

# REDES MÓVILES 5G: EVOLUCIÓN NEW RADIO

CRISTINA GÓMEZ LIBERAL

Máster Universitario en Ingeniería de Telecomunicación

Tutor

Dr. AURORA ANDÚJAR y Dr. JAUME ANGUERA

ENERO 2021





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



## AGRADECIMIENTOS

A mi familia, por animarme continuamente a seguir formándome tanto a nivel personal como académicamente.

A mi pareja, por su ayuda y apoyo incondicionales y por alentarme durante todo el proceso.



## FICHA DEL TRABAJO FINAL

<b>Título del trabajo:</b>	<i>Redes Móviles 5G: Evolución New Radio</i>
<b>Nombre del autor:</b>	<i>Cristina Gómez Liberal</i>
<b>Nombre del consultor/a:</b>	<i>Aurora Andújar, Jaume Anguera</i>
<b>Nombre del PRA:</b>	<i>Germán Cobo</i>
<b>Fecha de entrega (mm/aaaa):</b>	01/2021
<b>Titulación:</b>	<i>Máster Universitario en Ingeniería de Telecomunicaciones</i>
<b>Área del Trabajo Final:</b>	<i>Tecnologías de Antenas</i>
<b>Idioma del trabajo:</b>	<i>Castellano</i>
<b>Palabras clave</b>	<i>5G, New Radio Antenas Activas</i>

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

La creciente demanda de tráfico y nuevos servicios en los últimos años ha supuesto un reto para el sector de las telecomunicaciones que ha sido capaz de adaptarse y desarrollar diferentes sistemas que dieran respuesta a los requisitos planteados en cada momento.

Esta continua evolución llega a su punto álgido con el diseño de la nueva red de acceso radio 5G (5G New Radio) que promete solventar las demandas tanto de los usuarios como de la red a medio y largo plazo. Entre sus características destacan principalmente el incremento en el ancho de banda, la considerable reducción de los tiempos de latencia y la conexión simultánea de un número masivo de dispositivos. Asimismo, se plantea la división de la red en diferentes redes lógicas con el fin de adecuarlas a las distintas necesidades y casos de uso que puedan surgir.

En el presente proyecto se realiza un análisis exhaustivo de las necesidades, requerimientos y características del diseño de la red de última generación 5G, así como de su arquitectura, técnicas y algoritmos más representativos que la convierten en la solución final a los problemas que han empezado a surgir en los sistemas tecnológicos previos. Igualmente, se efectúa un estudio tanto de los procedimientos ya existentes y listos para su implantación como de las mejoras y capacidades que vendrán a futuro.

**Abstract (in English, 250 words or less):**

The growth of the Mobile traffic demand and the new services in recent years have been a challenge for the telecommunications sector, which has been able to adapt and develop different systems that would respond to the requirements set out at all times.

This continuous evolution reaches its peak with the design of the new 5G radio access network (5G New Radio) that promises to meet the demands of both users and the network in the medium and long term. Its main features include the increase in bandwidth, the considerable reduction in latency times and the simultaneous connection of a massive number of devices. Likewise, the division of the network into different logical networks is proposed in order to adapt them to the different needs and use cases that may arise.

This project carries out an exhaustive analysis of the needs, requirements and characteristics of the design for the next generation 5G network, as well as its architecture, techniques and most representative algorithms that make it the final solution for the problems that have begun to arise in previous technological systems. Likewise, a study of the already existing procedures is carried out and ready for their implementation and also the improvements and capacities that will come in the future.



# ÍNDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>13</b>
1.1. CONTEXTO Y JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO	13
1.2. OBJETIVOS	13
1.3. ENFOQUE Y MÉTODO SEGUIDO	14
1.4. PLANIFICACIÓN DEL TRABAJO	15
1.5. DESCRIPCIÓN DEL RESTO DE CAPÍTULOS DE LA MEMORIA	16
<b>2. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SISTEMA</b>	<b>17</b>
2.1. EVOLUCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS DE ACCESO MÓVIL RADIO	17
2.1.1. REDES 2G, 3G Y 4G	18
2.1.2. RED 5G	24
2.2. ESCENARIOS	38
2.3. NETWORK SLICING	44
2.4. DYNAMIC SPECTRUM SHARING	45
<b>3. ANTENAS</b>	<b>50</b>
3.1. PUERTOS DE ANTENAS	50
3.2. BEAMFORMING	53
3.2.1. MIMO	61
3.2.2. PROPAGACIÓN FRECUENCIAS	66
3.2.3. MASSIVE MIMO	68
3.2.4. MOVILIDAD DEL HAZ	79
3.2.5. ANTENAS NATIVAS NEW RADIO: 8TRX, 16TRX, 32TRX Y 64TRX	83
<b>4. CONCLUSIONES</b>	<b>88</b>
<b>5. GLOSARIO</b>	<b>90</b>
<b>6. BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>94</b>

# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

ILUSTRACIÓN 1: EVOLUCIÓN DE LA CAPACIDAD DE DATOS EN LOS DISTINTOS SISTEMAS	18
ILUSTRACIÓN 2: ARQUITECTURA DE LA RED GSM	19
ILUSTRACIÓN 3: SOFT-HANDOVER	20
ILUSTRACIÓN 4: NÚCLEO DE RED 2G Y 3G	21
ILUSTRACIÓN 5: ARQUITECTURA DE RED LTE	22
ILUSTRACIÓN 6: REPARTO DE RB EN MULTIPLEXACIÓN OFDMA	23
ILUSTRACIÓN 7: CALENDARIO INICIAL 5G 3GPP	25
ILUSTRACIÓN 8: ACTUALIZACIÓN DEL CALENDARIO RELEASE16 3GPP	26
ILUSTRACIÓN 9: CALENDARIO INICIAL RELEASE17 3GPP	27
ILUSTRACIÓN 10: ACTUALIZACIÓN DEL CALENDARIO RELEASE17 3GPP	27
ILUSTRACIÓN 11: ARQUITECTURA DE LA RED 5G O NEW RADIO	28
ILUSTRACIÓN 12: TIPOS DE ARQUITECTURAS: NSA Y SA	33
ILUSTRACIÓN 13: DESVENTAJAS DEL MODO NSA	35
ILUSTRACIÓN 14: VOZ E 5G MODO NSA	35
ILUSTRACIÓN 15: VOZ EN 5G MODO SA	37
ILUSTRACIÓN 16: VOZ EN 5G MODO SA VOZ NATIVA	38
ILUSTRACIÓN 17: ITU VISION FOR IMT-2020 AND BEYOND	39
ILUSTRACIÓN 18: NUEVOS ESCENARIOS DE USO DE 5G	40
ILUSTRACIÓN 19: NB-IOT Y CAT-M EN CELDA LTE	42
ILUSTRACIÓN 20: EXTENSIÓN DE COBERTURA NB-IOT Y CAT-M	42
ILUSTRACIÓN 21: NETWORK SLICING	44
ILUSTRACIÓN 22: ESQUEMA DSS	45
ILUSTRACIÓN 23: ALTERNATIVAS IMPLEMENTACIÓN: SUBTRAMA MBSFN	46
ILUSTRACIÓN 24: ALTERNATIVAS DE IMPLEMENTACIÓN: RATE MATCHING	47
ILUSTRACIÓN 25: VENTAJAS DEL DSS	48
ILUSTRACIÓN 26: VENTAJAS DEL DSS: ALTA CAPACIDAD 5G SA	49
ILUSTRACIÓN 27: VENTAJAS DEL DSS: MAYOR COBERTURA 5G 3500 TDD	49
ILUSTRACIÓN 28: ELEMENTOS TÍPICOS DE UNA ESTACIÓN BASE	51
ILUSTRACIÓN 29: PUERTOS DE UNA ANTENA PASIVA 2L4H	52
ILUSTRACIÓN 30: BEAMFORMING EN ANTENAS PASIVAS	54
ILUSTRACIÓN 31: BEAMFORMING EN ANTENAS MASSIVE MIMO	55
ILUSTRACIÓN 32: BEAM TRACKING ACCESS UE PRACH	60
ILUSTRACIÓN 33: BEAM TRACKING	60
ILUSTRACIÓN 34: GANANCIA EN DIVERSIDAD ESPACIAL	62
ILUSTRACIÓN 35: GANANCIA DE ARRAY	62
ILUSTRACIÓN 36: GANANCIA EN SUPRESIÓN DE INTERFERENCIAS	63
ILUSTRACIÓN 37: IDENTIFICACIÓN DE LAYERS POR SEÑALES PILOTO	64
ILUSTRACIÓN 38: BEAMFORMING POR LAYER: SU-MIMO	64
ILUSTRACIÓN 39: MU-MIMO: EXPLOTANDO LA DIVERSIDAD ESPACIAL	66
ILUSTRACIÓN 40: BANDAS DE FRECUENCIA DEL 5G	67
ILUSTRACIÓN 41: BANDAS DE FRECUENCIA EN LOS PRINCIPALES PAÍSES	67
ILUSTRACIÓN 42: IMPLEMENTACIÓN DE ANTENAS CON MIMO MASIVO	68
ILUSTRACIÓN 43: IMPLEMENTACIÓN DE MIMO MASIVO SEGÚN LA BANDA DE TRABAJO	69
ILUSTRACIÓN 44: FÓRMULA PARA CALCULAR EL ORDEN DEL MIMO EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE ANTENAS	71
ILUSTRACIÓN 45: SINGLE USER MIMO	72
ILUSTRACIÓN 46: MULTI USER MIMO / MASSIVE MIMO	73
ILUSTRACIÓN 47: DIVERSIDAD ESPACIAL EN MASSIVE MIMO	74
ILUSTRACIÓN 48: IMPLEMENTACIÓN DE MASSIVE MIMO	76
ILUSTRACIÓN 49: IMPLEMENTACIÓN DE MIMO MASIVO PARA FRECUENCIAS MENORES DE 6 GHZ	78

ILUSTRACIÓN 50: IMPLEMENTACIÓN DE MIMO MASIVO PARA FRECUENCIAS MAYORES DE 6 GHZ	78
ILUSTRACIÓN 51: FUNCIONAMIENTO DE HACES EN MIMO MASIVO	80
ILUSTRACIÓN 52: CAMBIO ADAPTATIVO DE SRS A CSI-RS	83
ILUSTRACIÓN 53: CONFIGURACIONES DE ANTENA PARA 5G	84
ILUSTRACIÓN 54: COMPARATIVA DE ANTENAS PARA THROUGHPUT EN EDIFICIOS ALTOS	86

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1: PLANIFICACIÓN DEL TRABAJO	15
TABLA 2: DIAGRAMA DE GANTT	15
TABLA 3: COMPARACIÓN ENTRE LTE Y NR RELEASE 15	25
TABLA 4: PRINCIPALES DIFERENCIAS ENTRE TECNOLOGÍAS	29
TABLA 5: SCS PARA FRECUENCIAS 1	31
TABLA 6: SCS PARA FRECUENCIAS 2	31
TABLA 7: FORMATOS DE SLOT PARA 5G	32
TABLA 8: AJUSTE DE COBERTURA EN FUNCIÓN DEL ESCENARIO	57
TABLA 9: TÉCNICAS MULTIANTENA EN CANALES NR	79



# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. CONTEXTO Y JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO

A lo largo de los años, las diferentes tecnologías de la red móvil se han ido adaptando y desarrollando para satisfacer las necesidades y requerimientos que marcaba el mercado, consiguiendo a través de las distintas generaciones cumplir con las expectativas puestas en ellas.

La evolución exponencial de las redes de acceso móvil y la creciente demanda de servicios y calidad por parte de los usuarios ha desencadenado el diseño de una red nueva y centralizada que se adapta a los requisitos y aspiraciones de los clientes, capaz de soportar la demanda de tráfico prevista para los próximos años. Es, bajo este marco, donde aparece la nueva red de acceso 5G New Radio con el firme propósito de conseguir la reducción de los tiempos de latencia, aumentar el número de dispositivos conectados simultáneamente a la red y ofrecer un gran ancho de banda.

Con estos tres pilares en mente, se empieza a trabajar en una arquitectura nueva que en los primeros años vaya de la mano del 4G, superando ampliamente las bondades de este sistema tecnológico, para, en un futuro, imponerse como la red principal de la que todos los usuarios puedan disfrutar independientemente de los servicios que deseen consumir.

Para lograr este objetivo, se definen nuevas bandas de frecuencia que permitan disfrutar de mayor ancho de banda y ofrezcan mayor capacidad, además de ampliar el uso de bandas ya existentes gracias a técnicas como el *Dynamic Spectrum Sharing* y a dividir la red en distintas redes lógicas en función del tipo de servicios mediante la implementación del *Network Slicing*.

Asimismo, el desarrollo de la nueva red 5G New Radio es posible debido al avance de técnicas como el *Massive MIMO*, donde se instala un número muy elevado de antenas en el extremo transmisor en comparación con la cantidad de antenas existentes en el lado receptor, y el *Beamforming*, donde, a través de la creación y conformado de haces apuntados, se consigue llegar mejor a los usuarios. Mediante la práctica de estas dos técnicas se logra aumentar extensamente tanto la capacidad como la ganancia de todo el sistema.

En este trabajo se ofrece un estudio detallado de la nueva red 5G New Radio para comprender su funcionamiento, sus principales diferencias con respecto a las tecnologías anteriores y las ventajas que supone su implantación para las comunicaciones móviles.

## 1.2. OBJETIVOS

Los objetivos del trabajo son los que se mencionan a continuación:

- Investigación sobre la nueva tecnología New Radio.
- Descripción del sistema y arquitectura New Radio comparándolo con su sistema predecesor, el LTE, y seguimiento de la evolución de su estandarización.
- Análisis de los requerimientos para construir una red 5G.

- Análisis y descripción de las arquitecturas de implantación posibles en 5G y sus diferencias.
- Evaluación de los escenarios posibles en función del tipo de servicio a ofrecer.
- Descripción del concepto de *Network Slicing*, cómo se aplica y cómo afecta a los servicios que se pueden ofrecer en New Radio.
- Descripción del concepto *Dynamic Spectrum Sharing*, análisis sobre su implementación y ventajas que presenta.
- Investigación, análisis y descripción de las nuevas antenas activas, nativas para 5G. Comparativa sobre su diseño e implementación con respecto a las antenas pasivas.
- Descripción de la técnica de conformado de haz que se aplica en el nuevo sistema 5G.
- Descripción y análisis sobre la aplicación del MIMO de acuerdo con su tipo de implementación: *Single User MIMO*, *Multi User MIMO* y *Massive MIMO*.

### 1.3. ENFOQUE Y MÉTODO SEGUIDO

La metodología que se ha seguido en la elaboración de este proyecto ha consistido primero, en un análisis del estado del arte, teniendo en cuenta el estado actual en el que se encuentran las redes de acceso radio, centradas sobre todo en la situación de España, y las necesidades que se desean cubrir a medio y largo plazo con la implantación y desarrollo del 5G New Radio. Para ello, en los capítulos posteriores se expone una evolución de los estándares y de las técnicas empleadas para conseguir la completa implementación del 5G.

Aunque en una fase inicial del proyecto, se planteó la recopilación de datos en paralelo con la elaboración de la memoria para lograr alcanzar hitos de forma continua, finalmente se vio que este proceso no era viable con la realidad del día a día puesto que, por un lado, no se podía obtener una imagen global del trabajo y, principalmente, porque había que acudir a cursos y ponencias con fechas ya concretadas y a partir de ahí analizar qué información era extraíble para el proyecto.

Una primera fase del trabajo se ha centrado en la recolección de artículos, con su posterior clasificación y ordenación para conseguir finalmente una obtención de los datos importantes.

Por otro lado, gran parte de la información que se presenta en este proyecto ha sido obtenida gracias a cursos y conferencias impartidos por los principales suministradores para sus operadores esenciales, como es el caso de Telefónica. Empresas tecnológicas líderes en el mercado y desarrollo del 5G, como son Ericsson, Nokia y Huawei. Y protagonistas de primera categoría en la elaboración de la estandarización actual que se está llevando a cabo en el 3GPP. Por tanto, su mención en la bibliografía no puede estar referida a datos de acceso y dominio público puesto que la información presenta cierto índice de sensibilidad.

Una vez recopilada, clasificada y ordenada toda la información relevante, y con una imagen global de todo el conjunto y del diseño, se ha pasado a la elaboración de la memoria donde se explican las técnicas, algoritmos y bondades principales que presenta la implantación de una red móvil 5G. La memoria también se centra en detalle en el proceso de construcción de las antenas activas y la implementación del *Massive*

MIMO puesto que, estos dos conceptos son los más relevantes y suponen las características por excelencia del 5G New Radio.

Por último, después del análisis descrito en la memoria, se ha elaborado un proceso de síntesis donde se han obtenido una serie de conclusiones que recogen las ideas principales de este proyecto.

## 1.4. PLANIFICACIÓN DEL TRABAJO

En este apartado se detalla la planificación seguida de acuerdo con el cronograma. Para la elaboración del presente documento tras fijar el tema y el alcance de este, se ha generado una tabla del proceso seguido con su correspondiente diagrama de Gantt con la planificación acordada y los hitos alcanzados.

Nº	ACTIVIDAD	DURACIÓN	PRECEDENTE	FECHA INICIO	FECHA FIN
<b>PEC 1</b>		<b>18 días</b>	-	<b>17/09/20</b>	<b>05/10/20</b>
1	Análisis global del alcance	5 días	-	17/09/20	21/09/20
2	Diseño de la memoria y metodología aplicada	6 días	1	22/09/20	28/09/20
3	Estudio de la red 5G	7 días	2	29/09/20	05/10/20
<b>PEC 2</b>		<b>27 días</b>	<b>PEC 1</b>	<b>06/10/20</b>	<b>02/11/20</b>
4	Asistencia a cursos y conferencias	60 días	2	05/10/20	03/12/20
5	Recopilación de información y bibliografía	64 días	4	05/10/20	07/12/20
6	Análisis de técnicas y algoritmos	18 días	5	15/10/20	02/11/20
<b>PEC 3</b>		<b>34 días</b>	<b>PEC 2</b>	<b>03/11/20</b>	<b>07/12/20</b>
7	Descripción del 5G y beamforming	10 días	6	03/11/20	13/11/20
8	Comparativa de artículos, suministradores y cursos	7 días	5	14/11/20	20/11/20
9	Clasificación de la información	7 días	8	21/11/20	27/11/20
10	Análisis y descripción de Antenas Activas y Massive MIMO	10 días	9	27/11/20	07/12/20
<b>PEC 4</b>		<b>31 días</b>	<b>PEC 3</b>	<b>08/12/20</b>	<b>08/01/21</b>
11	Redacción de la memoria	101 días	1	22/09/20	01/01/21
12	Revisión y corrección de la memoria	7 días	11	01/01/21	08/01/21
<b>DEFENSA DEL TFM</b>			<b>PEC 4</b>	<b>08/01/21</b>	<b>18/01/21</b>
13	Ensayo y presentación del TFM	10 días	12	08/01/21	18/01/21

Tabla 1: Planificación del trabajo

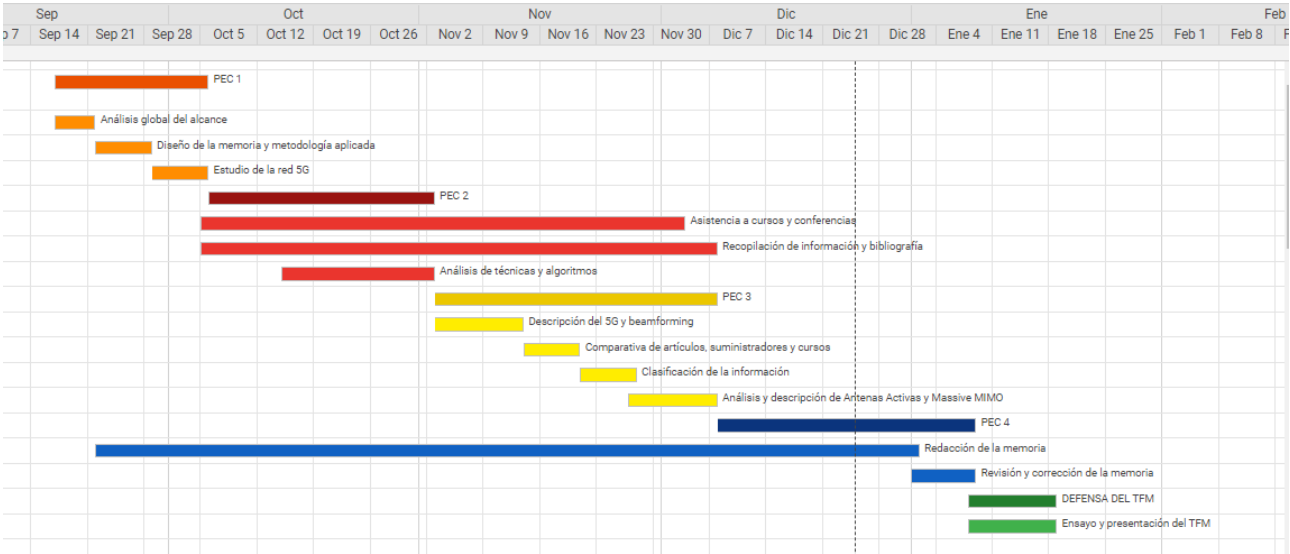


Tabla 2: Diagrama de Gantt



## 1.5. DESCRIPCIÓN DEL RESTO DE CAPÍTULOS DE LA MEMORIA

La memoria está dividida en 4 capítulos principales:

En el capítulo primero, se realiza una introducción del proyecto donde se detalla su justificación y los objetivos que se pretenden alcanzar con la elaboración de este trabajo. También, se describe la metodología empleada para su elaboración y el proceso de planificación que se ha ido siguiendo de acuerdo con el marco de fechas en que está realizado.

En el segundo capítulo se realiza un resumen de la evolución que han seguido las distintas redes con sus características principales hasta llegar finalmente a la creación de la red 5G New Radio. Además, se detallan las posibles arquitecturas que se pueden implementar para el 5G y los escenarios para los que tiene aplicaciones de uso. Por último, se realiza un análisis de los conceptos de *Network Slicing* y del *Dynamic Spectrum Sharing* y su importancia en la implementación del 5G.

El tercer capítulo se centra en el diseño de las antenas. Se realiza un estudio de la evolución de las antenas *legacy* implantadas hasta el LTE y las diferencias que presentan con respecto a las nuevas antenas activas, nativas del 5G. En este capítulo también se describen las técnicas empleadas en la implementación del 5G, como el conformado y movilidad del haz, característica imprescindible para esta nueva red, del MIMO y su evolución hasta poder emplear técnicas de *Massive MIMO* para tecnología New Radio y de las principales bandas de trabajo.

Y finalmente, en el cuarto capítulo se recogen las conclusiones adquiridas tras la elaboración del proyecto, así como las mejoras que se plantean a futuro y posibles casos de uso para el futuro desarrollo.

## 2. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SISTEMA

Debido al aumento de servicios y usuarios de la red móvil, la tecnología radio ha tenido que evolucionar rápidamente para poder soportar la alta demanda dando respuesta a las necesidades, requisitos y evolucionando para garantizar una calidad de servicio a la altura de las expectativas marcadas en el mercado de las telecomunicaciones.

Al principio, las nuevas generaciones se referían a cambios significativos en las tecnologías y métodos subyacentes con el objetivo de proporcionar comunicaciones más fiables y eficientes, por ejemplo, los métodos de acceso han evolucionado de TDMA a CDMA y más tarde a OFDMA. La nueva tecnología de acceso radio 3GPP para 5G se denomina *New Radio* y está basada en OFDMA. [1]

En las tecnologías móviles anteriores el servicio principal siempre ha sido la voz, aunque hubiera otros servicios disponibles. Poco a poco se fueron agregando nuevas prestaciones: los mensajes de texto en 2G, las videollamadas en 3G, la conectividad de datos en 4G. El 5G pretende realizar más cambios importantes en los servicios con un amplio abanico de requisitos. Esta nueva red es capaz de proporcionar capacidades que van desde la banda ancha móvil de alta velocidad hasta las comunicaciones ultra fiables de baja latencia. [2]

En este capítulo se verá en detalle la evolución de la tecnología desde sus inicios, por qué surge la necesidad de una nueva generación de acceso radio, así como su arquitectura y funcionamiento.

### 2.1. EVOLUCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS DE ACCESO MÓVIL RADIO

Al igual que ocurre con la inclusión de cada nueva tecnología, el 5G también se ha desarrollado a partir de su generación anterior, el 4G o LTE. El 5G define una red central con un diseño independiente de la tecnología acceso radio para que dicha red central pueda trabajar sin problemas con tecnologías 3GPP (móvil) y no 3GPP (no móvil, línea fija, etc).

A continuación, se desarrollarán con más detalle las arquitecturas de los sistemas digitales. En la Ilustración 1 se puede apreciar la evolución de los sistemas de comunicación y la capacidad de transmisión de datos que ha supuesto:

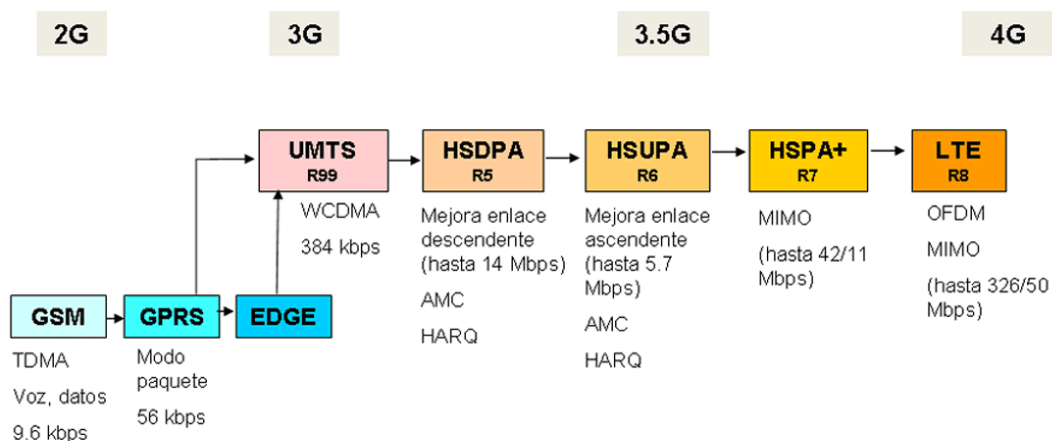


Ilustración 1: Evolución de la capacidad de datos en los distintos sistemas [3]

## 2.1.1. REDES 2G, 3G Y 4G

### 2.1.1.1. RED 2G

Entre 1980 y 1992 el ETSI (European Telecommunications Standards Institute) estandariza el primer sistema digital de comunicaciones móviles, al que da el nombre de GSM (Global System for Mobile Communications). Este sistema se conoce popularmente como 2G. Comienza a desplegarse en Europa entre 1992 y 1995 y se extiende también a nivel mundial. Esta tecnología permitía ofrecer a los usuarios voz (con diferentes tipos de códecs), teleservicios como el SMS y el fax, comunicaciones de datos (inicialmente a 9,6 *kbps* y en su evolución hasta los 192 *kbps*) y servicios complementarios como identificación de llamadas, llamadas en espera, conferencias, etc. [4]

Se caracteriza porque la conexión de paquetes puede salir directamente a Internet o a una red privada, en función del APN empleado por el usuario en la solicitud de conexión.

