



UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA



Máster Universitario
en Tecnologías, Sistemas y
Redes de Comunicaciones

Estudio del rendimiento de nuevas numerologías para sistemas Beyond 5G en la banda de sub-THz

Autor: Edgardo Andrés Vergara Barrios.

Director 1: David Gómez Baquero

Director 2: Manuel Fuentes Muela

Fecha de comienzo: 6/07/2020

Lugar de trabajo: Grupo de Comunicaciones Móviles del iTEAM

Objetivos — El objetivo principal de este trabajo es analizar el rendimiento de la forma de onda OFDM en la banda de frecuencias Sub-THz en el rango de 5 a 100 GHz, utilizando numerologías definidas y adicionales a las especificadas por el 3GPP en 5G Release-15, para comprobar la utilidad de dichas numerologías en aplicaciones de sistemas *Beyond 5G*. Se definen los siguientes objetivos secundarios:

- Estudiar la evolución de las comunicaciones móviles desde la primera generación hasta el actual 5G New Radio (NR) definido por el 3GPP.
- Realizar un estado del arte sobre requerimientos, estandarización y uso del espectro para despliegues 5G NR y de la visión que se tiene para sistemas Beyond 5G.
- Realizar una descripción de la tecnología, incluida la capa física, de la 5G NR.
- Evaluar el rendimiento del enlace PDSCH, mediante simulaciones *link-level* utilizando diferentes numerologías en escenarios con movilidad y frecuencias Sub-THz.
- Proporcionar unas recomendaciones sobre la utilización de dichas numerologías o posibles alternativas para tales frecuencias.

Metodología — En esta investigación se aplicó una metodología prospectiva con ella se busca contribuir e identificar oportunidades y aportar una visión de futuro. Mediante el análisis, la codificación y procesamiento aplicado en este ejercicio de consulta y tratamiento de datos tanto teóricos como experimentales se busca obtener los resultados confiables. Se puede dividir el desarrollo de este trabajo en dos partes; en la primera parte se presenta el marco teórico sobre las especificaciones del 3GPP para sistemas 5G NR, además sobre la forma de onda propuesta para tecnologías *Beyond 5G*. En la segunda parte (experimental) se realizan simulaciones *link-level* del canal físico compartido de enlace descendente PDSCH con el software Matlab, se analizan diferentes escenarios variando velocidad, frecuencia y esquemas de modulación y codificación; luego se recogen y analizan los resultados. Finalmente se presentan las conclusiones del tema.

Desarrollos teóricos realizados — Se utilizaron las recomendaciones del 3GPP en su publicación TR 38.807, en las que se propone el estudio de una forma de onda menos sensible al ruido de fase que afecta la operación de sistemas a frecuencias de onda milimétricas.

Desarrollo de prototipos y trabajo de laboratorio — La herramienta utilizada para realizar las simulaciones propuestas en este trabajo fue el software Matlab, provisto del módulo 5gtoolbox que contiene todas las librerías necesarias para simular el enlace PDSCH de acuerdo a las especificaciones técnicas para 5G NR release 15, posteriormente se realizaron las modificaciones correspondientes para simular dos nuevas numerologías OFDM, de acuerdo a la información recopilada en el estado del arte.

Resultados — Las simulaciones y análisis de los resultados, para el modelo de canal considerado, permiten concluir que una extensión de la forma OFDM con altas numerologías no es viable para operar en altas frecuencias con MCS altos y obteniendo bajas tasas de error. Según lo estudiado, es necesario una modificación de la capa física a nivel de señales PT-RS y el uso de arreglos multiantena para tener resultados que permitan soportar aplicaciones Beyond 5G. Sin embargo, se obtuvieron resultados en los que dicha extensión es funcional, por ejemplo, escenarios con esquemas de modulación bajos (16QAM) y escenarios *indoor*.

Líneas futuras — Se deben evaluar escenarios con modelos de canal que cubran frecuencias más allá de los 100GHz y arreglos multiantena que permitan validar el límite real de las numerologías OFDM propuestas en release 15.

Resumen — 5G NR inicia el cambio de las tecnologías móviles tal y como la conocemos múltiples servicios serán desplegados para impulsar el desarrollo de tecnologías propias de la industria 4.0, y si bien, solamente se está comenzando a explotar la capacidad de las redes 5G, es necesario proyectar servicios mas allá de lo soportado por esta generación de tecnologías móviles.

Servicios como la realidad virtual, conducción autónoma, inteligencia artificial e incluso servicios holográficos, sumados al incremento proyectado de dispositivos IoT, requerirán anchos de banda fuera de los límites del espectro optimizado en las especificaciones 5G. El uso de las bandas de frecuencia sub-THz es un requisito para soportar anchos de banda ultra-altos en transmisiones que permitan transferencias de datos en el rango de terabits.

el objetivo de este trabajo es validar mediante simulaciones el comportamiento de la forma de OFDM en transmisiones dentro del rango de frecuencias de los 5 -100GHz y si una extensión de la forma de onda utilizada para transmisiones en la capa física 5G NR es factible para utilizarse en frecuencias más altas de las que se definen para el 5G release 17.

Abstract — 5G NR initiates a change in the mobile technologies as we know them, multiple services will be deployed to impulse the development of 4.0 industry technologies, and even though the capacity of 5G networks is only beginning to be exploited, it is necessary to project services beyond that supported by this generation of mobile technologies.

Services such as virtual reality, autonomous driving, artificial intelligence and even holographic services, added to the projected increase of IoT devices, will require bandwidths outside the limits of the spectrum optimized in the 5G specifications. The use of sub-THz frequency bands is a requirement to support ultra-high bandwidths in transmissions that allow data transfers in the terabit range.

The objective of this work is to validate through simulations the behavior of the OFDM form in transmissions within the frequency range of 5 -100GHz and if an extension of the waveform used for transmissions in the physical layer 5G NR is feasible to be used in higher frequencies than those defined for 5G release 17.

ÍNDICE

I. INTRODUCCIÓN	4
<i>I.1 Evolución de las redes móviles.</i>	4
<i>I.2. Normativa y estandarización</i>	6
<i>I.3. Descripción del problema y motivación</i>	8
II. Análisis del Estado del arte	9
<i>II.1 5G NR.</i>	9
<i>II.2. ITU-ITM2020</i>	10
<i>II.3. Frecuencias Disponibles</i>	11
III. 5G NR: Descripción de la tecnología	13
<i>III.1 La nueva capa física.</i>	13
<i>III.2. Canales y señalización.</i>	16
<i>III.1. Limite en frecuencia.</i>	17
IV. Beyond 5G	17
<i>IV.1. Casos de uso</i>	18
<i>IV.2. Requerimientos y KPIs.</i>	19
<i>IV.3. Nuevas numerologías</i>	21
V. Implementación	22
<i>Nuevas numerologías.</i>	24
VI. Resultados	24
<i>VI.1 Resultados 5G</i>	25
<i>VI.1.1 Efecto por variación de SCS.</i>	25
<i>VI.1.2 Escenarios con movilidad.</i>	28
<i>VI.1.3 Variaciones del MCS</i>	30
<i>VI.2 Resultados B5G</i>	33
<i>VI2.1 Comparativa con numerologías Rel-15</i>	33
VII. Conclusiones y comentarios	39
AGRADECIMIENTOS	40
BIBLIOGRAFÍA	40

I. INTRODUCCIÓN

La inminente llegada de la cuarta revolución industrial está impulsando grandes avances tecnológicos, la transformación digital prevista, llegará al punto en el que la toma de decisiones no será una cuestión netamente humana. Tecnologías que interactúan en el mundo físico, como la robótica y el IoT, en conjunto con tecnologías que cambian el mundo digital, como las Inteligencias Artificiales (IA) y realidad virtual (VR), generarán una gran cantidad de datos (Big Data) que se convertirá en conocimiento, esto supondrá un gran cambio en la sociedad y el modo de vida humano[1].

Dado el crecimiento en el flujo y tamaño de datos y terminales conectados, se requiere una transformación en las capacidades y características de las tecnologías inalámbricas. Se estima que la 5G proporcionará un nuevo valor como tecnología básica de apoyo a la futura industria y sociedad, con sus características técnicas, como la alta velocidad, alta capacidad, baja latencia y conectividad masiva[2]. Y si bien, con la 5G inicia un cambio en la forma de utilizar la tecnología móvil, la proyección de demanda y tecnologías de los próximos años requiere que se estudie la operación del espectro radioeléctrico más allá de la propuesta actual para soportar redes aún más densas y con más capacidad.

El objetivo de este trabajo es analizar el rendimiento de la forma de onda utilizada por 5G para transmisiones en el canal descendente (*Downlink*), operando a frecuencias más allá de lo establecido en el estándar, para esto se organiza de la siguiente manera, en el primer capítulo se hace una breve historia de la evolución de las tecnologías móviles, procesos de estandarización y la descripción del problema que motiva este estudio, en la segunda parte un análisis del estado del arte de la tecnología 5G NR, requerimientos y un análisis de las bandas de frecuencia que utiliza, en el capítulo III se describe la tecnología utilizada por 5G, la capa física y forma de onda. Continúa el capítulo IV con estudio de la visión de tecnologías B5G, casos de uso y KPIs, además de la definición de nuevas numerologías OFDM que se utilizarán en las simulaciones. En el capítulo V se describe la herramienta de simulación sobre la cual se ejecutaron las pruebas y el diagrama de bloques del sistema utilizado. Seguidamente en VI se presentan los resultados obtenidos y en el capítulo final las conclusiones y comentarios respectivos.

1.1 Evolución de las redes móviles.

En la última década del siglo XIX se comenzó a explotar el espectro radioeléctrico como recurso público. Las primeras comunicaciones inalámbricas para servicios de radiotelegrafía revolucionaron la manera de comunicarnos y desde esa fecha el uso del espectro ha tomado vital importancia para el desarrollo tecnológico; 80 años después de las primeras transmisiones se comienza a hablar de sistemas de telefonía móvil o celular, la llamada primera generación (1G) funcionaba con tecnologías totalmente analógicas que proveían servicios de voz mediante la

conmutación de circuitos. Para evitar interferencias, el sistema estaba distribuido en una red de celdas contiguas que operaban en distintos canales (FDMA), principalmente en la banda de los 800MHz, y que para reutilizar las frecuencias de cada canal se separaban geográficamente las estaciones base [3].

Siguiendo la línea de tiempo, en los 90s aparece la segunda generación “2G”, y con ella el estándar GSM (*Global Systems for Mobile communications*) referente de la tecnología, cuya diferencia con la 1G radicaba en el uso de transmisión digital en vez de analógica y en la adición de un nuevo servicio de comunicación, mensajería de texto a través del *Short Message Service* SMS [3]. Operaba en bandas cercanas a los 900MHz y a los 1800MHz utilizando TDMA, y proporcionaba velocidades de transmisión de 64Kbps, que luego con su evolución EDGE alcanzarían los 384Kbps.

Entre 1996 y 2000 se concibió el paso a la tercera generación basada en el CORE GSM[4], La Union internacional de Telecomunicaciones (ITU), presenta la familia de sistemas IMT-2000, cuyo objetivo era definir los estándares necesarios para la “3G”. Con esta generación iniciaron los servicios comerciales de banda ancha móvil y el roaming de voz y datos. Nuevamente se extendía el uso del espectro, esta vez hasta la banda de los 2100MHz. Inicialmente logró velocidades de 2Mbps para usuarios *Indoor* y luego alcanzando 10Mbps en *downlink* con su variante HSDPA. Con estos anchos de banda aparecen por primera vez los servicios móviles de audio y video, además de múltiples opciones para uso de internet.

A mediados de los 2000s la ITU, con IMT-advance, dio las recomendaciones para el funcionamiento de la cuarta generación. Con la 4G, se consiguieron mejoras en cuanto a capacidad de usuarios conectados, velocidad y calidad de la experiencia. Esta generación sigue operando a lo largo del espectro de frecuencias por debajo de los 3.5Ghz y el acceso al medio se realiza mediante OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*), esto combinado con técnicas multiantena como MIMO (*Multiple-Input Multiple-Output*), CA (*Carrier Aggregation*) y modulaciones de orden superior hasta 64QAM proveen anchos de banda adaptativos entre 5-20MHz y velocidades cercanas a 1Gbps en ciertas condiciones. En la tabla 1 se muestra una comparación de las generaciones móviles, desde la 1G hasta 5G, cuyos primeros despliegues comerciales ya se encuentran operando.

Generación	1G	2G	3G	4G	5G
Lanzamiento	1980s	1990s	2000s	2010s	2020s
Ancho de banda	2kbps	64kbps	2Mbps	< 1Gbps	> 1Gbps
Tecnología	AMPS, TACS	GSM, CDMA	WCDMA, CDMA2000, TD-SCMDA	LTE, WiMax	mmWare, Beamforming, Small Cell
Servicios	Voz analogica	Voz digital, SMS	Banda ancha móvil (MBB)	Mejor y más rápida MBB	WWW (World-Wide Wireless Web)
Multiplexación	FDMA	TDMA, CDMA	CDMA	CDMA	CDMA
Conmutación	Circuitos	Circuitos_Paquetes	Paquetes	Paquetes	Paquetes

Tabla 1. Comparación de las generaciones móviles, fuente:[3]

En el 2015 la ITU presentó la recomendación ITM-2020 y sobre esta se construyó la quinta generación de tecnología móvil. La 5G es la primera generación de dispositivos móviles que soporta bandas de frecuencia sobre los 6GHz y su servicio objetivo es la conexión de todos, a todo y en todas partes, para esto divide su foco de acción en 3 ámbitos principales a saber; la banda ancha móvil mejorada (eMBB), comunicaciones masivas tipo maquina (mMTC) y comunicaciones ultra confiables de baja latencia (URLLC). Bajo estos 3 verticales se desarrollarán una gran variedad de servicios

Como se ha visto, cada cambio de generación móvil está marcado por nuevas características y/o servicios que lo diferencian del anterior, y una característica diferencial para la 5G es el uso de las frecuencias ubicadas en la parte alta del espectro más allá de los 6GHz, en primer lugar porque a estas frecuencias hay una gran cantidad de ancho de banda disponible y las longitudes de onda permiten realizar grandes arreglos multiantena sin ocupar mucho espacio en los dispositivos de transmisión o recepción y en segundo lugar para evitar la congestión de dispositivos en espectro sub-6GHz y brindar una conexión inalámbrica que permita la masificación prevista como consecuencia de desarrollos de IoT.

1.2. Normativa y estandarización

El *Third Generation Partnership Project* (3GPP) se creó para desarrollar especificaciones técnicas a nivel mundial en 1998, reúne un conjunto de 7 organizaciones encargadas de desarrollar los estándares de comunicaciones, denominadas como socios organizacionales. El conjunto de estas especificaciones da una descripción completa del sistema para las comunicaciones móviles desde la tecnología de telecomunicación celular, pasando por las tecnologías y sistemas necesarias para el acceso radio, red central y las capacidades de servicio. También se incluyen estudios para el acceso a la red central por medios no radio e interoperabilidad con redes que no pertenezcan a los estándares 3GPP[5].

Las contribuciones y estudios son aportadas por los miembros 3GPP organizados en grupos específicos llamados *Technical Specification Group* (TSG). Existen 3 TSG: *Radio Access Networks* (RAN), *Services & Systems Aspects* (SA), *Core Network & Terminals* (CT) que trabajan paralelamente en distintas versiones o releases. La figura 2 muestra el calendario actual para los releases activos, a la fecha se encuentran congelados (finalizados) los releases 15 y 16, dada la situación sanitaria por Covid-19 el calendario para release 17 puede retrasarse según lo indicado por el proyecto en su página web[6].

