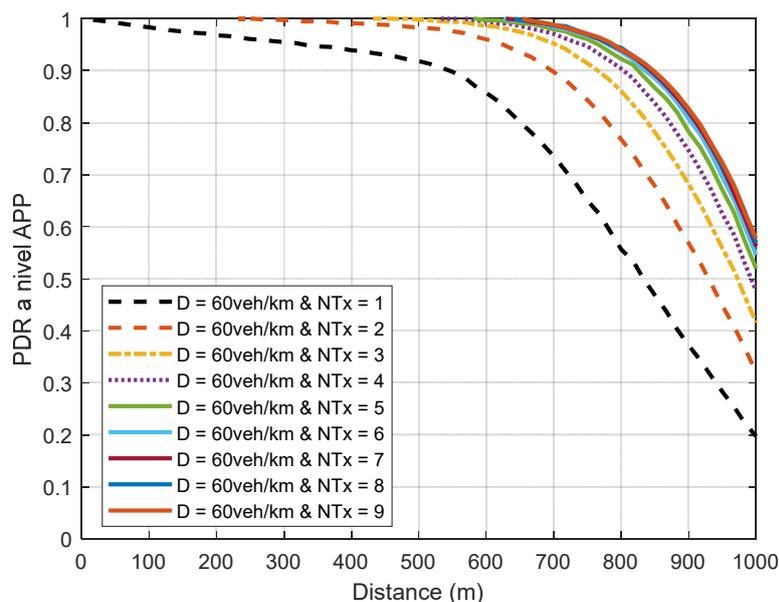


Figura 44. PDR a nivel de APP en función a la distancia para densidades de vehículos de 60 veh/km cuando se realizan NTx = {1:9} transmisiones del mismo paquete (tasa de generación de tráfico de 10 pkts/s).

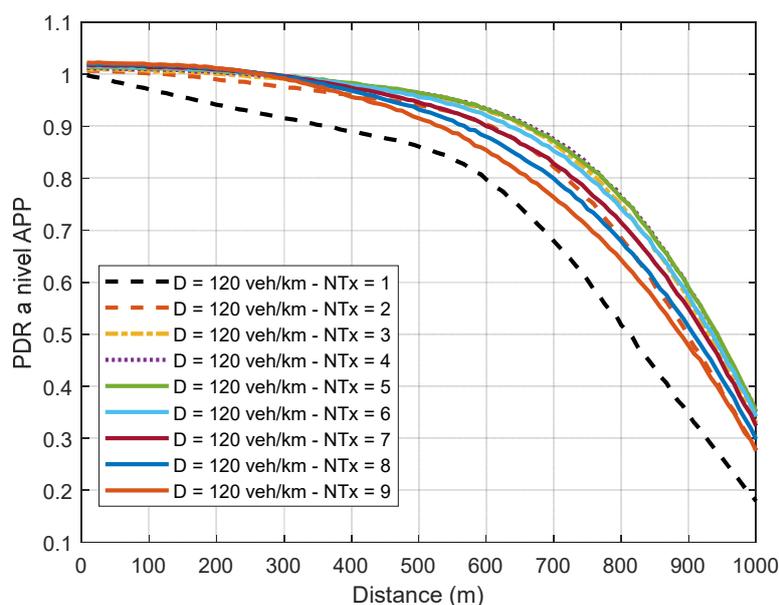


Figura 45. PDR a nivel de APP en función a la distancia para densidades de vehículos de 120 veh/km cuando se realizan NTx = {1:9} transmisiones del mismo paquete (tasa de generación de tráfico de 10 pkts/s).

4.5.3 Evaluación de 5G NR V2X en OAI utilizando Lightweight UE

4.5.3.1 Rendimiento computacional

La plataforma 5G NR V2X desarrollada permite diferentes tipos de despliegues. En este sentido, el Proxy y el agente OAI pueden ejecutarse en la misma máquina o en máquinas separadas conectadas a través de una red Ethernet.