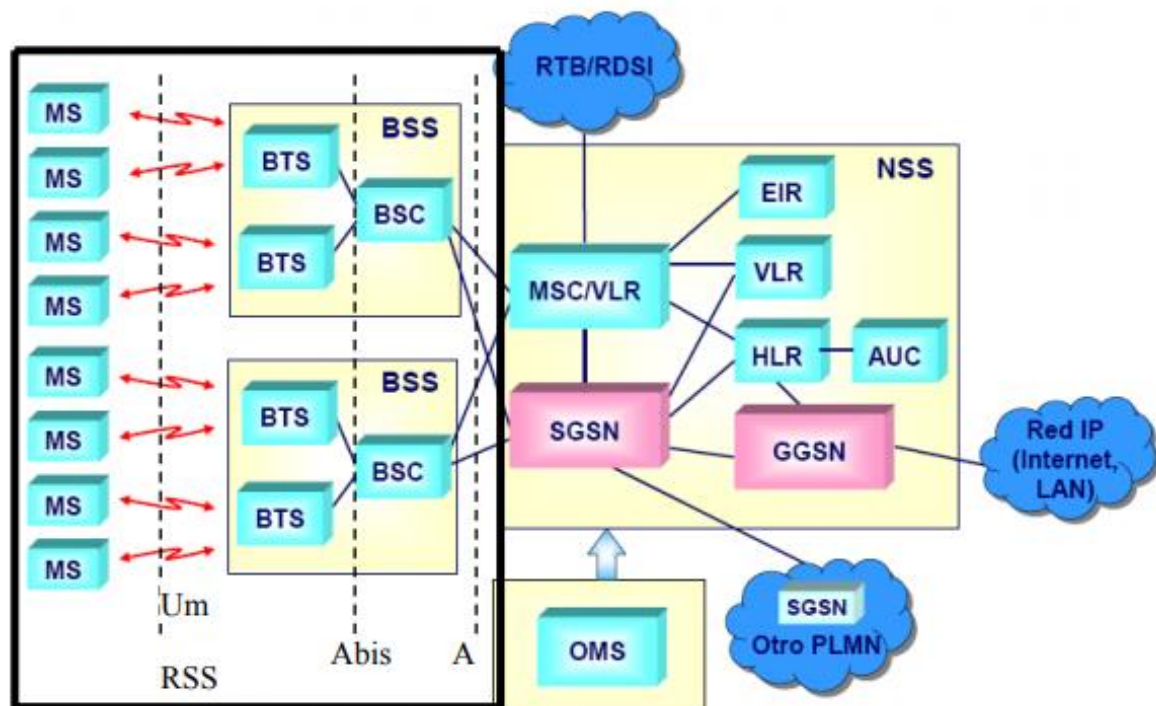


Ilustración 2: Arquitectura de la red GSM [5]

Utiliza canales de 200 *kHz* dentro de los cuales se pueden multiplexar hasta 8 usuarios. Además, permite multiplexación en el tiempo, TDMA, en frecuencia, FDMA y por códigos, CDMA.

La red GSM introdujo muchas mejoras en las comunicaciones móviles con respecto a la generación previa que era analógica: establece un enlace radio cifrado digitalmente con el fin de evitar escuchas (aunque a día de hoy se han implementado procesos para hackearlo aprovechando algunas vulnerabilidades). Al tratarse de un estándar abierto y no propietario, proporciona un sistema y terminales de bajo coste, gracias a la corrección de errores mediante técnicas digitales y a la ecualización del canal introduce mejoras en la calidad del servicio. También mejora la calidad frente a interferencias debido al uso de salto en frecuencia, posibilita el *roaming* internacional de los usuarios entre las redes GSM de diferentes países e incluye la tarjeta SIM en el terminal de usuario, facilitando así la posibilidad de cambio de terminal y protegiéndolos frente a la clonación.

#### 2.1.1.2. RED 3G

Unos años después, la ITU (International Telecommunication Union) insta a los distintos organismos de estandarización a crear un nuevo sistema de comunicaciones móviles a nivel mundial. Es en el año 2000 cuando surge la tecnología de tercera generación, conocida genéricamente como IMT-2000. Esta evolución es capaz de soportar altas tasas binarias de datos, permite soportar nuevos servicios, como la videoconferencia o la difusión de contenidos, y posibilita el acceso por satélite, así como el acceso radio terrestre.

Por un lado, el 3GPP, organismo que agrupa diversas instituciones de estandarización a nivel mundial y que está formado principalmente por ETSI en Europa, ARIB en Japón

y CWTS en China proponen el UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) que permite una evolución significativa frente a los sistemas de segunda generación. En cambio, la propuesta del 3GPP2 formado por TIA, el organismo estadounidense, fue el CDMA-2000 que era una evolución de los servicios 2G norteamericanos. Aunque se cumple el objetivo de alcanzar altas tasas binarias y la flexibilidad de los servicios, al final no se logra el propósito de universalidad. [6]

Cabe destacar entre otras novedades del UMTS, el uso eficiente del espectro que se consigue con la aparición de nuevas modulaciones y el acceso múltiple por división de códigos. También permite distintos servicios simultáneos en el mismo terminal, mayor seguridad que en 2G ya que se cifran las comunicaciones hasta el controlador, mayor movilidad internacional debido a que está más extendido que GSM y mejor movilidad gracias a la implementación del *soft-handover* (en lugar del ya existente *hard-handover*) al disponer de interconexión directa con los controladores radio (tal y como se dispone en la Ilustración 2). Además, la calidad de servicio es mayor gracias al códec de voz AMR, ofrece servicio de videollamada a 64 *kbps* y los datos de alta velocidad que, dependiendo de la versión, varían de la siguiente forma:

- *Release 99*: Desde 64 *kbps* 384 *kbps* en el enlace de bajada (DL) y 64 *kbps* en el enlace de subida (UL).
- *Release 5* (HSDPA, 3.5G): Aumenta la velocidad de descarga hasta 14 *Mbps*.
- *Release 6* (HSUPA, 3.75G): Aumenta la velocidad de subida hasta 5,76 *Mbps*.
- *Release 7* (HSPA+, 3.9G): Aumenta el DL hasta 28 *Mbps* y el UL hasta 11 *Mbps*.
- *Release 8* (HSPA+): Aumenta la velocidad en el DL hasta 56 *Mbps*.
- *Release 9* (HSPA+): Aumenta la velocidad en el DL hasta 84 *Mbps* y en el UL hasta 22 *Mbps*.

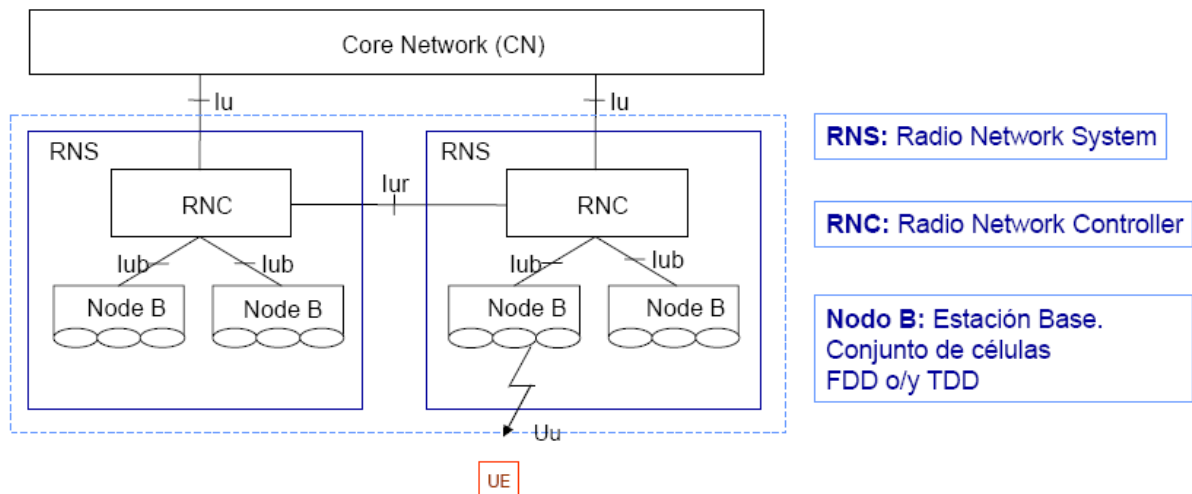


Ilustración 3: *Soft-handover* [7]

Otra novedad importante es el uso de un núcleo de red común tanto para las redes de acceso radio 2G como las 3G. Tal y como se muestra en la Ilustración 4:

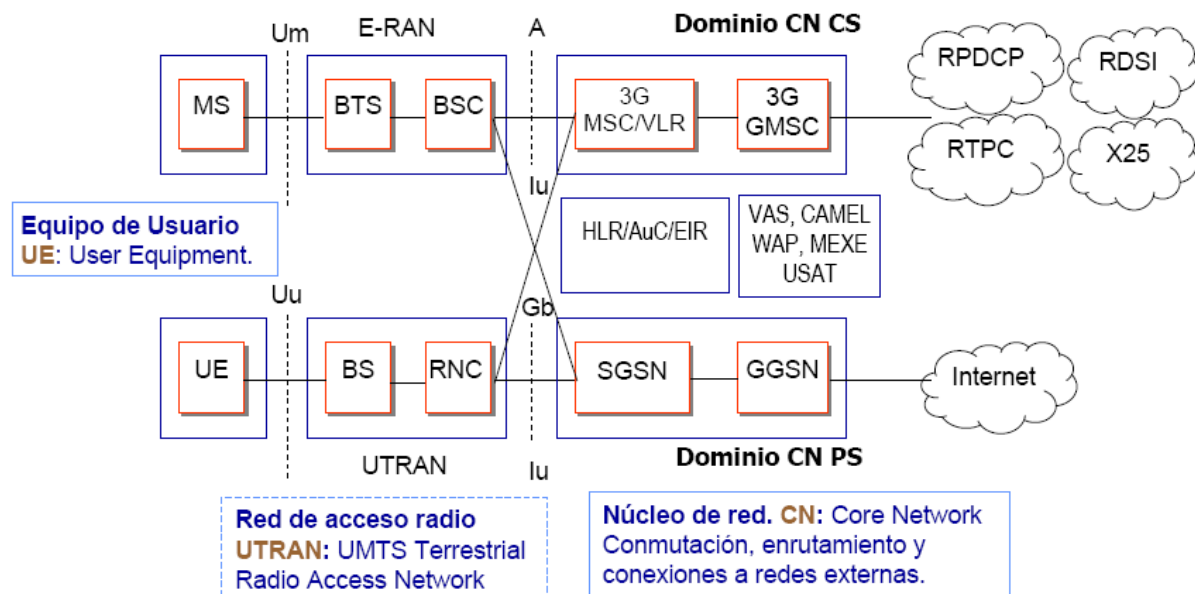


Ilustración 4: Núcleo de red 2G y 3G

El sistema UMTS utiliza canales radio de 5 MHz, dentro de los cuales se pueden multiplexar, mediante CDMA, un número muy alto de usuarios. La técnica que se emplea es el espectro ensanchado lo que permite una alta protección del sistema frente a interferencias *multitrayecto*. Como contrapartida, el cálculo de la capacidad de la celda se vuelve más complejo y la planificación celular requiere más elaboración. Al estar la capacidad de una célula subordinada a la interferencia existente, su área de cobertura y capacidad varía con el tiempo. Se dice comúnmente, que las células “respiran”. Otro requisito preciso para el buen funcionamiento de este sistema es el control de potencia tanto en la estación base como en los terminales, puesto que la capacidad del sistema se relaciona directamente con la potencia consumida. Otro requerimiento primordial es la planificación de la movilidad entre las células para no provocar interferencias indeseadas ni caídas de llamadas. [8]

#### 2.1.1.3. RED 4G

La cuarta generación de sistemas de comunicaciones móviles se denomina LTE (*Long Term Evolution*) y es desarrollada por el 3GPP. La estandarización del LTE finaliza en el año 2009 y en la actualidad se sigue desplegando. Ofrece los mismos servicios que puede ofrecer el UMTS, pero a mayor velocidad e incluye funcionalidades avanzadas como, por ejemplo, *Carrier Aggregation* (que evoluciona el sistema hasta el LTE Advanced) que permite alcanzar velocidades de hasta 1 Gbps en el enlace descendente y hasta 500 Mbps en el enlace ascendente. Entre sus novedades, cabe destacar la implementación de arquitectura plana *todo IP*, donde se elimina el controlador de las estaciones base y se emplea IP en todas las comunicaciones entre nodos y con los clientes. Al eliminar la figura del controlador, parte de las funciones que realizaba, se implementan en el MME (*Mobile Management Entity*), elemento que gestiona la movilidad, y en el SAE GW (*System Architecture Evolution*), encargado de concentrar hacia el núcleo de red. El aumento de velocidad se consigue gracias al desarrollo de los sistemas de antenas MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) y al mayor ancho de banda

del sistema (hasta 20 MHz). Además, al reducir los nodos de la red y utilizar IP de manera nativa, los tiempos de RTT (*Round Trip Time*) se reducen a 10 ms. Ofrece mayor flexibilidad al permitir utilizar anchos de banda variable, que oscilan entre los 1,4 a los 20 MHz. De esta forma, se consigue adaptar las estaciones base a las necesidades de capacidad o disponibilidad de espectro que hay en dicho emplazamiento. [9]

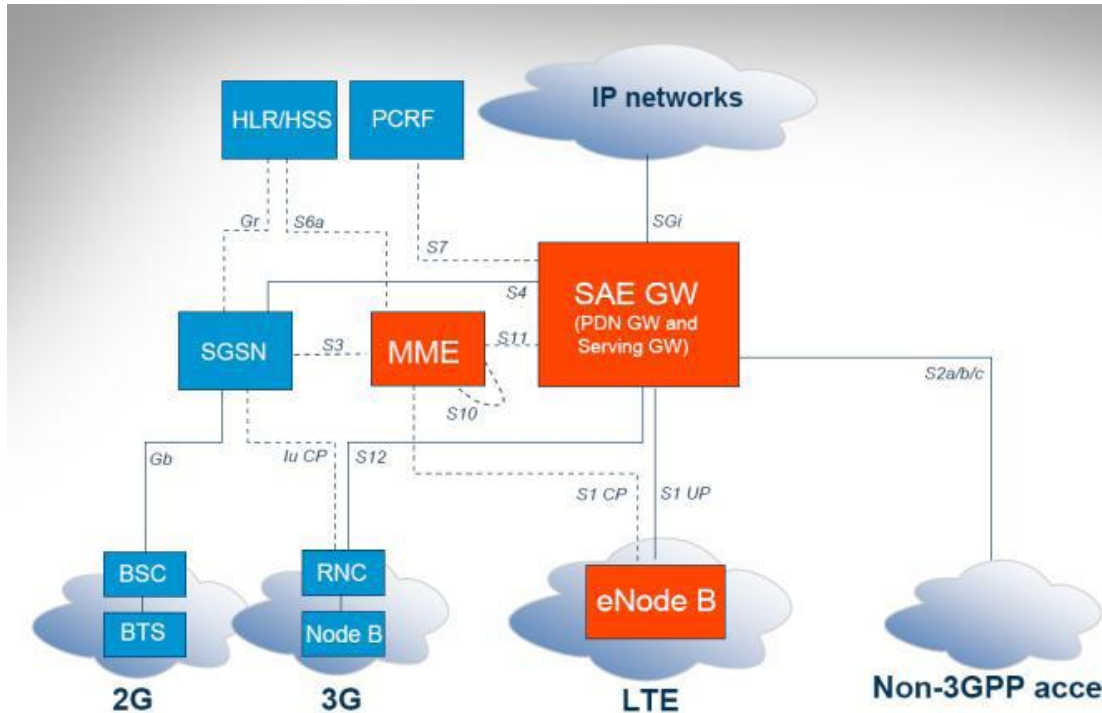


Ilustración 5: Arquitectura de red LTE [10]

En 2008 el 3GPP publica la *Release 8*, donde además de incluir mejoras del 3G, se definen las especificaciones propias del 4G. En la Ilustración 5 se puede apreciar la arquitectura establecida para la red LTE.

La multiplexación es la tecnología que se emplea para dividir los recursos del espectro entre los diferentes usuarios con la finalidad que dichos usuarios puedan acceder simultáneamente a la red. El LTE se caracteriza por utilizar OFDMA en el enlace descendente (*downlink*) y SC-FDMA en el enlace ascendente, que es muy similar al OFDM, pero con una ligera modificación. Para ello, las portadoras LTE deben disponer de un ancho de banda variable de mínimo 1,4 MHz hasta un máximo de 20 MHz. En función de la banda empleada y del operador de telefonía móvil, dispondrá de mayor o menor cantidad de espectro y se utilizará el ancho de banda que más se ajuste al tamaño de banda que posee dicho operador. [11]

Para organizar el espectro y poder dividirlo entre los distintos usuarios de la célula, se debe repartir el espectro, en el dominio de la frecuencia, en *slots* de 15 kHz. Estas divisiones de 15 kHz reciben el nombre de subportadoras. Por otra parte, en el dominio del tiempo, el espectro se organiza en tramas. Estas tramas se corresponden con fragmentos de 1 ms. Cada sección de 1 ms puede contener 14 símbolos, en los cuales se pueden introducir los datos de usuario, es decir, los bits de información, ya sea una llamada de voz, una conexión de datos, señalización, etcétera. De esta forma queda organizada la portadora.



El OFDM se caracteriza por emplear subportadoras estrechas, convirtiendo este sistema en una multiplexación óptima para los sistemas de comunicaciones móviles. Esto se debe a que al ser estrechas las subportadoras hace que, en el dominio del tiempo, los símbolos sean relativamente largos. Un símbolo en el interfaz aire ocupa  $67\ \mu s$  que, al ser un período largo, hace que pueda protegerse de los *multitrayectos*, que son unos de los principales problemas en las comunicaciones móviles.

Cuando se transmite una señal, ya sea desde el móvil o desde la estación base, esta se propaga y rebota en los múltiples objetos que va encontrando a su paso (edificios, semáforos, montañas, árboles...), de manera que al receptor le llega la misma señal desde distintos puntos, con diferentes retardos. Al disponer de símbolos y estos ser largos, aunque lleguen desde distintos *multitrayectos*, permiten recibir bien la señal ya que el margen de diferencia entre los distintos caminos debe ser muy grande para no poder obtener bien la señal.

Para generar la modulación de manera eficiente en OFDM, se emplea la transformada rápida de Fourier, FFT. En el dominio de la frecuencia, las subportadoras de  $15\ kHz$  se organizan en grupos de 12. Cada 12 subportadoras forman un conjunto denominado bloque de recursos (*Resource Block*). En el dominio del tiempo, el bloque de recursos tiene una duración de 0,5 milisegundos. En comunicaciones, a un usuario concreto, la asignación mínima de recursos que se le puede dar es 1 RB durante  $1\ ms$ , es decir, se le darían 2 RB consecutivos.

La Ilustración 6 muestra un caso práctico de reparto de bloques. Al primer usuario se le han asignado 3 *Resource Blocks* durante el primer milisegundo, disponiendo de un total de 6 RB. Al segundo usuario se le concede 1 RB durante  $2\ ms$  consecutivos, es decir, 4 RB. En el siguiente TTI, como el terminal 1 ha dejado de transmitir, se le asignan recursos al usuario 4. De esta forma se va realizando el reparto a los usuarios. [12]

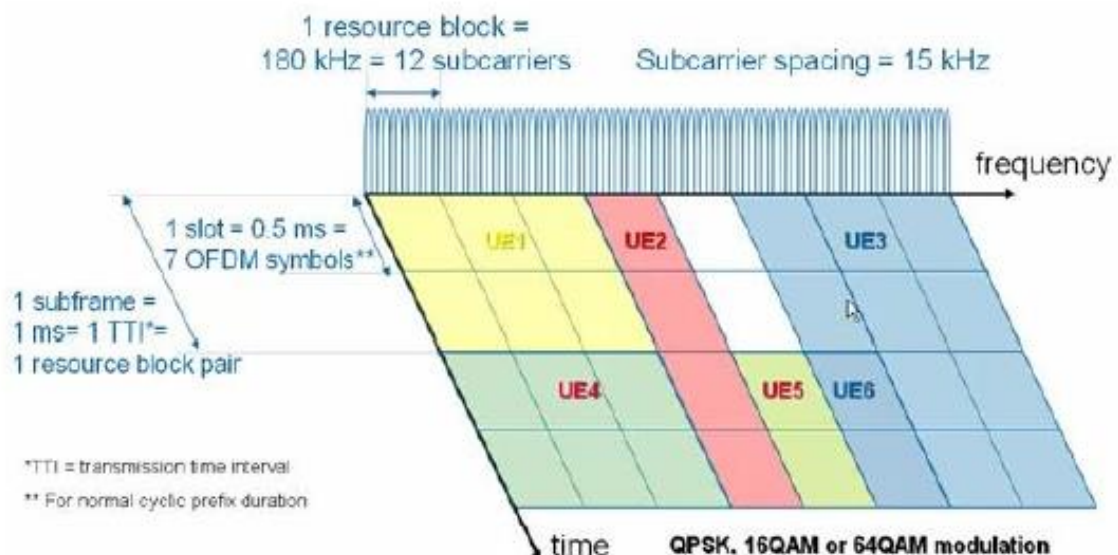


Ilustración 6: Reparto de RB en Multiplexación OFDMA [13]

La tarea de asignación de recursos la realiza el *scheduler* o planificador. Es una parte crucial del software del sistema, característica y propia del fabricante radio. Por eso es tan opaca ya que, gracias a él pueden establecer su competitividad en el mercado frente al resto de fabricantes. El buen funcionamiento del *scheduler* permite conseguir mayor o menor velocidad haciendo una gestión más eficiente de los usuarios y evitando, en última instancia, sobrecargar el eNodeB. [14]



Dependiendo del ancho de banda que tenga la portadora puede haber mayor o menor número de *Resource Blocks*. Un ancho de banda de 1,4 MHz, permite 6 RB, mientras que un ancho de banda de 3 MHz proporciona 15 RB. En 20 MHz, cabrían 100 RB. En la práctica, en LTE, se ocupan 18 MHz de la totalidad de los 20 MHz. Esto se debe a que el filtrado que se realiza para la estación base no es perfecto y una vez empleado el último *Resource Block*, tanto el móvil como la estación base, emiten cierta señal residual que invadiría el espectro adyacente en caso de ocupar los 20 MHz completamente. Para evitar interferir al operador del canal adyacente, ya sea otro operador móvil LTE u otro sistema, no se emplea todo el canal. Es lo que se conoce como eficiencia espectral. El sistema LTE presenta una eficiencia espectral variable, dependiendo del ancho de banda del canal, pero que se establece entorno al 90% para el caso de 20 MHz.

Para el caso del enlace ascendente, el funcionamiento es extraordinariamente similar, se trata también de OFDMA, pero introduce una pequeña modificación. La desventaja del OFDMA es que presenta un PAPR (*Peak to Average Power Ratio*) muy elevado debido a la alta variación de amplitud de las subportadoras. Esta característica se traduce en un impacto en el amplificador de potencia del terminal muy elevado, puesto que requiere un rango dinámico muy alto, así como muy alta linealidad. Desde el punto de vista del terminal, un PAPR elevado deriva en problemas de implementación, por eso en el *uplink* se realiza una IFFT para generar la portadora y después otra FFT. En la recepción, la estación base realiza el proceso inverso. Por el contrario, en la estación base no supone un problema debido a que no existen tantas restricciones en cuanto al tamaño y al consumo de potencia. El inconveniente es que se necesita una capacidad de procesamiento muy elevada para poder realizar todas las acciones. Estas es una de las principales razones por las que en el enlace ascendente en 4G no se ha llegado a implementar MIMO. [15]

### 2.1.2. RED 5G

La estandarización del 5G (New Radio en el 3GPP) comienza en marzo de 2017 con la *Release 15* de dicho organismo [16]. La primera en diciembre de 2017, donde se define el sistema *Non Stand Alone* (NSA), la segunda en junio de 2018 con la introducción de la arquitectura *Stand Alone* (SA) y la última, en marzo de 2019 con las arquitecturas 4 y 7.

	LTE Rel-8	LTE-A Pro Rel-15	NR Rel-15
Purpose	• Spectral efficiency enhancement	• Spectral efficiency enhancement	• Coverage enhancement (especially for above 6GHz) • Spectral efficiency enhancement
Multi-beam operation	• No specification support	• No specification support	• Beam measurement, reporting • Beam indication • Beam failure recovery
Uplink transmission	• Up to 4 layers per UE • Up to 8 layers for MU-MIMO (cyclic shifts for ZC-sequence)	• Up to 4 layers per UE • Up to 8 layers for MU-MIMO (cyclic shifts for ZC-sequence)	• Up to 4 layers per UE • Up to 8 layers for MU-MIMO (orthogonal ports)
Downlink transmission	• Up to 4 layers per UE • TM7/8/9 later introduced for MU-MIMO	• Up to 8 layers per UE • Up to 4 layers for MU-MIMO (orthogonal ports)	• Up to 8 layers per UE • Up to 16 layers for MU-MIMO (orthogonal ports)
Reference signal	• Fixed pattern, overhead • Up to 4 TX antenna ports (CRS)	• Fixed pattern, overhead • Up to 32 TX antenna ports (CSI-RS)	• Configurable pattern, overhead • Up to 32 TX antenna ports (CSI-RS) • Support for above 6GHz
Terminal support	• Full	• Extremely limited	• Full

Tabla 3: Comparación entre LTE y NR Release 15

En la Tabla 3 se muestra una comparativa entre las características del LTE y el NR definidas en la *Release 15*. Tabla 3: Comparación entre LTE y NR Release 15

El estándar 5G de *Release 15* se centra en la evolución del acceso móvil a la banda ancha (eMBB), el soporte básico de servicios URLLC (principalmente realidad virtual y aumentada) y del *Network Slicing* (sin ningún tipo de adaptación dinámica de las *slices*).



Ilustración 7: Calendario inicial 5G 3GPP [17]

El desarrollo de la *Release 16* del 5G está en curso y se esperaba que finalizase en junio de 2020 pero, debido a la situación actual el plan se ha retrasado 3 meses, en la Ilustración 8 se muestra dicha actualización. [18]

Sus principales contenidos son los siguiente:

- Soporte completo de servicios URLLC. La *Release 15* soporta *low latency* pero muestra carencias en la funcionalidad de *ultra reliability*, que aparecerá en la *Release 16*.
- Soporte de comunicaciones V2X (para *vehicle platooning* y *advanced driving*).
- Mejora al *Massive MIMO*, sobre todo para el soporte CoMP (Cooperative Multi Point) en 5G.
- Soporte de bandas no licenciadas (NR-U).
- Funcionalidades SON. La *Release 15* soporta básicamente ANR.

- Cross Link Interference (CLI) y Remote Interference Management (RIM).
- Movilidad de voz a 3G (CS Fall Back).
- Compatibilidad de NB-IoT t Cat-M con New Radio.
- Otras mejoras menores como *relays*, reducción del consumo de potencia, mejoras en movilidad, mejoras en posicionamiento, estaciones satelitales, soporte de trenes de alta velocidad, etc.

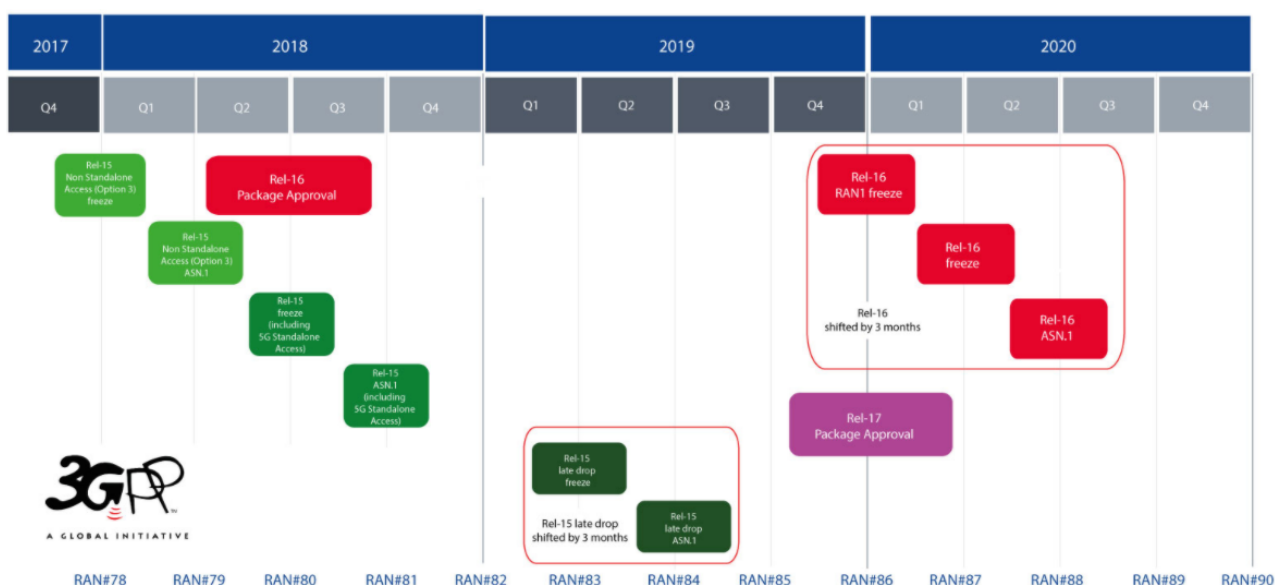


Ilustración 8: Actualización del calendario Release16 3GPP [18]

Los contenidos de la *Release 17* está actualmente bajo estudio. De momento los contenidos que se esperan son:

- Soporte de servicios de realidad extendida (XR), como los juegos online (requieren mejoras en movilidad y en consumo de batería).
- NR 1024 QAM DL. Ya aparecía en LTE, tienen como objetivo ser utilizada en servicios de acceso fijo radio.
- Bandas de frecuencia por encima de 52,6 GHz. Al ser tan elevada la frecuencia, la capacidad de propagación es muy mala. Tienen únicamente 2 posibles usos: ser utilizadas como *backhaul* de la red móvil mediante *relays* o emplearlas para las comunicaciones vehiculares.
- NR light. Nuevo tipo de terminal con prestaciones inferiores.
- Repetidores RF.
- Mejoras al RAN *Slicing*.
- Redes privadas 5G (interoperabilidad entre redes privadas y públicas).
- Gestión de drones por 5G.