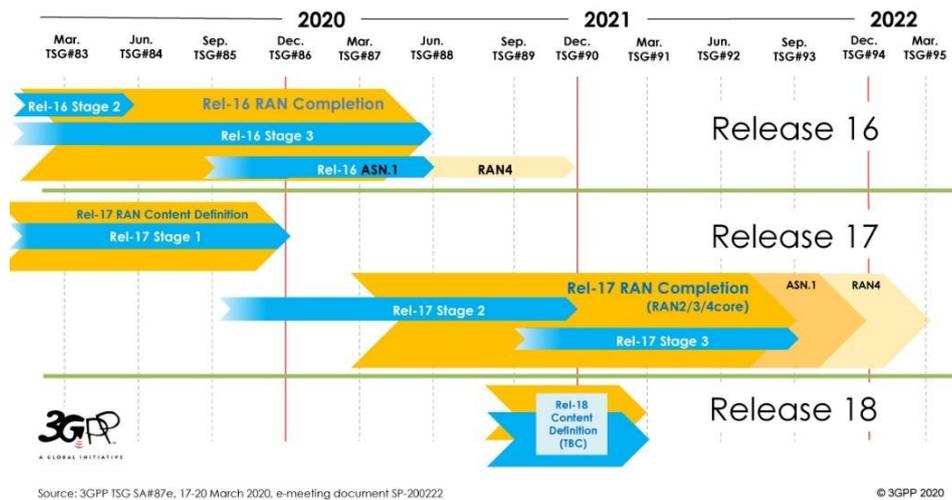


Fig. 1 Calendario 3GPP para releases de 5G.[6]

El 3GPP dividió proceso de estandarización de 5G en dos fases. La primera fase del fue entregada en el Rel-15 y su enfoque principalmente está en los servicios de banda ancha móvil mejorada (eMBB). El Rel-15 presenta una la nueva interfaz radio NR y una nueva arquitectura para el núcleo de red (5GC). También se definen dos modos de operación: *Standalone* (SA), en el que el *core* de la red es 5G, y *Non Standalone* (NSA), en el que se utiliza el core 4G. Tal como sucedió con las generaciones anteriores esta fase está centrada en mejorar las tasas de enlace descendente y permitir una mejor experiencia de usuario final.

Para el Rel-16, segunda fase del 5G, el enfoque abarca otros dos verticales URLLC y mMTC, se incluyen características como operaciones NR en espectro no licenciado (NR-U), redes de acceso y *backhaul* integradas (IAB), comunicaciones V2X (*Vehicle to everything*) mejoradas, mejor eficiencia energética entre otras. En Fig.2 se muestran algunos conceptos claves en la evolución del 5G NR, las mejoras introducidas en cada uno de los releases programados posteriormente al Rel-15. La Rel-16 inicia el enfoque de *Industrial IoT* (IIoT) que continuará en el Rel-17. Se presenta también el concepto de NR-Light (dispositivos NR de Capacidad Reducida) y soporte para UAVs (vehículo aéreo no tripulado) y NTN (redes no terrestres). Y el estudio de la tecnología para el funcionamiento en frecuencias superiores a 52,6 GHz.



Fig. 2 Evolución 5G NR.[7]

Uno de los principales objetivos del sistema de releases es hacer que los sistemas sean retrocompatibles y escalable al futuro cuando sea posible, para asegurar que los usuarios finales no vean interrumpidos sus servicios en los cambios generacionales, es por esto que, así como el día de hoy coexisten redes 2G, 3G y 4G, muchos operadores están realizando las nuevas implementaciones con la doble compatibilidad entre LTE y 5G NSA definido en el Rel-15 y es de esperar que las futuras tecnologías también tengan esta característica.

1.3. Descripción del problema y motivación

El release-15 (Rel-15) del 3GPP entregó la primera fase de la quinta generación de tecnologías móviles 5G, en esta se definió el 5G Core (5GC) y la arquitectura del 5G *New Radio* (NR) sobre la cual se están haciendo los despliegues comerciales de la tecnología. Estos se están realizando en las bandas de frecuencia por debajo de los 6 GHz y en algunos casos en las bandas de frecuencias de onda milimétrica, principalmente para mejorar los servicios móviles de banda ancha y la experiencia del usuario. La capa física para esta primera versión está optimizada para frecuencias hasta 52.6GHz y su esquema de acceso múltiple está basado en OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) con prefijo cíclico (CP, *Cyclic Prefix*) que en conjunto con tecnologías como *massive Multiple Input Multiple Output* (mMIMO) o FD-MIMO (*Full Dimension - MIMO*), permiten alcanzar altas eficiencias espectrales.

El release-17 (Rel-17) del 3GPP estudia los requerimientos para NR en frecuencias superiores a los 52.6GHz, casos de uso y posibles escenarios donde se pueda desplegar la tecnología para utilizar la parte alta del espectro que ofrece altas velocidades de transmisión y baja latencia, gracias al gran ancho de banda disponible. Sin embargo, la operación en estas bandas de frecuencia estará limitada entre otras cosas por una baja eficiencia en la amplificación de la potencia (PA), y un mayor deterioro provocado por el ruido de fase (*phase noise*, PN) [8]

Para mitigar los inconvenientes de PN, en el Rel-16 se propone el uso de nuevas numerologías OFDM en las que se mantengan la forma de onda pero que se aumente el espaciamiento entre portadoras (SCS). El objetivo de este trabajo es analizar el rendimiento del enlace físico descendente (PDSCH) utilizando las numerologías OFDM definidas en Rel-15 y nuevas

numerologías de acuerdo a las recomendaciones hechas en Rel-16 en la banda de frecuencias Sub-THz. Adicionalmente se utilizarán los modelos de canal especificados en TR 38.901, para identificar el límite de operación en términos frecuencias de portadora que tienen las numerologías propuestas en el Rel-15. En escenarios donde además de la frecuencia, hay variaciones del esquema de modulación y codificación (MCS, *Modulation and Coding Scheme*) y la velocidad de movimiento.

II. Análisis del Estado del arte

II.1 5G NR.

La 5G no es solo una evolución técnica de generaciones anteriores, si bien las primeras implementaciones están enfocadas a satisfacer la demanda de datos del mercado. Los enfoques de operación para los que fue diseñada van más allá. Una gran cantidad de desarrollos se han hecho paralelamente con la construcción del estándar, con el fin de que la tecnología móvil sea base en la transformación de la sociedad y pueda soportar múltiples servicios. Una de las características más interesantes con respecto al diseño de la 5G es su flexibilidad, la cual se logra aprovechando los conceptos de redes definidas por software (SDN) y la virtualización de las funciones de red (VNF) en una arquitectura de *network slicing*, una técnica que permite adaptar los parámetros de la red en función de los requisitos del UE, optimizando los recursos en términos de capacidad, velocidad y cobertura. La capacidad de crear subredes dedicadas a equipos y servicios amplía el campo de aplicación de las comunicaciones móviles mucho más allá de lo anteriores generaciones permitan. Como se mencionó antes, son 3 las verticales que agrupan cada uno de los servicios que se desarrollarán con 5G y que fueron sugeridas por la ITU.

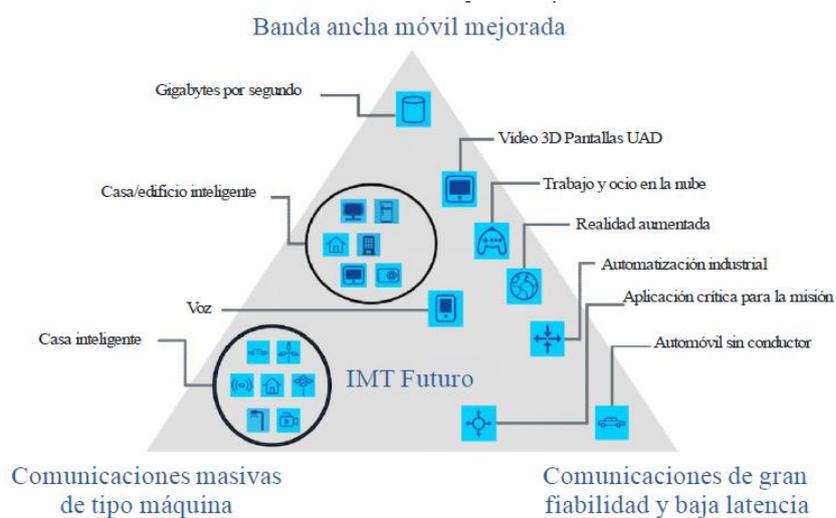


Fig. 3 Verticales 5G.[9]

- Banda ancha móvil mejorada (eMBB): Está centrada en mejorar el servicio y calidad de experiencia del usuario, permitiendo mayor cobertura y velocidades de carga y descarga de contenidos multimedia, lo que es ideal para aplicaciones como la realidad virtual, realidad aumentada, streaming de video, entre otras.
- Comunicaciones de gran fiabilidad y baja latencia (URLLC): también conocida como servicios de misión crítica (MCS), agrupa todas las aplicaciones donde es de gran importancia el uso de latencias mínimas(<1ms) para conseguir el control en tiempo real de los dispositivos, p.e vehículos autónomos, aplicaciones médicas como la cirugía remota, automatización industrial, servicios de emergencias, etc.
- Comunicaciones masivas tipo máquina. (mMTC): Este caso de utilización se caracteriza por un muy elevado número de dispositivos conectados que, por lo general, transmiten un volumen relativamente bajo de datos no sensibles al retardo[9], ofreciendo servicios de comunicación para IoT, como las smart cities, smart agricultura, y NB-IoT.

Varias tecnologías son necesarias para lograr estos avances, la primera y probablemente más importante tecnología es el uso de ondas milimétricas (mmwaves). Desde el comienzo de las redes móviles en la década de 1980, todos los dispositivos han estado operando en el espectro de frecuencias entre 3kHz y 6GHz. Con la aparición del IoT, *Wireless body area network* (WBAN), VR, realidad aumentada, vehículos autónomos y muchas otras tecnologías que requieren una rápida conexión inalámbrica, las bandas de frecuencia tradicionales están cada vez más congestionadas, por lo que el uso del espectro en bandas superiores es una obligación[10].

II.2. ITU-ITM2020

principios del año 2014, entidades internacionales como la ITU y el 3GPP (iniciaron el proceso de estandarización de la nueva generación de las comunicaciones móviles 5G y para el año 2015 se publicó el estándar de Telecomunicaciones Móviles Internacionales IMT-2020, donde se establecieron los requerimientos objetivo para la 5G. Los 8 parámetros mostrados en la fig.3 son las características clave de las IMT-2020[9].

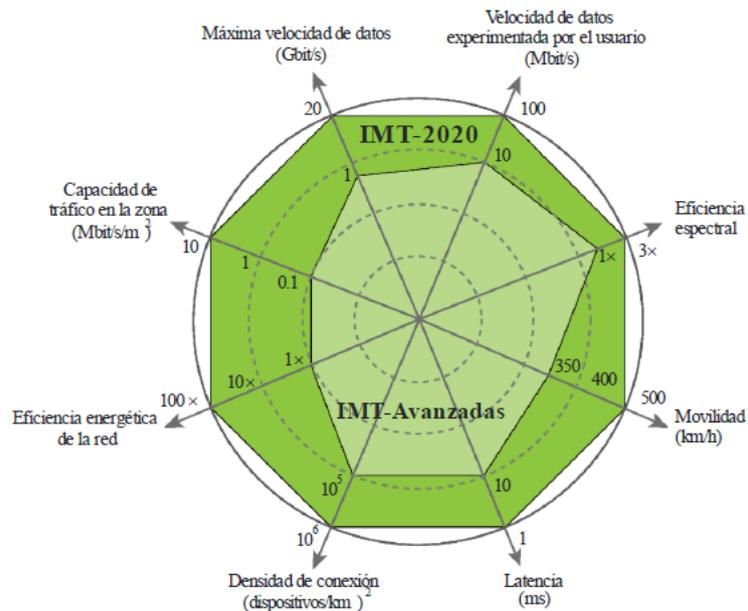


Fig. 4 IMT-2020 vs IMT advance[9]

- Velocidad de datos máxima que un usuario puede alcanzar, Se espera que alcance los 10 Gbit/s para la banda ancha móvil mejorada (eMBB). Bajo ciertas condiciones y escenarios, las IMT-2020 pueden soportar hasta 20 Gbit/s.
- Tasa de datos experimentada por usuario, Se esperan 100 Mbit/s para casos de cobertura de área amplia, como en zonas urbanas y suburbanas.
- Eficiencia Espectral de 30 bits/s/Hz para el enlace descendente, tres veces mayor comparada con LTE.
- Movilidad, es la velocidad máxima que un dispositivo puede llegar a tener obteniendo una calidad aceptable en el servicio, sin pérdida de paquetes y conexión estable, para 5G soportara velocidades hasta 500 km/h pensando en escenarios como trenes de alta velocidad.
- Latencia hasta de 1 ms.
- Densidad de conexión, cantidad de dispositivos que pueden conectarse por km^2 garantizando la calidad en el servicio, se espera que alcance hasta $10^6/km^2$, en escenarios como el mMTC, en las que una o más entidades no necesitan la interacción humana.
- Hasta 100 veces mayor eficiencia energética que IMT-advance.
- Capacidad de tráfico en la zona 2de 10 Mbit/s/ m^2

II.3. Frecuencias Disponibles

Para la 5G NR se definieron dos rangos de frecuencias: Rango de frecuencias 1 (FR1) que cubre el rango de frecuencias desde 410 MHz – 6000 MHz (sub-6GHz) y ampliando el límite superior hasta 7125 MHz para posibles nuevas ofertas de espectro[11]. El rango de frecuencias 2 (FR2) comprende las bandas entre 24,25-52,6 GHz (*mmwave*). En cuanto a implementaciones funcionales las bandas pioneras de 5G identificadas a nivel de la UE son la de 700 MHz (694-790 MHz), la de 3,6 GHz (3,4-3,8 GHz) y las bandas de frecuencia de 26 GHz (24,25-27,5 GHz). En Europa la mayoría de las nuevas implementaciones de 5G se están haciendo en bandas de frecuencia por debajo de los 6GHz, el 70% de los ensayos están en la banda de los 3.4-3.8 GHz, seguido de los 26 y 28 GHz. Los operadores ofrecen rendimientos de hasta 7.5Gbps en bandas mmwave y 4.7Gbps en bandas sub 6GHz[12].

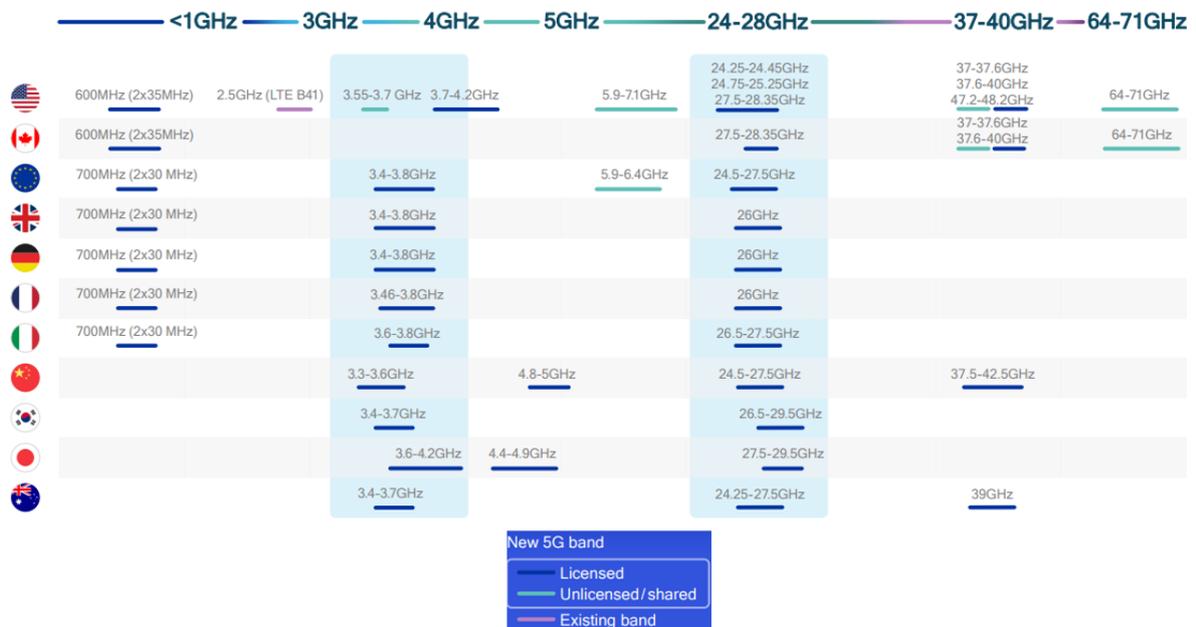


Fig. 5 radiografía del uso del espectro[13].