Además, y si es necesario, el Proxy puede ejecutarse únicamente en una máquina de alto rendimiento para escenarios complejos con un número muy elevado de UEs. En esta sección se analiza el rendimiento computacional para diferentes tipos de despliegues. Para llevar a cabo la evaluación se han empleado dos PC. Cada uno de ellos tiene un procesador Intel Core i7-10710U NUC con 32GB de RAM, 6 Cores y 12 Threads, proporcionando entonces 12 CPUs lógicas.

En el primer test de rendimiento realizado se ha medido el tiempo que el Proxy tarda en ejecutar todos los procesos dentro de un ciclo de una subtrama. En este test se ha supuesto que la configuración de 5G NR V2X utiliza la numerología 0, es decir, cada subtrama corresponde con una ranura temporal o slot. Para un despliegue de dos agentes OAI que se ejecutan en diferentes máquinas y el Proxy en una de ellas, se han obtenido valores de latencia de 33.67 ms. Esta latencia incluye el tiempo necesario en transmitir los paquetes a los equipos de usuario. Este tiempo de transmisión se ha estimado que es de 30ms. Por lo tanto, el tiempo de ejecución sería de 3.67ms. Esto indica que el Proxy no puede trabajar en tiempo real ya que su procesamiento es superior a 1 ms que es el tiempo de subtrama (para numerología 0). El equipo investigador está trabajando en reducir este tiempo de ejecución del Proxy. Una de las líneas de investigación abiertas incluye la optimización del protocolo MQTT que tiene diferentes niveles de servicio y en los que se puede sacrificar fiabilidad por latencia.

En la Tabla 14 se muestra el uso de la CPU para cada componente del despliegue considerado. Como se muestra en la Tabla 14, se ha observado que el Proxy representa el 8,4 % del total de CPUs. Teniendo en cuenta que hay 12 CPUs lógicas en el despliegue, ese porcentaje de utilización representa una CPU completa. Por otro lado, los agentes OAI son más eficientes y solo utilizan el 0.08 de la CPU. En cuanto al uso de memoria (MEM), el consumo en el Proxy es insignificante, y los agente OAI consume un 4,4%.

Tabla 14. Tasa de selección de recursos libres por el scheduler: esperada y obtenida

Configuración	Componente	Uso de CPU (%)	MEM (%)
Proxy + 2 UEs	Proxy	8.42	0
	Agente OAI	0.08	4.4

También se ha examinado el uso de la CPU cuando se emula un gran número de usuarios utilizando clientes externos. La Figura 46 muestra como el uso de la CPU del Proxy aumenta ligeramente con el incremento de LUEs. Los resultados obtenidos también muestran como el sistema de mensajería propuesto (bróker) es capaz de soportar un número muy grande de agentes, y su uso de CPU se mantiene por debajo de el del Proxy. El equipo de investigación está trabajando en optimizar el rendimiento del Proxy.

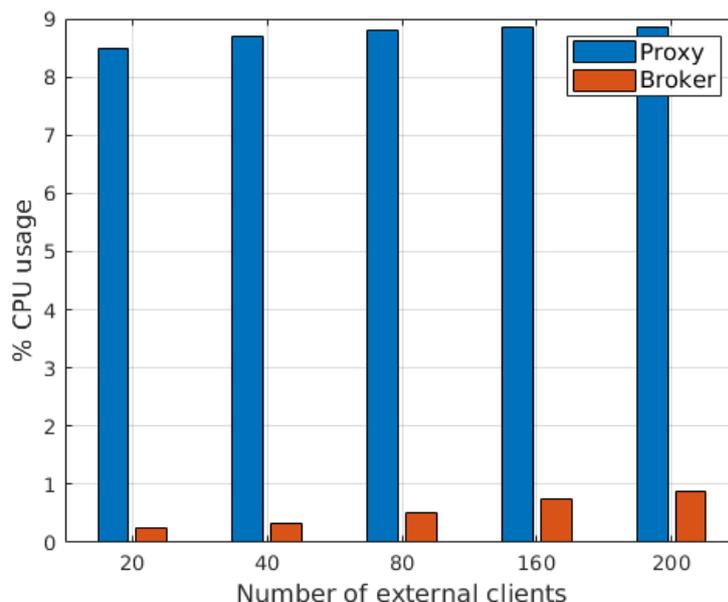


Figura 46. Porcentaje de CPU empleada frente al número de LUEs.