Se esperaba que la *Release 17* comenzara a ser desarrollada en marzo de 2020 y finalizara su estandarización en junio de 2021 de acuerdo con los tiempos marcados en la Ilustración 9 pero, debido a la situación actual y asumiendo la demora ya publicada de la *Release 16*, se ha trazado una nueva planificación, que es el que se muestra en la Ilustración 10. [19]



Ilustración 9: Calendario inicial Release17 3GPP [19]

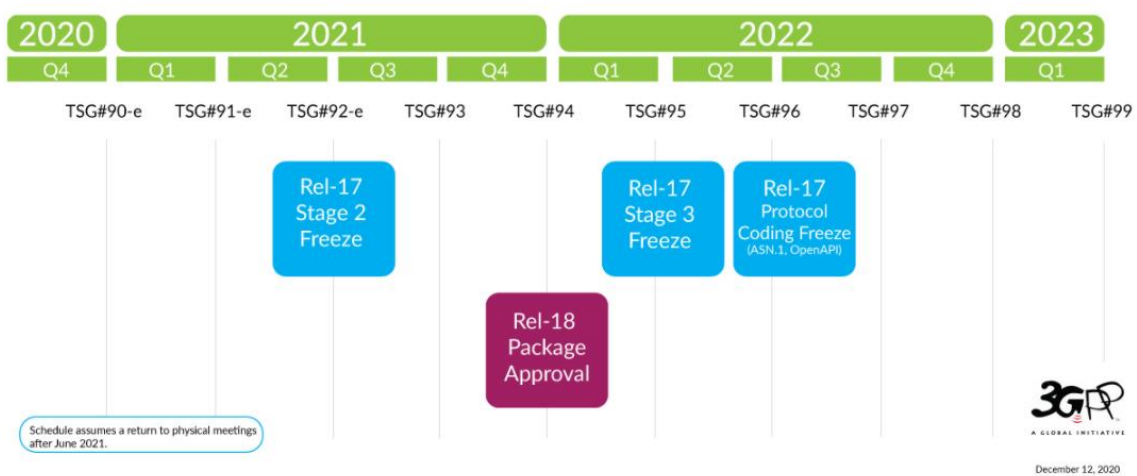


Ilustración 10: Actualización del calendario Release17 3GPP [19]

5G es la nueva generación de redes de comunicaciones móviles. Es conocida actualmente como New Radio (NR) dentro del 3GPP, y comercialmente como 5G y ofrece comunicaciones de voz y video sobre paquetes y servicios de datos de banda ancha, también brinda servicios de muy baja latencia y/o de una fiabilidad muy elevada (URLLC) y soporta comunicaciones para un número muy elevado de dispositivos M2M (Machine to Machine). [20]

Para conseguir los objetivos marcados por el 3GPP y poder adaptarse a la variedad de servicios que deberán ser soportados, el New Radio cuenta con las siguientes herramientas:

- Utiliza nuevas bandas de frecuencias, sobre todo altas, con un ancho de banda mayor.
- Permiten un diseño flexible y escalable de la capa física, gracias a la multiplexación OFDM con numerología flexible, La multiplexación de servicios con distintos requisitos en la misma portadora, la realización de un filtrado adicional de subportadoras con el fin de facilitar la coexistencia de diferentes servicios y la flexibilidad en la asignación del espectro.
- Emplea tecnologías multiantena avanzadas con haces direccionales, Multi User MIMO y Massive MIMO.

- Asimismo, permite la segmentación de la red, conocida como *Network Slicing*, donde una sola red se divide en varias redes lógicas con recursos repartidos dinámicamente entre los distintos servicios.

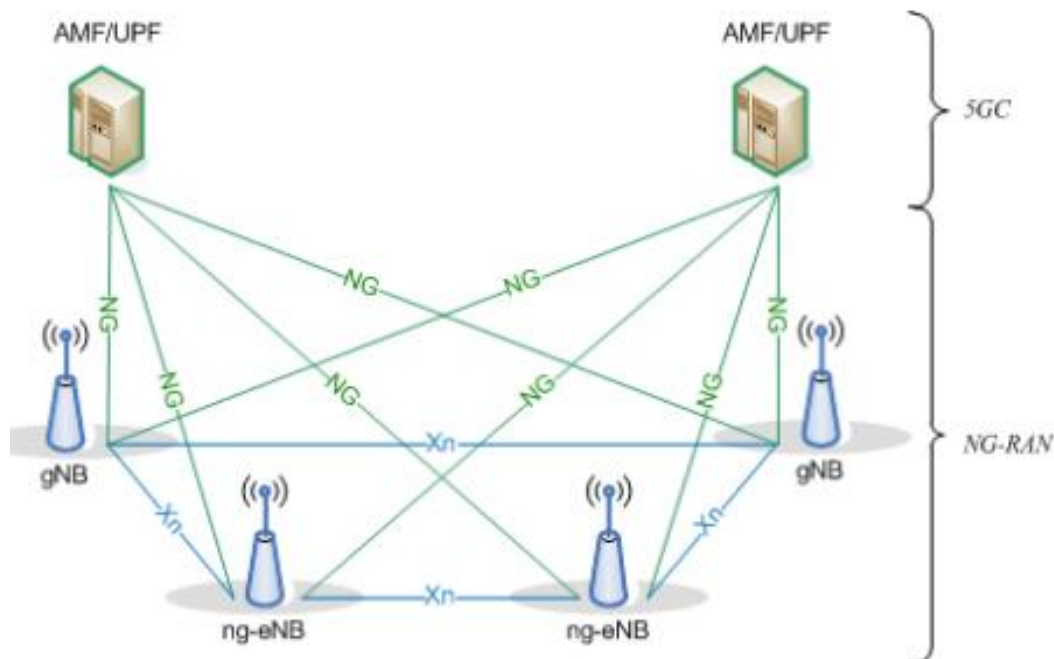


Ilustración 11: Arquitectura de la red 5G o New Radio [21]

En la Ilustración 11 se muestra la arquitectura de la red 5G siendo muy similar a la arquitectura del 4G. Las estaciones base reciben el nombre de gNB, a diferencia de los eNB del 4G. Las estaciones base 4G evolucionan, ng-eNB, para poder tener interfaces tanto con las estaciones 5G como con el núcleo de red 5G. Los nodos del núcleo de red también se desarrollan (AMF/UPF) y se crea el nuevo interfaz NG (N2 plano de control, N3 plano de usuario) tanto con estaciones base 5G como con 4G evolucionadas. Además, el interfaz  $X_n$  es la evolución del  $X_2$ , y su función es comunicar estaciones base 4G evolucionadas y/o 5G. La diferencia que incluye el 5G es que las estaciones base de esta generación pueden comunicarse con estaciones base de comunicaciones anteriores. [22]



	2G (GSM)	2.5G (GSM + GPRS + EDGE)	3G/ 3.5G (UMTS + HSPA)	LTE	5G New Radio
<b>Arquitectura</b>	Sólo circuitos	Circuitos + paquetes	Circuitos + paquetes	Sólo paquetes Arquitectura Plana	Sólo paquetes Arquitectura Plana
<b>Multiplexación</b>	FDMA + TDMA	FDMA + TDMA	WCDMA	OFDMA (DL) SC-FDMA (UL)	OFDMA (DL) SC-FDMA (UL)
<b>Servicios</b>	Voz SMS	Voz SMS Datos (200 kbps)	Voz Videollamada SMS Datos (42 Mbps)	Voz (IMS) Videollamada (IMS) SMS Datos (hasta 1 Gbps)	Voz (IMS) Videollamada (IMS) SMS Datos (hasta 20Gbps) Servicios URLLC Servicios mMTC

Tabla 4: Principales diferencias entre tecnologías

En la Tabla 4 se muestra un resumen con las diferencias más relevantes entre los distintos estándares. Como se puede observar, tanto en la arquitectura 4G como en la 5G, solo hay nodos e interfaces dedicados a cursar servicios basados en paquetes. A esto se le conoce como arquitectura plana, donde solo existe un tipo de nodo. Esta característica no implica que el 4G y el 5G no puedan cursar servicios basados en circuitos, como serían las llamadas de voz, sino que dichas llamadas de voz deben realizarse mediante paquetes. Dando lugar a lo que se conoce como aplicación *over the top*, como son Skype, Whatsapp, etc.

Este sistema está formado por un núcleo 5G y la red de acceso 5G. A diferencia de las tecnologías de comunicación móvil anteriores, la red central del 5G está diseñada para funcionar perfectamente con más de una tecnología de acceso. La red de acceso 5G puede construirse a partir de una red de acceso definida por el 3GPP, así como por una WLAN o acceso de banda ancha fijo. Dentro de esta red de acceso, se introduce una nueva tecnología de acceso móvil conocida como *New Radio* (NR) junto con E-UTRA, la tecnología de acceso utilizada para LTE. El núcleo 5G, 5GC, se define como una red de acceso independiente y capaz de proporcionar servicios 5G a través de cualquiera de estas redes de acceso. [23]

Entre las tecnologías móviles, que se designan colectivamente como red de acceso radio de próxima generación, la posibilidad de que E-UTRAN y NR se incluyan en el núcleo 5G, genera varios escenarios de conectividad. La posibilidad de que la misma red central se conecte con varias redes de acceso da como resultado varios escenarios de conectividad o tipos de arquitecturas. El terminal (*User Equipment*), se puede conectar a través de LTE o NR al nuevo 5GC (opción SA). Pero además la conectividad que involucra las comunicaciones móviles se ha desarrollado tanto que también permite la opción de realizar la conexión a través de más de una tecnología de acceso al mismo tiempo (opción NSA).

En la arquitectura de LTE ya se empezó a implementar el concepto de conectividad dual (DC), que permite que el usuario se conecte a dos estaciones base diferentes. Las dos

estaciones base forman parte de una conexión cuyas señales no necesitan estar sincronizadas en el tiempo.

La *Release* 15 del 3GPP establece que puede haber dos estaciones base NR (NR-DC) o una estación base NR y una LTE (Multi-Radio-DC). Solo es factible el uso de LTE para una posible conectividad de múltiples radios con NR. Otras tecnologías como GSM no se pueden combinar en DC con NR. Además, no se define ninguna intercomunicación entre estas tecnologías y NR en la *Release* 15 de 3GPP.

La conectividad MR-DC permitirá una fácil transición de la actual interfaz radio LTE a la interfaz New Radio. En la conectividad dual, una de las dos estaciones base, asume la función de nodo maestro (MN) y la otra, la función de nodo secundario (SN). El MN se encarga de la conexión de señalización en el interfaz aire (SRB1, SRB2) y en la red central mientras el nodo secundario es responsable de la conexión de datos de usuario adicional en el interfaz aire (DRB).

En la primera fase de implementación, el E-UTRA sirve como nodo maestro y maneja toda la señalización de control de la red central. Se añade NR para permitir una alta velocidad de datos a través del interfaz aire que transporta solo los datos de plano de usuario conectados a la red central LTE, EPC. En la fase siguiente, New Radio o LTE asumen el rol de nodo maestro y se encargan tanto del control como de la señalización de usuario. En opciones posteriores, E-UTRA servirá como nodo secundario y completará las conexiones de plano de usuario con portadoras de datos adicionales.

Las diferentes opciones de conectividad a través del interfaz aire también permitirán la migración desde la red central EPC a 5GC y las tres opciones EN-DC, NGEN-DC y NE-DC a menudo se denominan y resumen con lo que se conoce como acceso *Non Stand Alone* (NSA).

Como cada nodo en conectividad dual puede contener varias celdas, se emplea el término grupo de celdas (CG). El propósito del grupo de celdas es programar datos en varias portadoras para aumentar el rendimiento general. Dentro de un grupo de celdas, una celda primaria sirve como celda especial (SpCell). Se encarga de controlar todo el CG general y opcionalmente, una o más celdas secundarias (SCell) que incrementan el espectro de frecuencia de la célula primaria, mediante agregación de portadoras (CA). En la conectividad dual, el nodo maestro (MN) representa el grupo de células maestras (MCG) y el nodo secundario (SN), representa el grupo de celdas secundarias (SCG). En los escenarios de conectividad dual se emplea la siguiente terminología: la celda primaria (PCell) para referirse a la celda primaria (SpCell) del grupo de celdas máster (MCG) y la celda secundaria primaria (PSCell) como la celda primaria (SpCell) del grupo de celdas secundario. [24]

Por otro lado, las redes 5G deben soportar servicios muy distintos, con requisitos muy variados en cuanto a velocidad, ahorro de energía, etc. Por ello, el 3GPP ha estandarizado la capa física de tal forma que soporte simultáneamente en una única portadora servicios con requisitos muy diferenciados.

Para lograrlo, permite que cambien en el tiempo y en la frecuencia, las características de la portadora, como la duración del TTI o la separación entre subportadoras.

El esquema básico de la capa física es OFDM, igual que en el estándar 4G, pero para New Radio va a ser más flexible para poder variar las características antes mencionadas.

Si se utiliza un ancho de subportadora o SCS bajo, como, por ejemplo, 15 kHz, el tiempo de símbolo y el prefijo cíclico son largos y, por tanto, ofrecen mayor protección frente a *multitrayectos*. Esto es idóneo para bandas bajas. Por otro lado, si se utiliza un ancho de subportadora o SCS alto, el tiempo de símbolo y slot es menor y, por tanto, se reducen latencias, mejorando los servicios URLLC. Esta técnica ofrece mayor resistencia frente al *efecto Doppler*, lo cual es beneficioso para escenarios de alta velocidad. También ofrece mayor resistencia al ruido de fase del oscilador local, beneficiando así a las bandas altas donde el ruido de fase produce una mayor afectación. Pueden mezclarse distintos SCS en una sola portadora, y así poder soportar simultáneamente servicios con distintas características.

New Radio soporta tanto el modo FDD como el TDD. El modo FDD se empleará para bandas bajas, de cobertura, y el modo TDD, será más típico en bandas altas, de capacidad (a partir de los 3,5 GHz). Los *Resource Block* seguirán estando compuestos por 12 subportadoras, independientemente de la numerología, pero el ancho de subportadora puede variar entre bandas o dentro de una portadora. El número máximo de subportadoras es 3300, frente a las 1200 que había en LTE.

Las tramas radio van a seguir teniendo una duración de 10 ms, compuesta por 10 subtramas de 1 ms. La diferencia es que ahora, cada subtrama puede estar compuesta de uno o más *slots*, en lugar de 2 fijos, como ocurría en 4G. Un *slot* está compuesto siempre de 14 símbolos (12 símbolos con prefijo extendido), en vez de los 6,7 que había en LTE. Y cada TTI puede estar compuesto de 1 *mini-slot*, 1 *slot* o varios *slots*.

Hay que tener en cuenta que no todas las combinaciones de SCS y anchos de banda de portadoras son posibles. El 3GPP ha especificado qué anchos de banda y SCS pueden agregarse para bandas en el rango de frecuencias 1 (frecuencias menores de 6 GHz) y en el rango de frecuencias 2 (frecuencias entre 24,25 GHz y 52,6 GHz). [25]

SCS (kHz)	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz	25 MHz	30 MHz	40 MHz	50 MHz	60 MHz	70 MHz	80 MHz	90 MHz	100 MHz
	$N_{RB}$	$N_{RB}$	$N_{RB}$	$N_{RB}$	$N_{RB}$	$N_{RB}$	$N_{RB}$	$N_{RB}$	$N_{RB}$	$N_{RB}$	$N_{RB}$	$N_{RB}$	$N_{RB}$
15	25	52	79	106	133	160	216	270	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A
30	11	24	38	51	65	78	106	133	162	189	217	245	273
60	N.A	11	18	24	31	38	51	65	79	93	107	121	135

Tabla 5: SCS para frecuencias 1

SCS (kHz)	50 MHz	100 MHz	200 MHz	400 MHz
	$N_{RB}$	$N_{RB}$	$N_{RB}$	$N_{RB}$
60	66	132	264	N.A
120	32	66	132	264

Tabla 6: SCS para frecuencias 2

También hay restricciones en las combinaciones de SCS y ancho de portadora para cada banda estandarizada (3GPP TS 38.104).

Los terminales no tienen por qué soportar todos los anchos de banda definidos en el estándar. Aunque sí es obligatorio que soporten los definidos en la especificación 3GPP TS 38.101 v15.0.0. Y el ancho de banda 90 MHz siempre es opcional [26].

En 5G se permite que 1 *slot* tenga símbolos tanto para enlace descendente como para el ascendente, pudiendo recibir un reporte del terminal dentro del propio *slot* y, minimizando de esta forma, la latencia del plano de usuario.



El 3GPP ha estandarizado 100 formatos de *slot*. Los más representativos y que se pueden observar en la Tabla 7 son D, que simboliza el *downlink* o enlace descendente, U, que simboliza el *uplink* o enlace ascendente y X, que es un símbolo flexible y se emplea como guarda entre el *downlink* y el *uplink*. Siempre hay al menos 1 símbolo flexible al conmutar de *downlink* a *uplink*. El formato de *slot* puede variar dinámicamente (siendo notificado por DCI), o semiestáticamente (siendo notificado por RRC).

Format	Symbol number in a slot													
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
0	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D
1	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U
2	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
3	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	X
4	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	X	X
5	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	X	X	X
6	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	X	X	X	X
7	D	D	D	D	D	D	D	D	D	X	X	X	X	X
8	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	U
9	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	U	U
10	X	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U
11	X	X	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U
12	X	X	X	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U
13	X	X	X	X	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U
14	X	X	X	X	X	U	U	U	U	U	U	U	U	U
15	X	X	X	X	X	X	U	U	U	U	U	U	U	U
16	D	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
17	D	D	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
18	D	D	D	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
19	D	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	U
20	D	D	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	U
21	D	D	D	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	U
22	D	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	U	U

Tabla 7: Formatos de slot para 5G [25]

Las modulaciones utilizadas son las mismas que en LTE, salvo que ahora se podrá utilizar también 256 QAM en el enlace ascendente. Como se ha mencionado anteriormente, con la *Release 17* se permitirá también 1024 QAM. Además, la señal de referencia desaparece y se utilizan símbolos de referencia para cada canal, llamados DMRS (*Demodulation Reference Signal*).

También se incluye una nueva señal llamada PT-RS (*Phase tracking Reference Signal*), especialmente útil en bandas altas en las que el ruido de fase del oscilador local es una limitación importante.

Hay 1008 PCIs que son indicados por las señales de sincronismo NR-PSS y NR-SSS, similar a cómo se aplicaba en LTE. El bloque SS/PBCH (SSB) se forma por 24 PRB en el dominio de la frecuencia y 4 símbolos en el dominio del tiempo y contiene las señales de sincronismo y el principal bloque de información del sistema. Únicamente se difunde una parte mínima de la información de sistema para acceso inicial. El resto de la información de sistema se puede difundir periódicamente o enviarla bajo demanda.

El hecho de que las señales de referencia y los canales de broadcast (SS/PBCH) ocupen menos recursos en el tiempo y en la frecuencia que en LTE, mejora la eficiencia espectral, puesto que hay más PRB libres y menos interferencia *inter-celda*, y, además, disminuye el consumo de potencia. También ayuda el hecho de que la mayor parte de la información de sistema se distribuya bajo demanda.

### 2.1.2.1. NON STAND ALONE (NSA)

El 3GPP ha definido varias arquitecturas posibles para la coexistencia entre LTE y 5G.

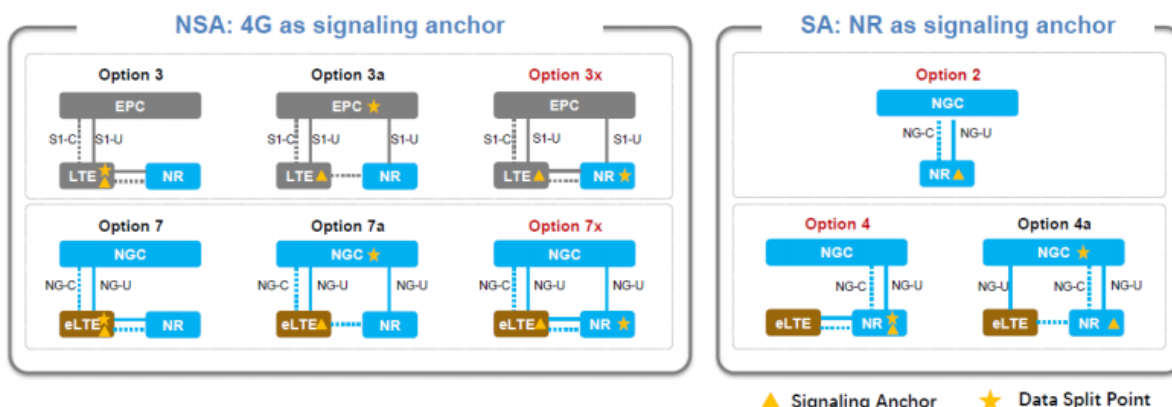


Ilustración 12: Tipos de arquitecturas: NSA y SA [26]

La Ilustración 12 muestra las diferentes tipologías que se han estandarizado para el 5G. Dentro de cada tipo, existen varias opciones que se describen a continuación.

El despliegue inicial de 5G se realiza con la tipología nombrada como NSA (*Non Stand Alone*) y sigue la arquitectura 3/3A/3X definida por el 3GPP. Para estas opciones la estación base LTE se conecta con el núcleo de red 4G, y se encarga del plano de control para la señalización y movilidad. La conexión de datos (que se lleva a cabo en el plano de usuario) del NR puede realizarse por medio del núcleo de red a través del nodo LTE (es lo que se muestra en la Ilustración 12 como alternativa 3), o llegar directamente (como se observa en las opciones 3a y 3x).

Uno de los principales problemas que se encuentra el 5G cuando se empieza a desplegar es que debe usar parte del espectro, como cualquier sistema nuevo cuando comienza a implantarse. Hoy en día, las bandas más atractivas existentes están ocupadas por el 4G, que lleva la capacidad de la red. Y no se puede quitar simplemente parte de este espectro y asignárselo al 5G. En España el 5G se quiere instaurar en la banda 28 (segundo dividendo digital) y en la banda n78, que es la banda de 3500 MHz. Pero estas bandas presentan un pequeño inconveniente, la banda 28 situada en los 700 MHz, es la más baja que se utiliza y aunque se caracteriza por poseer grandes ventajas como su buena propagación y su amplio radio de cobertura, solo puede soportar MIMO 2x2 y además posee muy poca capacidad. Esto se traduce en que las máximas velocidades para esta banda serían muy similares a las que se obtienen en el 4G con la banda de 800 MHz, aunque ligeramente superiores en 5G, en torno a un 3% o un 5% más. Por su parte, la banda de 3500 MHz ofrece mucha más capacidad, dispone de muchos más megahercios y permite implementar *Massive MIMO*, sin embargo, posee una cobertura relativamente reducida.

El 3GPP dispuso que los despliegues iniciales del 5G y 4G fueran de la mano, con la idea de que el 5G fuera un mero complemento del 4G y con el tiempo se fuera independizando de este y consiguiera operar como un sistema aislado. Por ello, define una serie de arquitecturas de coexistencia. Estandariza 7 arquitecturas, de las cuales han perdurado 4 y que se conocen con sus números: 2, 3, 4 y 7. Estas cuatro arquitecturas se clasifican en los modos NSA y SA.

Las 4 arquitecturas se pueden dividir de manera genérica en dos grupos. El primer grupo es lo que se conoce como NSA. En este grupo es el 4G el sistema que está al cargo de

la señalización y encamina el plano de señalización del terminal. Las otras dos arquitecturas son en modo SA.

La primera arquitectura en aparecer en el mercado es la número 3. Dicha arquitectura se divide a su vez en 3 opciones diferentes, denominadas 3, 3a y 3x. Comúnmente, estas 3 opciones se conocen como NSA y es lo que se está desplegando a día de hoy en la red. De las 3 alternativas, la más popular y con mayor índice de implementación es la 3x, donde el núcleo de red sigue siendo del 4G, el EPC. El terminal móvil se va a conectar inicialmente al LTE y con este realiza la señalización, toda la señalización del terminal móvil a la estación base y de la estación base al terminal es a través del 4G. El plano de usuario, para los usuarios 5G, se envía al nodo 5G. El nodo 5G (NR) se encarga de efectuar la conectividad con el nodo 4G para enviarle parte del plano de usuario si así lo considera. El terminal de usuario que soporte este modo NSA se va a encontrar conectado para el plano de usuario simultáneamente al 4G y al 5G y va a poder transmitir y recibir información de ambos nodos. En este caso, el 5G lo único que hace es añadir capacidad en la capa de datos, consiguiendo mayor velocidad. Los usuarios que no son NSA van a seguir utilizando el plano de usuario del 4G, de modo que, un usuario NSA, una vez se conecta, y la estación base a la que se ha conectado tiene algún nodo en su emplazamiento o cerca un nodo 5G, se va a comunicar con el terminal NSA para ver si puede recibir de este nodo. Después, configura un evento, este evento se activa porque el terminal ha identificado un nodo 5G, reconfigura su servicio portador y lo transforma en un servicio portador partido que bebe tanto del 4G como del 5G.

La diferencia entre las opciones 3, 3x y 3a es quién realiza la partición en el plano de usuario. En la alternativa 3, el plano de usuario se conecta siempre al 4G y es él el que para los usuarios NSA, lo divide entre el nodo 4G y el nodo 5G. En la alternativa 3a, es el núcleo de red quien realiza el reparto entre el 4G y el 5G. El problema en esta alternativa es que el núcleo de red no posee ningún conocimiento sobre el estado del interfaz radio, es decir, no puede valerse de ningún criterio para saber cómo ejecutar dicho reparto. Y es por esto, por lo que la alternativa más común es la 3x.

Entre las ventajas del modo NSA cabe destacar que permite disfrutar de eMBB más rápido y esto es la base para la mayoría de los casos de uso actuales. No es necesario implementar un núcleo nuevo, solo hay que actualizar el software EPC a EPC+. Además, la parte radio de LTE se moderniza para admitir nuevas señales y procedimientos. Su desarrollo es sencillo ya que se basa en cobertura y procedimientos LTE bien establecidos. En cuanto a los terminales NSA, están disponibles antes que los terminales SA. Y la opción 3x centra los cambios importantes en nuevos elementos 5G, hecho que reduce la inversión a la hora de modernizar los equipos existentes. [28]

Pero este modo presenta también algunos inconvenientes, como no admitir nuevas funciones nativas de 5G como uRLCC o mMTC. Para poder implementarlas hay que evolucionar a la opción híbrida 3x más 2.

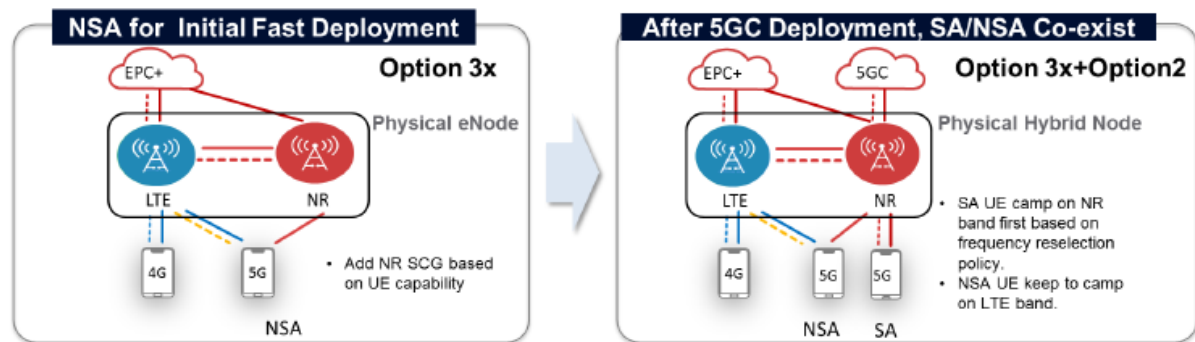


Ilustración 13: Desventajas del modo NSA [28]

La Ilustración 13 muestra las desventajas que se acaban de describir donde para poder acceder a las opciones nativas hay que modificar la arquitectura a la opción 3x más la opción 2.