De acuerdo al escenario de interés se puede hacer una clasificación de las bandas de frecuencias que se utilizan en 5G NR, en bajas, medias y altas frecuencias, explotando cada una las características específicas de las diferentes porciones del espectro. El espectro de banda baja, por debajo de los 2GHz, es útil para expandir la cobertura 5G NR en todos los escenarios de implementación urbana / suburbana / rural, asegurando la continuidad del servicio en diferentes geografías. Las bandas de frecuencia en la gama de 3-6 GHz (se amplía en la versión 16 a 7,125 GHz) corresponden a bandas de frecuencia media, tienen el mejor compromiso entre capacidad y cobertura, cumpliendo una gran parte de los requisitos de 5G / IMT-2020. El rango de espectro de banda media 5G tiene el mérito adicional de ofrecer el mayor ancho de banda contiguo disponible para IMT por debajo de 6 GHz. las frecuencias de ondas milimétricas por encima de 24 GHz, con

un rango entre 24,25 y 52,6 GHz (ampliada a 71 GHz en release 17), corresponde a bandas de alta frecuencia, son ideales para aplicaciones de alto rendimiento de datos, como streaming de video, animaciones de video y aplicaciones que requieren gran cantidad de datos, como la realidad virtual y aumentada, el espectro de banda alta de menor potencia se puede implementar de manera eficiente en entornos *indoor* para complementar el Wi-Fi y proporcionar una cobertura 5G perfecta[14]. Dada la amplia gama de frecuencias que se consideran necesarias para el soporte de 5G NR, el funcionamiento en FR1 de sub-6 GHz está avalado por tres separaciones de subportadoras (SCS) (15, 30 y 60 kHz), y por el funcionamiento de dos SCS (60 ó 120 kHz) en FR2, en bandas de ondas milimétricas.

III. 5G NR: Descripción de la tecnología

III.1 La nueva capa física.

La principal diferencia entre LTE y 5G NR está radicada en la adaptabilidad de los parámetros de la forma de onda que usa la NR para soportar la amplia gama de servicios que ofrece. Si bien se mantiene la estructura de la trama o *frame* LTE con una duración de 10ms que está dividida en 10 subtramas de 1ms, otros parámetros como el ancho de banda que ocupa una subportadora, SCS (de sus siglas en inglés Subcarrier Spacing) o Δf , y el número de slots en cada subtrama, variarán de acuerdo a la numerología μ .

OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) con prefijo cíclico (CP, *Cyclic Prefix*) es el esquema de acceso múltiple para transmisiones *Uplink* y *Downlink* utilizado en la nueva capa física de NR. Para transmisiones *uplink* también está definido el uso de SC-FDMA (*Single Carrier - Frequency Division Multiple Access*) con CP.

Los símbolos OFDM en cada subtrama, están agrupados en slots y dependiendo del tipo de prefijo cíclico CP, que puede ser normal o extendido, cada slot tendrá 12 o 14 símbolos OFDM. El número de slots por cada subtrama tiene una variación que es proporcional a 2^μ , donde μ es un entero positivo que varía de 0 a 4. Cada símbolo OFDM puede asignarse a transmisiones de enlace en *uplink* o *downlink* dependiendo del *slot format indicator* (SFI), el cual es un parámetro indica al UE cuando es de un tipo u otro, además permite una asignación flexible para los modos de funcionamiento TDD o FDD.

El ancho de banda que ocupa una subportadora SCS en el dominio de la frecuencia, toma valores de acuerdo a:

$$SCS = 2^\mu * 15KHz \quad (1)$$

A medida que el SCS aumenta, también aumenta el número de símbolos que puede alojar cada trama, ya que cada subtrama tendrá más slots y para que esto suceda el tiempo de cada símbolo debe disminuir. Para compensar la duración del símbolo, el tiempo de escucha del CP varia, decreciendo cuando el SCS crece y haciéndose más grande cuando el SCS disminuye. La tabla 2 muestra la variación del número de símbolos de acuerdo a la numerología y CP. Como se puede ver, se trata de un balance entre SCS y duración de símbolo. La opción adecuada dependerá por tanto del servicio que se pretende dar.

μ	Símbolos/slot	Slots/subframe	Slots/frame	Símbolos/frame	CP
0	14	1	10	14	Normal
1	14	2	20	28	Normal
2	14	4	40	56	Normal
2	12	4	40	48	Extendido
3	14	8	80	112	Normal
4	14	16	160	224	Normal

Tabla 2. Símbolos/súframe por numerología. Fuente[15]

Como se ha indicado de los tiempos de trama y subtrama no dependen del SCS, pero el número de slots (y símbolos) y el intervalo de tiempo que duran variará de acuerdo al espaciamiento en razón de ir doblando el numero de slots para cada aumento numerología e ir reduciendo a la mitad la duración de tiempo con respecto a la inmediatamente anterior.

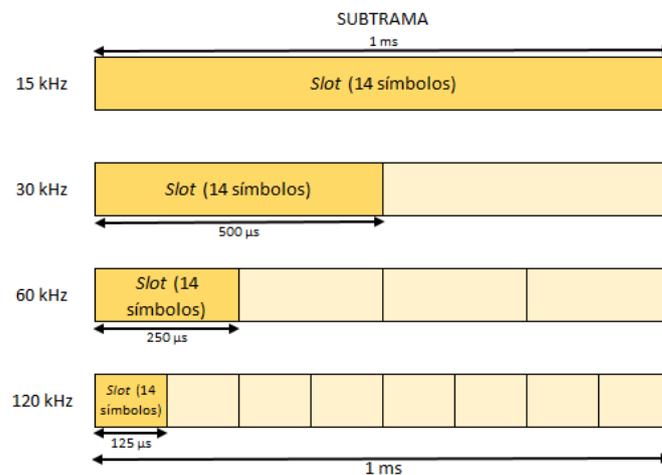


Fig. 6 variación de tiempo de símbolo respecto al SCS

Un *Resource element* RE, como el mostrado en la figura 2, está definido como una subportadora en frecuencia o un símbolo OFDM en el dominio del tiempo, y un *Resource Block* RB es el conjunto de 12 REs en frecuencia [16]. El ancho de banda variará entonces de acuerdo a la numerología y al número de RBs que se pueden transmitir. Para calcular el máximo ancho de banda que puede soportar cada configuración de Subcarrier Spacing se tienen en cuenta el ancho de

banda del canal y los intervalos de guarda entre portadoras, la tabla 3 muestra el ancho de banda máximo soportado para cada numerología.

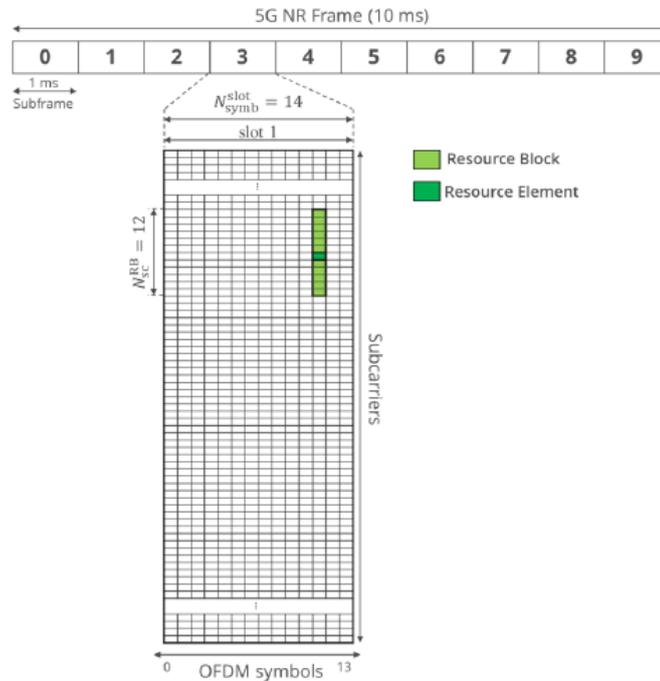


Fig. 7 Estructura de trama NR con $\mu = 0$ [16].

Dada la variedad de servicios soportados por NR, se definen los rangos de frecuencia FR1(450 MHz - 6 GHz) que soporta los servicios por debajo de los 6Ghz y anchos de banda estrechos (entre 5Mhz y 100Mhz) y FR2(24.25 GHz - 52.6 GHz) que soporta las bandas milimétricas y anchos de banda hasta 400MHz. Las bandas milimétricas corresponden al rango entre los 30 y los 300GHz, o el equivalente a longitudes de onda de 1 a 100mm, y es en esta parte del espectro donde se encuentran disponibles los anchos de banda necesarios para soportar aplicaciones 5G como eMMB, adicionalmente gracias a las longitudes de onda, se posibilitan grandes arreglos multiantena como MIMO masivo y beamforming.

Frequency Range (FR)	$\Delta f(\text{Khz})$	Tcp(μs)	Slot Duration (ms)	Max. BW (MHz)
FR-1	15	4.76	1	50
	30	2.38	0.5	100
	60	1.19 4.17	0.25	100
FR-2	60	1.19 4.17	0.25	200
	120	0.6	0.125	400

Tabla 3: Máximo ancho de banda BW por numerología y duración correspondiente de CP y slot fuente [17].

III.2. Canales y señalización.

La forma de onda define cómo se colocan los recursos en el dominio de tiempo-frecuencia y también la estructura que mapea los símbolos de información a estos recursos[17]. NR utiliza diferentes flujos de información para separar los datos, a estos flujos se les conoce como canales, para las transmisiones de enlace descendente se definen los siguientes canales y señales físicos[16]:

- **Physical Broadcast Channel (PBCH):** Transmite la parte estática de la Información del Sistema (SI), conocida como el Bloque de Información Maestra (MIB), a todos los UEs que requieran acceder a la red.
- **Physical Downlink Control Channel (PDCCH):** especifica la asignación del contenido de los datos para cada UEs que lo solicite. También configura la retransmisión del HARQ, la adaptación del enlace y los parámetros MIMO.
- **Physical Downlink Shared Channel (PDSCH):** transmite el contenido de los datos al UE y a los Bloques de Información del Sistema (SIBs).
- **Primary and Secondary Synchronization Signals (PSS, SSS):** junto con el PBCH son necesarias para permitir el acceso a la red de la UE. Específicamente, proporcionan información de sincronización de tramas de radio e identificación de celdas en la búsqueda inicial de celdas.
- **Demodulation Reference Signal (DMRS).** La señal está presente solo en los RB asignados para el PDSCH y es específico para cada UE, se utiliza para estimar el canal de radio. El sistema puede formar el DMRS, mantenerlo dentro de un recurso programado, y transmitirlo sólo cuando sea necesario en DL o UL. Además, se pueden asignar múltiples DMRS ortogonales para soportar la transmisión MIMO El tipo de mapeo de PDSCH es por ranuras (tipo A) o no por ranuras (tipo B). Las posiciones de cualquier símbolo DM-RS adicional se definen mediante un conjunto de tablas, como se especifica en TS 38.211 Sección 7.4.1.1.2[15].
- **Phase Tracking Reference Signals (PT-RS)** es la señal de referencia de seguimiento de fase. PT-RS se utiliza principalmente para estimar y minimizar el efecto de error de fase común CPE en el rendimiento del sistema. Debido a las propiedades del ruido de fase, la señal PT-RS tiene una baja densidad en el dominio de la frecuencia y una alta densidad en el dominio del tiempo. PT-RS siempre ocurre en combinación con DM-RS y solo cuando la red la haya configurado.
- **Channel State Information Reference Signal (CSI-RS)** es una señal solo para downlink la CSI-RS que recibe el UE se utiliza para estimar el canal y reportar la información de calidad del canal al gNB. Durante las operaciones MIMO, la SR utiliza diferentes enfoques de antena basados en la frecuencia portadora Para el control de tiempo/frecuencia, la CSI-

RS puede ser periódica o aperiódica. Se transmite en ráfagas de dos o cuatro símbolos que se extienden a través de una o dos ranuras[18].

III.1. *Limite en frecuencia.*

En los release 15 y 16 se especifican los requerimientos para operar NR en frecuencias hasta los 52.6GHz, el 3GPP ha estudiado la operación más allá de estas frecuencias, en dichos estudios, los casos de uso y escenarios propuestos utilizan el espectro hasta los 114.25Ghz [19]. Se indica que la operación en este rango estará limitada por el rendimiento de dispositivos como amplificadores de potencia PA, conversores análogo-digital ADC y amplificadores de ruido LNA, y por las pérdidas de propagación y penetración que se intensifican a estas frecuencias. De aquí que la mayoría de escenarios propuestos están limitados a casos estáticos o de movilidad baja con comunicaciones de corto alcance.

En las características esperadas a desplegar en el release 17 se incluye la operación en el rango de frecuencias entre 52.6-71GHz con la forma de onda existente. Para esto el rel-16[19] propone como requerimiento de sistema en este rango una forma de onda más robusta aumentando el SCS para la forma de onda CP-OFDM, para poder afrontar mejor el aumento del PN. El aumento debe hacerse manteniendo el principio de escalado de la numerología NR (1), pero ampliándolo a numerologías más altas.

Como se ha mencionado las formas de onda que acepta el release 15 y el 16 son OFDM y SC-FDMA, al utilizar múltiples portadoras ortogonales entre sí, el ruido de fase PN afecta a todas las portadoras de forma similar produciendo un error de fase común (CPE) y a las frecuencias de interés el alto PN puede producir también interferencia entre portadoras (ICI). Para mitigar estos efectos existen propuestas de modificación de la capa física, en las que se utilizan técnicas de arreglos de símbolos PTRS; para la forma de onda CP-OFDM la idea es asignar bloques contiguos de símbolos PTRS en frecuencia, que permitan estimar las componentes de ICI en el receptor de forma más confiable [20].

IV. **Beyond 5G**

Históricamente el cambio en las generaciones de comunicaciones móviles viene dado por el cambio de década, y si bien aún no se han explotado todo el potencial de la 5G la hoja de ruta presentada para el Rel-17, abre la puerta a la era del Internet of Everything (IoE) y permite imaginar los pasos a seguir hacia la próxima generación cuya base dependerá de que tanto se desarrolle 5G, nuevas tecnologías y necesidades de la próxima década que seguramente tendrá

exigencias más estrictas (en cuanto a fiabilidad, capacidad, eficiencia energética y baja latencia) de las que puedan soportar las tecnologías inalámbricas actuales, así como nuevas combinaciones en áreas específicas y requisitos que no caben dentro de las 3 categorías de 5G: eMMB,URLLC y mMTC[21].

IV.1. Casos de uso

A continuación, se presenta una lista de los posibles nuevos casos de uso y aplicaciones en la 6G[22]:

- **Capacidad extrema xhaul:** los escenarios ultra densos en áreas urbanas hacen que el xhaul (*fronthaul* y *backhaul*) de fibra óptica sea la opción más deseable, pero se prevee que las comunicaciones inalámbricas sean complemento para el despliegue de fibra cuando presente problemas de penetración tanto en interiores como al aire libre Este caso de uso se refiere a un enlace punto a punto simétrico fijo que apunta a alta velocidades de datos sin limitaciones de energía o complejidad.
- **Comunicaciones de rango corto dispositivo a dispositivo:** Las comunicaciones de rango corto utilizan enlaces P2P simétricos de alto rendimiento. Este tipo de comunicaciones se centran en el intercambio de datos a corta distancia e incluyen las comunicaciones inter/intrachip, conectores inalámbricos, entre otros. Se presentan restricciones como las fuentes de energía y complejidad de los dispositivos.
- **Movilidad ferroviaria inteligente:** Comunicaciones ferroviarias de alto rendimiento de datos entre infraestructura, trenes, pasajeros y objetos. Las comunicaciones ferroviarias están evolucionando desde las aplicaciones de soporte crítico de señalización hasta el desarrollo de aplicaciones con alto ancho de banda. Por ejemplo, la videovigilancia de alta definición a bordo y en estaciones, la conectividad de banda ancha para los pasajeros, la difusión de información entre los pasajeros y la conducción remota o control remoto. Estas deben desarrollarse en cinco escenarios: del tren a la infraestructura, entre vagones (intervagones), dentro de los vagones (intravagones), dentro de las estaciones y de infraestructura a infraestructura.
- **Realidad multisensorial extendida:** Consiste en el desarrollo de aplicaciones de realidad aumentada, realidad virtual o la mezcla entre las dos, para capturar entradas multisensoriales y proveer de interacciones en tiempo real al usuario. Se necesita de velocidades de datos extremadamente altas, en el rango de los Gigabits por segundo y latencias excepcionalmente bajas para ofrecer una experiencia de inmersión total. Las necesidades de conectividad, interacción a distancia (comunicaciones holográficas) y experiencia sensorial de los humanos, son los impulsores para conseguir los objetivos de

velocidad y latencia de datos. Por ejemplo, las cámaras de visión múltiple utilizadas en comunicaciones holográficas requerirán de datos del orden de terabits por segundo.