Por último, se ha evaluado el tiempo de procesamiento de las principales tareas realizadas por el Proxy. En la Figura 47 se representa el tiempo de procesamiento de todos los paquetes recibidos en una subtrama determinada, es decir, el tiempo de resolución de las transmisiones de paquetes en función del canal de propagación, la movilidad, la topología y el módulo decisor. Este tiempo se expresa en microsegundos y aumenta a medida que se introducen más clientes externos. De forma similar, en la Figura 48 y en la Figura 49 se aprecia como el tiempo necesario para transmitir las peticiones de paquetes y las respuestas de paquetes. Es importante señalar que el eje de tiempos en estas dos figuras se muestra en milisegundos. Los resultados obtenidos muestran que estos tiempos son mayores en comparación con el tiempo de procesamiento, debido a la transmisión secuencial de paquetes. Hay que tener en cuenta que, cada vez que se necesita llegar a más clientes externos, el Proxy envía más paquetes de forma secuencial, y de ahí los mayores tiempos para transmitir las peticiones de paquetes y las respuestas de paquetes.

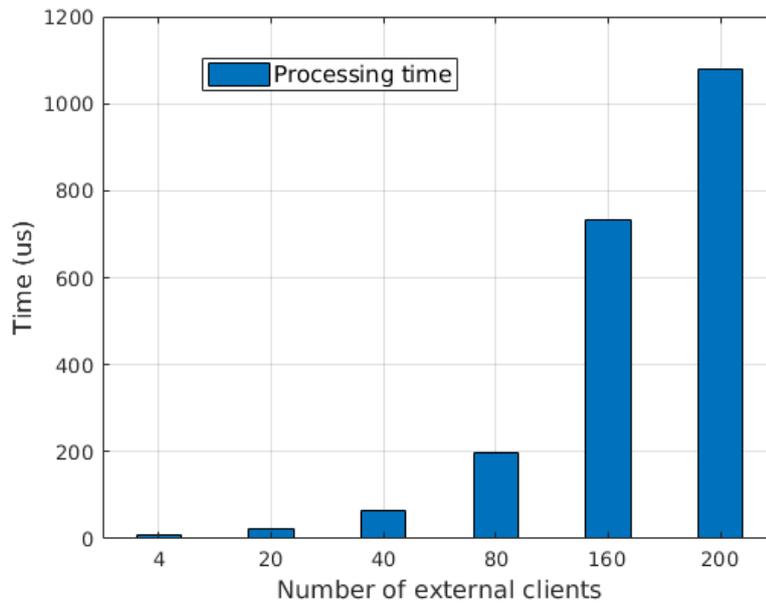


Figura 47. Tiempo de procesamiento frente al número de clientes externos o LUEs.

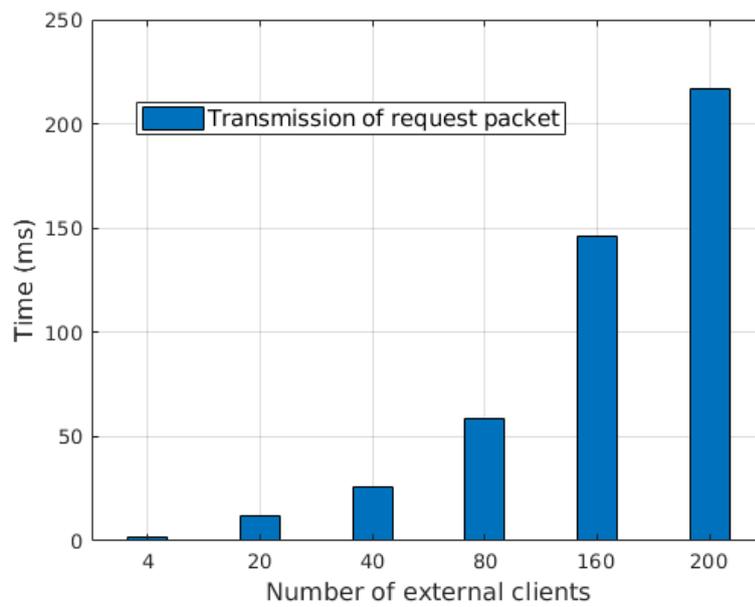


Figura 48. Tiempo de transmisión de paquetes de solicitud frente al número de clientes externos o LUEs.