En el modo NSA, la voz la proporciona el 4G mediante VoLTE (*Voice over LTE*), o el 3G/2G mediante CSFB para el caso en el que el terminal no soporte VoLTE.

El núcleo IMS no es consciente del modo NSA. El 5G es un complemento del 4G. El 4G se encarga de la señalización y es, por tanto, el sistema que sigue ofreciendo la voz puesto que es el que posee el núcleo de red IMS. Cuando un usuario con una portadora de datos 5G establece una llamada de voz, se le asigna un servicio portador de voz. Este servicio portador no tiene la posibilidad de ir por el 4G y el 5G, solo puede ir por el 4G. Cuando finaliza la llamada de voz, vuelve al 5G para evitar inestabilidades en las llamadas de voz.

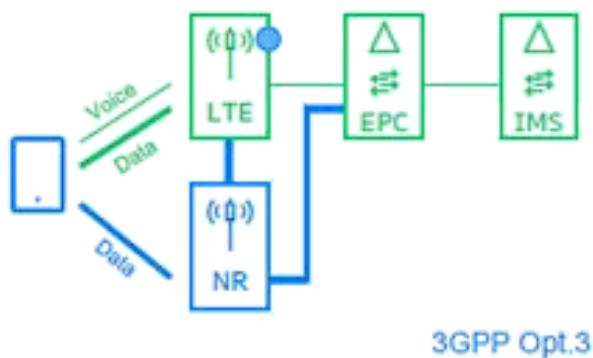


Ilustración 14: Voz e 5G modo NSA [27]

La Ilustración 14 muestra el recorrido que realiza la llamada del terminal en la red de acuerdo con el modo NSA.

El 3GPP no define cómo realizar el control de potencia en el enlace descendente del modo NSA. Sin embargo, se desarrollan 2 formas básicas para efectuar el control de potencia en el *downlink*: de forma estática y de forma dinámica.

- El procedimiento estático consiste en distribuir la potencia final del sistema entre los canales existentes, de forma estática, sin variación. Además, se le añade un offset entre los diferentes canales.

- Para el caso del control dinámico de potencia, se va ajustando la potencia que se transmite al terminal en función de algún parámetro que pueda medir la estación base. La norma es realizarlo en función de la tasa de error, BLER. El inconveniente del control dinámico de potencia es que acaba introduciendo un nuevo elemento en el sistema.

El enlace ascendente sí requiere tener control de potencia puesto que afecta a la batería del terminal. Si al terminal se le pidiera transmitir mucha potencia, consumiría mucha batería y la percepción del usuario a la larga sería peor. Para el *uplink* el estándar define 2 métodos para el control de potencia y de este modo poder indicar al terminal qué método aplicar. Incluso se pueden definir ciertos canales con un método y ciertos canales con otro. Estos procedimientos son los 2 modos básicos que se utilizan con otras tecnologías como el LTE: [27]

- *Open-loop* o lazo abierto: Se denomina *loop* o lazo porque existe una retroalimentación de forma que el terminal obtiene ciertos parámetros de la red para decidir cómo ajustar la potencia. Y es abierta porque no recibe la retroalimentación de manera específica de control de potencia, sino que los obtiene de otros parámetros.

El terminal selecciona una potencia inicial en base a una configuración que hay en el sistema y la va ajustando de manera autónoma en función de las necesidades. El terminal mide las potencias que está recibiendo de las señales piloto. Una vez consigue esa información, interpreta cuáles son las pérdidas aproximadas del canal. Inicia una potencia en base a esas pérdidas del canal, envía un preámbulo y, si no recibe respuesta, el terminal interpreta que no ha llegado a la estación base, por lo que vuelve a enviarlo con un salto de potencia. Realiza esta operación varias veces, incrementando el número de saltos que haya en la potencia.

- *Close-loop* o lazo cerrado: El terminal sí que recibe una indicación por parte de la estación base para modificar la potencia. Este método se conoce como TPC (Transmit Power Control). El lazo cerrado advierte que el terminal inicia la comunicación con una potencia dada y el nodo (gNodeB) es el que establece, con dichos comandos TPC (dirigidos a nivel MAC ya que son muy rápidos), si debe aumentar o disminuir la potencia. El método *close-loop* es más preciso que el *open-loop*, pero requiere más consumo de recursos puesto que los TPC se envían en el interfaz aire, y, por lo tanto, consumen recursos. Una mayor precisión se traduce en una mayor señalización.

#### 2.1.2.2. STAND ALONE (SA)

En el modo *Stand Alone* es el 5G el que se encarga de llevar la señalización.

Como se ha descrito en el apartado anterior, actualmente la opción más implementada para el 5G es la del modo NSA, pero con el paso del tiempo el 5G evolucionará a la opción 2. Esta última opción muestra el 5G independiente. Formada por la estación base 5G con un núcleo de red 5G y terminal 5G puro. Aunque, de momento, no hay un criterio evidente sobre si, para llegar a dicha opción, va a implementarse antes las opciones 4 y 7.

La alternativa 7 presenta una arquitectura muy similar a la arquitectura 3 del NSA, pero en este caso, la estación base 4G está conectada al núcleo de red 5G, denominado NGC. Las alternativas 7, 7a y 7x son análogas a las 3, 3a y 3x con la salvedad de que el núcleo de red es el NGC.

Por su parte, la opción 4 es como la 3 pero a la inversa. El nodo 5G es el maestro, se encarga de llevar la señalización y lo hace, además, con su propio núcleo de red. El nodo 4G es un complemento que le da capacidad el 5G. El desarrollo del DSS, que se desarrollará más adelante, hace que la alternativa 4 deje de tener sentido.

El planteamiento es que los dos modos, NSA y SA convivan en el tiempo, de forma que la red soporte en paralelo terminales NSA y SA.

En el modo SA es posible que el 5G no ofrezca servicio de voz de manera nativa. Si se da este caso, la red New Radio realiza un *EPS Fallback* similar al CSFB de 4G y envía la llamada de voz a la red 4G. Si la red 4G no puede ofrecer VoLTE, realizaría un CSFB a continuación.

Se plantean 2 posibles escenarios. Uno es que el 5G ofrezca servicio de voz de manera nativa y otro es que no lo ofrezca. Es el caso del dibujo que se muestra en la Ilustración 15, donde el usuario ha acampado en el modo 5G SA, requiere voz y realiza una redirección (EPS FB) del usuario al 4G.

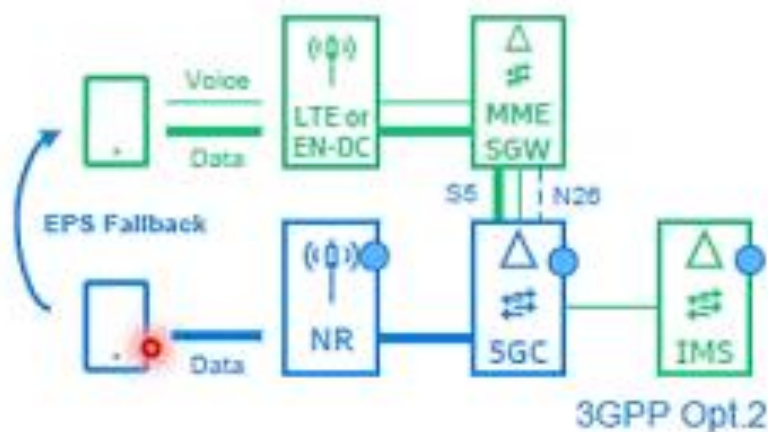


Ilustración 15: Voz en 5G modo SA [28]

En *Release 15* no se puede realizar un *Fallback* al 3G, solo se puede hacer al LTE. De manera que, si un usuario hace un *Fallback* al 4G y en el LTE no hay voz, en el 4G habría que realizar un CSFB. Este procedimiento entraña un peligro y es que, si el tiempo de redirección de los 2 *Fallback* es excesivamente elevado, la llamada puede caerse por temporización. [25]

En el modo SA con soporte nativo de voz en la red 5G, lo que se denomina VoNR (*Voice over New Radio*), la red 5G ofrece el servicio de voz empleando el núcleo IMS. En caso de pérdida de cobertura 5G, la llamada se envía a la red 4G mediante un traspaso *inter RAT*.



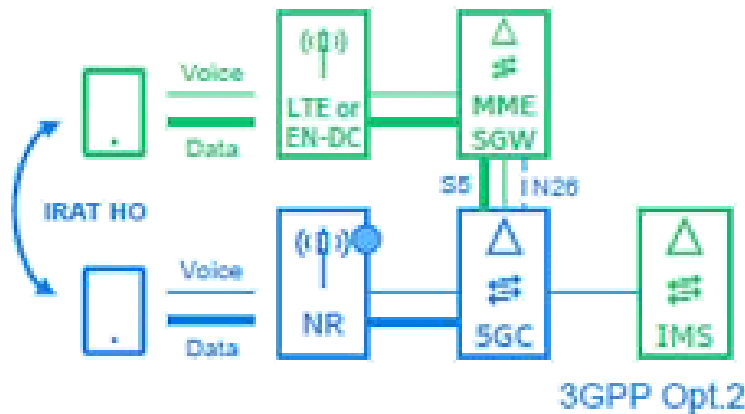


Ilustración 16: Voz en 5G modo SA voz nativa [28]

En la Ilustración 16 se puede observar el recorrido que realiza una llamada en el terminal cuando soporta el modo SA con voz nativa en 5G. Cuando el usuario sale de la cobertura del 5G y pasa a la del 4G, se realiza el traspaso *inter RAT*.

## 2.2. ESCENARIOS

La finalidad del 5G es centrarse en los servicios proporcionados a los usuarios y en los avances tecnológicos necesarios para poder cumplir con los requisitos del servicio demandado. Dentro del alcance del 5G, los servicios se pueden clasificar en 3 tipos principales: [29]

- Banda ancha móvil mejorada (servicios de alta velocidad de datos). Se trata de servicios que van a ser diseñados para satisfacer la creciente demanda de acceso a mayor volumen de datos y de forma más rápida. Esta idea deriva directamente de los servicios de alta velocidad de datos que proporcionaba el LTE y se conoce como eMBB (*enhanced Mobile Broadband*). Algunos ejemplos son smartphones, visualización de videos de ultra alta definición: 4K/8K UHD, juegos de realidad aumentada VR/AR, realidad virtual.
- Internet masivo de las cosas. El IoT masivo, será una extensión de los servicios de IoT actuales que incluyen probablemente casi todas las máquinas que se comunican con otras máquinas. Este planteamiento permitirá abordar una mayor automatización en todos los ámbitos de la vida. Es lo que se conoce como mMTC (*massive Machine-Type Communications*). Como, por ejemplo, gestión de flotas, contadores inteligentes, agricultura inteligente.
- Servicios ultra fiables de baja latencia. Estos servicios implican nuevos casos de usos en los que se pueden realizar pequeños intercambios de datos para proporcionar comunicaciones fiables y críticas. Se denomina URLLC (*Ultra-Reliable Low-Latency Communications*), con un tiempo de latencia menor a 1 ms. Algunos ejemplos son monitorización de la salud, cirugía remota, control de vehículos, conducción autónoma, protección de vehículos frente a colisión, gestión remota de máquinas, etcétera.

En cuanto a la forma general, la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU), ya definió en 2015 los requisitos en forma de KPI para todos los servicios futuros. Estos requisitos se pueden clasificar considerando los tres servicios principales que se centran en el sistema 5G tal y como se observa en la Ilustración 17

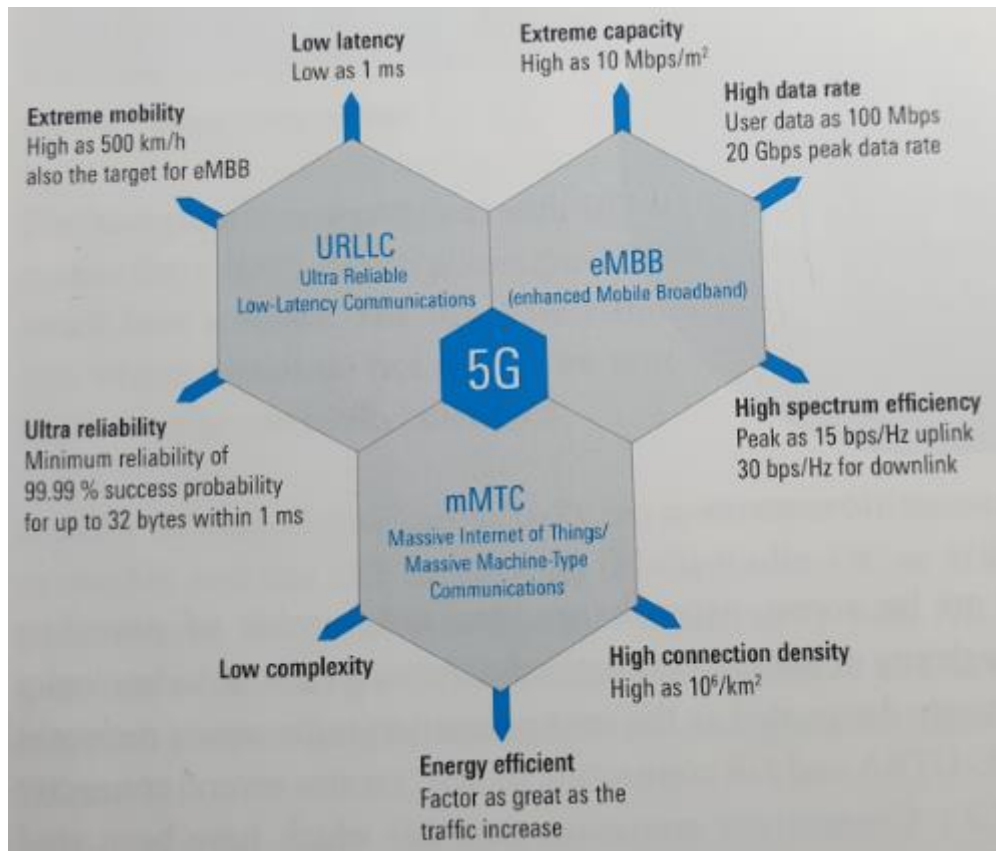


Ilustración 17: ITU vision for IMT-2020 and beyond [24]

Otra versión de la pirámide nos muestra los nuevos escenarios de uso que se darán en el 5G y que se analizarán en detalle más adelante en el apartado 2.3.





Ilustración 18: Nuevos escenarios de uso de 5G [30]

En el apartado de mMTC, ya ha habido bastante desarrollo a través del IoT. IoT son las tecnologías que permiten la conexión a la red de dispositivos sencillos de forma masiva y eficiente. Estos dispositivos estarán tanto en la ropa, como en los coches pasando por los electrodomésticos o las máquinas industriales. Conocido también como internet de las cosas, va a permitir conectar a la red de datos una cantidad masiva de dispositivos muy sencillos, que antes no disponían de conexión y que, aun siendo muchos, van a realizar esa conexión de manera eficiente debido a que los requisitos establecidos para su conexión son muy distintos a los requisitos de los dispositivos que se conectan actualmente a la red. Los dispositivos conectados actualmente a la red requieren un usuario físico, es decir, son típicamente, smartphones, terminales de acceso fijo radio o, en algunos casos, dispositivos que tienen una máquina detrás, como por ejemplo las máquinas de vending, los terminales de pago automático, etc.

El IoT tiene previsto conceder conectividad a otro tipo de dispositivos, tales como contadores de agua, de luz, a las etiquetas de ropa, comida, electrodomésticos y productos de uso cotidiano en general.

Para dar respuesta al internet de las cosas, el 3GPP ha estandarizado el Narrow Band IoT y el Cat-M, aunque también existen otras respuestas tecnológicas que están teniendo éxito. Independientemente de si se emplean las tecnologías del 3GPP u otras alternativas, los requisitos que deben cumplir los dispositivos que se van a conectar a la red, son los siguientes: [31]

- La red debe ser capaz de soportar conexiones de forma masiva. El estándar de 4G no está diseñado para soportar tantos dispositivos conectados ya que los canales comunes, que son los servicios portadores virtuales que se utilizan para que los terminales hablen con la red, no están preparados para la existencia de tantas conexiones. Por eso es necesaria una mejora tecnológica que permita la conexión de millones de dispositivos a la vez. Es a través del 5G donde se hace realidad el IoT masivo.
- Otra demanda de vital importancia gira entorno a las baterías ya que la duración de estas debe ser mucho mayor. Puesto que los dispositivos que van a estar conectados a la red no van a tener la posibilidad de ser cargados con regularidad

o en un período corto de tiempo. Si se pone como caso de uso, el contador del gas se ve que dicho contador normalmente no tiene cerca un enchufe, sino que suele alimentarse a través de pilas. No es viable cambiar las pilas cada pocas semanas o días y deriva en la conclusión de desarrollar baterías con una duración del orden de años.

- Además, deben ser dispositivos muy baratos para que salga rentable el plan de negocio. Se trata de muchos dispositivos que van a ser introducidos en artículos simples y estos productos no van a aumentar considerablemente el precio por el hecho de incluir un dispositivo.
- Y, por último, estos dispositivos deben permitir una cobertura mejorada con respecto a la existente. Las redes 2G, 3G y 4G proveen una cobertura muy buena, pero no es suficiente ya que esta no llega a todos los sitios, como, por ejemplo, sótanos o interiores de algunos edificios. Con el IoT se pretende llegar a los rincones donde las tecnologías previas no han podido llegar.

En la red móvil existen dos carreras en paralelo, una para obtener velocidades lo más alta posibles, ayudándose para ello de técnicas como el *Carrier Aggregation*, el MIMO de alto orden y la suma de ambas con modulaciones para alcanzar velocidades superiores al *Gbps*. Y, por otro lado, el 3GPP quiere ofrecer servicios más simples, con el mayor número de aparatos posibles, caracterizados por su baja velocidad y su amplia cobertura. Esto último es lo que busca el IoT.

Desde el comienzo de la estandarización del 5G, se estableció una categoría, la Categoría 1, conocida como Cat-1, donde aparecieron dispositivos capaces de establecer conexión. Posteriormente, va evolucionando hasta que se estandariza e implementa la categoría Cat-M y el Narrow Band IoT (NB-IoT). En la *Release 16*, el 3GPP decide adoptar el Cat-M y el NB-IoT en portadoras 5G. La toma de esta decisión se debe a que se trata de tecnologías muy bien diseñadas y porque el mercado de IoT tiene muchas características que difieren del mercado móvil. Entre ellas, la ya mencionada anteriormente, permanencia en el tiempo del dispositivo. Si a un objeto se le implanta un módem IoT, ese módem está diseñado para durar unos 10 años, por eso se decide adaptar directamente sobre 5G, para que así vaya sobre tecnología nueva. Aun así, en la *Release 17* va a aparecer un nuevo estándar, conocido como New Radio Lite y que pretende ser un punto medio de diseño entre el NB-IoT o Cat-M y los dispositivos móviles normales de 5G.

NB-IoT y Cat-M son dos tecnologías distintas y por tanto sirven para dar respuesta a casos de uso diferentes. No hay una tecnología mejor que otra, ya que cada una de ellas está orientada a un tipo de aplicaciones. Aunque Cat-M ofrece mayor velocidad y más funcionalidades, a su vez, también requiere mayor complejidad del dispositivo.

La primera versión del estándar de IoT (*Release 13* del 3GPP), establece una velocidad máxima de célula inferior a 100 *kbps*, asignándole un máximo de 65 *kbps* a cada usuario. Por su parte, los Cat-M soportan un *throughput* de celda de casi 1 *Mbps*, pero cada usuario individual no puede superar los 375 *kbps*. El ancho de banda espectral que utilizan también es diferente. Mientras que NB-IoT emplea 200 *kHz* de ancho de banda, Cat-M utiliza 1,4 *MHz*. Esto quiere decir que el NB-IoT ocupa 1 PRB y el Cat-M, 6 PRB. Con esto, se puede observar que Cat-M está orientado a usuarios que demandan un poco más de capacidad.

Otras diferencias que caracterizan a estas 2 tecnologías son que el NB-IoT al ser más simple y emplear menos velocidad logra una cobertura mayor que el Cat-M, alrededor de 20 *dB* adicionales al LTE frente a los 15 *dB* adicionales que presenta el Cat-M. En

cuanto a la modulación, la máxima soportada por NB-IoT es QPSK mientras que en Cat-M se llega a 16 QAM. El hecho de tener que soportar una velocidad tan baja y que la cobertura sea tan grande, permite que la latencia aumente. Así, en NB-IoT, la latencia típica está entre 1,6 y 9,9 segundos y en Cat-M entre 0,3 y 4 segundos.

NB-IoT es una tecnología que no tiene por qué soportarse en todas las bandas de frecuencia. De hecho, se implementa como una portadora distinta e independiente de LTE. Este es el motivo por el que el 3GPP ha tenido que estandarizar esa portadora. Actualmente, el 3GPP soporta NB-IoT en todas las bandas de interés de España (bandas 20, 8, 3, 1 y 7). No obstante, es el operador móvil el que define el NB-IoT. Normalmente se define en una banda baja, como por ejemplo el 800 ya que, al ir en dispositivos de acceso más recóndito, la propagación es mejor en bandas bajas. Los terminales Cat-M por su parte, pueden emplear cualquier banda de frecuencia.

En cuanto a la movilidad, NB-IoT no soporta conectividad en estado conectado, mientras que Cat-M sí la soporta. En estado *idle* el dispositivo NB-IoT se podría mover, pero una vez pasa a conexión activa en curso, no hay movilidad. Si el dispositivo se mueve de una estación base a otra, la conexión se pierde, ya que está pensado para dispositivos fijos y que no requieren enviar gran cantidad de datos. El Cat-M sí que soporta movilidad puesto que está pensado para objetos como camiones, flotas, bicis, patinetes de alquiler, etcétera. Ambas tecnologías permiten el posicionamiento de los dispositivos. [32]

En cuanto al VoLTE (voz nativa sobre 4G), solo es compatible con Cat-M. Los usuarios de Cat-M podrían cursar llamadas de voz. Por otra parte, en implementación, el NB-IoT es una celda independiente, mientras que el Cat-M es una funcionalidad dentro de una celda LTE/5G.

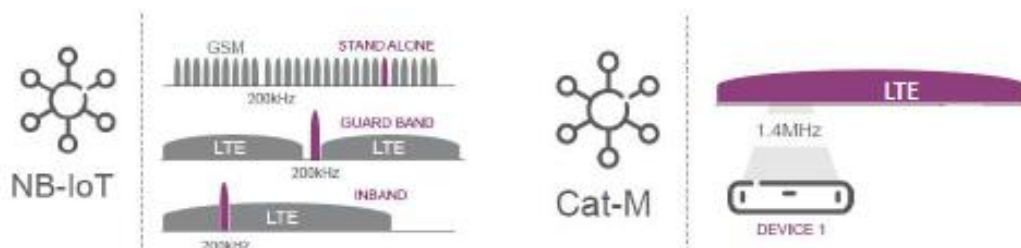


Ilustración 19: NB-IoT y Cat-M en celda LTE [33]

La Ilustración 19 muestra las 3 opciones posibles para desplegar una portadora NB-IoT. *Stand Alone*: se despliega la portadora en cualquier banda. *Guard Band*: se despliega en la banda de guardia del LTE para no quitarle una portadora al LTE. *Inband*: le quita 1 portadora al LTE. El Cat-M, al ser una funcionalidad, va sobre el LTE desplegado.

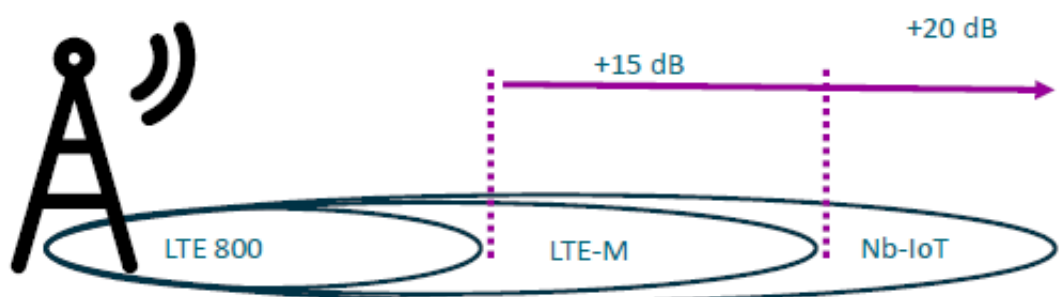


Ilustración 20: Extensión de cobertura NB-IoT y Cat-M [33]

En cuanto a la extensión de cobertura, en la Ilustración 20 se puede ver como con Cat-M el radio de cobertura de LTE aumenta en 15 *dB* mientras que con NB-IoT se consigue aumentar la cobertura hasta 20 *dB*. Este incremento de cobertura, se da gracias a las retransmisiones y nuevos canales de control y es fundamental para los dispositivos que se encuentran situados dentro de edificios y/o en plantas subterráneas. Tanto en Cat-M como en NB-IoT, todos los datos se transmiten varias veces con una modulación muy baja. Cuantas más repeticiones se generen, mejor será la cobertura, aunque disminuye la capacidad. Por tanto, se puede concluir que se trata de un compromiso entre cobertura y capacidad.

Otra funcionalidad básica para estas tecnologías es el ahorro de energía, conocido como *Power Saving Mode*, puesto que por norma general este tipo de dispositivos no van a estar conectados a la corriente eléctrica y además van a encontrarse situados en lugares remotos y poco accesibles. Por este motivo, el consumo de energía debe ser el mínimo posible, con una duración de años. Para conseguir dicho ahorro de energía, se estandariza un nuevo estado para estos dispositivos, nombrado estado *Deep Sleep*. Aunque en el estado *RRC Idle* el dispositivo escucha y está en ahorro de energía, este estado no es suficiente para el internet de las cosas ya que se pretende que la duración de las baterías sea mucho mayor. Esta es la razón de introducir el nuevo estado *Deep Sleep*. El desarrollar este estado durmiente permite que el dispositivo, al terminar de realizar su función, apague su circuitería. Además, se le añade un *reloj* para que despierte puesto que, como mucho, enviará información una o dos veces al día. El estado *Deep Sleep* es un nuevo estado de ahorro máximo de batería. Este estado equivale a un apagado del dispositivo, con la salvedad de que el usuario se mantiene registrado en la red y no tiene que volver a registrarse para volver a estar conectado. En el estado *Deep Sleep* el usuario no es alcanzable por la red. Un usuario puede estar en *Deep Sleep* hasta un máximo de 13 días. A medida que los dispositivos tienen que despertar más veces para enviar información, deja de ser ventajoso este sistema de ahorro de energía. La siguiente opción de ahorro de energía es mediante eDRX. Se trata de otro mecanismo más para reducir el consumo de batería de los dispositivos, extendiendo el periodo de *Sleep* del dispositivo en estado *RRC Idle*. Permite al propio dispositivo negociar con la red cuántos periodos de 10,24 segundos puede descansar antes de volver a escuchar canales DL. Durante este tiempo, el dispositivo no escucha los *paging* o los canales de control DL y de esta forma, la red no puede contactar con dicho dispositivo, pero requiere sincronismo en fase en la red radio. El funcionamiento del eDRX se caracteriza porque el terminal, una vez despierta de su estado de alta eficiencia energética, está un periodo más corto esperando para pasar a dicho estado de conexión donde vuelve a enviar y recibir datos. El periodo máximo del eDRX entre periodos de estar despierto es de 40 minutos. [34]

También cabe destacar una funcionalidad muy importante para estas tecnologías, es la conocida como funcionalidad DoNAS (Data over NAS). Se trata de una funcionalidad del núcleo que simplifica y reduce los mensajes que transmite el dispositivo. Además, asimismo permite el envío de datos no-IP, evitando las cabeceras. En LTE existe una separación entre el plano de usuario y el plano de control. Con el sistema DoNAS los datos de usuario pueden incluirse en los mensajes de señalización. Este desarrollo influye notablemente en el consumo de energía debido a que se trata de una funcionalidad que permite enviar los paquetes de datos en la portadora de señalización. Entre las ventajas de la funcionalidad DoNAS es sustancial el ahorro de energía en la transmisión de datos, y este punto se traduce en un ahorro de batería. En contraposición no es válido para todas las aplicaciones, requiere soporte del MME y presenta cierta incertidumbre sobre seguridad y QoS.