- **Movilidad autónoma:** Para las tecnologías definidas en 5G, se espera una mejora y avance hacia sistemas totalmente autónomos, que proporcionen un transporte más seguro y eficiente, con una mejor gestión del tráfico y mejor experiencia para los usuarios. Los vehículos autónomos conectados exigen fiabilidad por encima del 99,99999% y latencia por debajo de 1 ms, incluso en escenarios de muy alta movilidad hasta 1000 km/h. Además, se requieren mayores velocidades de datos debido al aumento del número de sensores en los vehículos que se necesitan para ayudar a la conducción autónoma.
- **Conectividad en áreas remotas:** Para reducir la brecha digital, un objetivo clave de 6G es garantizar 10 Mbps en todas las zonas pobladas del mundo, utilizando una combinación de componentes de red terrestres y espaciales. Es importante que esto no sólo esté apoyado teóricamente por la tecnología, sino que la 6G sea diseñada de manera suficientemente rentable para permitir despliegues reales que ofrezcan banda ancha a toda la población del mundo.
- **Automatización industrial y robótica:** La industria 4.0 visualiza una transformación digital de las industrias y procesos de fabricación mediante sistemas ciber-físicos, redes IoT, computación en la nube e inteligencia artificial. Esto para lograr una fabricación de alta precisión, con procesos industriales que utilizan control automático y tecnologías de comunicación. Se necesita también de una fiabilidad ultra-alta en el orden de 10^9 y una latencia extremadamente baja de alrededor de 0,1 ms, junto con la transferencia de datos en tiempo real con una fluctuación de retraso garantizada de microsegundos para las redes de control industrial. La industria 4.0 será producto de los desarrollos 5G.

IV.2. Requerimientos y KPIs.

De acuerdo a los escenarios mencionados se prevén los requerimientos mostrados en la tabla 4, para la operación después del 5G[23]:

KPIs	5G	6G
Tasa máxima de datos	20 Gbps	1 Tbps
Experiencia de usuario	DL: 100 Mbps UL: 50 Mbps	Niveles Gbps
Latencia en plano de usuario	eMBB <4 ms URLLC <0,5 ms	<0,1 ms
Eficiencia espectral máxima.	30 bps/Hz	60 bps/Hz
Eficiencia espectral experimentada	0,3 bps/Hz	3 bps/Hz
Ancho de banda máximo	1 GHz	100 GHz

Capacidad de tráfico por área.	10 Mbs/m ²	0,1-10 Gbps/m ³
Densidad de conexiones	10 ⁶ dispositivos/km ²	10 ⁷ dispositivos/km ²
Eficiencia energética	No especificado	1 Tb/J (10 a 10000 veces en comparación con 5g)
Latencia	1 ms	100 μs
fiabilidad	1*10 ⁻⁵	1*10 ⁻⁹
Jitter	No especificado	1 μs
Movilidad	500 km/h	1000 km/h
Positioning accuracy	Outdoor: 10m	Outdoor: sub-meter level
	Indoor: 3m	Indoor: centimeter level

Tabla 4: KPIs 6G comparativa con 5G[23].

- **Tasa máxima de datos** Después de 2030 surgirán nuevos servicios como la realidad extendida y las comunicaciones holográficas, que aportarán una mejor experiencia para el usuario. Sin embargo, estos nuevos servicios exigen una mayor velocidad de datos que los 20Gbps ofrecidos por 5G. Por ejemplo, en la comunicación holográfica, el tamaño de una foto holográfica es de 7~8GByte, lo que equivale a 56~64Gbit, si el video es de la misma definición, considerando 30 cuadros por segundo, la tasa correspondiente debe ser de 1,68~1,92Tbps, alcanzando el nivel de Tbps.
- **Tasa de datos de la experiencia del usuario:** Con la aplicación de la realidad extendida y las comunicaciones holográficas, toda la información de los sentidos (visión, audición, tacto, olfato, gusto) se integrará para proporcionar una experiencia verdaderamente inmersiva. para los usuarios individuales, se espera que la velocidad de datos aumente hasta por lo menos 10Gbps, y hasta 100Gbps.
- **Latencia:** La fusión entre el mundo “ciber” y el mundo físico, además de aplicaciones la conducción autónoma o la cirugía a distancia requieren interacciones con latencias extremadamente bajas (0,1-1ms) para superar los límites entre el entorno real y el espacio computacional.
- **Eficiencia espectral:** Se espera que la eficiencia espectral de 6G sea de 2 a 3 veces mayor que la de 5G apoyado en tecnologías como la AI, para el uso adaptativo del espectro.
- **Fiabilidad:** Se espera que los requisitos de fiabilidad de la red 6G sean específicos para cada caso de uso. Los servicios emergentes como el control industrial y la cirugía a distancia son los escenarios más estrictos de fiabilidad en los que sólo se permite un bit erróneo en mil millones de bits transmitidos.
- **Movilidad:** Con los transportes avanzados de ultra-alta velocidad se requieren servicios inalámbricos con calidad aceptable en escenarios con movilidad hasta de 1000Km/h.
- **Capacidad de tráfico:** La capacidad de tráfico en un área, se define como el producto de la densidad de dispositivos, el ancho de banda y la densidad espectral media. En 5G se

espera una capacidad de 10Mbps/m^2 en entornos eMBB. Para las redes 6G es necesario cambiar el concepto y mirar la red desde un punto de vista tridimensional dado que la densidad de dispositivos esperados crecerá por metro cubico (m^3), y además se dispondrán anchos de banda de hasta 10GHz en la banda de los THz.

- **Posicionamiento:** Se espera una mejora en la precisión del posicionamiento horizontal y vertical a niveles submétricos en escenarios outdoor y a precisiones centimétricas en indoor, pensando en el seguimiento de activos.

En cuanto al espectro seguramente incluirá mejoras en el uso del espectro actual del 5G (incluso hasta 71GHz planteado en el Rel-17) y nuevos rangos en sub-THz / THz Actualmente, se dispone de un ancho de banda agregado de hasta 18 GHz para las comunicaciones fijas en Europa en la banda de frecuencia 71-100 GHz, también hay bandas entre 95 GHz y 3 THz recientemente abierto por la Comisión Federal de Comunicaciones de EEUU (FCC) para uso experimental, para apoyar el desarrollo de bandas más altas, por lo que se puede esperar que las nuevas bandas operativas estén contenidas allí. [22]

IV.3. Nuevas numerologías

Para afrontar la operación en bandas altas de frecuencia, existen varios desafíos a nivel técnico dado que la eficiencia de los amplificadores de potencia (PA) y la linealidad disminuye con el aumento de la frecuencia, para contrarrestar este efecto esto se requiere una modulación más eficaz en términos de potencia que el esquema actual de la OFDM, una de las opciones principales es utilizar modulaciones de una sola portadora (SC, Single Carrier) [7].

Otro problema que tiene que ver con OFDM es el aumento del ruido de fase de los osciladores locales (LO) al aumentar la frecuencia de portadora, esto se puede aliviar aumentando los espacios entre portadoras, si se aumenta el SCS, también aumenta la tasa de símbolos y el ancho de banda para un tamaño de FFT determinado[8], además se gana robustez contra la ICI causada por el ruido de fase este aumento de SCS da origen a una nueva gama de numerologías para la forma de onda OFDM, que entre otras cosas aumentarán el número de slots y símbolos por trama pero que deben estar acompañadas de un rediseño en cuanto a la densidad de las señales de referencia dado que los tiempos de símbolos serán más cortos.

μ	Símbolos/slot	Slots/subframe	Slots/frame	Símbolos/frame	CP
5	14	32	320	448	Normal
6	14	64	640	896	Normal

Tabla 5: nuevas numerologías OFDM

De acuerdo a lo propuesto por el 3GPP se han realizado varios experimentos prácticos en escenarios indoor y outdoor. En [8] por ejemplo, se discuten resultados de sistemas operando a

90GHz. El objetivo está enfocado en analizar la forma de onda candidata para operar en sistemas Sub-THz entre las propuestas OFDM y SC-FDMA. En este experimento se recalca como primer comentario que el aumento del SCS es necesario para la operación en frecuencias del orden de los 90GHz independientemente de la forma de onda que se utilice y obtiene resultados que sugieren que una forma de onda SC-FDMA es más efectiva en términos de PA, por lo que la recomiendan para enlaces *uplink* y *downlink*.

V. Implementación

Para realizar este estudio se utilizó la herramienta 5G Toolbox de Matlab, esta herramienta permite hacer simulaciones a nivel de enlace y a nivel de sistema. Las simulaciones se hicieron utilizando las funciones de procesamiento para canales descendentes, lo cual permite caracterizar el rendimiento del canal físico PDSCH y el canal compartido DL-SCH, utilizando los modelos de canal TDL y CDL definidos por el 3GPP en [24]. el diagrama de bloques del sistema se muestra en la figura 8.

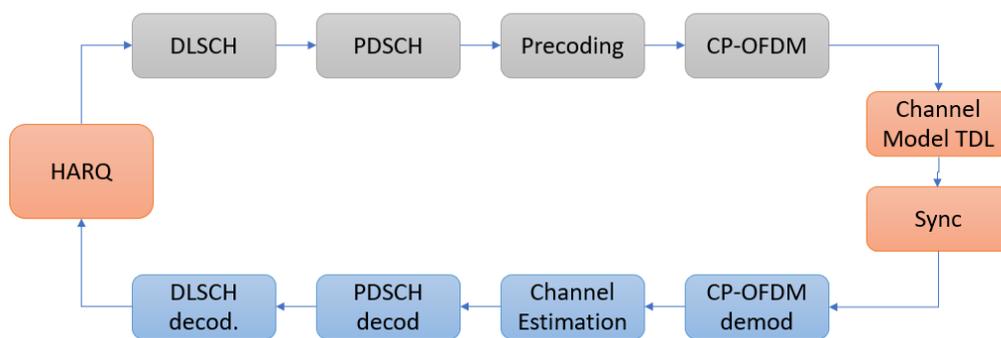


Fig. 8 Diagrama de bloques del sistema.

Como punto de partida se definieron las condiciones sobre las cuales se van a realizar las simulaciones, se eligió un enlace con línea de vista (LOS) entre el transmisor y el receptor. Para cada configuración se realiza un barrido en frecuencia desde 5GHz hasta 100GHz con pasos de 5GHz y se eliminó la retransmisión de datos del bloque HARQ debido a que esto mejoría los resultados en términos de throughput. Adicionalmente luego de varios ensayos se define utilizar un número de 20 frames de 10ms en cada punto SNR para suavizar las curvas de la tasa de error de bits (BER) y controlar los tiempos de simulación. Se realizaron simulaciones variando el valor de la SNR de acuerdo a la numerología utilizada.

Para la parte superior del diagrama de bloques de la figura 6 se define todo lo relacionado con la transmisión de la forma de onda OFDM, la entrada del modelo está compuesta por el bloque HARQ que como se indicó anteriormente no tendrá en cuenta retransmisión de bits erróneos y simplemente genera datos binarios aleatorios en cada transmisión. Se configuran los parámetros

para el gNodeB, los canales DL-SCH y PDSCH, incluidas las señales de referencia DM-RS y PT-RS, y se especifica el modelo de canal que se va a utilizar. Para este estudio se eligió modelo de canal TDL-D, se fijó el ancho de banda en número de RBs (12 subportadoras por RB) a 51 RBs para todos los escenarios y el número de antenas transmisoras y receptoras a 1 (sistema 1x1) no MIMO.

Para los pilotos DM-RS y PT-RS se configura la ubicación, longitud y la densidad de pilotos de acuerdo a la numerología, en este caso se seleccionó que el piloto estuviera ubicado en la posición dos del símbolo, los símbolos ocuparan una sola posición (single symbol) y que se distribuyeran de manera intercalada en el resource block, estos parámetros son propios de las funciones provistas por Matlab para la simulación del canal. Y finalmente el modelo de canal TDL-D elegido se configura con un delay spread de 100ns objetivo, aquí se configura la opción para hacer el barrido en frecuencia con distintas frecuencias de portadora. Con estos parámetros inicia el ciclo de procesamiento, para determinar el rendimiento del enlace en cada punto de SNR.

De acuerdo al escenario que se vaya a simular se eligen las características para el gNodeB y seguidamente con la información de la ubicación de los símbolos del canal PDSCH se calcula el tamaño del bloque de transporte TB. El módulo HARQ genera los datos de información con el tamaño calculado, como no se está retransmitiendo, se generan nuevos datos por cada SNR que va simulando.

la información es codificada a través del canal DL-SCH, con el *code rate* elegido y aplicando los códigos LDPC (*low density parity check*). El bloque de información codificada pasa por el canal PDSCH donde se generan los símbolos PDSCH de acuerdo al MCS que se haya elegido y se hace el mapeo de las señales DM-RS y PT-RS.

En el bloque CP-OFDM se modulan los símbolos que llegan de PDSCH y se genera la forma de onda que se va a transmitir. La forma de onda atraviesa el canal TDL que agrega pérdidas y retardos y luego se añade además a la señal ruido AWGN.

En el bloque de sincronización utiliza la forma de onda provista por el canal para hallar la componente multicamino más fuerte y así comenzar con el proceso de demodulación OFDM.

En la parte baja de la figura 6 se obtiene la matrix de precoding para el siguiente slot y se comienza a decodificar el canal PDSCH demapeando los pilotos y los símbolos PDSCH recuperados, junto con la estimación de ruido, son demodulados y decodificados por la para conseguir una estimación de las palabras de código recibidas.

Finalmente, el bloque es decodificado en el módulo DL-SCH decod donde se de información recibido junto con el bloque de errores CRC que servirán para calcular el rendimiento del canal y la tasa de errores BER.

En el programa se añadió una operación para realizar una comparación bit a bit y así calcular la *bit error rate* con una variable que va mostrando cuantos bits distintos hay en la transmisión de la SNR que se está evaluando y otra que lleva una sumatoria de los bits erróneos, para luego

compararlo con el número total de bits transmitidos y calcular la tasa de error. También para calcular el rendimiento a nivel del bloque de información completo se almacenan en una matriz los bloques que llegan sin errores y luego se comparan con el total de bloques transmitidos. Al finalizar la simulación se genera un archivo con extensión .mat que contiene los parámetros de la simulación y los resultados para realizar las gráficas y analizar el comportamiento del enlace.

- *Modificación del SCS.*

Los nuevos SCS están basados en la propuesta del release-16 escalando de acuerdo a (1). Para configurar las nuevas numerologías en el simulador, principalmente se modificaron las restricciones referentes a los valores del SCS, para permitir un espaciado de 480kHz y de 960kHz, se verificó que la forma de onda se generara correctamente en cuanto a modulación y mapeo de señales. Esta modificación afecta el número de muestras por trama, ancho de banda ocupado dado que se definieron 51 RBs y la longitud del símbolo OFDM con su CP correspondiente. Además, se debe tener en cuenta que la estimación del canal se hace de acuerdo al SCS y que las señales de sincronización SS también utilizan un espaciado de acuerdo a la numerología.

Los escenarios planteados pretenden validar el funcionamiento del enlace manteniendo la forma de onda y evaluando la respuesta con los patrones piloto utilizados por las numerologías del release 15. No se utilizarán técnicas MIMO que en la práctica son obligatorias para obtener rendimientos superiores a estas frecuencias de operación.

VI. Resultados

En este capítulo se presenta el análisis de los resultados generados luego de la implementación del sistema, el objetivo principal es proyectar la capacidad del sistema en función de la SNR. Las gráficas de respuesta se miden basados en la Tasa de error de bits (BER), cuando la BER es alta, hay más bits que llegan erróneos al receptor. En el peor de los casos, la tasa de error es del 50%, la mayoría de los sistemas de comunicación requieren una tasa de error de varios órdenes de magnitud inferior a ésta. Incluso una tasa de error del 1% se considera bastante alta[25]. Para el caso de este estudio se estableció como criterio de funcionalidad una BER de 10^{-3} , que indica que, de cada mil bits transmitidos, uno es erróneo. También para analizar el rendimiento del canal se estableció un criterio de funcionalidad de 90%.

