

## **Evaluación del rendimiento de estándares 3GPP para comunicaciones C-V2X**

Las redes móviles de quinta generación (5G) destacan por su robustez, superando las prestaciones ofrecidas por sus predecesoras. Estas redes, comúnmente denominadas 5G, posibilitan mejoras significativas en los indicadores clave de rendimiento (KPIs en inglés) con el propósito de respaldar casos de uso y servicios avanzados. Los KPIs se clasifican en tres escenarios fundamentales: Banda Ancha Móvil Mejorada (eMBB en el estándar), Comunicaciones Ultra Fiables y de Baja Latencia (uRLLC) y Comunicaciones Masivas entre Máquinas (mMTC). El escenario eMBB se orienta primordialmente hacia servicios que demandan elevadas tasas de transmisión y recepción para garantizar una experiencia de usuario mejorada. En contraste, uRLLC aborda situaciones que requieren estrictos estándares de baja latencia y alta confiabilidad en la red. Esta necesidad se manifiesta, por ejemplo, en aplicaciones en tiempo real donde la pronta respuesta de la red constituye un factor indispensable. En cuanto al escenario mMTC, se refiere a aplicaciones y servicios que solicitan el respaldo de la red para la conectividad masiva de dispositivos por kilómetro cuadrado, además de una eficiencia energética mejorada.

Entre los servicios y aplicaciones mencionados, destacan aquellos basados en comunicaciones vehiculares mediante la red celular, conocidos según el estándar como comunicaciones V2X. Estos servicios están diseñados con el objetivo de mejorar la seguridad vial en las carreteras, optimizar los tiempos de viaje y reducir la contaminación ambiental originada por el consumo de combustibles fósiles.

En términos generales, la comunicación V2X engloba el intercambio de paquetes entre vehículos y diversos elementos de la red. Cuando estas comunicaciones se efectúan mediante estándares basados en redes móviles, ya sea en LTE o NR, la interfaz radio de 5G se denomina C-V2X. En este contexto, las comunicaciones Vehículo a Vehículo (V2V) posibilitan el intercambio de paquetes entre vehículos, mientras que las comunicaciones de Vehículos con Infraestructuras (V2I) facilitan el intercambio entre vehículos e infraestructuras de red. Por su parte, las comunicaciones de Vehículos con Peatones (V2P) comprenden la transferencia de paquetes entre vehículos y dispositivos portados por peatones, y las comunicaciones Vehículo a Red (V2N) permiten el intercambio de tráfico V2X entre vehículos y la red. Cada tipo de comunicación posibilita la implementación de diversos servicios,

desde funciones básicas hasta aplicaciones avanzadas que exigen potenciales requerimientos por parte de la red.

Esta Tesis Doctoral tiene como objetivo principal llevar a cabo una evaluación del rendimiento de los estándares C-V2X, considerando los procedimientos y mecanismos de asignación de recursos radio definidos por el 3GPP, tanto para LTE V2X como NR V2X. Una de las hipótesis planteadas en esta investigación se fundamenta en la idea de que, si bien una red LTE puede respaldar servicios V2X básicos, es únicamente mediante una red 5G NR que se pueden aprovechar servicios avanzados, integrando diversas tecnologías de acceso, modos de transmisión/comunicación e interfaces de red.

Para llevar a cabo la evaluación del rendimiento de dichos estándares, se ha prestado especial atención a los modos descentralizados definidos tanto para LTE V2X como para NR V2X. Esta consideración se fundamenta en que, en tales modos, los vehículos no dependen de la cobertura de la red celular, sino que se establecen mecanismos y procedimientos para la selección y utilización autónoma de recursos radio. Dado que el estándar define una serie de parámetros en las capas física (PHY) y de control de acceso al medio (MAC) que pueden ser empleados en función de diversos casos de uso, la problemática abordada en esta tesis implica la necesidad de evaluar las prestaciones de los modos descentralizados bajo distintos parámetros de referencia, según las directrices del estándar, con el propósito de determinar en qué condiciones se puede alcanzar el rendimiento máximo. Es importante destacar que, si bien el estándar establece ciertos parámetros conforme a las características fundamentales de las tecnologías LTE y NR, existen otros parámetros que pueden ajustarse según diversos escenarios. Entre estos se incluyen diferentes numerologías, anchos de banda de canal, anchos de banda de los subcanales sidelink, tamaño de paquetes, densidad de vehículos, frecuencia de transmisión de paquetes, tamaño de las ventanas de sensado, así como la activación y desactivación de los mecanismos de sensado, entre otros.

En esta Tesis Doctoral, se llevó a cabo una revisión exhaustiva del estándar para comunicaciones V2X LTE y NR V2X, destacando particularmente los modos de comunicación descentralizados, como se mencionó anteriormente. Posteriormente, se realizó una campaña de simulaciones a nivel de sistema para configurar escenarios V2X conforme a las especificaciones del 3GPP. Los resultados obtenidos permitieron evidenciar que las prestaciones del modo 4 en LTE son adecuadas para servicios básicos que no requieren un alto throughput, bajas latencias o estrictos criterios de fiabilidad en la red. En

contraste, mediante el modo 2 de NR V2X, se observó un rendimiento mejorado, lo que permite la adaptación a servicios V2X avanzados. Asimismo, se demostró que altas numerologías contribuyen a un mejor comportamiento del sistema al proporcionar una mayor diversidad de recursos, reduciendo la probabilidad de que dos vehículos utilicen los mismos recursos para sus transmisiones en el modo descentralizado. Además, se comprobó que en NR V2X es crucial una combinación adecuada de numerologías, anchos de banda de canal y tamaño de los subcanales sidelink, según los servicios V2X a implementar. Finalmente, se analizó la incorporación de múltiples tecnologías de acceso radio (multi-RAT) con el fin de respaldar servicios avanzados y mejorar la interoperabilidad mediante el uso de tecnologías de acceso basadas en LTE y NR, especialmente en escenarios con múltiples operadores de red móvil (MNOs), distintas interfaces de conexión y modos de comunicación.