El 5G NR también se ha desarrollado para otro tipo de escenarios completamente diferentes como es el caso de la automatización industrial o del esperado coche autónomo. Para este tipo de aplicaciones, los requisitos de la red son distintos puesto que se trata de servicios críticos donde la fiabilidad y la baja latencia desempeñan un papel primordial. Se necesita una respuesta en tiempo real, menor a 1 ms, y una velocidad de transmisión muy elevada. Asimismo, la seguridad e integridad de los datos en todo el proceso de comunicación, debe estar garantizada. Se trata de los servicios tipo uMTC o URLLC por sus siglas en inglés. También se prevé su uso para escenarios de aplicación sanitaria, como pueden ser operaciones o para el control de redes inteligentes.

Y, por último, están los escenarios que se encuentran bajo el marco eMBB, donde las características más relevantes son la capacidad de la red, la velocidad y la cobertura. Está enfocada sobre todo a aplicaciones que necesiten realidad aumentada y realidad virtual.

## 2.3. NETWORK SLICING

El *Network Slicing* es un cambio de filosofía respecto a la idea tradicional de dedicar redes físicas y recursos diferenciados para distintas aplicaciones. Con el *Network Slicing* una sola red física es dividida en varias redes lógicas, especializadas en diferentes tipos de servicios.

Los recursos de la capa física del acceso radio se dividen para cada tipo de servicio, para lo cual es necesaria la flexibilidad de la capa física del 5G. Los paquetes de cada tipo de servicio pueden seguir diferentes caminos en la red en función de sus requisitos. El terminal envía a la red el NSSAI que requiere, este a su vez puede estar compuesto de hasta 8 S-NSSAI. Cada S-NSSAI (*Single-Network Slicing Selection Assistance Information*) está compuesto del SST (*Slice/Service Type*), que indica los servicios y funcionalidades requeridos, y el SD (*Slide Differentiator*), que contiene información adicional para realizar una selección precisa entre las *slices*. [35]

Tipo de servicio	Valor estándar de SST
eMBB	1
URLLC	2
MIoT	3

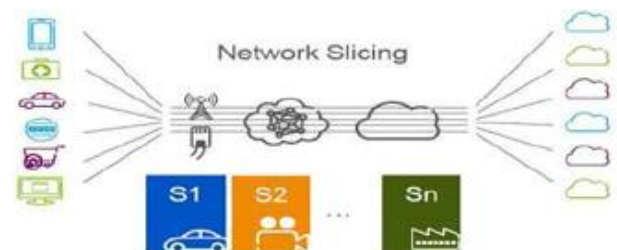


Ilustración 21: Network Slicing

En la Ilustración 21 se muestra el valor que se le asigna al SST según se clasifique el tipo de servicio.

Existe una única red, con una sola portadora (si solo hay una banda) o varias portadoras (en caso de emplear varias bandas), una sola estación base y un único núcleo de red, pero los usuarios que acceden a dicha red van a tener la opción de ser servidos por distintas *slices*. Cada *slice* es un concepto lógico y va a estar especializada en cierto tipo de servicios. A nivel físico en la portadora, sí que se divide la portadora en distintas



zonas físicas, es decir, habrá diferentes tipos de *Resource Blocks*, cada uno de ellos, dedicado a ofrecer un tipo de servicio. Cada porción de la portadora, también conocido como *bandwidth part*, puede tener distintas características como el ancho de banda de la portadora o el TTI.

Cuando un usuario accede a la red, puede requerir ser servido por una única *slice* o por varias *slices*. El usuario puede pedir varios S-NSSAI, donde cada S-NSSAI identifica una *slice* concreta. Puede pedir hasta un máximo de 8 *slices*, aunque lo normal es solicitar 1 o 2.

A diferencia del LTE, en New Radio se puede tener varios flujos con calidad de servicio diferenciada dentro de un servicio portador. En la red radio, la priorización entre los diferentes flujos es generada por una capa de protocolos adicional denominada SDAP. Esta capa se introduce sobre PDCP. La estandarización de dicha capa se define en la *Release 16*. El terminal continúa pudiendo soportar varios servicios portadores en paralelo.

En 5G existe el concepto equivalente a QCI, designado como 5QI (5G Quality of Service Indicator). Los paquetes a nivel SDAP, acarrean un marcado en su cabecera para diferenciar los flujos o 5QI a los que pertenecen. Existen valores 5QI estandarizados, igual que ocurría con el QCI en 4G. [36]

## 2.4. DYNAMIC SPECTRUM SHARING

El DSS o *Dynamic Spectrum Sharing* es una funcionalidad de la red que permite compartir el espectro de una banda empleada actualmente para LTE, entre LTE y 5G, de manera dinámica.

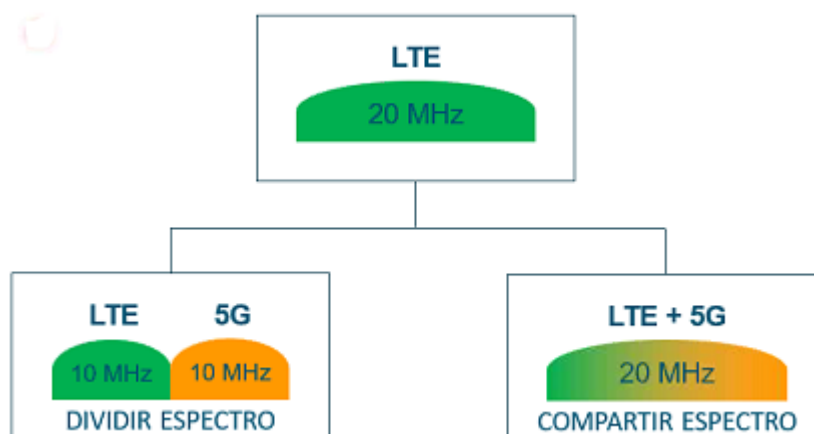


Ilustración 22: Esquema DSS [37]

Tal y como puede verse en el esquema de la Ilustración 22, cuando se divide el espectro para utilizarlo tanto para LTE como para 5G, existe un uso ineficiente del mismo, una degradación significativa de la capacidad del LTE. Si la celda se encuentra muy congestionada, puede no terminar siendo admisible por la carga de dicha celda LTE. Por el contrario, cuando se comparte el espectro para las 2 tecnologías, LTE y 5G, se produce un uso eficiente del espectro y admite mayor capacidad tanto en LTE como en 5G.

Mediante la funcionalidad DSS, se puede introducir la tecnología 5G en una de las bandas dedicadas hoy en día para LTE, sin impactar de manera significativa a la capacidad del LTE.

Se trata, por tanto, de una funcionalidad propia de los fabricantes y no de un bloque estandarizado por el 3GPP. Sirve para dar acceso al 5G a bandas operativas en la actualidad por el 4G. Si no hay usuarios 5G, toda la capacidad de esa banda es utilizada por los usuarios 4G y viceversa, si no hay usuarios LTE, todos los recursos de esa banda se les asignan a los usuarios 5G. En caso de coexistir simultáneamente usuarios de los 2 tipos, se reparte dinámicamente en función de la demanda de cada usuario.

En la práctica, el DSS tiene cierto impacto en la red, ya que los usuarios de LTE van a disponer de un poco menos de velocidad de la que disfrutaban antes de introducir el DSS.

Existen varias alternativas de implementación. Una célula LTE, aunque no curse tráfico no quiere decir que esté vacía. Los canales de difusión y las señales de referencia de la célula ocupan *Resource Elements* de la matriz frecuencia-tiempo. Para hacer uso del espectro simultáneamente para una célula 5G sin impactar al LTE existen 2 alternativas.

- Subtramas *MBSFN*: Se trata de una funcionalidad de LTE que se define en la *Release 8* del estándar y que permite reservar subtramas para otros usos. Inicialmente estaba pensado para MBMS.

Esta funcionalidad permite reservar subtramas LTE para usos especiales, de manera que los terminales LTE convencionales ignoren dichas subtramas. La funcionalidad se diseñó con la idea de introducir MBMS en LTE, pero se ha visto que puede implementarse para reservar subtramas para introducir señales 5G. El uso de subtramas MBSFN se señala en los canales de difusión de la célula LTE, y la configuración de este tipo de subtramas solo se puede modificar cada 5 minutos.

El inconveniente de esta funcionalidad es que impide el uso de dichas subtramas para LTE, restando capacidad al 4G de manera significativa. Es por ello por lo que esta funcionalidad solo es recomendable emplearla para transmitir los canales de difusión 5G, que de otra forma colisionarían con las señales LTE.

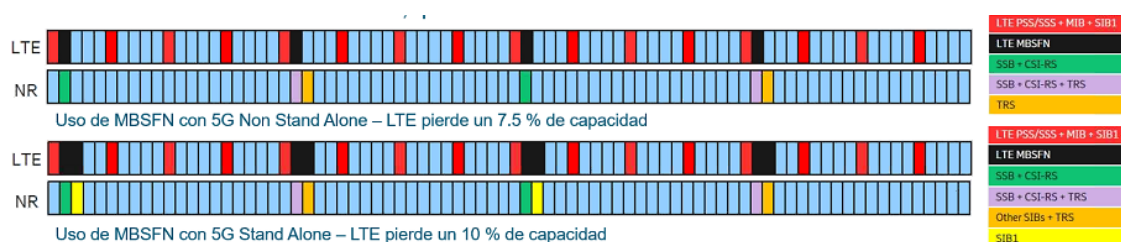


Ilustración 23: Alternativas implementación: subtrama MBSFN [37]

Por tanto, la célula 5G solo utiliza el *downlink* en subtramas MBSFN. En la práctica, es difícil que el 5G pueda aprovechar más del 40% de la capacidad de la banda. Esta funcionalidad es la más fácil y rápida de implementar.

- *Rate matching*: Funcionalidad que se incorpora desde el principio en la *Release 15* de 5G. Su función es indicar a los terminales que deben ignorar ciertos *Resource Elements* de los *Resource Blocks* que se les asigna.

El proceso que sigue el *rate matching* es el siguiente. La estación base 5G (gNB) informa al terminal 5G sobre la ubicación de las señales y canales comunes de

la célula 4G (CRS, PSS/SSS y PBCH). Tanto la estación base como el terminal evitan utilizar los *Resource Elements* empleados por dichas señales y canales para transmitir y recibir el N-PDSCH. Pero requiere soporte en el terminal para implementar 2 funcionalidades. Dichas funcionalidades aparecen en el estándar 3GPP y son obligatorias para el terminal. Son la FG 5-28, también conocida como *Rate matching around LTE CRS* y FG 5-26 o *Semi-static rate matching resource set configuration for DL*. Estas funcionalidades son enviadas por los terminales en el enlace ascendente cuando remite sus capacidades, donde comunica si dichas funcionalidades están implementadas, si no debe implementarlas ya que es obligatorio e indicar si han sido probadas. En caso de no haber sido probadas, la red radio considera que el terminal no las soporta. Esta es la razón por la que no todos los terminales móviles 5G van a poder beneficiarse desde un principio del DSS. La gran mayoría de terminales que hay a día de hoy en la red, no soportan el DSS puesto que no toleran estas 2 funcionalidades.

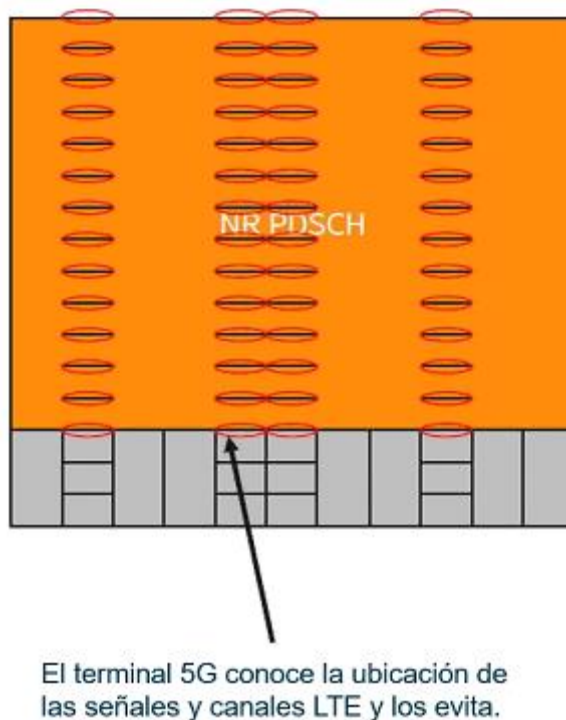


Ilustración 24: Alternativas de implementación: rate matching [37]

La estación base informa al terminal sobre cómo debe realizar el *rate matching* en el primer *RRC Reconfiguration*. Pero las señales y canales que tengan que ser utilizados antes, deben ser protegidos de alguna otra manera. En conclusión, la célula 5G realiza *rate matching* del canal NPDSCH para evitar el CRS, SSS, PSS y PBCH. Los canales y señales 5G NR SSB, TRS, CSI-RS y SSB también hacen *rate matching* para evitar los canales y señales de LTE. Éste último *rate matching* es el que provoca que la célula 5G pierda unos 2 dB de cobertura al eliminar *Resource Elements* necesarios.

También existe la posibilidad de implementar las 2 funcionales, MBSFN más *rate matching*. En este caso, la célula 5G realiza como antes *rate matching* del canal NPDSCH para evitar el CRS/SSS/PSS/PBCH. Se reservan algunas subtramas para los



canales y señales SSB, TRS; CSI-RS y SIP de la célula 5G. Con esta alternativa, no se pierde cobertura en la célula 5G, aunque la célula LTE pierde algo más de capacidad que con la funcionalidad anterior.

Es importante seleccionar adecuadamente la alternativa de implementación más conveniente ya que impacta directamente en la capacidad de los sistemas 4G y 5G.

El *scheduler* es una parte fundamental del sistema que se encarga de realizar el reparto de recursos. Los *Resource Blocks* de la trama radio se reparten dinámicamente entre 4G y 5G en función de las necesidades de capacidad de cada sistema. Actualmente, en la industria, se manejan 3 posibles periodos para el reparto de recursos:

- Cada 5 minutos: Se trata del caso de implementación de DSS a través de subtramas MBSFN. Para este proceso no es posible una periodicidad menor, puesto que es el periodo de actualización de información para el SIB relativo a subtramas MBSFN.
- Cada 10 ms: Es la duración de una trama radio LTE. Se utiliza con la alternativa de implementación *rate matching* y es relativamente fácil de implementar puesto que se corresponde con una periodicidad *lenta*. Esta opción se conoce comúnmente como *Dynamic Spectrum Sharing*.
- Cada 1 ms: Es la duración de una subtrama radio LTE o 1 TTI LTE. Se aplica también con la alternativa de implementación *rate matching*. Su puesta en práctica es más compleja ya que se trata de una periodicidad *rápida*. Esta alternativa se conoce popularmente como *Instant Spectrum Sharing*.

Para el tráfico típico de los smartphones, que es el tráfico de ráfagas, la periodicidad más recomendable es la *Instant Spectrum Sharing*, cada 1 ms. Los fabricantes normalmente suelen implementar en primer lugar la periodicidad de 10 ms para pasar posteriormente a 1 ms. [37]

A continuación, se describen las principales ventajas que ofrece la implementación del DSS. Permite una rápida disponibilidad del 5G sin necesidad de instalar hardware adicional en la estación base. Dota a la red de cobertura 5G de una manera rápida y sencilla, activando una célula 5G sobre células 4G ya existentes. La célula 5G se activa sobre las celdas LTE de una banda intermedia (típicamente la banda de 1800 MHz), y los móviles 5G pueden disfrutar de *Dual Connectivity* entre el 5G de dicha banda y el 4G en una banda baja como, por ejemplo, la banda de 800 MHz. La banda LTE intermedia pierde una pequeña parte de su capacidad. Los usuarios 5G obtienen una velocidad en dicha banda algo menor a la que obtenían antes los usuarios LTE. De esta manera, además, los usuarios pueden ver el icono 5G en sus terminales. [38]



Ilustración 25: Ventajas del DSS [38]

También ofrecerá una alta capacidad para el 5G en el modo *Stand Alone*. Cuando se active la modalidad SA para el 5G con el núcleo de red 5G, el espectro disponible en exclusiva para el 5G serán probablemente las bandas 700 y 3500 MHz. Esto implica

que los usuarios que dispongan de cobertura de 3500 MHz podrán disfrutar de las altas prestaciones del 5G, pero la mayoría tendrán peores prestaciones que los usuarios LTE puesto que los servicios van por la banda de 700 MHz. Este motivo hace que sea necesario añadir células 5G en bandas intermedias, que poseen un buen equilibrio entre cobertura y capacidad y de esta forma asegurar que los usuarios 5G se benefician de prestaciones similares o superiores a las que tienen los usuarios en LTE. Para ello es particularmente valiosa la funcionalidad DSS.



Ilustración 26: Ventajas del DSS: Alta capacidad 5G SA [38]

Además, los usuarios 5G SA se caracterizan por tener menos latencia en las conexiones de datos, mejor cobertura que los usuarios 5G NSA, ya que toda la potencia del terminal sería para el 5G, y por la posibilidad de recurrir al *Network Slicing*.

Otra ventaja fundamental es que supone un incremento de cobertura para el 5G 3500 TDD. El uso del 5G en bandas intermedias permite mover los canales de control del enlace descendente y del enlace ascendente del 5G a bandas intermedias de manera que desaparece la limitación de cobertura en enlace ascendente del 5G 3500 TDD.

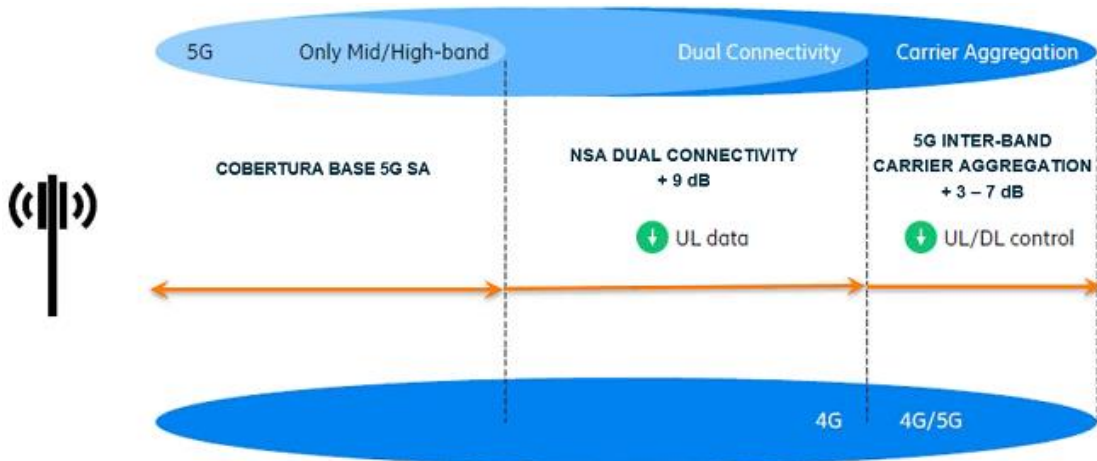


Ilustración 27: Ventajas del DSS: Mayor cobertura 5G 3500 TDD [38]

De acuerdo con el análisis de uno de los principales suministradores en una ciudad europea, el porcentaje de usuarios que pueden disponer del 5G 3500 TDD en cada caso sería el que se muestra en la Ilustración 27. Un 45% de los usuarios tendrían solo de 5G SA, un 67% disfrutarían tanto de NSA 3500 con 1800 y un 84% de los usuarios podrían implementar *Carrier Aggregation* en 3500 más 1800.

### 3. ANTENAS

Este capítulo se va a centrar en el funcionamiento propio de las antenas. Donde se verá las características tanto de las antenas pasivas o antenas *legacy*, que se han venido utilizando hasta la llegada del 5G, como de las antenas activas que se empiezan a implantar para New Radio con la finalidad de poder generar *beamforming* y *Massive MIMO*.

#### 3.1. PUERTOS DE ANTENAS

El patrón de una antena es una representación espacial de cómo la señal se combina al ser transmitida por varios dipolos. Un dipolo es un elemento radiante.

Un array de antenas pasiva está formado por muchos dipolos, normalmente situados en vertical que radian la señal aportándole ciertas características de acuerdo con la colocación de los dipolos en la antena. De acuerdo con esas características, la señal en el aire a medida que avanza se va combinando de cierto modo. Los dipolos radian la misma señal y los puntos donde interfieren las dos señales, se suman. A este suceso se le llama suma constructiva y permite incrementar la potencia aparente de la señal en ese punto. Los puntos de corte son, por tanto, puntos donde la potencia de la señal crece. Por otro lado, las zonas donde las señales están en contrafase, es decir el punto donde un dipolo anula la señal de otro dipolo, es lo que se conoce como nulo de propagación [39]. Generalmente, la distancia media entre los dipolos es el centro de una suma constructiva, la dirección central entre el punto medio de todos los dipolos de la antena, es decir, es el que posee la mayor parte de la energía puesto que es donde más sumas constructivas se generan. [40]

Cuando se habla de lóbulos, *beams* o de patrones de antena, se hace referencia a un concepto físico, a un concepto de propagación de la señal. Un *beam* no es más que una dirección física en la que la señal se suma constructivamente logrando generar cada vez más apuntamiento.

A medida que se incluyen más dipolos en el lado transmisor, los puntos en los que se suman coherentemente las señales se reducen. Normalmente, esos puntos coinciden con el centro de todos los dipolos. Este es el motivo por el que a medida que se añaden más dipolos se consigue una señal más estrecha. Se logra apuntar más la señal obteniendo un lóbulo principal más estrecho que se genera con una ganancia mayor. Como inconveniente cabe mencionar que el hecho de incluir más dipolos también genera más lóbulos secundarios, haciendo que la energía radiada por la antena se disperse. A medida que el número de haces se incrementa, la energía está más concentrada espacialmente, se logra que los haces sean más estrechos, con mayor ganancia y una directividad mayor. Este tipo de construcción permite concentrar la radiación de la señal en ciertas direcciones, hecho que es útil para poder aislar a los usuarios en el espacio y así aplicar a posteriori técnicas de *Massive MIMO*.

En los sistemas previos al 5G New Radio, los elementos típicos que componen una estación base macro son los equipos radio, el sistema radiante, la transmisión, la infraestructura general y la estructura soporte. [10]

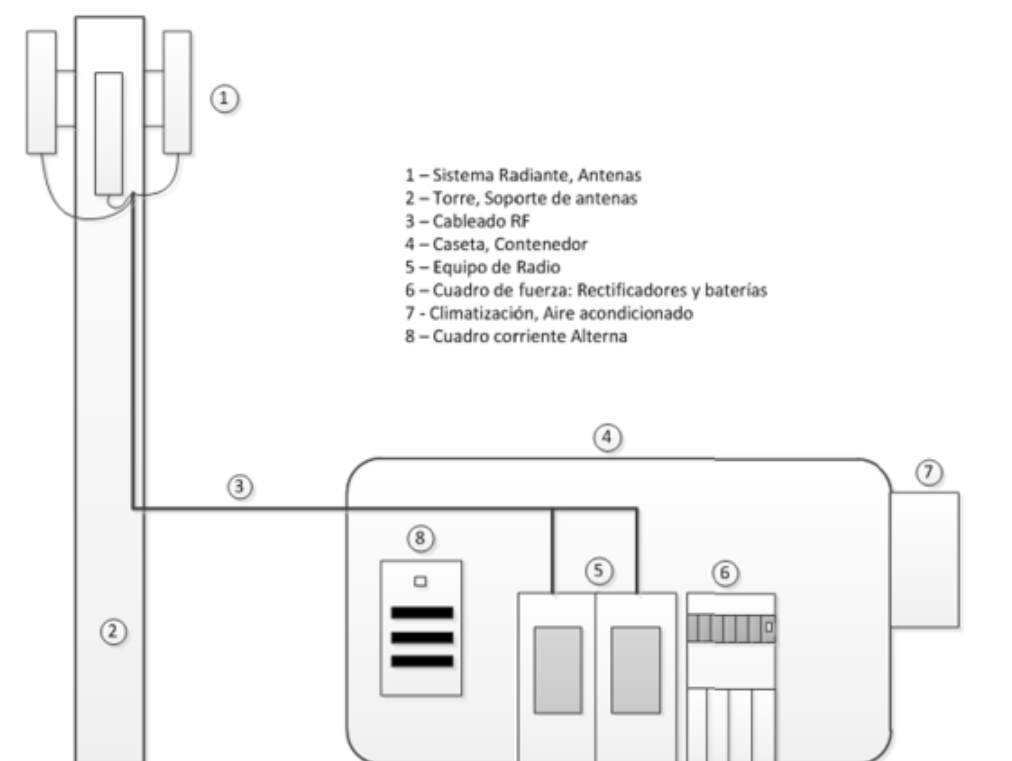


Ilustración 28: Elementos típicos de una estación base [10]

En la Ilustración 28 puede verse el aspecto típico que presenta una estación base macro. La estructura soporte hace referencia al tipo de soporte donde se instalan las antenas como torres, mástiles tubos, empalizadas, etcétera. La infraestructura general se compone del cuadro de energía, la climatización, la puesta a tierra, las luminarias, el detector de incendios y la bandeja de coaxiales, es decir, todos aquellos elementos que sirven para alimentar y acondicionar la estación. La transmisión permite conectar la estación con el resto de la red, así como ofrecer conexión de las máquinas entre sí. Actualmente, la mayoría de las transmisiones llegan a través de fibra, aunque puede darse por par de cobre, radioenlaces o vía satélite. Hasta la llegada del LTE, la transmisión de fibra podía darse con 1 Gb de capacidad, pero para el 5G son necesarios enlaces de 10 GB. En cuanto a los equipos radio, son los elementos que transmiten y reciben las señales y a su vez se compone de varios elementos como son la banda base, que es donde se realiza el tratamiento de señal, el módulo radio o cabeza remota, que es la sección de radiofrecuencia y donde se realiza un procesamiento digital, se transforma la señal a RF y se amplifica. Y, por último, está el sistema radiante. El sistema radiante está formado por la antena que se conecta con el módulo radio por medio de cables RF (cables coaxiales) con conectores RF en sus extremos [10].

Las antenas pasivas se caracterizan en función del número de arrays de banda baja y de banda alta (con la llegada del 5G las hasta ahora denominadas bandas altas pasarán a convertirse en bandas medias puesto que las nuevas bandas de trabajo del 5G funcionan en el rango de GHz) [41]. Los arrays hacen referencia al rango de frecuencias en el que funcionan. Típicamente, en España, los arrays de banda baja de las antenas actuales que se emplean en las estaciones macro, cubren las bandas de 700 MHz, 800 MHz y 900 MHz. Por su parte, los arrays de banda alta suelen cubrir las bandas de 1800 MHz, 2100 MHz, 2600 MHz y algunos también ofrecen la posibilidad de cubrir la banda de 1500 MHz.



Ilustración 29: Puertos de una antena pasiva 2L4H [42]

En el diseño de la antena, cada array se materializa hacia el exterior por medio de 2 bocas. Estas 2 bocas se deben a la doble polarización con  $\pm 45^\circ$ . Y es en estas bocas donde se conectan los cables RF que permiten unir las antenas con el módulo radio. En la Ilustración 29 se muestra el ejemplo real de una antena pasiva típica de 2 arrays de banda baja, que se corresponde con las 4 bocas rojas, y 4 arrays de banda alta, con las 6 bocas amarillas. Los puertos AISG (AISG1 y AISG2) que aparecen en la Ilustración 29, no es más que el dispositivo RET. Muchas antenas cuentan con RET (*Remote Electrical Tilt*). El RET permite variar de manera remota el tilt eléctrico de la antena. En el caso de la Ilustración 29, se muestran 2 entradas porque se trata de un RET doble, es decir, que podría llegar a ser utilizado por 2 operadores móviles diferentes y cada uno podría variar sus arrays de forma independiente.