- *Modelos de canal.*

El 3GPP define en su informe técnico TR 38.900[24] modelos de canal para las simulaciones a nivel de enlace para 5G para toda la gama de frecuencias de 0,5 a 100 GHz, el objetivo es ayudar a modelar y evaluar rendimientos de la capa física. Se indican dos modelos:

- Tapped Delay Line (TDL)
- Clustered Delay Line (CDL)

Estos canales admiten una señal con ancho de banda no mayor a de 2 GHz por lo que resultados por encima de este ancho de banda no serán válidos. Además de permitir escenarios de movilidad hasta 500 Km/h. existen cinco perfiles típicos para cada canal:

- CDL/TDL-A, CDL/TDL -B, y CDL/TDL -C, para sistemas sin línea de vista (NLOS)
- CDL/TDL-D y CDL/TDL-E, para sistemas con línea de vista (LOS)

Para el caso particular de este estudio se utilizará un modelo de canal TDL-D, los modelos TDL están especialmente diseñados para evaluaciones no MIMO e igualmente están definidos para un ancho de banda máximo de 2GHz y hasta una frecuencia central de 100GHz. cada modelo TDL puede escalarse para lograr a un *delay spread* deseado, el *delay spread*, es una medida de la diferencia de tiempo entre la llegada de la primera y la última componente multitrayecto de la señal transmitida. Para el objeto de este estudio se elige un *delay spread* de 100ns definido como un valor nominal en los rangos establecidos en TR 38.901.

- MCS

El Esquema de modulación y codificación MCS define cuantos bits útiles pueden ser transportados por resource element RE, básicamente se trata de buscar la mejor combinación entre code rate, que es la relación entre bits útiles y total de bits transmitidos, y la modulación, que define la cantidad de bits que puedo transportar en un RE.

Se utilizarán los MCS predefinidos por 3gpp en el ts 38.214 [26] Table 5.1.3.1-2 Para determinar el orden de modulación, la tasa de código y el tamaño del bloque o bloques de transporte en el enlace PDSCH.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos, se ha dividido la discusión en dos partes, una con el análisis del comportamiento del enlace utilizando la forma de onda y numerologías de acuerdo al Rel-15 y la segunda comparando con las dos numerologías soportadas por el simulador. En cada caso se irá describiendo el escenario planteado y comentando las figuras con los resultados.

VI.1 Resultados 5G

VI.1.1 Efecto por variación de SCS.

El primer grupo de resultados pretende mostrar el comportamiento del enlace PDSCH para el grupo de frecuencias de interés a medida que aumenta la numerología. Se analizará fijando un escenario con movilidad urbano (50Km/h) y un MCS 15. La idea es analizar hasta que frecuencias funciona la configuración elegida y el rendimiento alcanzado para cada una de las SNR simuladas.

La Fig.9 muestra el escenario planteado con SCS de 15, 60 y 240Khz, en primer lugar, se puede ver que con numerología $\mu = 0$, o lo que es lo mismo SCS 15Khz, el enlace trabaja hasta los 15GHz con una SNR mayor de 30dB a partir de ahí el BER comienza a empeorar a medida que se aumenta la frecuencia de portadora. Ahora aumentado el espaciamiento SCS 60kHz, $\mu=2$, en la configuración propuesta el canal aumenta el rango de frecuencias en las que tiene respuesta correcta. Hasta 60GHz el sistema tiene una respuesta con un BER de 10^{-3} , a frecuencias más altas, el enlace no responde correctamente, aunque también se notan mejores BERs que en el caso de $\mu = 0$. Además, la respuesta a frecuencias bajas se va acercando en términos de SNR, se puede apreciar que, por ejemplo, la diferencia entre las respuestas del enlace a 10GHz y a 15 GHz, que en $\mu = 0$ era de más de 10dB se reduce a menos de 1dB. Seguimos aumentando la numerología y con $\mu=4$ el efecto se intensifica aún más, todo el grupo de frecuencias analizado responde correctamente y con SNRs más cercanas, si bien las frecuencias bajas responden con SNRs más elevados, se tiene una diferencia de poco más de 1dB entre la respuesta a 5GHz y a 100GHz.

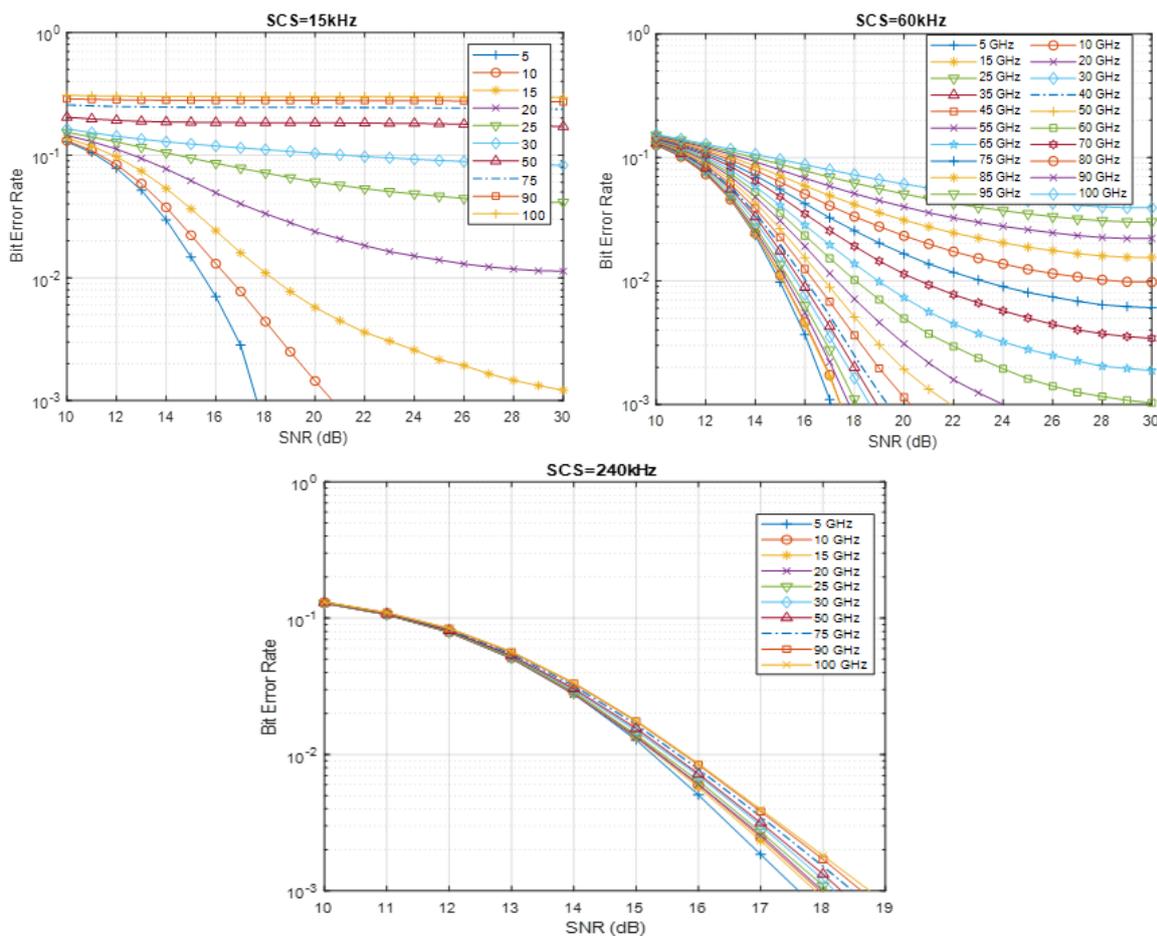


Fig. 9 Variación de SCS con MCS fijo.

Para analizar el efecto estudiado en términos de rendimiento, la Fig.10, muestra el porcentaje alcanzado por el enlace, respecto a la capacidad máxima posible, para cada una de las

numerologías anteriormente utilizadas. Haciendo la relación con los resultados de la Fig. 9, vemos que para la $\mu = 0$ solamente se obtiene un rendimiento por encima del 90% de la capacidad con frecuencias de portadoras por debajo de los 15GHz, y de igual forma se tiene que para $\mu = 2$, se amplía el rango de frecuencias donde se pueden obtener buenos rendimientos. La última parte de la figura muestra que con un SCS más alto tenemos que el uso del canal se va tornando menos sensible al aumento de la frecuencia, alcanzando el 100% de rendimiento para todas las frecuencias simuladas y además para valores de SNR cercanos entre sí.

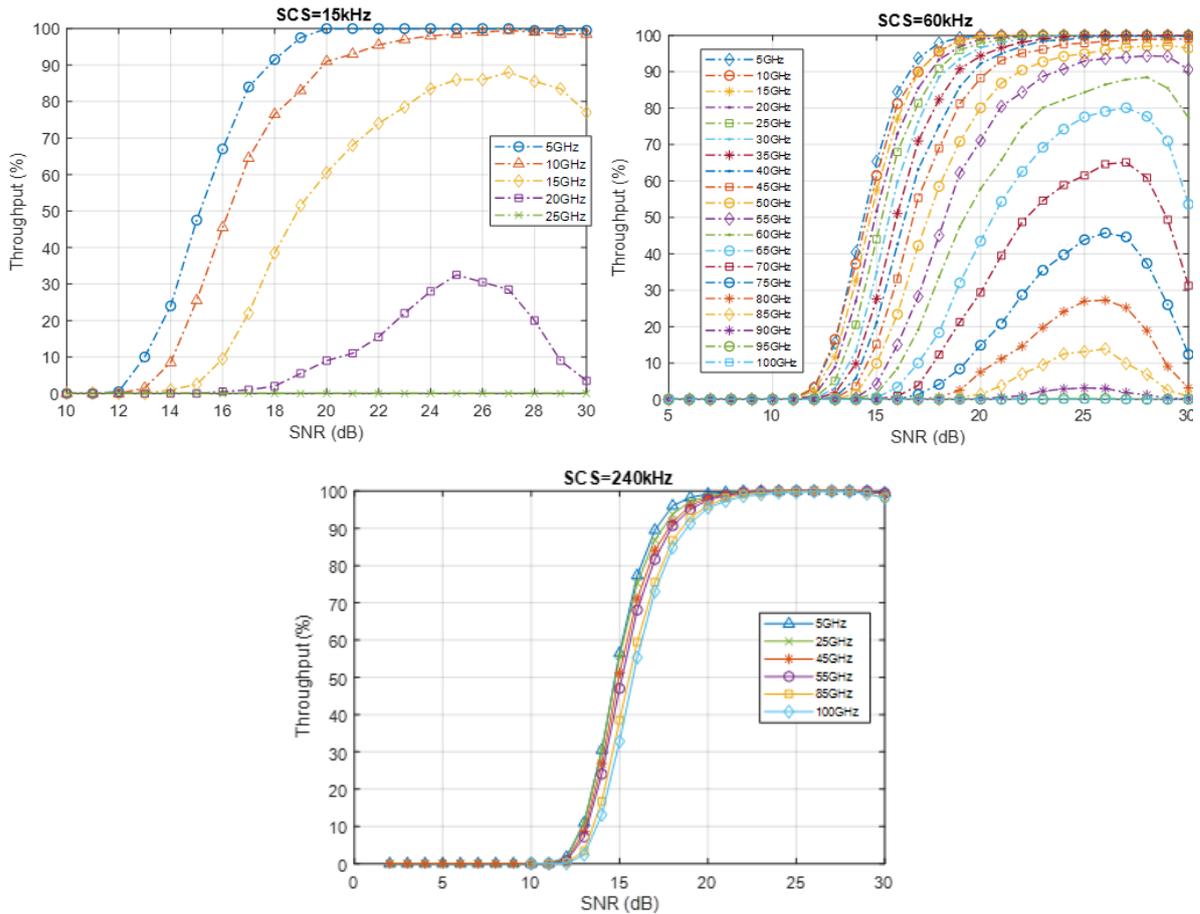


Fig. 10 Respuesta en frecuencia.

Si bien para este escenario se tienen rendimientos del 100% en cada una de las numerologías analizadas; el aumento de la numerología, como se ha mencionado, afecta directamente la capacidad del enlace, ya que a más SCS el ancho de banda disponible es más grande, debido a que se está transmitiendo el mismo número de RBs, como se puede ver en la Fig 11. Si se analiza la respuesta del enlace a 10GHz, donde la $u=0$ alcanza el máximo de capacidad, la diferencia entre la numerología 0 y la numerología 4 es de más de 90Mbps para este esquema de modulación y la diferencia entre numerologías contiguas, por ejemplo 3 y 4, va doblando en capacidad a la inmediatamente anterior.

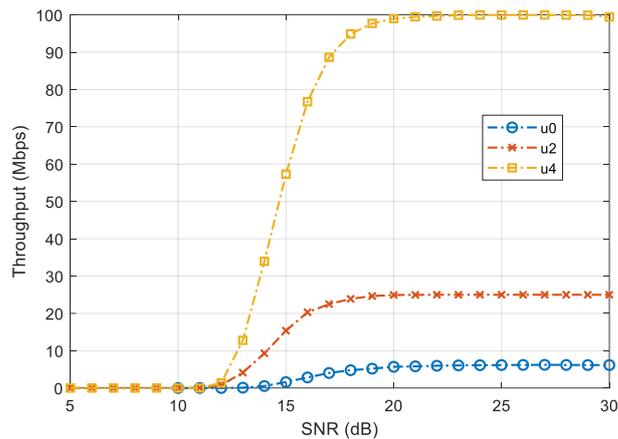


Fig. 11 Diferencias de *throughput* en Mbps para diferentes numerologías

La Fig. 12, resume el efecto que se ha estado comentando; en términos generales y dependiendo del escenario que se presente, cada numerología tiene un límite en frecuencia para el cual el enlace funciona correctamente en términos de BER y rendimiento. Para el caso particular de un MCS15 y velocidad 50Km/h se tiene que para operar en el rango de frecuencias sub-THz las numerologías más bajas no proveen el rendimiento necesario en el escenario analizado, además se muestra que el enlace tiende a responder mejor con numerologías más altas a altas frecuencias y también que la respuesta entre las frecuencias de portadora más bajas no tiene una diferencia en términos de SNR con las más altas.

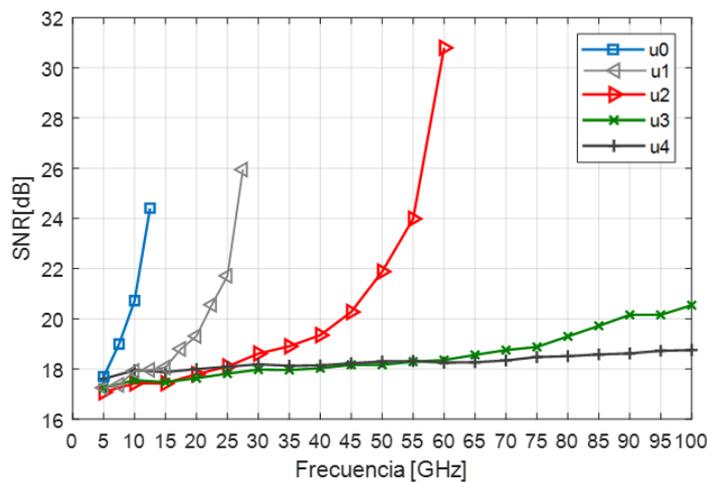


Fig. 12 Limites funcionales de cada numerología para MCS15 y velocidad 50Km/h.

VI.1.2 Escenarios con movilidad.

Para este apartado se contemplan 3 escenarios; el primero con baja movilidad 5Kmh, simulando entornos indoor o *pedestrian* (velocidad de peatón); luego subiendo a 50Km/h, para representar escenarios promedio de velocidad en zonas urbanas; y finalmente con velocidad de 100Kmh, para hacer un acercamiento a un escenario de Autopista (*highway*). Nuevamente se mantiene un MCS 15 fijo para todas las simulaciones y lo que se pretende es analizar la sensibilidad del enlace a las pérdidas y retardos introducidos por el modelo de canal TDL para cada una de las numerologías definidas en el Rel-15.

Para hacer analizar el efecto que producen las variaciones de velocidad sobre la operación del enlace operando en las frecuencias de interés, primero simulamos con $\mu = 0$ y observamos en la parte izquierda de la Fig. 13, que en escenarios con baja movilidad se tiene una respuesta estable, en términos de la BER, para todo el rango de frecuencias, en cambio, a medida que se aumenta la velocidad las frecuencias más altas dejan de cumplir la condición de operación y solamente se tiene respuesta por debajo de los 15GHz, como se había visto en la Fig. 9 para el escenario a 50Km/h y para valores cercanos a los 5GHz cuando aumentamos la velocidad en el caso *highway*. Del lado derecho se aprecia lo que esto significa en términos de *throughput* para el enlace operando a 5GHz, dado que es la única frecuencia de las simuladas donde podemos comparar los 3 escenarios. Se puede ver que el enlace alcanza su máximo rendimiento con SNRs menores a velocidades más bajas y que ocurre el efecto contrario al aumentar la velocidad.