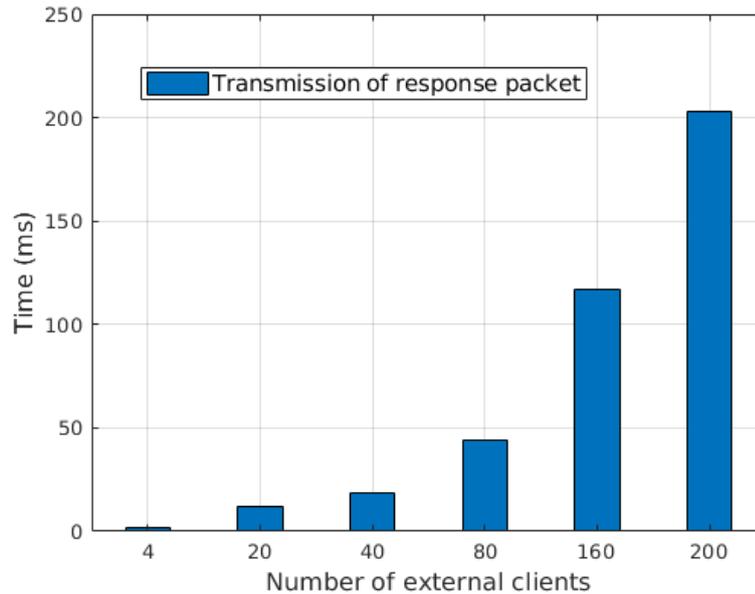


Figura 49. Tiempo de transmisión de paquetes de respuesta en función del número de clientes externos o LUEs.

4.5.3.2 Rendimiento de comunicaciones 5G NR V2X

El objetivo de esta sección es mostrar el rendimiento de las comunicaciones 5G NR V2X cuando el código implementado para el scheduler es integrado en la plataforma OAI. Es importante señalar que la modularidad de la implementación desarrollada facilita dicha integración. Además, el proceso de validación de la implementación utilizando la herramienta de validación completa (Sección 4.5.1.2) se ha diseñado para que los resultados obtenidos sean los esperables cuando se integra el código en OAI. De hecho, este ha sido el resultado, lo que ha permitido validar que el proceso de integración en OAI se ha realizado con éxito. Estas pruebas de testeo han servido por lo tanto para verificar la correcta implementación del scheduler de 5G NR V2X en la plataforma OAI. Es importante señalar que el equipo de investigación tiene previsto realizar pruebas adicionales una vez haya sido desarrollada la capa PHY de 5G NR V2X en OAI. Estas pruebas permitirán validar la implementación realizando transmisiones radio por el aire, en lugar de utilizar el módulo Proxy implementado.

5 Conclusiones

La tecnología 5G ofrece capacidades de conectividad, fiabilidad y adaptabilidad necesarias para actuar como catalizador de la transformación digital de la industria. Estas capacidades son claves para dar soporte a servicios industriales críticos, como es el de la movilidad conectada y autónoma. La movilidad autónoma se está viendo favorecida por los continuos avances en los sistemas de percepción y control que se basan en la utilización de los datos que proporcionan los sensores de a bordo. Sin embargo, los crecientes niveles de automatización requeridos en los procesos de conducción autónoma, al igual que las elevadas garantías de robustez y fiabilidad ante cualquier situación de conducción, precisan de capacidades que van más allá de las que pueden ofrecer dichos sensores. En este contexto, 5G se ha manifestado como una tecnología habilitadora para complementar e incrementar las capacidades de los vehículos autónomos. La conectividad 5G permitirá dar soporte a servicios avanzados de vehículo autónomo conectado que están orientados a mejorar las capacidades de sensado y de control que los vehículos pueden obtener con sus sensores de abordó. Para permitir esta conectividad en los escenarios vehiculares, ha surgido una adaptación de la tecnología 5G que es conocida como 5G NR V2X. Esta tecnología introduce importantes novedades, entre las que se encuentra un modo para comunicar de forma directa a los vehículos sin pasar por la red celular; incluso puede operar en espacios sin cobertura de red 5G.