Como puede verse, para las antenas pasivas, el equipo radio y el sistema radiante son 2 elementos independientes y diferenciados. Los equipos radios son diseñados y fabricados por los suministradores radio como son Huawei, Ericsson o Nokia, sin embargo, las antenas son específicas de fabricantes de antenas como son Commscope o Kathrein. Pero, con la llegada del 5G New Radio y las antenas activas, el modelo de negocio cambia puesto que el sistema radiante y la cabeza radio forman un único elemento y, por tanto, el suministrador y fabricante deben ser la misma persona. En el caso de Huawei, por ejemplo, no ha supuesto un gran cambio, puesto que esta empresa tecnológica ya era suministrador y fabricante de antenas, pero para otras compañías ha supuesto un reto porque o bien la empresa ha tenido que abrir una nueva área que desarrolle antenas o bien suministrador y fabricante tienen que unir alianzas para poder entrar en el mercado del 5G.

Asimismo, puesto que, en las antenas activas el equipo radio y el sistema radiante son el mismo elemento, ya no son necesarios los cables coaxiales y la conexión entre la banda base y la antena activa se realiza mediante un único puerto de fibra.

Para conseguir apuntar los lóbulos en la dirección deseada, hay que cambiar la fase. Si se cambia la fase, el punto de cruce donde se hallaba un máximo de la señal, se desplaza, consiguiendo de esta forma que todos los puntos de suma constructiva se desplacen. Gracias a este cambio de fase, se consigue apuntar el *beam* sin tener que tocar físicamente los dipolos. Este procedimiento es el que se emplea para el *beamforming* o conformado de haz que se define más adelante.



En las antenas pasivas el *beamforming* suele darse por defecto, por la propia construcción de la antena ya que los dipolos conservan cierta separación física para poder generar algo de desfase en la señal de modo que el haz al que apunta esa señal no tiene por qué estar centrado en  $0^\circ$ . Dicho haz, de acuerdo con la disposición de los dipolos, puede apuntar a  $-1^\circ$ , a  $1^\circ$  y a  $2^\circ$  y recibe el nombre de tilt.

La mayoría de las antenas incluyen también una varilla en su diseño, que permite introducir cierto rango de desfase y mover el haz de un lado a otro de manera vertical. Además, el RET se encarga de generar también un desfase en la señal, bien con un elemento pasivo o bien con un elemento activo, de forma eléctrica y remota, es decir, no hay que estar físicamente en la estación base para poder modificar la inclinación del haz en la antena.

### 3.2. BEAMFORMING

El *beamforming* o conformado de haz es una técnica que combina la señal de varias antenas con el único objetivo de apuntar la señal en una dirección concreta. Este propósito se consigue, tal y como se ha explicado anteriormente, realizando cambios de fase. Ajustando los desfases, de tal forma que se sume la señal constructivamente. La suma de la señal se produce en el aire, por lo que el terminal no es capaz de separar esos *beams*, él ha recibido esa única información y no sabe que la señal le ha llegado por diferentes caminos. Por eso el terminal demodula la señal como si hubiera un único *layer* dentro. Si se quiere introducir un segundo *layer* hay que realizar un segundo *beamforming* con otra polarización o en otra dirección.

Puede implementarse *beamforming* estático. En este caso se establecen unos pesos fijos en el desfase y cada cierto tiempo o cada ciertos recursos se puede modificar esa fase de modo que se generan direcciones concretas de apuntamiento de señal. De esta forma se consigue separar angularmente la celda y así lograr enviar una información diferente en cada dirección. Los usuarios que están en cada una de las direcciones de propagación reciben un mensaje distinto, consiguiendo así el MU-MIMO.

En el *user-based beamforming* se recibe *feedback* por parte del usuario. La finalidad es apuntar a un usuario concreto y para lograr este objetivo no se pueden aplicar pesos prefijados que dividan angularmente la célula como en el caso anterior, sino que requiere apuntar la señal en la dirección concreta en la que se encuentra dicho usuario. Para ello, hay que introducir unos desfases concretos para lograr que la señal se sume en el aire en esa dirección específica. Para lograr esto es necesario que el usuario le envíe información a la antena sobre cómo está recibiendo los estáticos. De esta manera, la antena es capaz de apuntar al terminal con un *beam* concreto. Este mecanismo es el que se utiliza para las señales piloto de 5G. Se emplean pilotos apuntadas en diferentes direcciones, el usuario informa sobre cómo está viendo esas señales piloto y con esos datos, el nodo es capaz de identificar dónde está el terminal. [43]

El punto de conformado de haz con cierto rango de movimiento es determinante en la confección del *Massive MIMO*. Si se puede apuntar la señal en una dirección concreta y además se genera una señal con mucho apuntamiento, se logra concentrar la señal en un punto concreto, mientras que el resto de la celda apenas recibe nada de esa señal y se pueden reutilizar esos recursos en otro punto de la célula. A medida que aumentan rápidamente los transmisores, los haces se vuelven más estrechos, se genera más

riqueza entorno al apuntamiento y, por tanto, se puede obtener más ganancia del *Massive MIMO*.

Si, además se dispone de un banco de dipolos en horizontal, que permita introducir un desfase en este sentido, se consigue desplazar también el azimut de la celda con este mismo desfase.

Cuanto más señales con diferente desfase sea capaz de generar la antena, más rico va a ser el *beamforming* y habrá mayores posibilidades de apuntar la señal. Cuanto más desfases distintos se puedan crear, más cantidad de apuntamientos diferentes.

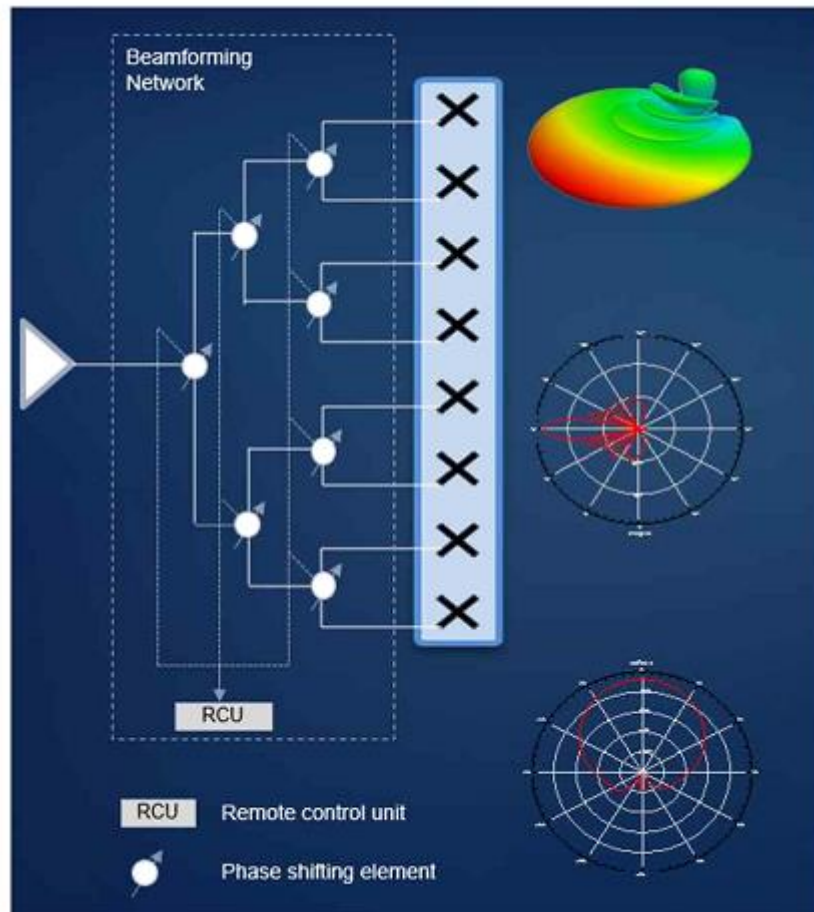


Ilustración 30: Beamforming en antenas pasivas [44]

En las antenas pasivas existe poca opción de desfase puesto que los dipolos están contruidos físicamente en una posición concreta, son alimentados por un amplificador, situado normalmente en el equipo radio, y se le añade un desfasador que bien mediante las varillas existentes en la propia antena o bien mediante RET, permite introducir un desfase concreto de modo que la señal se mueve en vertical hacia arriba o hacia abajo. Se trata de un apuntamiento muy simple, ya que solo se dispone de un formato de *beam* creado según se han dispuesto los dipolos y el desfase que se logra no es muy grande. Por eso, se considera que las antenas clásicas, las antenas pasivas, ya realizan algún tipo de *beamforming* aunque con limitada flexibilidad y poca posibilidad. En la Ilustración 30 se muestra el interior de una antena pasiva y cómo se distribuyen los dipolos a lo largo de ella.

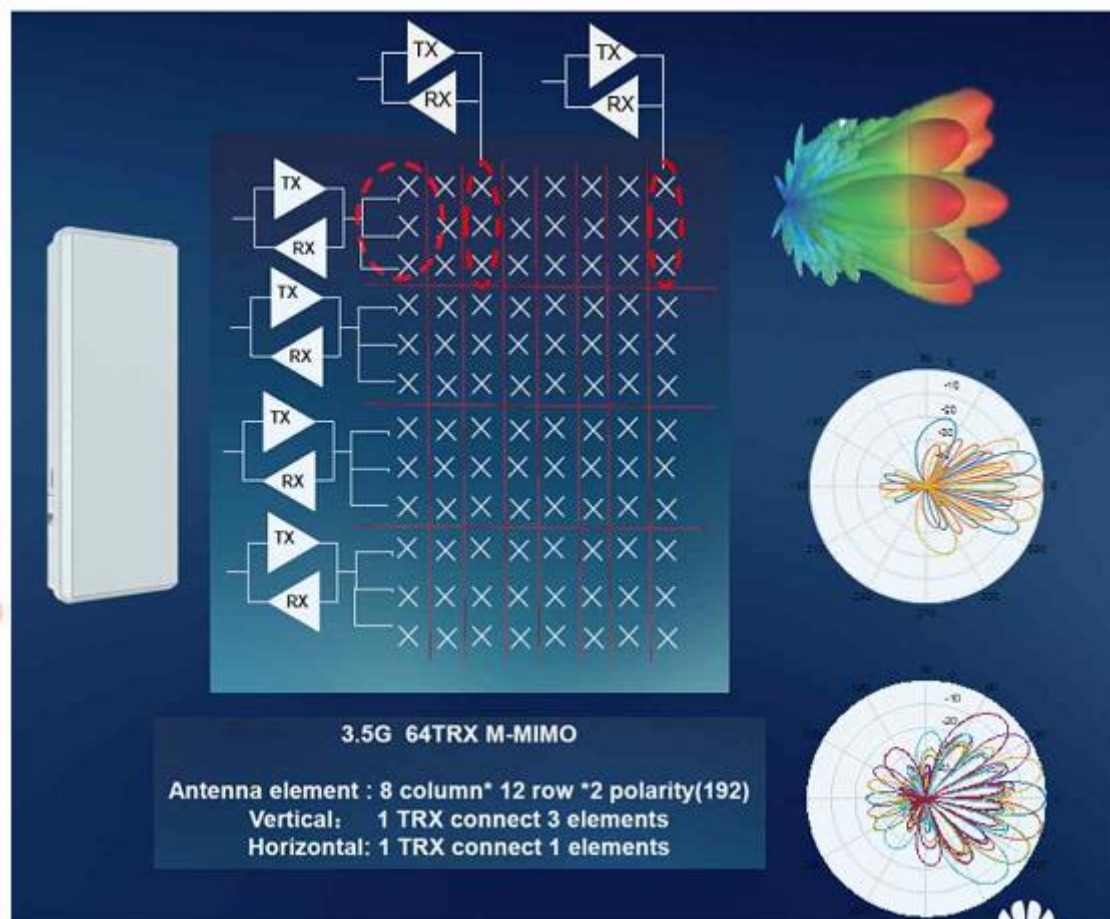


Ilustración 31: Beamforming en antenas Massive MIMO [44]

En la Ilustración 31 se muestra una antena activa 64TRX. Que una antena activa sea 64TRX quiere decir que está formada por 64 PA (64 antenas, 64 generadores de señal o 64 amplificadores). A cada uno de esos 64 elementos se le puede otorgar una fase distinta, logrando alcanzar 64 desfases diferentes la señal. Las antenas activas se construyen como una rejilla de dipolos y detrás de esa rejilla hay amplificadores. Para el caso de la Ilustración 31, en las antenas hay un amplificador conectado a 3 dipolos en horizontal, una fila de dipolos en vertical y 2 polarizaciones. La antena puede introducir un desfase diferente para cada cuadrícula de 3 dipolos. Cada uno de esos 3 dipolos va a generar un apuntamiento vertical (un *beam* estrecho) de unos  $8^\circ$  aproximadamente. Se aprovecha el desfase activo que se puede introducir en la señal para apuntar esos  $8^\circ$  de *beam* más o menos arriba. Como, además, también se disponen dipolos en horizontal, se consigue generar apuntamiento en horizontal. Al tener los elementos radiantes distribuidos en vertical y en horizontal se consigue realizar apuntamiento en 3 dimensiones. [44]

No es necesario generar todos los apuntamientos, sino que se puede crear hasta un máximo de 64, pero, según el escenario que se desarrolle en un momento dado, para unos recursos dados puede ser suficiente con menos como, por ejemplo, con 4 apuntamientos. En este caso, todos los PAs van a transmitir señal, ya que los PAs no se apagan, pero la transmiten de manera que solo generen 4 apuntamientos y no 64. Esto significa que varios PAs trabajan juntos para generar una señal apuntada. Es por este motivo por el que se obtiene más ganancia cuando hay menos usuarios en la célula



ya que se pueden unir más PAs trabajando en una dirección determinada y, por tanto, se logra alcanzar mayor distancia con mayor ganancia de antena en dicha dirección.

Otra implementación significativa y novedosa del estándar para New Radio es el uso de *beamforming* en los canales comunes.

En LTE no se aplica *beamforming* en los canales comunes. Las señales de referencia se transmiten en formato broadcast, sin patrón estrecho, sino que se transmiten por las antenas con un patrón general ancho para que se propague por toda la celda. Con esta modalidad, la información que ve un usuario en un punto es la misma que la que ve otro usuario en cualquier otro punto de la célula si emplea el mismo canal. La estación base transmite la misma información en todas las direcciones. Por un lado, esta metodología es buena ya que permite que cualquier usuario en cualquier posición detecte la misma información, pero el inconveniente es que no puede enviar información distinta o no permite aplicar diferentes procesos en función de dónde esté ubicado el terminal. Toda la inteligencia acerca de cómo cubrir una celda se traslada a la antena (antena pasiva). La antena pasiva es la responsable de generar unos patrones de radiación de modo que la celda quede perfectamente cubierta.

Hasta LTE no supone un problema, pero a medida que se requieren más estaciones base para obtener más capacidad en el sistema, el uso de patrones broadcast empieza a convertirse en una limitación puesto que ya no se pueden instalar antenas en cualquier sitio para cubrir zonas específicas. Con el sistema broadcast habría que decidir a priori el hardware a instalar de forma que, cualquier modificación a futuro supondría un problema muy complejo.

En 5G ya no se utilizan patrones broadcast, sino que se recurre a patrones apuntados. Para garantizar que un terminal situado en cualquier punto de la célula sea capaz de detectar estos canales broadcast, se realiza un barrido de la celda. Para un instante dado solo se transmite 1 *beam* con el canal de broadcast. Unos milisegundos después, se pasa al siguiente *beam*, se transmite el canal de broadcast únicamente en esa nueva dirección y se repite el proceso a lo largo de toda la celda un número N de *beams*.

El bloque de canales que va dentro del *beam* se llama SSB. Dependiendo de en qué dirección esté el terminal, dicho terminal leerá uno u otro *beam*, es decir uno u otro SSB. Una vez que el terminal haya escaneado todos los *beams*, es capaz de decidir cuál es el SSB que recibe con mayor fuerza. Gracias al barrido se logran 2 cosas, apuntar la señal, solo por el hecho de realizar el apuntamiento se ganan unos 9 dB de cobertura, y al producirse el barrido en diferentes instantes, se obtiene información de posición del terminal. [45]

Los haces que se generan, al estar creados por una antena activa permiten modificación en el diseño, de forma que no están sujetos a un único patrón como sucedía con la antena pasiva en LTE. Se pueden crear diferentes escenarios tal y como muestra la Tabla 8.



Pattern	Horizontal HPBW	Vertical HPBW	Azimuth	Max Gain(dBi)	Typical Scenario	64TRX(16H4V) Supported	32TRX (16H2V) supported
0	110°	6°	-	25	Non-regular 3-sector coverage(For site coverage optimization)	Y	Y
1	105°	6°	-	25	Regular 3-sector coverage(Default recommended)	Y	Y
2	90°	6°	±10°	25	Non-regular 3-sector coverage(For site coverage optimization)	Y	N
3	65°	6°	±22°	25	Non-regular 3-sector coverage(For site coverage optimization)	Y	N
4	45°	6°	±32°	25	Low buildings hotspot coverage	Y	N
5	25°	6°	±42°	25	Low buildings hotspot coverage(Smaller horizontal coverage)	Y	N
6	110°	12°	-	21	Regular 3-sector 3D coverage	Y	Y
7	90°	12°	±10°	21	Non-regular 3-sector 3D coverage(For site coverage optimization)	Y	Y
8	65°	12°	±22°	21	Non-regular 3-sector 3D coverage(For site coverage optimization)	Y	Y
9	45°	12°	±32°	25	Middle buildings hotspot coverage	Y	N
10	25°	12°	±42°	25	Middle buildings hotspot coverage(Smaller horizontal coverage)	Y	N
11	15°	12°	±47°	25	Middle buildings hotspot coverage(Minimized horizontal coverage)	Y	N
12	110°	25°	-	20	Regular 3-sector 3D-MAX coverage	Y	Y
13	65°	25°	±22°	20	Non-regular 3-sector 3D-MAX coverage (For site coverage optimization)	Y	Y
14	45°	25°	±32°	20	High buildings hotspot coverage	Y	Y
15	25°	25°	±42°	25	High buildings hotspot coverage(Smaller horizontal coverage)	Y	Y
16	15°	25°	±47°	25	High buildings hotspot coverage(Minimized horizontal coverage)	Y	N
17	-	-	User def	User def	User defined scenario by separate configuration of each beam	Y	Y

Tabla 8: Ajuste de cobertura en función del escenario [44]

La Tabla 8 muestra la posibilidad de generar distintos patrones de SSB. Aparecen 18 patrones diferentes en función del escenario que se plantee, pero en cada versión de software del suministrador aparecen patrones nuevos, con diferente número de *beams*. Por ejemplo, siguiendo esta tabla, si se observa el patrón 0, se sigue un patrón horizontal de 110° y uno vertical de 6°, por tanto, los *beams* de SSB que se crean van a cubrir el rango HPBW Horizontal: 110° - HPBW Vertical: 6°. Estos 6° en vertical es un rango menor que lo que realmente puede buscar la antena, pero, para acceder a la celda, no interesa enviar un *beam* en todas las direcciones verticales, sino que, con utilizar un *beam* que apunte aproximadamente hacia el final de la celda, se garantiza que los usuarios que estén en ese borde de celda entren dentro de la cobertura. Los usuarios más cercanos a la estación base no suponen un problema puesto que entran por proximidad. En cuanto al patrón horizontal hay mucha mayor flexibilidad.

Esta técnica de apuntamiento más grosso modo es únicamente para SSB, es decir, para la cobertura de acceso y movilidad de la célula. Para poder enviar los flujos de datos sí que hay que realizar un apuntamiento más preciso, pero para los SSB no es necesario.

En 5G es complicado decidir a priori el patrón de la celda puesto que la propagación que se produce a lo largo de ella es diferente que en LTE. Es por este motivo por el que los fabricantes de antenas activas a la par elaboran herramientas de optimización para obtener una planificación detallada basada en inteligencia artificial. De modo que se ponen a radiar las células con el patrón asignado por defecto, que suele ser el patrón 1, y, a medida que entran usuarios y se va recogiendo información sobre dónde se localizan los usuarios entre varias celdas, el sistema proporciona una sugerencia acerca de cómo modificar los SSB para poder garantizar que los usuarios acceden a la mejor célula. Para lograr esto, se apagan y encienden *beams* de SSB y se mueven anchos de haz horizontales y verticales de la celda de modo que encaje con la distribución real de

usuarios. La cobertura de la celda se ensancha y/o acorta en horizontal y en vertical en función de los parámetros que se modifican, es decir en función del patrón elegido.

En relación con las imágenes que se muestran en la Tabla 8, la primera ilustración se corresponde con el patrón más general, el de cobertura para todo el ancho de la celda. Es el patrón por defecto, el patrón 1, se corresponde análogamente con una celda de 120° de LTE. La segunda ilustración se trata de un ejemplo donde interesa riqueza vertical puesto que hay un edificio alto en las proximidades de la antena. Para que, en todas las alturas del edificio, los usuarios se beneficien de cobertura, conviene implementar un patrón vertical más grande y de esta forma poder llegar a la parte alta del edificio con SSB. Se corresponde con el patrón 12, puesto que es necesario una célula ancha en horizontal, ya que al final hay que cubrir una ciudad y por tanto habrá usuarios por todas partes, pero también que sea ancha verticalmente (unos 25°). Hay que tener en cuenta que, a medida que se hacen más anchas las celdas, se obtiene menor ganancia.

La tercera imagen muestra un patrón típico de *user defined*, que se corresponde con el patrón 17. Aquí se introducirían manualmente los valores para los haces horizontales y verticales, quedando los valores a elección del operador móvil.

Y, por último, la cuarta imagen se corresponde con un escenario de carretera, es, por tanto, una cobertura lineal. Este diseño puede servir para cubrir zonas rurales donde solo quiere cubrirse una carretera, una vía del tren o para cubrir una avenida en una ciudad con mucho tráfico, donde se desea concentrar a la gente situada en esa avenida en la celda sin que penetre en celdas vecinas. Para estos escenarios es interesante aplicar un patrón amplio verticalmente, pero estrecho en horizontal. Se corresponde, por tanto, con el patrón 16 (15° en horizontal y 25° en vertical) de la Tabla 8.

El SSB va a permitir decidir dónde van a entrar los usuarios. Hay que tener en cuenta que no se trata del apuntamiento de los *beams* de datos, como se ha mencionado anteriormente, sino que este procedimiento es solo para identificar hacia dónde se envía el bloque que permite a los usuarios acceder a la celda. Esto quiere decir que puede haber un usuario fuera del bloque que entre en la celda si, por rebotes y/o propagación, le llega el *beam*, aunque ya sería más un tema de condiciones de entorno. Si se desea que específicamente la célula cubra ese escenario, por seguridad, se debe definir un SSB acorde con el escenario a cubrir.

Al ver la evolución de la antena y cómo implementa los *beams* de SSB se puede pensar que no es necesario que las nuevas antenas estén dotadas con tilt eléctrico. Sin embargo, se va a mostrar que no es así y que no es suficiente con el tilt mecánico para garantizar un servicio óptimo. Las antenas, normalmente, pueden instalarse con cierto tilt mecánico y además también suelen incorporar tilt eléctrico. Si no se toca el tilt eléctrico en New Radio, el SSB de un patrón puede no apuntar correctamente a la zona deseada. Para lograr el objetivo es necesario gestionar 2 efectos. Por un lado, está el tilt mecánico que va a indicar en qué zona se buscan *beams* para los datos o en qué zona se generan los *beams* de datos. Por otro lado, está el tilt eléctrico que va a permitir mover el SSB con el fin de centrar la zona donde se quiere apuntar la celda. Por tanto, es importante seguir el orden del proceso: primero se ajusta el tilt mecánico para marcar la zona en la que se buscan los *beams* de datos, y una vez fijado éste, se ajusta el tilt eléctrico para saber dónde apuntar el SSB.

El SSB es el único canal que permite tilt eléctrico configurable. Los demás canales no permiten tilt eléctrico y solo se gestionan con el tilt mecánico.

El tamaño del *beam* SSB viene predefinido y se pueden encender y apagar *beams* SSB en función del patrón que se quiera implementar.

El número de *beams* SSB depende del ancho que se desee tener en la célula. Además, el tamaño del *beam* SSB está predefinido y es bastante similar al que se puede observar en los patrones de antena. Lo único que se realiza al modificar el patrón de cobertura del SSB es encender o apagar *beams* SSB en horizontal o en vertical. Esto quiere decir que normalmente no se cambia cómo es el *beam* del SSB, sino que se modifica el número de *beams* y las direcciones en las que apuntan los *beams*.

En la cuarta columna de la Tabla 8 aparece el dato del azimut y puede observarse que este parámetro también es configurable en remoto. En los patrones en los que el haz horizontal es muy ancho, entre 105° y 110°, el azimut es 0, no se puede mover puesto que ya se ha alcanzado el máximo de cobertura de la antena. Sin embargo, cuando se seleccionan patrones con haz horizontal menor, como por ejemplo 90°, se puede mover el azimut hasta 10° a un lado y a otro para conseguir apuntar la celda en horizontal. Puede comprobarse que la suma del haz horizontal del patrón más el azimut en los dos sentidos da como resultado un valor aproximado a los 110° que es el máximo de cobertura horizontal soportado por la antena. Por tanto, se trata de un sistema flexible que permite reorientar todo el patrón en una dirección concreta, siempre y cuando no se exceda el rango de la celda.

Estas modificaciones en el patrón se traducen en cierta afectación en la célula. Suponen una afectación en términos de tiempo de unos 5 minutos puesto que requiere reajustar los *beams*. Durante este periodo cae el servicio, se ajusta al nuevo patrón y vuelve a levantar.

El estándar define la existencia de ciertos canales que se pueden reutilizar en espacio, principalmente el canal de control. Si se conoce la dirección en la que se encuentra el usuario, se puede generar un *beamforming* estático para dividir la célula en varias posiciones (normalmente se divide en 4) y, si se identifica en qué ángulo se encuentra ese usuario, se le pueden asignar recursos de ese espacio.

Si el usuario se mueve a otra zona, debe indicar que se ha movido y entonces se le asignan recursos del canal común de la nueva zona en la que se encuentra. El estándar obliga a mantener esa información, por lo que se desarrolla un proceso llamado *beam track* que permite realizar un seguimiento del *beam* para el SSB. Se efectúa una identificación del acceso cuando el usuario entra en la celda y un seguimiento a medida que éste se mueve. [44]

- El acceso se realiza gracias a que cuando se barre la celda, el terminal es capaz detectar cuál es el mejor SSB, el que mejor recibe y con mayor potencia. El estándar define para cada uno de los posibles SSB, un posible grupo de recursos de acceso del canal PRACH. De modo que, cuando el terminal detecta que el mejor *beam* es el 4, por ejemplo, utiliza el PRACH de acceso del *beam* 4, que es distinto al PRACH de los otros 3 *beams*. Una vez ha ejecutado el comando de acceso y el PRACH ha entrado por el bloque 4, el nodo ya entiende que el terminal se encuentra en la dirección del *beam* SSB4 y puede asignarle recursos de esos canales (reutilizables por espacio) en esa zona. De esta manera, al haber realizado el barrido y al tener recursos distintos del PRACH para cada SSB, el nodo obtiene información indirectamente y sabe dónde se encuentra el terminal.

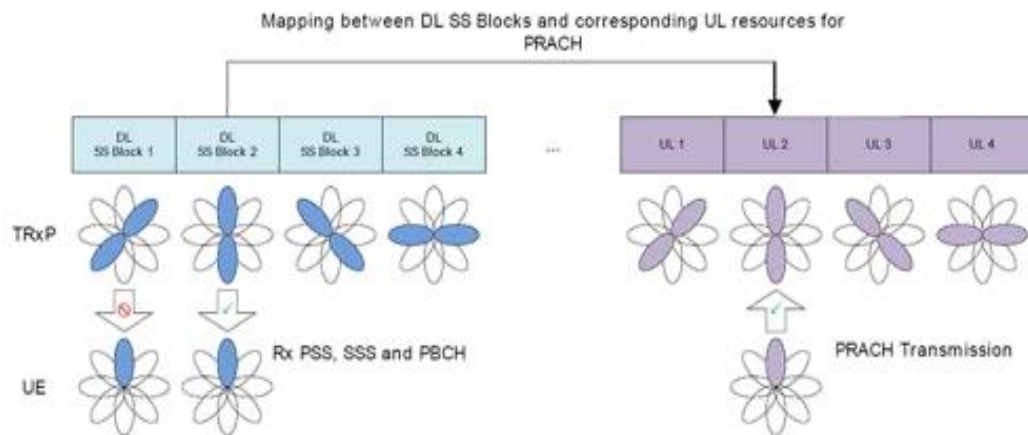


Ilustración 32: Beam Tracking Access UE PRACH [44]

La Ilustración 32 muestra el proceso de acceso a la celda que realiza el terminal. Este procedimiento se aplica tanto en el acceso inicial a la célula como en un *handover*.