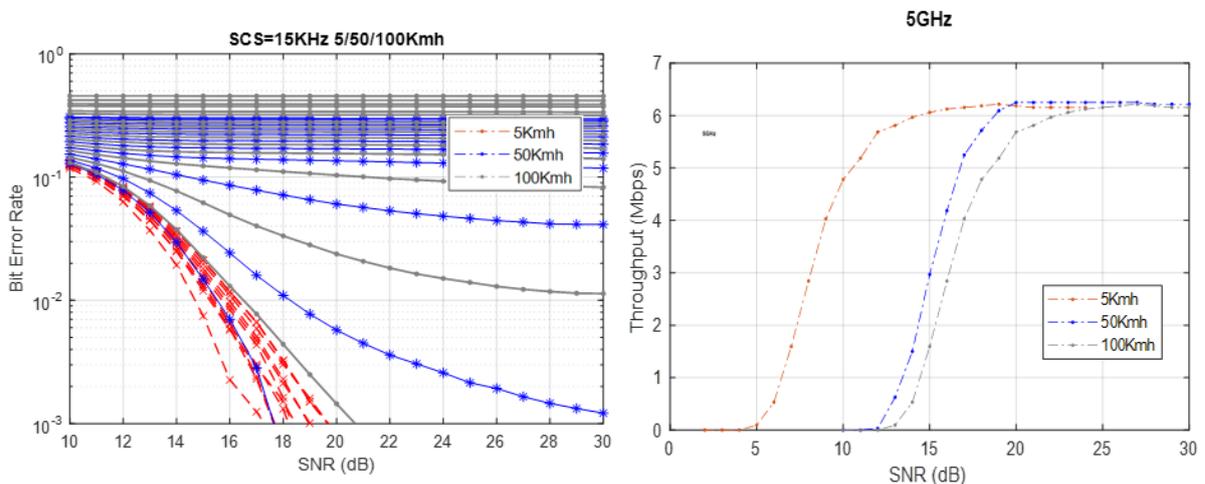


Fig. 13 SCS = 15KHz operando a distintas velocidades y throughput a 5GHz.

A medida que se aumenta el SCS, el enlace parece responder mejor a los cambios de velocidad, esto debido a que se disminuye la pérdida de ortogonalidad entre las portadoras que puede generar el efecto Doppler, al tener más espacio entre ellas. En la Fig.114 se muestra el efecto que produce hacer variaciones de velocidad con numerología 4, se evidencia que el enlace responde mejor a los aumentos de velocidad en todas las frecuencias analizadas, pero que en escenarios como

highway(100Kmh) la velocidad poco a poco va degradando la respuesta sobre todo para operaciones a frecuencias más altas. Lo anterior se evidencia en la parte derecha de la figura 14, donde se hace la misma comparación que se hizo con numerología 0 pero esta vez para una frecuencia de operación de 100GHz, se puede ver que para 100Km/h el enlace alcanza un rendimiento del 90% solo hasta una SNR = 25dB.

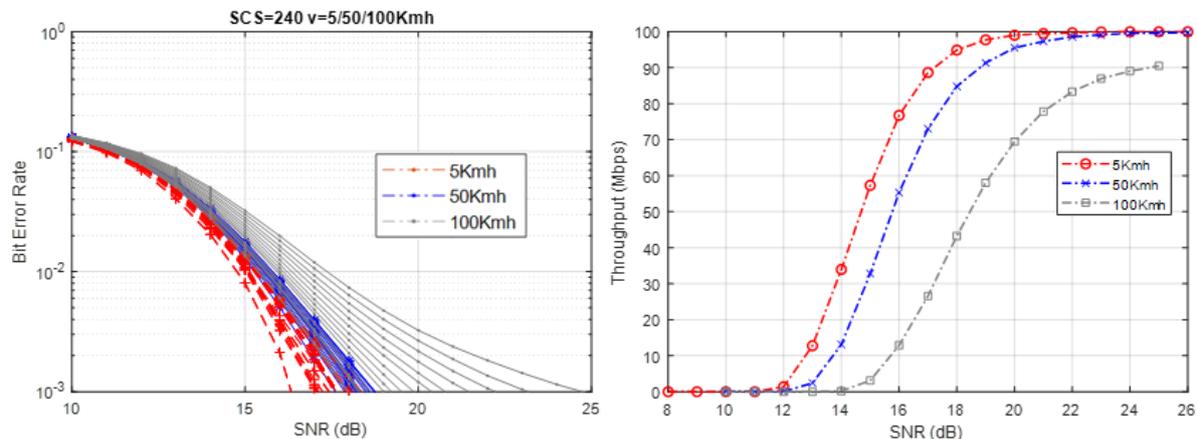


Fig. 14 SCS=240KHz con variaciones de velocidad y MCS fijo | Rendimiento del canal a 100GHz

VI.1.3 Variaciones del MCS

Las simulaciones para este apartado se organizan de acuerdo a los escenarios vistos en la sección V.1.2. Primero se considera un escenario de baja movilidad. Evaluando con $\mu = 0$; en Fig. 15 se muestra el efecto que el MSC produce en el la respuesta del enlace. Se puede ver que la curva del BER se va moviendo hacia la derecha a medida que aumentamos el esquema, respondiendo a SNRs más altas a medida que va aumentando. También se puede ver para esta numerología existe un punto en MCS 20 que para las frecuencias más altas aumenta el valor de la BER dejando de ser funcionales según el criterio establecido. Para evaluar la capacidad máxima que alcanzaba el enlace se tomó una frecuencia de portadora de 60GHz, para poder comparar la operación en frecuencias de *mmwaves*, como se esperaba al aumentar el esquema de modulación aumenta el ancho de banda que se puede ocupar dado que hay más bits en la transmisión dado que se utilizan modulaciones más altas.

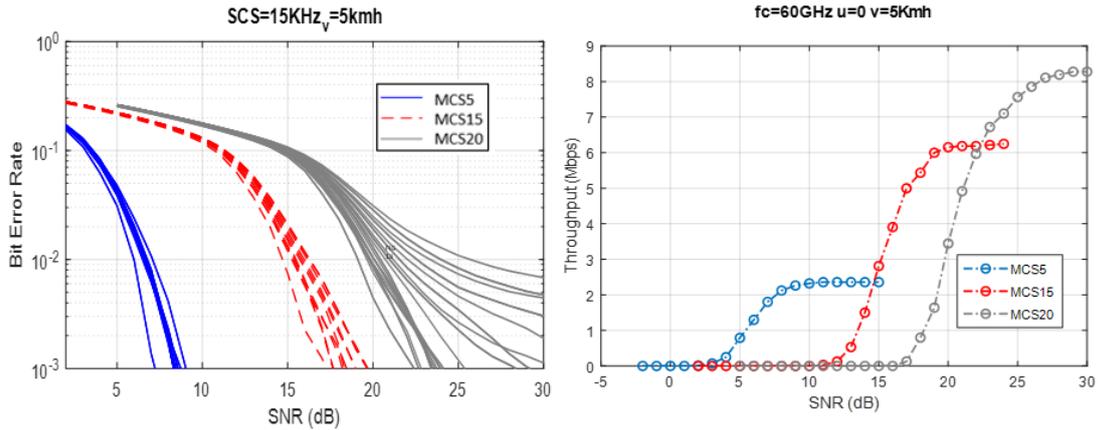


Fig. 15 Variaciones del esquema de modulación y codificación.

Siguiendo con los resultados en escenarios *pedestrian*, se evidenció que, para las simulaciones realizadas, al establecer MCSs bajos el espaciamiento entre subportadoras no afecta significativamente la respuesta del canal con las variaciones en frecuencia ya que tiene respuestas a SNRs de menos de 1dB entre frecuencias bajas y altas. También se ve que los aumentos en el SCS no generan mucha diferencia en cuanto a la SNR. En Fig. 16 se muestra la BER para cada una de las numerologías release-15 operando con MCS 5 y velocidad 5Kmh, donde se evidencia que las respuestas están en ordenes de magnitud similares en todos los SCS analizados.

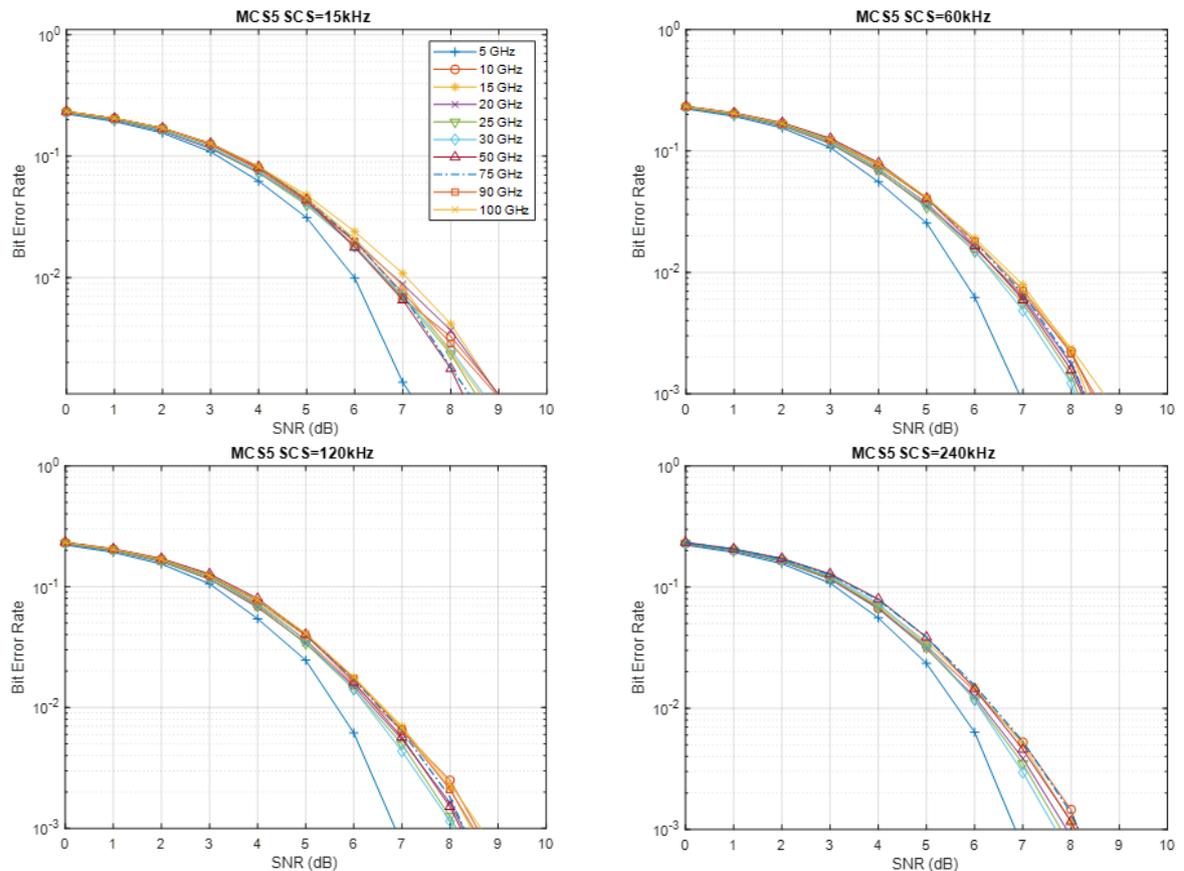


Fig. 16 Respuesta del enlace PDSCH a distintas numerologías con MCS 5 y baja movilidad.

En cuanto a la capacidad del enlace, en los resultados obtenidos se sigue la tendencia mostrada en Fig. 9 donde a medida que se aumenta el SCS se va duplicando el ancho de banda, nuevamente se debe aclarar que esto es debido a que se definió un ancho de banda de 51RBs para hacer las simulaciones.

En este mismo escenario de baja movilidad se evaluó la respuesta del sistema utilizando la combinación MCS 20 (Fig.17), lo que se obtuvo fue que al aumentar la numerología de $\mu = 0$ hasta $\mu = 4$, las frecuencias más altas mejoraban en términos de BER, y que en general se estabiliza la respuesta del enlace a medida que aumenta la numerología, es decir que la respuesta a frecuencias altas y bajas tiene valores similares de BER; sin embargo, existe un punto donde empieza a desmejorar la respuesta en términos de SNR para todas las frecuencias, en este caso se puede apreciar que después de la numerología 2 el enlace comienza nuevamente a alejarse de la SNR 20 y por lo visto con SCS = 240Khz hay una tendencia a que incluso las frecuencias bajas dejen de responder si se sigue aumentando la numerología, esto se comprobará en la sección V.2.

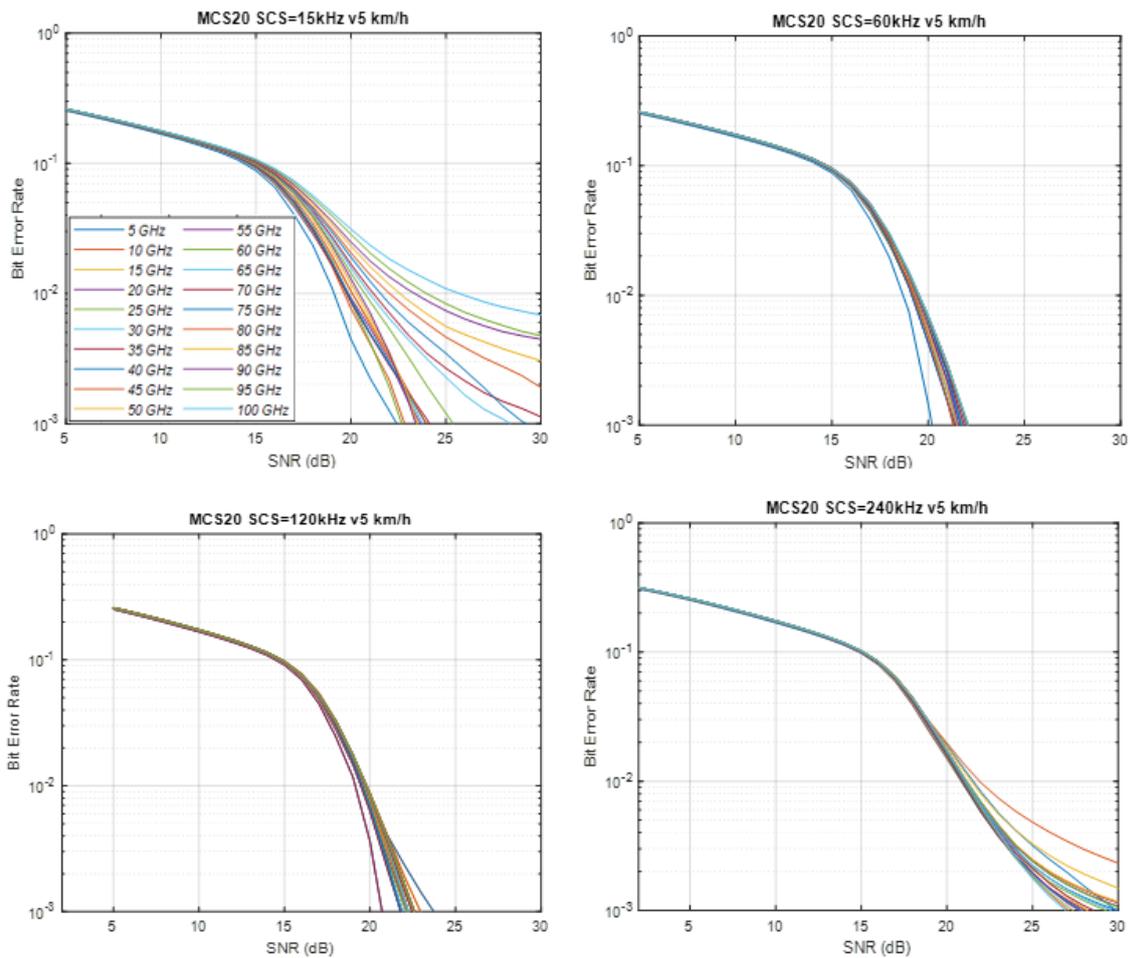


Fig. 17 Respuesta del enlace PDSCH a distintas numerologías con MCS 20 y baja movilidad.