En este contexto, el presente proyecto de investigación ha realizado un detallado estudio del estado actual de la tecnología 5G NR V2X. El estudio llevado a cabo se ha centrado en el análisis de los documentos técnicos de la Release 16 del 3GPP de 5G NR V2X. Además, se ha realizado un análisis comparativo con las características y funcionalidades añadidas en 5G NR V2X en comparación con la anterior tecnología celular para dar soporte a comunicaciones V2X (LTE V2X). El análisis llevado a cabo se ha centrado en las características y requisitos de los servicios avanzados a los que 5G NR V2X debe dar servicio, la arquitectura de la red 5G para permitir el establecimiento de conexiones con la red y entre los vehículos, y finalmente en las novedades tecnológicas introducidas a nivel de capas PHY y MAC. En este sentido se ha destacado la elevada flexibilidad que introduce 5G NR V2X en comparación con LTE V2X por la definición de numerologías variables que dan lugar a una utilización y gestión de los recursos radio más dinámica y flexible. Otro de los puntos fundamentales en los que se ha centrado la comparativa entre las dos tecnologías ha sido de hecho en el análisis de los mecanismos de gestión de recursos radio que utilizan 5G NR V2X y LTE V2X. Este análisis ha puesto especial atención a lo que se conoce como Modo 2 de 5G NR V2X que permite la comunicación directa entre los vehículos.

El conocimiento adquirido en el estudio del estado de la tecnología 5G NR V2X ha sido fundamental para el desarrollo de las siguientes actividades del proyecto que se han centrado en evaluar el rendimiento de la tecnología 5G NR V2X. Para llevar a cabo dicha evaluación, el proyecto ha implementado la tecnología 5G NR V2X en dos plataformas diferentes. Por un lado, se ha desarrollado un simulador de comunicaciones 5G NR V2X en la plataforma de simulación ns3. El simulador ha sido utilizado para testear el rendimiento de 5G NR V2X Modo 2 siguiendo las metodologías de evaluación recomendadas por el 3GPP. La evaluación se ha llevado a cabo para diferentes fuentes de tráfico que pueden generar los vehículos, incluyendo tráfico aperiódico que se ajusta mejor al tráfico real que generarán los vehículos conectados. Los resultados obtenidos han mostrado que la asignación de recursos semipersistente utilizada en el Modo 2 de 5G NR V2X presenta más dificultades para dar soporte al tráfico aperiódico, resultando en una degradación del servicio que 5G NR V2X puede ofrecer. Esta degradación de servicio de 5G NR V2X con tráfico aperiódico se produce por un incremento de las colisiones de las transmisiones de los diferentes vehículos. 5G NR V2X Modo 2 ha introducido un mecanismo (re-evaluation) que persigue reducir las colisiones de los paquetes. Utilizando la plataforma de simulación desarrollada en este proyecto, también se ha analizado el funcionamiento del mecanismo de re-evaluation introducido en 5G NR V2X Modo 2. Los resultados obtenidos han mostrado que dicho mecanismo puede tener un impacto positivo en el rendimiento de 5G NR V2X. Sin embargo, su utilización debe limitarse a evitar colisiones de paquetes causadas por reservas de recursos que vayan a tener asociadas una transmisión de un paquete. En caso contrario, el uso del mecanismo de re-evaluation podría ser contraproducente para 5G NR V2X.