- A parte de acceder, también se debe controlar dónde se encuentra el usuario a medida que se mueve, para ello hay que realizar un proceso denominado *Beam Tracking*. Cuando el usuario se desplaza e interpreta que existe un nuevo SSB dominante, debe indicar a la estación base un cambio de *beam*. Ese cambio de *beam* SSB, puede desencadenar un reajuste de recursos dependiendo de cómo estén repartidos los recursos del nodo. El terminal informa del cambio de *beam* y es el nodo el que decide si esto supone algún cambio en el tipo de asignación de los recursos.

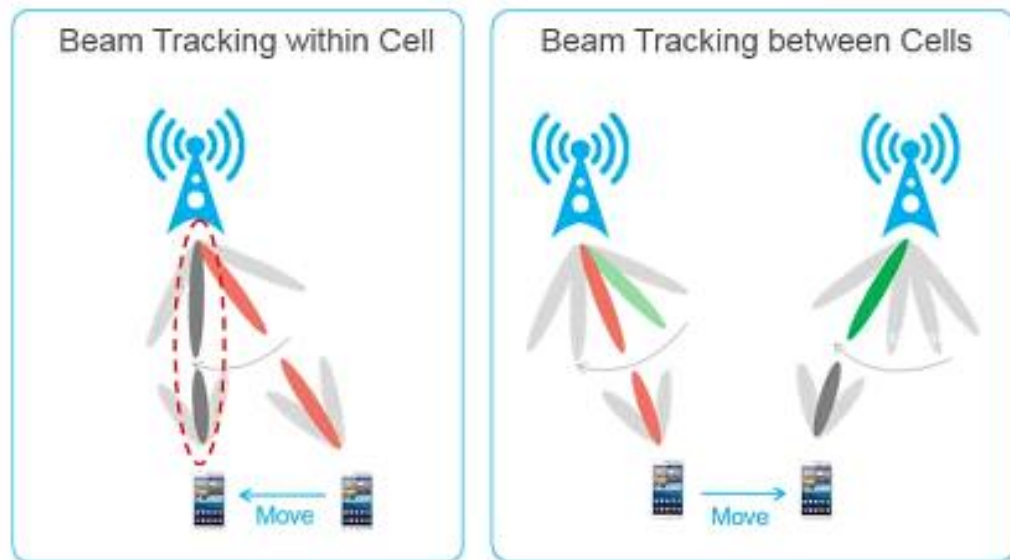


Ilustración 33: Beam Tracking [44]

A futuro cuando existan técnicas de coordinación entre celdas, también habrá que realizar *beam tracking* incluso con los SSB de las celdas vecinas. La Ilustración 33 muestra cómo se produce el *beam tracking* tanto para el caso de un terminal que se desplaza dentro de la misma celda como para el caso en el que ya se ha implementado con celdas vecinas.



### 3.2.1. MIMO

Para poder realizar MIMO (Multiple Input Multiple Output) es necesario emplear tecnologías multiantena. Las tecnologías multiantena emplean varias antenas tanto en el lado transmisor como en el lado receptor con el objetivo de aumentar la velocidad de datos alcanzable. En los dos extremos del enlace de comunicaciones móviles se dispone de un número elevado de antenas. La ventaja de disfrutar de dicha cantidad de antenas es que permite mejorar la calidad del interfaz radio, del enlace y, por tanto, de incluir más bits en la comunicación. Al mejorar la calidad, se puede emplear o bien menor redundancia o bien una modulación mayor y la disposición de múltiples antenas en ambos extremos permite enviar datos en paralelo, lo que se traduce en diferentes flujos de datos.

Cuando se utilizan las tecnologías multiantena para mandar distintos flujos de datos, se dice que se está empleando el MIMO en modo Multiplexación espacial (SM), ya que se aprovechan las diferentes antenas para enviar diferente información. La multiplexación espacial puede utilizarse en dos formatos: en Single User y en Multi User. En SU, los 2 flujos de información se dirigen al mismo terminal. En cambio, en MU, cada uno de los flujos se envía a un usuario diferente.

Otra opción es aprovechar las múltiples antenas para mejorar la calidad del interfaz radio. Esto es lo que se conoce como MIMO en modo diversidad de transmisión (DT). Para ello, se envían los mismos flujos de datos por las diferentes antenas disponibles, de forma que al terminal le llega la misma información por distintos puntos, maximizando así la probabilidad de llegada de dicha información. Esta opción permite incluso sumar la información de los diferentes caminos para mejorar la calidad señal a ruido posibilitando así una modulación más eficiente, con menor codificación. [46]

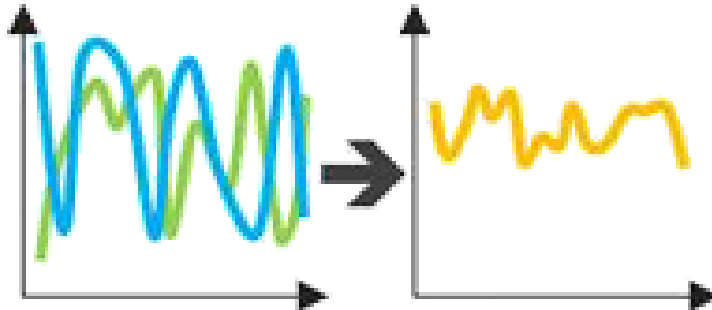
El 5G se caracteriza por el uso de tecnologías multiantena avanzadas. De esta forma puede crear haces direccionales, implementar el MU-MIMO y desarrollar el *Massive MIMO*. Al emplear un número muy elevado de transmisores se consigue un doble objetivo: aumentar la capacidad del sistema con el MU-MIMO y poder enfocar la energía de la antena lo máximo posible hacia el terminal. Esta focalización de la energía e incremento de capacidad permite compensar las altas pérdidas de propagación que se generan en las bandas altas, obteniendo a su vez una ganancia elevada. Al implementar esta técnica, se consiguen áreas de cobertura de célula en bandas altas relativamente similares a las que se pueden obtener en bandas más bajas.

En este apartado se va a estudiar el funcionamiento de la antena y qué proceso sigue la señal en el aire para poder efectuar el MIMO.

La tecnología multiantena ofrece 3 tipos de ganancia. Dependiendo de cómo se procese la señal que se recibe en la boca receptora o cómo se transmita la señal en cada una de las bocas transmisoras, la ganancia podrá ser de un tipo u otro: [47]

- Ganancia en diversidad. Es la más simple. Esta ganancia se logra repitiendo la información en la transmisión para mejorar la fiabilidad de dicha transmisión y reducir la fluctuación relativa de SNR. Si se dispone de 2 antenas, se pueden recibir 2 señales diferentes que, aunque se hayan transmitido muy cerca entre ellas o con polarización cruzada, realmente el canal que observan en el aire puede ser diferente. A medida que la señal se propaga, una polarización se va atenuando más que otra. Si en su lugar, se transmite con 4 antenas, existen 2 arrays de antenas verticales, que, aunque la separación entre antenas sea pequeña, dicha separación, posteriormente en el aire, se combina y hace que se

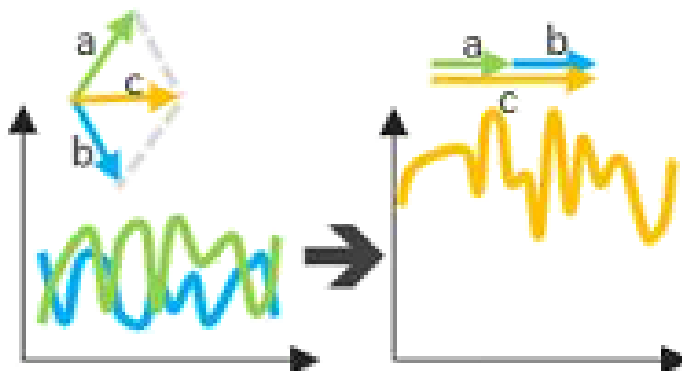
distancia. La ganancia en diversidad simplemente es aprovechar el hecho de disponer de 2 copias de la señal para obtener una señal sumada que evite los nulos de las 2 señales. Los nulos de cada señal individual, no suelen coincidir entre ellos, por lo que, si se suman adecuadamente, se pueden evitar, obteniendo de esta forma una señal en la que no se haya perdido información.



*Ilustración 34: Ganancia en diversidad espacial [44]*

La técnica de la ganancia en diversidad espacial está orientada a reducir las fluctuaciones y puede observarse en la Ilustración 34.

- Ganancia de array. La combinación coherente puede mejorar eficazmente la SNR media después de procesarla. El único requisito necesario es que el canal de información debe ser conocido.



*Ilustración 35: Ganancia de array [44]*

Se trata de una ganancia activa. En este caso, sí que se aprovecha la existencia de esas 2 antenas para generar la señal de modo que se le sume coherentemente en el receptor. El hecho que la suma sea coherente implica que las 2 señales han de tener algo de relación entre ellas, de forma que desde el lado transmisor se deben enviar para que el terminal las reciba en un estado que puedan sumarse coherentemente y obtener una señal más fuerte, mejor. Este es el motivo por el que es preciso tener información del canal. La ganancia de array es la técnica que se emplea en MIMO. En MIMO al haber 2 copias y estas poder enviarse con cierta configuración y polarización, se logra que en lado receptor se lean 2 señales limpias. De esta forma, se gana en calidad de señal.

- La última ganancia que existe en las técnicas multiantena, es la ganancia en supresión de interferencias.

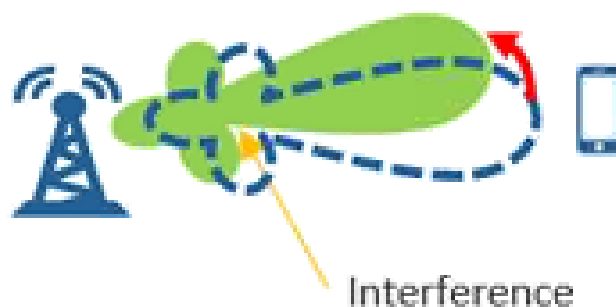


Ilustración 36: Ganancia en supresión de interferencias [44]

Tal y como puede observarse en la Ilustración 36, si hay un usuario y existe una interferencia fuerte en la dirección que marca la flecha, pudiendo proceder esta de otra célula cercana o de un rebote, y entra en esa dirección, al intentar enviar la información con el patrón representado con líneas discontinuas en el esquema, se introduciría la interferencia en un lóbulo con algo de ganancia. Si se da esta situación, se suma la señal de ese usuario con interferencia externa y la SNR que se obtiene es menor. La supresión de interferencias consiste en ajustar la ganancia de la antena de modo que la demodulación no apunte directamente al usuario, sino que se desvíe un poco consiguiendo de esta forma que dicha interferencia coincida con un nulo y, aunque disminuya levemente la ganancia por el hecho de mover el haz principal, así mejorar notablemente la SNR gracias a este movimiento. Esta técnica es la que se aplica en el *Massive MIMO*.

### 3.2.1.1. SU-MIMO

Para aprovechar la riqueza del canal, hay que tener en cuenta los caminos ortogonales para poder enviar información diferente y enviar más de un *layer*. Este proceso es el que realiza el *Single User MIMO*. Aprovecha la información del canal en unos recursos, para enviar varios *layers* hacia un usuario.

Si existen, por ejemplo, 2 antenas, cada una transmite una información separada, se modula la señal, se agrupa en el interfaz aire y el receptor, recibe 2 señales diferentes por cada una de sus antenas, con diferente propagación. La propagación es diferente puesto que el camino que siguen no es exactamente el mismo, hay cierta diferencia entre ellos y gracias a que la señal contiene las señales piloto, que son conocidas, el terminal es capaz de saber qué degradación ha generado el canal en la señal y puede deshacerla sobre la señal combinada que ha recibido, separando de esta forma los 2 *layers*.



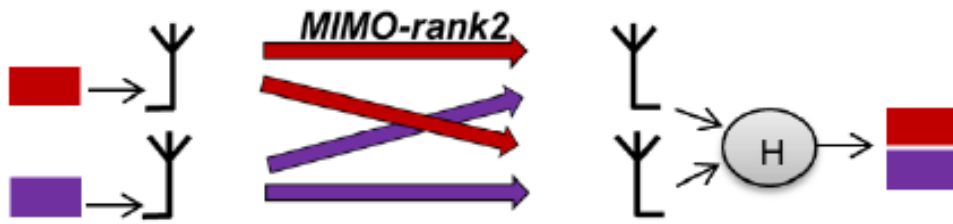


Ilustración 37: Identificación de layers por señales piloto [44]

Mientras que para realizar *beamforming* no es necesario tener información específica, únicamente en el apuntamiento, para implementar MIMO y que el terminal sea capaz de diferenciar las señales, debe poder detectar el canal y ser capaz de interpretar que en el aire se están transmitiendo varias señales. Para lograr esto, es necesario introducir señales piloto, de forma que el terminal estime el canal, detecte como el canal ha generado una variación y luego deshaga el efecto.

Si, como en el caso de la antena activa 64TRX, el número de transmisores es mucho mayor que el número de receptores ( $N_{TX} \gg N_{RX}$ ), se puede aplicar un *beamforming* a cada uno de los *layers*.

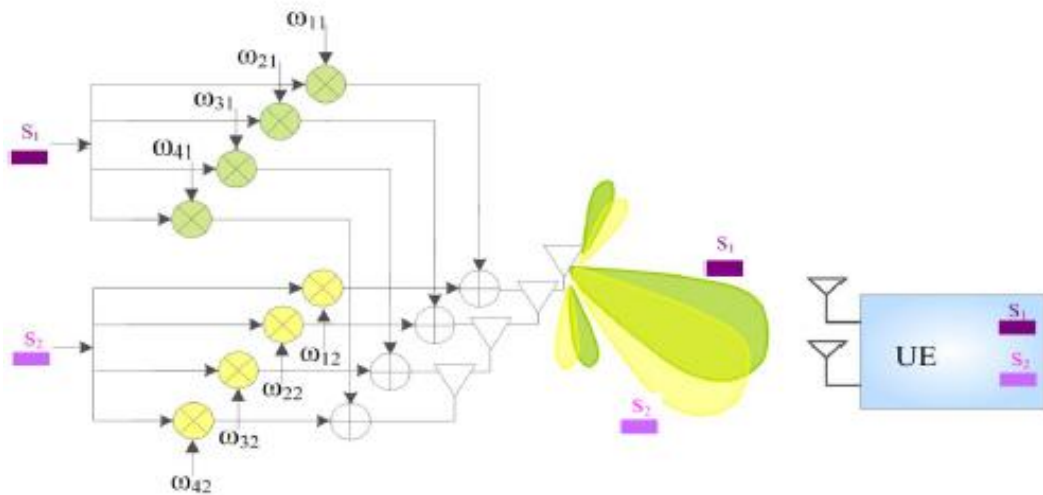


Ilustración 38: Beamforming por layer: SU-MIMO [44]

Tal y como se muestra en la Ilustración 38, solo se pueden enviar 2 flujos de información distintos puesto que el terminal solo dispone de 2 antenas en su interior, pero como existen tantas antenas en el lado transmisor, se pueden aplicar diferentes pesos a la señal que se radia por cada una de las antenas, de modo que genere 2 apuntamientos. Idealmente, el mejor caso sería que la señal  $S_1$  solo llegara a la antena 1 del receptor y la señal  $S_2$  solo llegara a la antena 2 del receptor. De esta forma, el receptor vería las señales completamente separadas, perfectamente aisladas y podría sacar toda la información con una calidad excelente.

Existe una limitación física que es el aislamiento del canal. Para poder realizar SU-MIMO, es necesario que el terminal sea capaz de aislar, mediante procesamiento, los canales cruzados que se transmiten. El canal directo es el bueno, y el cruzado es el que genera interferencias entre las 2 señales. Si los canales no están muy separados y existe coherencia entre ellos, los caminos cruzados pueden combinarse demasiado y provocar que no se distingan las señales. El problema realmente radica, en el tamaño

de los terminales, puesto que normalmente son reducidos y solo existen 2 polarizaciones ortogonales. En un terminal convencional, como es el caso de un móvil, cada una de las antenas de dicho terminal posee o bien doble polarización [44] o bien una única polarización, pero aisladas gracias a la distancia. Entre estas 2 polarizaciones existe un aislamiento perfecto ( $90^\circ$  de aislamiento), por lo que, en principio, las 2 señales se pueden separar en las mejores condiciones posibles. Hasta el rango 2, no supone un problema, pero al incrementar el rango, como ya no existen más polarizaciones, hay que recurrir al aislamiento espacial [48] [49]. Esto se traduce en añadir más antenas en el dispositivo. Además, dichas antenas deben estar situadas en distintos puntos para intentar separar la información que reciben las dos primeras polarizaciones cruzadas de las que reciben las otra dos. La disposición de las 2 antenas del terminal no es  $90^\circ$ , sino una distancia muy pequeña en comparación con un aislamiento perfecto. Este es el motivo por el que solo se consigue rango 3 y rango 4 cuando el aislamiento provocado por el espacio existente entre las dos antenas del terminal es comparable con la calidad de la señal. La calidad de la señal debe ser lo suficientemente buena como para que el aislamiento espacial permita distinguir canales. Este es el motivo por el que cuando se pasa a un 4T4R no se gana rango 3 y rango 4 en toda la celda, únicamente se consigue en ciertas zonas donde la calidad de la señal es buena para que la separación física de antenas sea representativa. Esto, en antenas pasivas, normalmente solo se produce en zonas próximas a la estación base y con visión directa, puesto que la forma en la que radia la señal es masiva para toda la celda. Sin embargo, cuando se consigue apuntar mucho mejor, creando *beams* estrechos, la separación física de las antenas del terminal empieza a ser representativa. Al no propagarse la señal en todas direcciones sino concentrarse en ciertas zonas de la célula, el aislamiento físico entre antenas de un mismo terminal, empieza a ser notable y puede compararse con la coherencia de la señal que se está enviando. Por eso en 5G el uso de rango 3 y rango 4 es mucho mayor.

Aun así, se alcanza el límite con rango 4 puesto que conseguir situar más de 4 antenas en el terminal es complicado.

### 3.2.1.2. MU-MIMO

El siguiente paso es aprovechar la ventaja de disponer de muchas más antenas en el lado transmisor, para aplicar técnicas de *Multi User MIMO*.

En la Ilustración 39 se muestra un ejemplo donde para el lado transmisor hay 4 antenas y en el lado receptor solo hay 2 usuarios, con 2 antenas cada uno. Existen 4 flujos de datos que se quieren transmitir y enviar por las 4 antenas. Cuando la señal está en el interfaz aire, la señal de todas las antenas se combina.

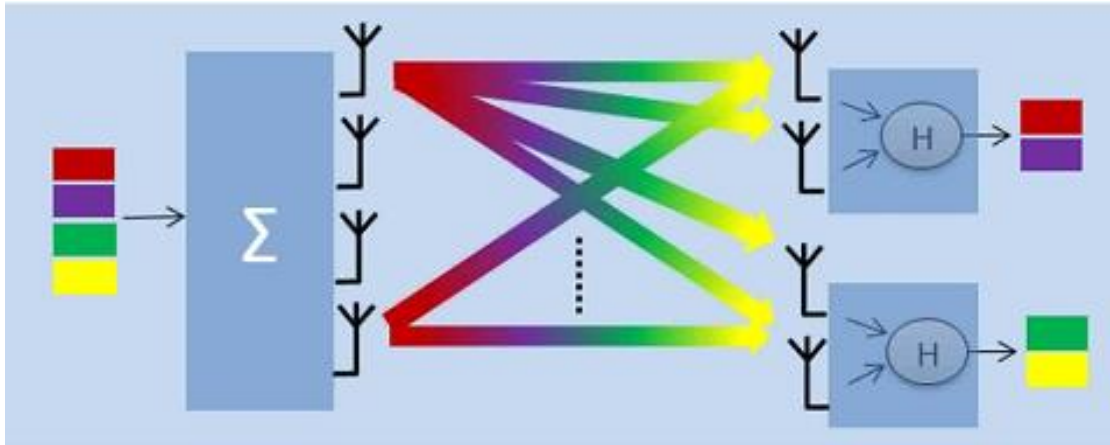


Ilustración 39: MU-MIMO: Explotando la diversidad espacial

Lo que intenta el terminal es quedarse con una parte de la información y el otro terminal con otra, pero los 2 terminales no se comunican entre sí, por tanto, el aislamiento de los 2 terminales tiene que llegar por parte de la estación base. La misión de la estación base es encontrar qué terminales de entre todos los que hay en la celda, poseen un canal lo suficientemente incorrelado entre ellos. De modo que, cuando la señal avanza, la información dirigida al terminal 1, puede detectarla dicho usuario y recibirla correctamente y la parte del terminal 2 apenas la ve el usuario 1 y la asimila como una interferencia. Si se ha implementado apropiadamente la técnica, esa interferencia debe de ser de un nivel similar a la interferencia del resto de la celda, por lo que tiene una recepción buena. Por el contrario, si no se implementa bien, la interferencia cruzada será bastante potente y puede hacer que sea imposible detectar la señal que va dirigida al usuario 1. La carga del algoritmo reside en encontrar a esos 2 usuarios de entre todos los que tienen datos que transmitir. [50]

El *Massive MIMO* o MIMO masivo es una generalización del *Multi User MIMO* donde el número de antenas del transmisor es mucho mayor que el número de antenas del receptor.

### 3.2.2. PROPAGACIÓN FRECUENCIAS

El 5G se puede desplegar en las bandas actuales utilizadas por el 2G, 3G y 4G, pero, dado que la mayoría de los operadores las tienen ocupadas, el 3GPP ha estandarizado nuevas bandas de operación para los despliegues iniciales. Las bandas de interés en Europa son las siguientes: [51]

- Banda n28 (758 – 803 y 703 – 748 MHz): Dividendo digital 700 MHz. El regulador del espectro radioeléctrico quiere que esté disponible para despliegues 5G el 30 de junio de 2020. Será previsiblemente la principal banda de cobertura 5G. Debido a la actual situación de la pandemia ha sufrido retrasos.
- Banda n78 (3,3 – 3,8 GHz): El regulador quiere reorganizar el espectro para intentar que todos los operadores móviles dispongan de su espectro continuo. Esta banda será utilizada tanto para células macro como para *Small Cells*.

- Banda n258 (24,25 – 27,5 GHz): Banda pendiente de subastar. De momento solo dispone de 1 GHz libre y no se prevé su subasta hasta 2022-2023. Esta banda será útil para escenarios de cobertura muy confinada y requerirá *beamforming* para mejorar el enlace radio. Se conoce comúnmente como banda milimétrica. Va a tener un uso relativamente especializado ya que, debido a sus características, servirá para cobertura de interiores o para ofrecer servicio de *backhaul* a las estaciones base.

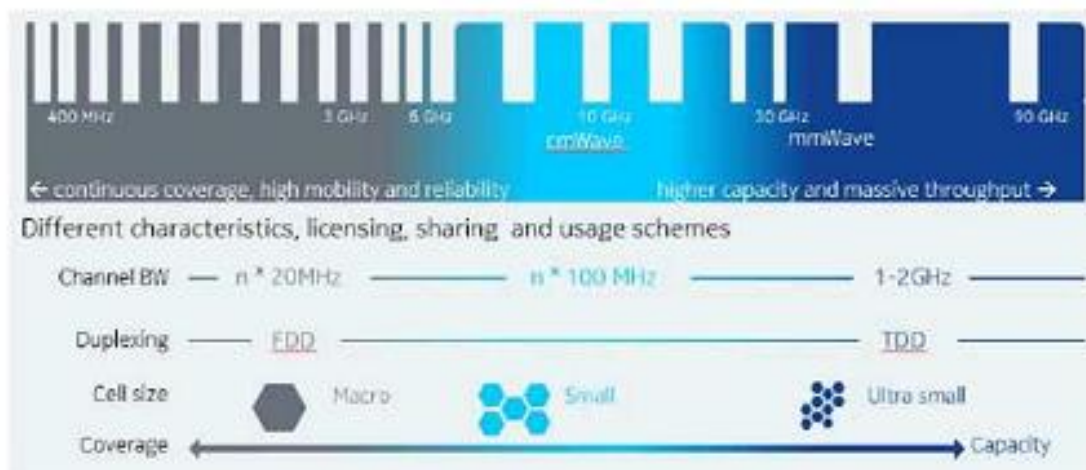


Ilustración 40: Bandas de frecuencia del 5G [51]

Como se observa en la Ilustración 40, a medida que se sube en el espectro, hay mayor capacidad, pero el inconveniente es que la propagación disminuye drásticamente. Este es el motivo por el que a medida que se sube en el espectro de frecuencias, se migra de células macro a células cada vez más pequeñas. Asimismo, el modo de multiplexación cambia de FDD a TDD.

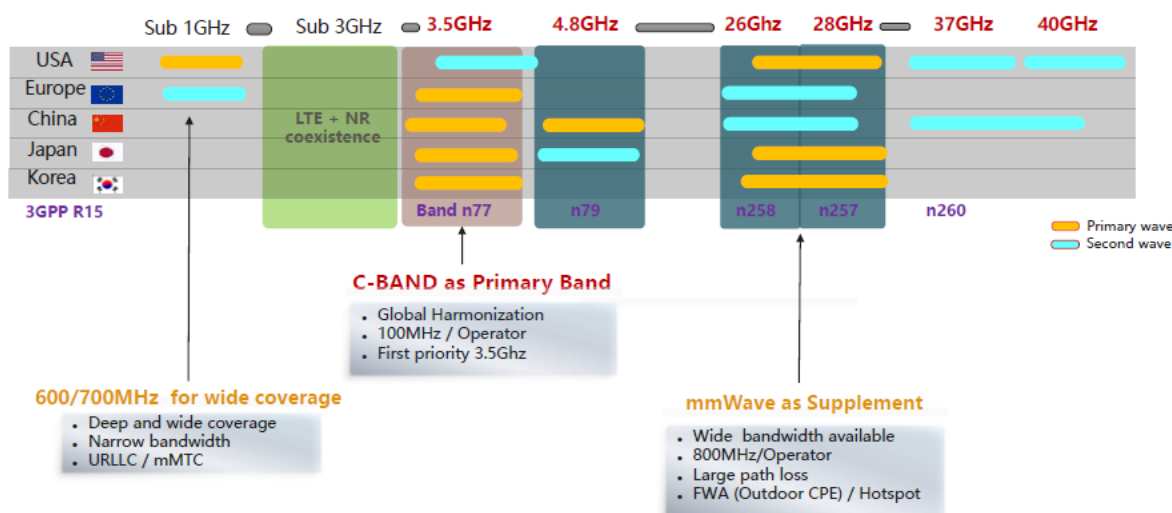


Ilustración 41: Bandas de frecuencia en los principales países [43]

La Ilustración 41 muestra las bandas de trabajo del 5G en los principales países. Como se acaba de explicar, Europa centrará su 5G en la banda C principalmente. Otros países que han apostado por esta frecuencia principal han sido China, Japón y Corea. También se puede ver que Estados Unidos explotará la banda milimétrica de los 26 a 28 GHz.

En la *Release 15* del 3GPP, se estandariza que el ancho de portadora máxima es de 100 MHz para portadoras que se encuentren en bandas inferiores a los 6 GHz, y de 400 MHz, para bandas superiores a 24 GHz. En dicha versión, también se define el espacio de subportadoras:

- Para bandas inferiores a 6 GHz, se establecen las siguientes posibilidades: 15, 30 y 60 Hz.
- Y para bandas comprendidas entre 24 GHz y 52,6 GHz los espacios pueden ser de 60 o 120 KHz. A futuro se contempla la posibilidad de incluir también 240 KHz.

El uso de anchos de canal mayores permite velocidades mayores, no solo por el hecho de ser mayor sino porque no requiere huecos entre canales como ocurría con LTE.