Como se vio en la sección V.1.2, un aumento en la velocidad hace que la respuesta del enlace a numerologías bajas se degrade para altas frecuencias y que, al aumentar la numerología, se tenga mejor respuesta frente al efecto Doppler, por lo que para este estudio los análisis en escenarios con movilidad solo serán válidos para numerologías altas. La siguiente figura (Fig. 16) muestra la respuesta del enlace aumentando la velocidad a 50Kmh, con numerología 4 y MCS 5, 15 y 20. Se puede ver que un MCS 15 se comporta mejor en términos de SNR en todo el rango de frecuencias simuladas que el enlace con MCS 20, para el cual las curvas de la BER no alcanzan a bajar cuando se trabaja a frecuencias del grupo FR2.

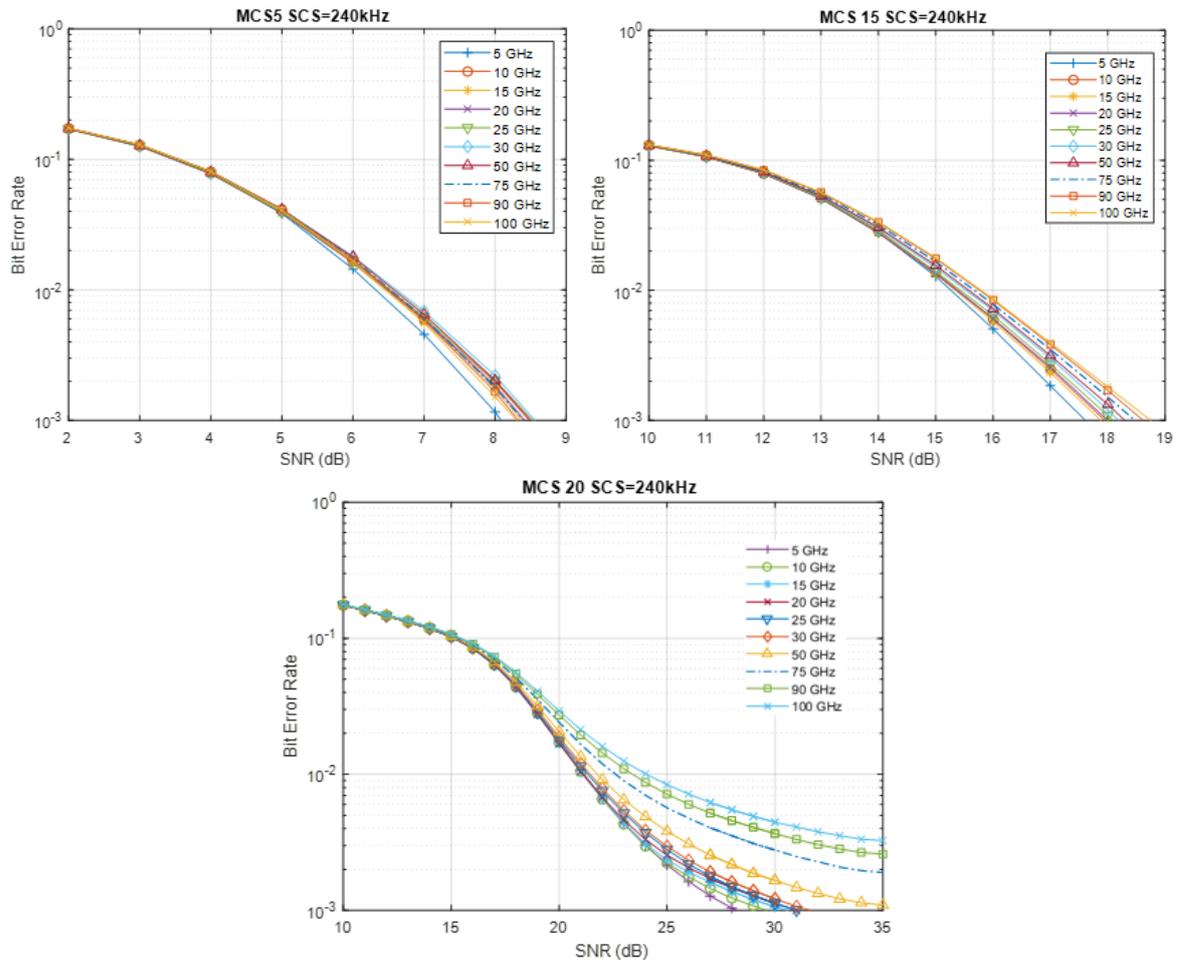


Fig. 18 Respuesta del enlace PDSCH a variaciones del MCS con $\mu = 4$ y velocidad 50kmh

VI.2 Resultados B5G

En esta sección se muestran los resultados obtenidos al aumentar el *Subcarrier Spacing* a 480KHz y 960Kkhz, se analizan los escenarios de movilidad como con las numerologías Rel-15 y el efecto que producen los esquemas de modulación de orden superior en frecuencias de la banda Sub-THz.

VI.2.1 Comparativa con numerologías Rel-15

De los resultados anteriormente mostrados en las secciones V.1.2. y V.1.3, se deduce que las numerologías altas serán especialmente útiles para escenarios que involucren movilidad y operaciones a altas frecuencias, dada la resistencia que suponen frente al efecto Doppler. En cuanto al MCS y de acuerdo a los resultados mostrados en la Fig. 19, se puede ver que, al igual que ocurría en Fig. 15, en la medida que aumenta la modulación la respuesta del enlace va subiendo en SNR, en esta ocasión se evalúan las nuevas numerologías en un escenario urbano (50Km/h) y se puede ver que los MCS de orden superior no cumplen con los requerimientos de BER establecidos para la operación adecuada del enlace. También se puede ver que para SCS = 960KHz, lo equivalente a $\mu = 6$, la configuración utilizada para hacer las simulaciones no permite la operación en con esquemas como MCS 15.

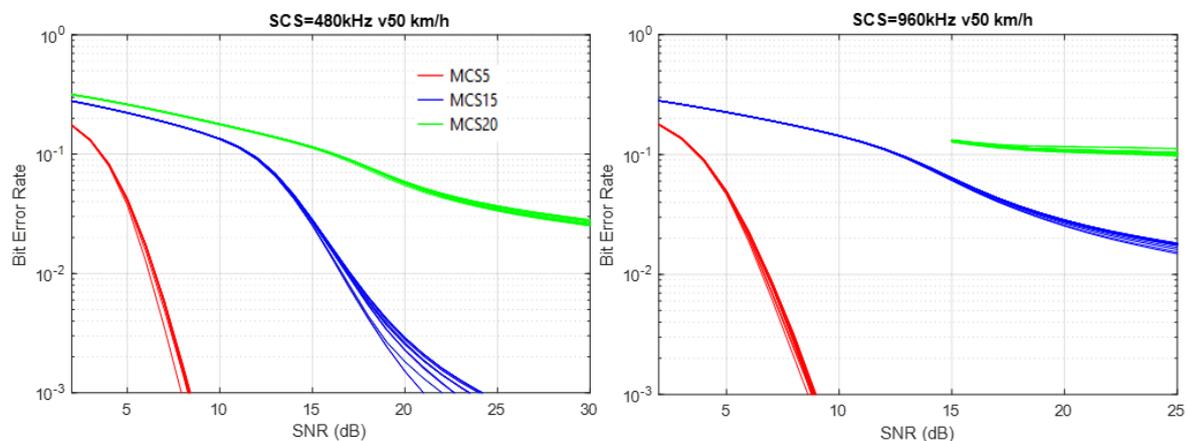


Fig. 19 Respuesta de numerologías 5 y 6 a variaciones del MCS

Es de esperarse que en escenarios estáticos o de baja movilidad, y con MCS bajo como el que brinda los resultados mostrados en Fig. 16, las nuevas numerologías sean completamente funcionales en términos de BER, para confirmar esto se presentan los resultados en Fig. 20, donde se puede ver que las dos nuevas numerologías simuladas, cumplen con el criterio de BER para todo el rango de frecuencias y con SNRs bajas. La similitud de la respuesta del canal entre $\mu = 0$ y $\mu = 6$ en términos de SNRs supone que para estos escenarios se puede aprovechar el ancho de banda ofrecido por numerologías más altas. En este caso se utilizó un MCS 5, y movilidad a 5 Km/h.

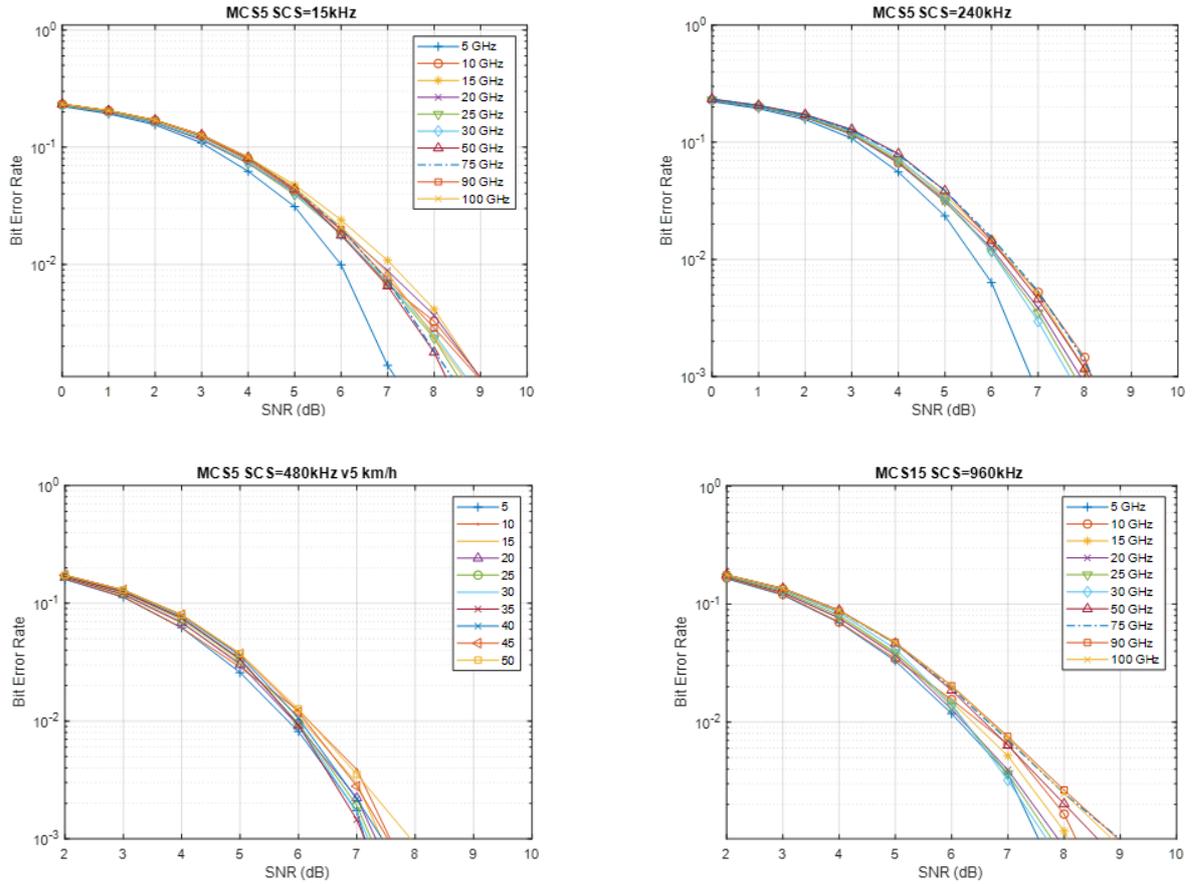


Fig. 20 Comparativa nuevas numerologías con MC5 en escenarios pedestrian.

Al momento de subir la velocidad con esquemas de modulación bajo, se evidencia en la Fig. 21 que nuevamente numerologías mas altas presentan una mejor respuesta en sistemas dinámicos. En términos de SNR aparentemente no hay mayor diferencia entre las respuestas del canal operando en todo el rango de frecuencias Sub-THz. Se podría inferir que en estos escenarios se puede seguir aumentando el espaciamento entre las subportadoras y aprovechar los grandes anchos de banda que se encuentran en el espectro de interés, aclarando que arreglos de antena y técnicas como beamforming son obligatorios para que el enlace funcione en este rango de frecuencias y se puedan obtener las velocidades de transmisión objetivo.

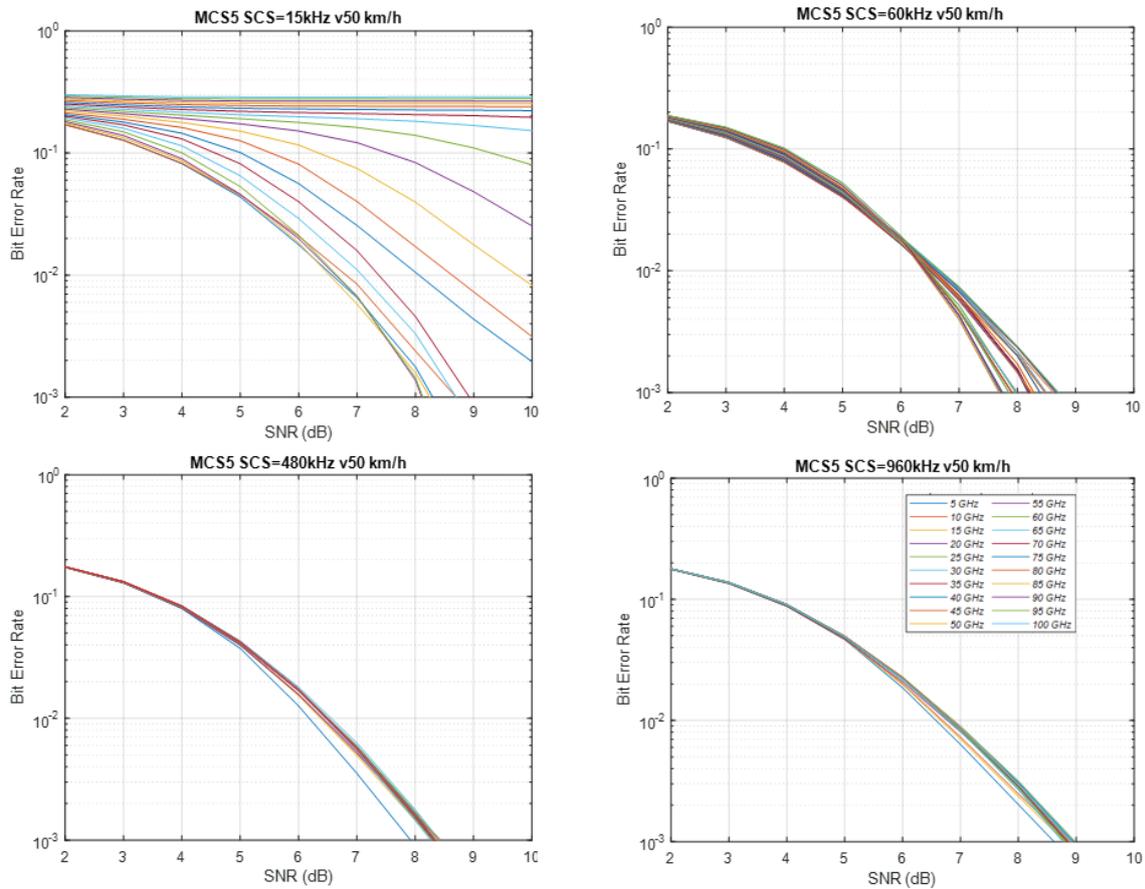


Fig. 21 Comparativa de numerologías con MCS bajo en entorno urbano

Como se mencionó aumentar la velocidad parece un escenario adecuado para explotar el funcionamiento de las nuevas numerologías, que de acuerdo a lo mostrado en Fig. 21 la respuesta de SCS más grandes se puede apreciar mejor trabajando con esquemas de modulación y codificación bajos, y se evidencia además una independencia de la respuesta del enlace a las variaciones de frecuencia. Respecto a la capacidad, se debe recalcar que la importancia de las nuevas numerologías no está en el hecho de obtener más anchos de banda, ya que dependerá de la capacidad disponible de acuerdo a la frecuencia de trabajo. Y dado que para este caso de estudio que se definió un ancho de banda fijo en términos de *Resource Blocks* se puede apreciar el efecto de la figura 22.