Con el objetivo de complementar el estudio y análisis llevado a cabo con la plataforma software de simulación, en el marco del presente proyecto también se ha desarrollado un prototipo experimental de comunicaciones 5G NR V2X basado en la plataforma radio definida por software OAI. El prototipo en su estado actual implementa el mecanismo de gestión de recursos radio de 5G NR V2X Modo2. La comunidad OAI está trabajando en el desarrollo de la capa PHY de esta tecnología. Esta contribución por lo tanto permitirá testear y evaluar experimentalmente las capacidades de 5G NR V2X en pruebas de campo reales. Para validar la implementación realizada en la plataforma OAI, este proyecto ha emulado el comportamiento de la capa PHY de 5G NR V2X mediante el uso de un Proxy. Diferentes test funcionales y pruebas de validación se han desarrollado para verificar y evaluar el rendimiento computacional del prototipo, al igual la implementación de las funcionalidades de 5G NR V2X.

Las investigaciones y desarrollos llevados a cabo en el marco del presente proyecto han puesto de manifiesto las capacidades de la tecnología 5G NR V2X para dar soporte a los servicios de vehículo conectado y autónomo. Sin embargo, también han desvelado la necesidad de explorar soluciones de comunicación inteligentes y optimizadas que garanticen que la tecnología 5G NR V2X puede ofrecer altos niveles de calidad de servicio en entornos altamente complejos y cambiantes. El potencial de la Inteligencia Artificial podría ser explorado para diseñar soluciones de comunicación 5G NR V2X capaces

de anticipar las necesidades de comunicación y adaptar/optimizar su funcionamiento a dichas necesidades.

Referencias

- [1] LG Electronics, Huawei, "RP-190766. New WID on 5G V2X with NR sidelink," 3GPP TSG RAN Meeting #83, Shenzhen, China, March 2019.
- [2] Lin, Xingqin, J. G. Andrews, A. Ghosh and R. Ratasuk, "An overview of 3GPP device-to-device proximity services," *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 4, pp. 40-48, Abril 2014.
- [3] Chen et al., "Vehicle-to-Everything (v2x) Services Supported by LTE-Based Systems and 5G," *IEEE Communications Standards Magazine*, vol. 1, no. 2, pp. 70-76, Julio 2017.
- [4] 3GPP, "TR 22.886: Study on enhancement of 3GPP Support for 5G V2X Services (v16.2.0, Release 16)," 3GPP, Tech. Rep., Diciembre 2018.
- [5] 5GAA, "White Paper C-V2X Use Cases: Methodology, Examples and Service Level Requirements," Junio 2019. [Online]. Disponible en: https://5gaa.org/wp-content/uploads/2019/07/5GAA_191906_WP_CV2X_UCs_v1.pdf
- [6] SAE International, Standard J3016: "Taxonomy and Definitions for Terms Related to On-Road Motor Vehicle Automated Driving Systems", Septiembre 2016.
- [7] 3GPP, "TS 22.186 Service requirements for enhanced V2X scenarios (v16.2.0, Release 16)," 3GPP, Tech. Spec., Junio. 2019.
- [8] 3GPP, "TS 23.285 Architecture enhancements for V2X services (v16.2.0, Release 16)," 3GPP, Tech. Spec., Diciembre 2019.
- [9] 3GPP, "TS 23.501 System architecture for the 5G System (5GS); Stage 2 (v16.4.0, Release 16)," 3GPP, Tech. Spec., Marzo 2020.
- [10] SA WG2, "SP-190625. Study on Architectural enhancements for 5G multicast-broadcast services," 3GPP TSG SA Meeting #85, Newport Beach, USA, Septiembre 2019.
- [11] 3GPP, "TS 38.214 NR; Physical layer procedure for data (v16.3.0, Release 16)," 3GPP, Tech. Spec., Septiembre 2020.
- [12] 3GPP, "TR 37.985 Overall description of Radio Access Network (RAN) aspects for Vehicle-to-everything (V2X) based on LTE and NR (v16.0.0, Release 16)," 3GPP, Tech. Rep., Septiembre. 2020.
- [13] R. Molina-Masegosa, J. Gozalvez, "System Level Evaluation of LTE-V2V Mode 4 Communications and its Distributed Scheduling", *Proceedings of the IEEE 85th*

Vehicular Technology Conference (VTC2017-Spring), 4-7 Junio 2017, Sydney (Australia).