En la figura 22 se puede apreciar el throughput alcanzado en las simulaciones del escenario MCS bajo y velocidad 50Kmh, como punto importante a resaltar es el efecto que se presenta para los valores de la numerología 6, donde se ve que después de alcanzar un 100% de rendimiento existen valores de SNR para los que el sistema deja de funcionar.

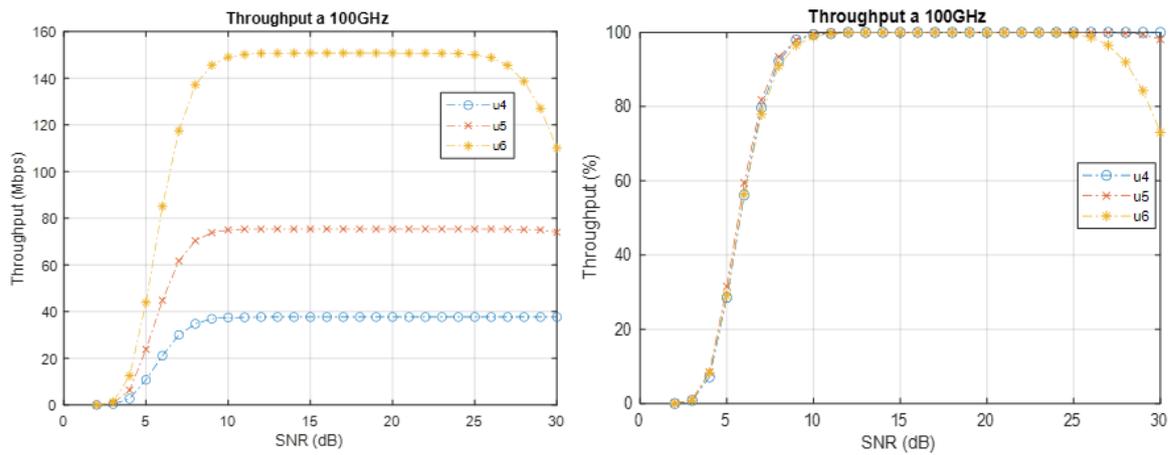


Fig. 22 Throughput a 100GHz.

Al aumentar el esquema de modulación se obtiene el mismo comportamiento que con numerologías Rel-15, la BER comienza a subir sobre todo para frecuencias más altas, es aquí donde supondría una mejoría utilizar esquemas de acceso con modulaciones de una sola portadora como SC-FDMA que por tener mejor eficiencia en términos de potencia soportaría mayores esquemas de modulación y podría obtener mejores rendimientos en la tasa de errores y capacidad del enlace.

En la siguiente figura (Fig. 23) se muestran resultados a 100Kmh utilizando las nuevas numerologías, el efecto encontrado evidencia que aumentar la velocidad con un esquema de modulación 64QAM produce que para SCS se degrade la respuesta en términos de BER de acuerdo al criterio elegido. Aun así, se logra obtener una respuesta que cumple con el criterio de capacidad del 90% para numerología 5 (Fig.24).

Nuevamente las diferencias entre la operación en frecuencias FR1 y FR2, vistas en numerologías altas, parecen tener una cierta independencia de la respuesta del enlace a las variaciones de frecuencias en términos de BER, pero al obtener este comportamiento va apareciendo un *error floor* que, dependiendo del MCS (como en la Fig. 23) y la SNR (como en la Fig 22.), estará por encima o por debajo del criterio de los $10e-3$.

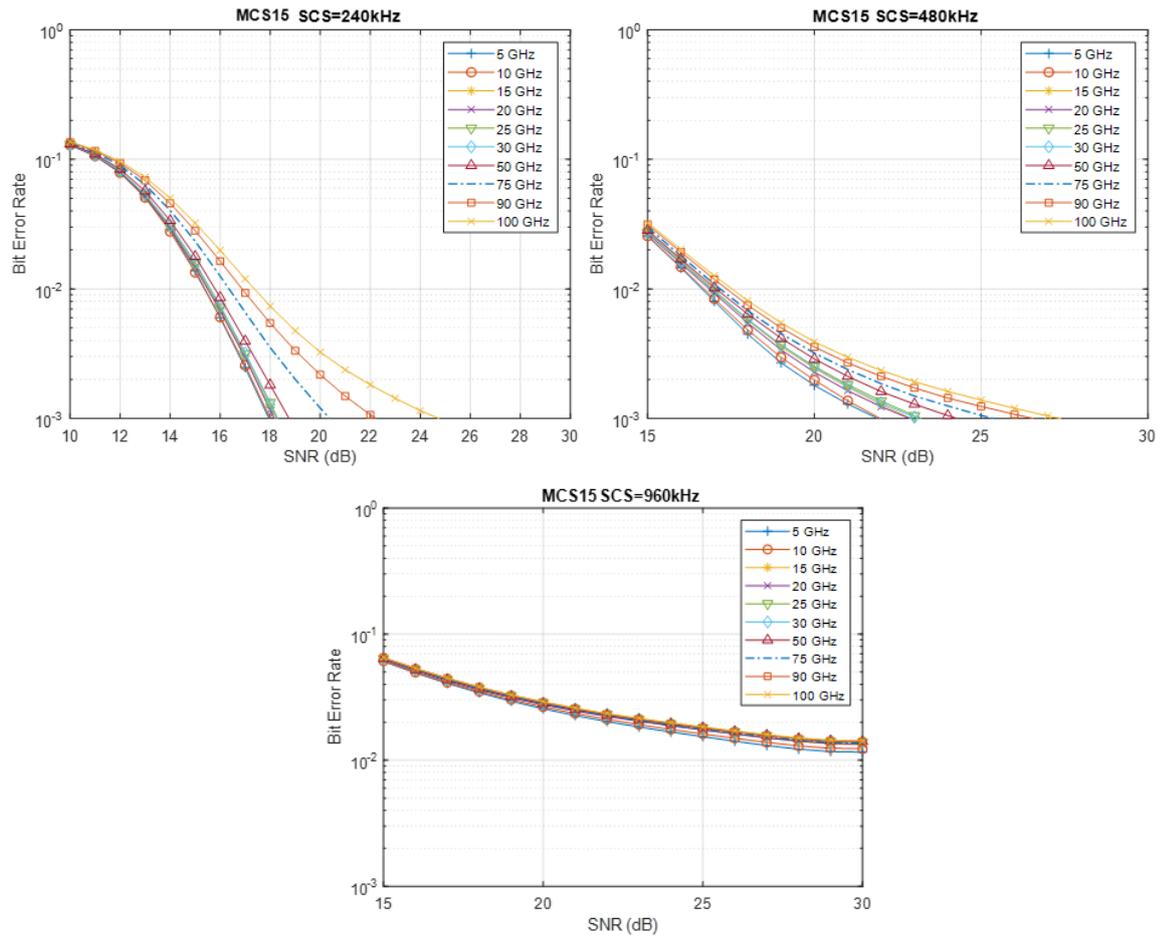


Fig. 23 Respuesta del enlace PDSCH a distintos SCS escenario highway.

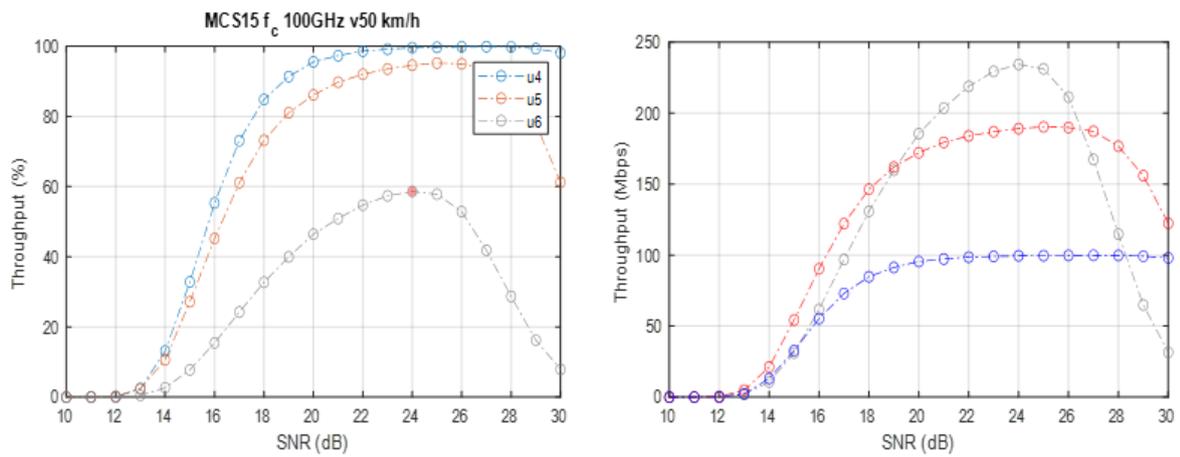


Fig. 24 Throughput del enlace PDSCH a distintos SCS escenario highway.

VII. Conclusiones y comentarios

En este Trabajo final de Master se ha configurado un entorno simulado para estudiar el funcionamiento de las numerologías OFDM definidas por el Rel-15 y una extensión de dos nuevas numerologías operando en frecuencias sub-THz. Se utilizaron diferentes escenarios relacionados con la movilidad y el esquema de modulación y codificación para hacer el análisis de la respuesta del canal PDSCH en todo el rango de frecuencias para los que los modelos de canal TDL están definidos (de 5 a 100GHz). Se espera que para implementaciones Beyond 5G se utilicen estos SCS y aún más altos para operar en rangos de frecuencia sub-THz.

Se confirman los beneficios en términos de ancho de banda que pueden aportar nuevas numerologías utilizando la forma de onda actual OFDM, mediante el aumento del SCS en escenarios donde el esquema de modulación sea bajo (16QAM). Lo que quiere decir que una extensión de la capa física OFDM tal cual está definida en Rel-15 es factible para ser utilizada en la banda de frecuencias sub-THz en estos escenarios puntuales, más no se pudo extender el uso de la forma de onda para obtener rendimientos aceptables con esquemas de modulación más altos. Se requieren modificaciones en la capa física a nivel de señales p.e. PT-RS para contrarrestar los problemas generados por el PN al operar en esta parte del espectro.

Como se mencionó en el desarrollo de este trabajo la importancia de aumentar la numerología no es únicamente una mejora en la capacidad, como se observó SCS de 120KHz y 240KHz son igualmente operativos en el rango de frecuencias analizado (5 – 100GHz) y con *Carrier Aggregation CA* podrían alcanzar *throughputs* de ordenes de magnitud cercanos a los provistos por las nuevas numerologías que se analizaron.

Con esquemas de modulación 16QAM como el MCS 5 utilizado en las simulaciones, la operación en bandas milimétricas no es muy sensible al aumento en el SCS, se podrían contemplar SCS aún más grandes para este tipo de MCS y contemplar el uso de este rango de frecuencias no solo para aprovechar el ancho de banda que proveen sino para descongestionar el espectro por debajo de los 6GHz.

El aumento en el SCS, es necesario como solución para escenarios pedestrian, urbanos o de alta movilidad como los estudiados, pero debe estar acompañado de técnicas como mMIMO y beamforming para tener rendimientos diferencialmente superiores a lo propuesto en Rel-15.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por sus bendiciones en mi vida, por nutrir mi espíritu con la fe necesaria para enfrentar todos los retos.

A la universitat politécnica de valència y su cuerpo docente por brindarme la oportunidad hacer parte de este máster y compartir sus conocimientos conmigo, especialmente a Manuel por su compromiso, paciencia y dedicación en el desarrollo de este trabajo.

A mi amada Marcia, mi compañera en todo y para siempre.

Y finalmente a mi familia, Pacho, Mayita, Mami Pei, Nani, Mary y Miwi; mi mayor logro siempre será ser parte de ustedes.

Gracias totales.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. M. da Silva and J. Guerreiro, "On the 5G and beyond," *Appl. Sci.*, vol. 10, no. 20, pp. 1–12, 2020.
- [2] D. N. D. Tripathi and D. J. H. Reed, "5G Evolution : On the Path to 6G White Paper," pp. 1–40, 2020.
- [3] R. Bai, V. Chandra, R. Richardson, and P. P. Liu, "Next generation mobile wireless networks: 5G cellular infrastructure," *J. Technol. Manag. Appl. Eng.*, vol. 36, no. 3, 2020.
- [4] F. HILLEBRAND, "the creation of standards for global mobile communication : gsm and umts standardization from 1982 to 2000," no. October, pp. 24–33, 2013.
- [5] 3GPP, "About 3GPP." [Online]. Available: <https://www.3gpp.org/about-3gpp/about-3gpp>.
- [6] 3GPP, "Release 17." [Online]. Available: <https://www.3gpp.org/release-17>.
- [7] A. Ghosh, A. Maeder, M. Baker, and D. Chandramouli, "5G Evolution: A View on 5G Cellular Technology beyond 3GPP Release 15," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 127639–127651, 2019.
- [8] O. Tervo, T. Levanen, K. Pajukoski, J. Hulkkonen, P. Wainio, and M. Valkama, "5G new radio evolution towards sub-THz communications," *2nd 6G Wirel. Summit 2020 Gain Edge 6G Era, 6G SUMMIT 2020*, 2020.
- [9] ITU, "Concepción de las IMT – Marco y objetivos generales del futuro desarrollo de las IMT para 2020," *Recom. UIT-R M.2083-0*, vol. 0, p. 22, 2015.
- [10] W. Lambrechts and S. Sinha, *Millimeter-wave Integrated Technologies in the Era of the Fourth Industrial Revolution*, vol. 679. 2021.
- [11] ETSI, "TS 138 521-2 - V15.3.0 - 5G; NR; User Equipment (UE) conformance specification; Radio transmission and reception; Part 2: Range 2 standalone (3GPP TS 38.521-2 version 15.3.0 Release 15)," *3GPP TS 38.101-1 version 15.2.0 Release 15*, vol. 15.3.0, pp. 1–72, 2018.
- [12] F. Pujol, C. Manero, B. Carle, and S. Remis, "5G Observatory Quarterly Report 7 Up to March 2020," no. september, pp. 1–117, 2020.
- [13] "Qualcom, 5G Spectrum Access." [Online]. Available: https://www.itu.int/dms_pub/itu-

r/oth/0a/0E/R0A0E0000C60001PDFE.pdf.

- [14] “5G Spectrum.” [Online]. Available: <https://gsacom.com/5g-spectrum/>.
- [15] T. Specification, G. Radio, and A. Network, “3gpp ts 38.211,” vol. 0, no. Release 15, 2017.
- [16] M. C. Enablers and W. Systems, “Deliverable D3.2 Air Interface,” 2019.
- [17] A. Yazar, B. Peköz, and H. Arslan, “Fundamentals of Multi-Numerology 5G New Radio,” 2018.
- [18] “5G NR Reference Signals (DMRS, PTRS,SRS and CSI-RS).” [Online]. Available: <http://www.techplayon.com/5g-nr-reference-signals-dmrs-ptssrs-and-csi-rs/>.
- [19] T. Specification, G. Radio, and A. Network, “3GPP TR 38.807 V1.0.0, ‘Study on NR beyond 52.6 GHz,’,” no. Rel. 16, 2019.
- [20] V. Syrjala, T. Levanen, T. Ihalainen, and M. Valkama, “Pilot Allocation and Computationally Efficient Non-Iterative Estimation of Phase Noise in OFDM,” *IEEE Wirel. Commun. Lett.*, vol. 8, no. 2, 2019.
- [21] T. Nakamura, “5G Evolution and 6G,” no. January, pp. 1–1, 2020.
- [22] N. Rajatheva *et al.*, *White paper on broadband connectivity in 6G*, no. 10. 2020.
- [23] G. Liu *et al.*, “Vision, requirements and network architecture of 6G mobile network beyond 2030,” *China Commun.*, vol. 17, no. 9, pp. 92–104, 2020.
- [24] ETSI, “TR 138 900 - V14.2.0 - LTE; 5G; Study on channel model for frequency spectrum above 6 GHz (3GPP TR 38.900 version 14.2.0 Release 14),” vol. 0, 2017.
- [25] I. Ali, “Bit-Error-Rate (BER) Simulation Using MATLAB,” *Int. J. Eng. Res. Appl. www.ijera.com*, vol. 3, pp. 706–711.
- [26] T. Specification, G. Radio, and A. Network, “3gpp ts 38.214,” vol. 0, no. Release 15, 2017.