- [14] R. Molina-Masegosa, J. Gozalvez, "LTE-V for Sidelink 5G V2X Vehicular Communications: A New 5G Technology for Short-Range Vehicle-to-Everything Communications", *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 12, no. 4, pp. 30-39, Diciembre 2017.
- [15] 3GPP, "TS 38.321 NR; Medium Access Control (MAC) protocol specification (v16.2.1, Release 16)," 3GPP, Tech. Spec., Septiembre 2020.
- [16] "GNU General Public License", disponible en: <http://www.gnu.org/>. Último acceso en Noviembre de 2021.
- [17] Página web oficial del proyecto Wireshark: <https://www.wireshark.org/>. Último acceso en Noviembre de 2021.
- [18] Página web oficial del simulador ns-3: <https://www.nsnam.org/>. Último acceso en Noviembre de 2021.
- [19] "Wi-Fi Module", disponible en: <https://www.nsnam.org/>. Último acceso en Noviembre de 2021.
- [20] "Lte Module", disponible en: <https://www.nsnam.org/>. Último acceso en Noviembre de 2021.
- [21] "Wave Module", disponible en: <https://www.nsnam.org/>. Último acceso en Noviembre de 2021.
- [22] 3GPP, "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures (v14.3.0, Release 14)", 3GPP, Tech. Rep. 36.213, Junio 2017.
- [23] Huawei, HiSilicon, "R1-1901542. Link level evaluations on sidelink for NR V2X," 3GPP TSG RAN WG1 Meeting #96, Athens, Greece, Febrero 2019.
- [24] Huawei, HiSilicon, "R1-1900852. Link level evaluations on sidelink for NR V2X," 3GPP TSG RAN WG1 Ad-Hoc Meeting 1901, Taipei, Enero 2019.
- [25] Ericsson, "R1-1903180. Link level evaluations of NR PSCCH," 3GPP TSG RAN WG1 Meeting #96, Athens, Greece, Febrero 2019.
- [26] 3GPP, "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio transmission and reception (v14.4.0, Release 14)", 3GPP, Tech. Rep. 36.101, Julio 2017.
- [27] 3GPP, "TR 37.885 "Study on evaluation methodology of new Vehicle-to-Everything (V2X) use cases for LTE and NR (v15.3.0, Release 15)," 3GPP, Tech. Rep., Junio 2019.
- [28] M.H. Castañeda Garcia, A. Molina-Galan, M. Boban, J. Gozalvez, B. Coll-Perales, T. Şahin and A. Kousaridas, "A Tutorial on 5G NR V2X Communications", *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 23, no.3, pp.1972-2026, thirdquarter 2021. DOI: 10.1109/COMST.2021.3057017.

- [29] "OAI opensource: " <http://www.openairinterface.org/>. Accessed: 2020-09-01.
- [30] "Universal Software Radio Peripheral (USRP)." <https://www.ettus.com/>. Último acceso en Noviembre de 2021.
- [31] K. S. Gill, K. N. Heath, S. Chuke, A. Haider, R. J. Gegear, E. F. Ryder, and A. M. Wyglinski, "Bumblebee-Inspired C-V2X Dynamic Spectrum Access Testbed Using OpenAirInterface," in *2020 IEEE 91st Vehicular Technology Conference (VTC2020-Spring)*, pp. 1–5, 2020.
- [32] J. Manco, G. G. Baños, J. Härri, and M. Sepulcre, "Prototyping V2X applications in large-scale scenarios using openairinterface," in *2020 IEEE Vehicular Networking Conference (VNC)*, pp. 1–4, 2020.
- [33] R. Molina-Masegosa, J. Gozalvez and M. Sepulcre, "Comparison of IEEE 802.11p and LTE-V2X: An Evaluation with Periodic and Aperiodic Messages of Constant and Variable Size", *IEEE Access*, vol. 8, pp. 121526-121548, Julio 2020.