Además, el número máximo de *Resource Blocks* para un ancho de banda dado, es mayor en 5G que en LTE. Para los típicos 20 MHz que había en LTE con 100 RB, en 5G puede haber 106 RB. Este aumento de *Resource Blocks* se debe al filtrado extra que se realiza en 5G.

### 3.2.3. MASSIVE MIMO

Como ya se describió en el apartado 3.2.1. MIMO, la tecnología multiantena permite utilizar antenas con un número muy alto de transmisores. Desarrollando esta técnica para el *Massive MIMO*, las antenas han evolucionado y típicamente para 5G cuentan con 192 elementos radiantes. [50]



Ilustración 42: Implementación de Antenas con MIMO Masivo [52]

La disposición de un número tan elevado de elementos radiantes posee 2 potenciales ventajas. Por un lado, enfocar la energía del sistema radiante en un único usuario para enviarle un número elevado de flujos de información, también llamados *layers*, en paralelo. Se pueden enviar hasta 8 *layers* en el enlace descendente y 4 en el ascendente. Esta implementación se denomina SU-MIMO y es la más importante en bandas altas. Y, por otro lado, se consiguen crear haces o beams simultáneos, de manera que se pueden servir en paralelo en el mismo recurso de tiempo/frecuencia, a varios usuarios con 1 o varios flujos de información para cada uno. Esta técnica permite



maximizar la capacidad de la célula y se conoce como MU-MIMO. Las implementaciones típicas permiten distribuir hasta 16 flujos simultáneos por célula.

El *Massive MIMO* es especialmente útil en bandas altas, en las que la complejidad de la antena es aceptable. Son bandas de capacidad con un ancho de banda mayor. Por eso la banda de 3,5 GHz es una candidata perfecta para el uso del *Massive MIMO*.

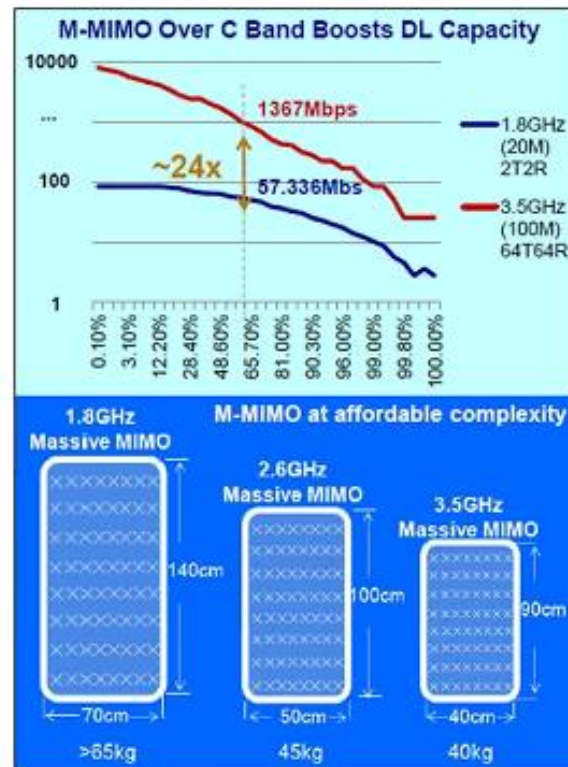


Ilustración 43: Implementación de MIMO Masivo según la banda de trabajo [53]

La Ilustración 43 muestra el tamaño que requieren las antenas de acuerdo con la banda de trabajo en la que vayan a funcionar. Para 5G, una de las primeras bandas que se emplean en Europa, es la banda C, es decir la banda de 3,5 GHz. Las dimensiones de una antena que funcione en esta banda van a ser menores que las que requieren las bandas de 1800 MHz y 2600 MHz. Además, empleando las técnicas de *Massive MIMO*, la capacidad de la banda C es incluso mayor que la capacidad que se consigue en las 2 bandas inferiores.

El *Massive MIMO* es uno de los pilares fundamentales de la tecnología 5G. Como se ha mencionado anteriormente, por un lado, va a permitir compensar las grandes pérdidas de propagación que surgen en las bandas de trabajo altas, y por otra, permite maximizar la capacidad del sistema.

El *Massive MIMO* consiste en aprovechar muchas antenas y de forma masiva. Esto implica que deben manejarse muchas más antenas que las que se utilizaban para el MIMO convencional, donde lo normal era explotar 2, 4 u 8 antenas en el sistema transmisor y en el receptor. En el *Massive MIMO* del 5G se van a utilizar un número de antenas mucho más elevado.

Llegados a este punto, hay que diferenciar entre lo que son antenas físicas (elementos radiantes) y transmisores. Para el caso del *Massive MIMO* en 5G se van a aplicar 16, 32 o 64 transmisores. Sin embargo, antenas físicas, los elementos radiantes

mencionados, se pueden tener muchos más. Las especificaciones típicamente describen 192 elementos radiantes, lo que hace que cada transmisor se conecte a 3 antenas.

La tecnología multiantena de *Massive MIMO* se implementa con lo que se denomina antenas activas. Las antenas activas son antenas de diferente tipo de dimensión. Cuanto mayor es la banda de frecuencias, más pequeñas son las antenas de *Massive MIMO* ya que el tamaño de las antenas es inversamente proporcional a la frecuencia que utilizan. Además, las antenas activas no solo están formadas por los elementos radiantes en sí, sino que también llevan integrado el módulo radio.

El *Massive MIMO* es más típico de banda altas y es más fácil de implementar en dichas bandas por su tamaño. Al existir un número elevado de transmisores y un número elevado de elementos radiantes, se puede enfocar altamente la señal radio en el espacio, hacia el usuario que se quiere dirigir. Esta técnica permite compensar en bandas altas el hecho de que la frecuencia se propague peor que en las bandas bajas. Se consigue una ganancia muy alta de la antena activa y además en las bandas altas como el 3,5 *GHz* una buena cobertura. Este modo de uso de compensar las bandas altas enfocado en un usuario es la técnica que se emplea en el SU-MIMO, donde se le envía a un único usuario varios flujos de datos. El estándar permite enviar hasta 8 flujos en paralelo.

Por otro lado, también existe la opción de aprovechar el *Massive MIMO* para enviar haces paralelos. Conseguir que un mismo *Resource Block*, en un instante temporal dado, pueda ser utilizado simultáneamente de 2 formas. La antena de MIMO masivo genera 2 haces para el mismo instante temporal para dar servicio a 2 usuarios. Esto es lo que se conoce como MU-MIMO y gracias a él se logra maximizar la capacidad de la célula. Se pueden generar hasta 16 flujos y dar servicio simultaneo como, por ejemplo, para el mismo *Resource Block*. Ofrecer servicio a 8 usuarios con 2 flujos en paralelo o a 4 usuarios con 4 flujos en paralelo.

En los primeros años de desarrollo del 5G el SU-MIMO va a ser el funcionamiento por defecto del *Massive MIMO* y el MU-MIMO será un complemento. Si los usuarios se encuentran lo suficientemente separados espacialmente y coincide que se puede utilizar, en ese caso sí se implementa el MU-MIMO.

Las soluciones de *Massive MIMO* comienzan a implementarse en escenarios de alta capacidad en LTE, pero es en 5G donde presenta su máximo desarrollo ya que se va a implantar en todos los casos.

Con el *Massive MIMO* llegan conceptos nuevos para el mundo de la radio que no existían hasta ahora. A medida que un usuario se mueve por el área de cobertura de una célula que implementa MIMO masivo, puede salir de un haz y entrar en otro. Este comportamiento hace que se introduzca un concepto nuevo en la gestión de las redes radio que es el *beam management*. Cuando un usuario accede a una estación base con *Massive MIMO*, puede entrar en la celda por uno u otro haz. Se puede radiar en un SSB distinto por cada haz, de manera que el usuario, cuando accede a la estación base, lo hace por un canal de acceso aleatorio, que es específico de cada haz. [43]

El principio en el que se basa el MIMO es que, si se consiguen enviar varios flujos de datos en paralelo por canales suficientemente separados, el receptor puede detectar esas señales independientemente y conseguir transmitir mucha más información en los mismos recursos.

El número máximo de canales independientes que puede detectar el terminal es lo que se conoce como orden del MIMO y va a depender del mínimo en el número de antenas. Esto quiere decir que, si se instalara una estación base con 1000 antenas, pero el terminal únicamente está diseñado con 2, solo podrían enviarse 2 flujos de datos por separado.

$$C = B \sum_{i=1}^m \log_2 \left( 1 + \frac{S_i}{N_i} \right)$$

$$m = \min[N_{TX}, N_{RX}]$$

$N_{TX}$  = Number of Transmit Antennas  
 $N_{RX}$  = Number of Receive Antennas

C = Channel Capacity  
 B = Bandwidth  
 m = Number of Layers  
 S = Signal Power  
 N = Noise Power (mutual noise)

Ilustración 44: Ecuación para calcular el orden del MIMO en función del número de antenas [50]

Es la fórmula que aparece en la Ilustración 44. Si se aplica para el ejemplo anteriormente descrito,  $N_{TX}$ , el número de antenas transmisoras sería 1000,  $N_{RX}$ , el número de antenas receptoras sería 2. Por lo que, aplicando la fórmula,  $m = \min[N_{TX}, N_{RX}] = [1000, 2] = 2$ . El número de flujos, representado en la ecuación como  $m$ , sería 2.

La relación señal a ruido que va a haber en el MIMO va a ser normalmente más pequeña que la suma de las 2 SNR que existe por separado. No se consigue alcanzar el límite de Shannon, pero se aproxima más que antes y se gana en capacidad.

Comienza a aparecer el concepto de *layer*. Un *layer* define cuántos flujos de datos en paralelo se pueden detectar en MIMO y esta cantidad es como máximo el mínimo entre el número de antenas del lado transmisor y el número del lado receptor. Siguiendo con el ejemplo anterior, si existe una antena con 4 transmisores y un receptor también con 4, el máximo será  $m = 4$ . Esto se consigue en las zonas mas cercanas a las antenas, pero a medida que el terminal se aleja de la estación base o el canal empieza a ser menos diverso, el rango va a ir disminuyendo. Si las conexiones del canal provocan una disminución de la SNR, al utilizar los 4 transmisores, comienzan a mezclarse las señales y es entonces cuando el terminal no es capaz de distinguir correctamente dichas señales. Cuando ocurre esto hay que ir disminuyendo el orden de  $m$ , que no es más que reducir el número de señales que se combinan con el fin de poder identificar con claridad cada una de esas señales. Por tanto, el *layer* como tal define el número de flujos que se envían en paralelo. El número de *layers* es lo único que logra que se multiplique el *throughput* y no el número de antenas. El número de antenas ayuda para poder generar los flujos, pero lo que en definitiva establece si se ha doblado el *throughput* es que el sistema sea capaz de enviar 2 flujos en paralelo. Por tanto, se puede concluir que la ganancia del MIMO viene dada por el número de *layers*.

Como ya se ha explicado en apartados anteriores, existen 2 tipos de MIMO. El más convencional que se ha dado hasta ahora es el SU-MIMO, donde todas las antenas de la estación base trabajan para generar canales independientes hacia un usuario. Cuando en LTE se aplicaba al sistema un 2T2R (2 antenas en el lado transmisor y 2 en el receptor), se comprueba que, de acuerdo con la fórmula anteriormente descrita,  $m$  puede llegar como máximo a 2.



### Single-User MIMO

Diversity needed between antennas located in the device



High spatial correlation



Layer number is limited even though antenna number increases

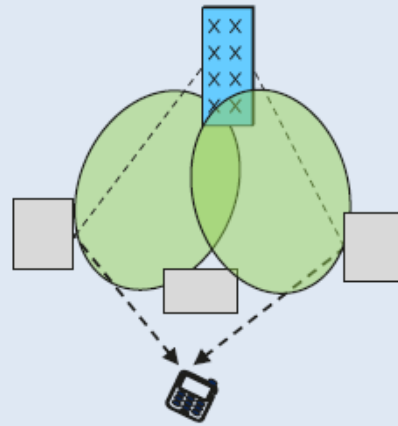


Ilustración 45: Single User MIMO [50]

Para LTE un orden de 2 suele ser un valor muy típico puesto que, como se utiliza polarización cruzada, en la antena, en una salida un flujo emerge con  $+45^\circ$  y en la otra con  $-45^\circ$  y las 2 señales rara vez se mezclan entre ellas. Por eso el rango 2 es muy común en LTE puesto que obtener esa separación es relativamente sencillo.

A medida que el terminal se aleja de la estación base, el ruido comienza a ir ganando protagonismo. En este caso ya no interesa tener 2 señales por separado pues el error en la demodulación de ambas señales comienza a aumentar. El objetivo en este punto es que la estación base transmita el mismo flujo de datos, el mismo *layer*, por las 2 antenas. De modo que el terminal se beneficie de la riqueza del canal no para conseguir 2 flujos diferentes en paralelo sino para combinar 2 señales y mejorar la recepción de un único flujo. Este es el motivo por el que cuando el terminal se aleja bastante de la estación base, se conmuta de rango 2 a rango 1.

El *Massive MIMO* se produce cuando la antena de la estación base posee más transmisores que receptores los terminales. También se aplicaba esta técnica a LTE. Si la antena de la estación base tiene 4T, pero los terminales siguen siendo 2R, aplicando la fórmula, se obtiene que como máximo el orden va a ser 2. Esto quiere decir que, cuando la estación base se comunica con el terminal, solo va a poder enviarle como máximo 2 flujos. Sin embargo, al poseer el lado transmisor el doble de antenas se puede jugar con las 4 antenas y, si el sistema es capaz de encontrar 2 terminales cuyo canal sea muy diferente e incorrelado, puede emplear los otros 2 flujos sobrantes para enviar datos a ese otro terminal. Este procedimiento es el que se conoce como MU-MIMO. Al aplicarlo la estación base enviaría 2 *layers* a un terminal y generaría otros 2 *layers* para el segundo terminal, de modo que  $N_{TX}$  seguiría siendo 4,  $N_{RX}$  sería 2 pero multiplicado por 2 terminales, se convertiría en 4 y  $m$  pasaría a ser 4. Al emplear este proceso sí que se logra subir el *throughput* de la célula. El desafío en este punto es ser capaz de encontrar esos 2 terminales en la celda, donde la señal, cuando se radian los mismos recursos en tiempo-frecuencia hacia 2 usuarios, en una dirección, hacia el usuario 1, el canal se combina de tal modo que se anula el efecto de las otras 2 señales destinadas al usuario 2 y viceversa, cuando la señal se propaga hacia el usuario 2, los *layers* de ese usuario se combinan correctamente mientras que los *layers* destinados al usuario 1 se van degradando.

## Massive MIMO / Multi-User MIMO

Diversity is obtained between users of the same cell



Low spatial correlation



Layer number in the cell can be increased even with simple devices

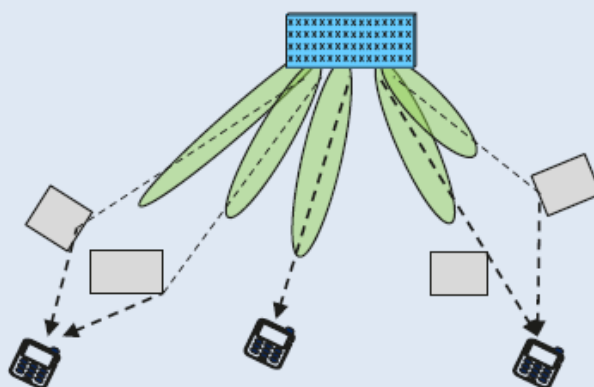


Ilustración 46: Multi User MIMO / Massive MIMO [50]

En LTE se obtiene una ganancia limitada ya que hay que encontrar a los 2 usuarios que cumplan con la premisa de canal incorrelado únicamente con 2 antenas de más en la estación base. Esto provoca que sea complicado generar patrones de señales de manera que produzca los 4 flujos.

Es en este punto donde entra en juego el *Massive MIMO*. Si, en vez de utilizar 4 antenas en la estación base, se emplean 32 o 64, entonces el sistema ya es capaz de generar una señal suficientemente apuntada, donde se va a concentrar altamente la radiación, de modo que sí se pueden formar esos canales incorrelados en el espacio.

Una antena de *Massive MIMO* contiene muchos más transmisores comparado con los receptores que pueda haber en la célula. Por este motivo puede generar mucho apuntamiento en la señal. Al poseer una señal tan concentrada, se puede garantizar que la señal que recibe otro usuario, en los mismos recursos, es baja y por lo tanto se pueden reutilizar recursos. Al poseer una antena con un número tan elevado de transmisores, se pueden realizar apuntamientos tanto en horizontal como en vertical, de modo que la relación señal a ruido mejore. Estas 2 razones, capacidad y apuntamiento de señal, son las razones de que el New Radio sea de *Massive MIMO*.

La ganancia puede incrementarse hasta 10 veces si comparamos New Radio implementado con antena de 64TRX con LTE implementado con antena de 2TRX. La ganancia de la señal a ruido en vertical puede llegar hasta los 20 dB y la ganancia de la señal a ruido en el haz horizontal logra hasta los 9 dB.

Para comprender dónde está la ganancia del *Massive MIMO* hay que hablar del término *layer*. Como ya se ha comentado en apartados anteriores, hay que diferenciar el concepto *layer* del concepto *beam*. El *beam* es el lóbulo o haz de la señal y el *layer* es el flujo de datos. No es lo mismo declarar que una antena soporta muchos *layers* a decir que una antena soporta muchos *beams*. Un *layer* es un flujo de datos independiente. Se puede decir que el *beam* es un concepto físico, es el lóbulo de una señal y el *layer* es un concepto lógico, que hace referencia a los símbolos o bits. A mayor número de *layers*, mayor cantidad de información y a mayor número de lóbulos o *beams*, más señal. Por tanto, tener más *beams* no implica tener más *layers*.

Las técnicas multiantena permiten generar caminos de propagación incorrelados, es decir, diferentes entre ellos, de forma que se pueden enviar flujos de información

separados por cada uno de ellos. El receptor es capaz de distinguirlo y puede recibir esos flujos de manera independiente y así consigue aumentar el *throughput*.

El incremento de *throughput* en *Massive MIMO* no se consigue a base de generar muchos *beams*, sino porque se generan muchos *layers*. Crear muchos *beams* ayuda a la hora de generar muchos *layers*, pero el *throughput* viene dado por el *layer* y no por el *beam*, está unívocamente relacionado con el *layer*.

En *Massive MIMO* el conformado de señal para enviar a los usuarios es lo que ya se hacía para sistemas anteriores como el LTE, pero la complejidad para 5G reside en encontrar los usuarios que están incorrelados en el canal.

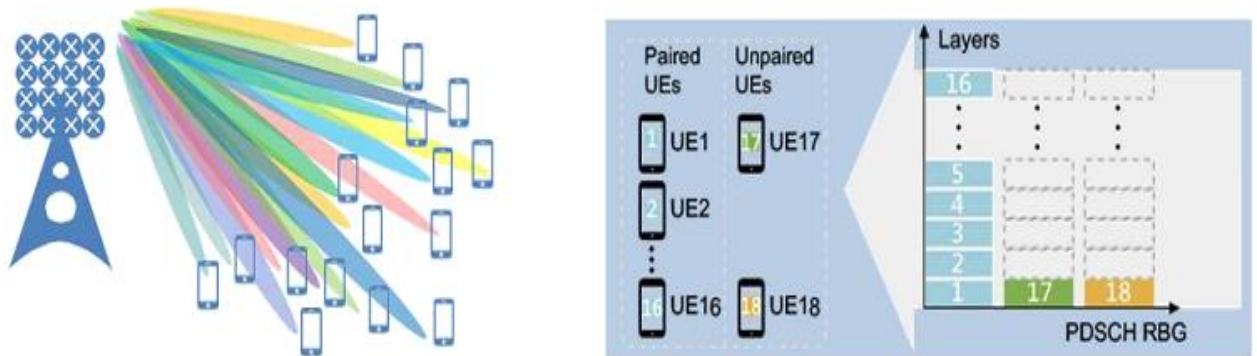


Ilustración 47: Diversidad espacial en Massive MIMO [44]

La imagen de la Ilustración 47 muestra una antena activa en una célula con muchos usuarios distribuidos por toda la celda. El algoritmo lo que detecta es que existen 16 usuarios que son *pareables*.

El concepto *pareable* quiere decir que esos 16 usuarios poseen canal intercorrelado mutuo, es decir, que, cuando se manda una señal en la dirección del usuario 1, los 15 usuarios restantes reciben muy poca señal, técnicamente ven un pequeño incremento de interferencia, pero se trata de un incremento que no es significativo. Lo que debe cumplirse es que al usuario 2 le ocurra lo mismo, que haya un canal incorrelado hacia el usuario 2 con respecto a los 15 usuarios restantes, y así con el resto de los usuarios. De tal forma, cuando se encuentran 16 usuarios *pareables*, es porque existen 16 usuarios con canales incorrelados entre los 16. La complejidad del algoritmo reside en esa búsqueda de usuarios cuyo canal *downlink* es incorrelado.

Una vez detectados los usuarios *pareables*, se realiza el conformado de señal, que consiste en introducir unos pesos para apuntar en la misma dirección.

Por el contrario, los usuarios no *pareables* son aquellos cuyo canal no es incorrelado con el resto. Para el caso de la Ilustración 47, cuando se envía señal al usuario 1, el usuario 17 recibe un volumen significativo de señal. De modo que, si se ponen juntos en los mismos recursos, la señal se va a mezclar. Lo primero que debe distinguir el nodo es qué usuarios tienen demanda de tráfico, mirando el canal entre todos ellos, debe detectar qué usuarios son *pareables* y cuáles no. Esto es lo que se muestra en la parte derecha de la Ilustración 47 donde los usuarios no *pareables* se tienen que poner en recursos diferentes, en diferentes PRB. Por su parte, los usuarios *pareables*, si interesa, se pueden agrupar en los mismos recursos, en el mismo tiempo.

Es en este punto donde se consigue ganancia en *throughput*. Cuando se agrupan usuarios *pareables* en los mismos recursos, se aumentan los *layers* por recurso, con lo cual se aumenta la eficiencia y esto permite aumentar *throughput*.

El Massive MIMO no puede aplicarse a todos los terminales de la celda, habrá unos que serán elegibles como *pareables* y otros que no. Al poder elegir los pesos que se generan en la señal en cada PRB, se puede tener simultáneamente PRB *pareables* y PRB no *pareables*. La Ilustración 47 muestra la señal que se valida en un TTI concreto.

En los recursos en los que no se pueden parear usuarios, existe la opción de aplicar *beamforming*, con su rango correspondiente en función del número de antenas que disponga el terminal. Además, no tienen por qué meterse todos los usuarios *pareables* en los mismos recursos, es decir, no es obligatorio que se generen todos los PRB *pareables* a la vez ni con el mismo número de *layers*.

El número máximo de usuarios *pareables* son 16 si cada uno tiene 1 *layer*. Si hubiera usuarios de 2 *layers*, el máximo serían 8 usuarios *pareables* de 2 *layers* por PRB.

Con todas las tipologías de antenas activas se pueden generar 16 *layers*, pero el *beam* no es tan fino en una antena 16TRX como en una antena 64TRX. Al ser más ancho, es más difícil encontrar 16 usuarios *pareables*, la probabilidad es baja. Al aumentar el número de antenas, se consigue que el *beam* apunte más y por tanto aumente la probabilidad de encontrar 16 usuarios *pareables* con 16 *layers*.

El Massive MIMO puede implementarse de 3 formas: [50]

- *Massive MIMO* estático: No importa dónde se encuentran realmente los usuarios, sino que la antena genera *beams* en diferentes direcciones donde se van a introducir diferentes *layers*. Si un usuario es capaz de recibir varios *beams*, se le pueden enviar varios *layers*, si no es así, la antena no hace nada. Es la forma más sencilla de implementar *Massive MIMO*, pero también es la más ineficiente puesto que se está generando señal en todas las direcciones para ver si algún usuario pasa justo por esa dirección y puede beneficiarse.
- *Massive MIMO* dinámico basado en máxima ganancia: Esta opción es bastante frecuente. En este caso, lo primero es detectar usuarios para luego configurar patrones de antena de manera que se apunte la señal al usuario. Genera apuntamiento hacia el usuario. El inconveniente es que no garantiza que al apuntar al usuario 1, algún rebote o algún lóbulo secundario le llegue al usuario 2 o viceversa y eso con los 16 usuarios. Es una de las primeras implementaciones que se utilizó, pero genera interferencia mutua entre los usuarios. Al final, la ganancia está limitada por esa interferencia cruzada.
- El mejor algoritmo de los tres es *Massive MIMO* basado en interferencia cruzada entre usuarios: No es tan relevante hacia donde apunte el *beam*, siempre que apunte cerca del usuario para que reciba señal, sino que lo primordial es que un usuario no reciba señal de otros y que la señal que se envíe a ese usuario no sea recibida por otros. Este algoritmo pretende minimizar el efecto de interferencia cruzada cuando se reutilizan los recursos.

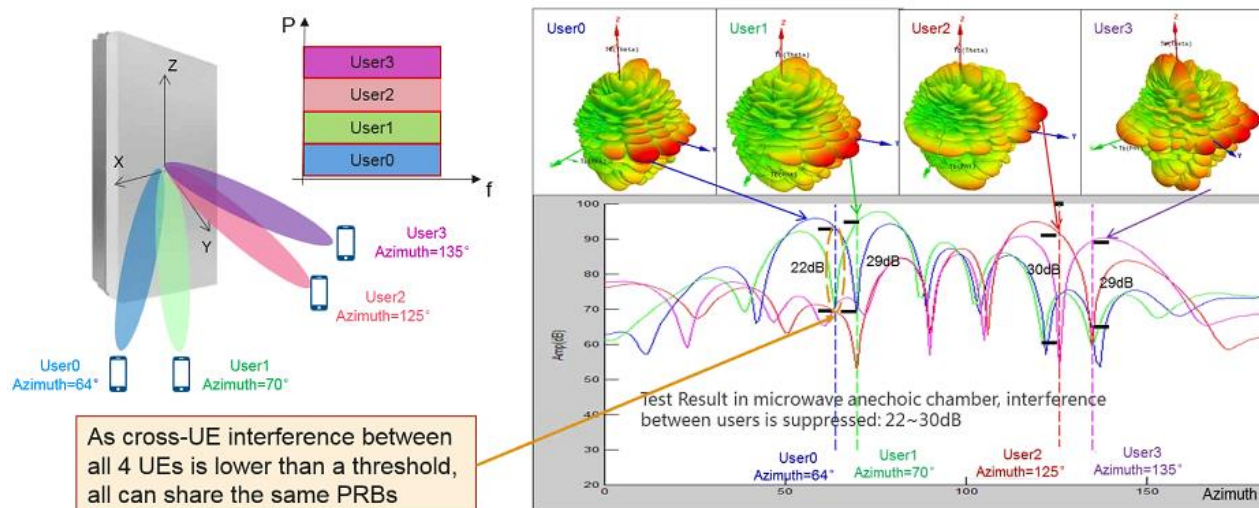


Ilustración 48: Implementación de Massive MIMO [50]

Tal y como puede verse en el ejemplo de la Ilustración 48, hay una antena y 4 usuarios. Los 4 usuarios están distribuidos en la celda con distinto azimut. El objetivo es meter a esos 4 usuarios en los mismos recursos frecuenciales. Hay muchas posibilidades de generar *beams* puesto que existen muchas combinaciones posibles. Si se elige una serie de *beams*, como por ejemplo los 4 diagramas superiores representados en 3D, con la ganancia del diagrama de radiación en el plano en el que están los usuarios (lóbulos en rojo). Se obtiene la gráfica inferior, referenciada en ángulo. Para cada usuario se ha generado un *beam* y se muestra su diagrama de radiación con un color específico. Para saber si ese patrón es bueno, hay que establecer un límite. Hay que asegurar que la diferencia entre el patrón del usuario interesante y todos los demás patrones de los usuarios restantes es mayor de 20 dB. En el ángulo marcado en el diagrama en vertical puede observarse que el usuario 1 posee un valor importante de su ángulo y el resto de los usuarios tiene un valor prácticamente nulo, de 22 dB de diferencia. Se puede decir que un máximo del lóbulo del usuario 1 coincide con mínimos de todos los demás lóbulos en esas direcciones. Por tanto, esto quiere decir que, en teoría, hay 20 dB de SINR, que es bastante más de la normalmente tiene un usuario de la red. El efecto que provoca agrupar varios usuarios en los mismos recursos no incrementa significativamente la interferencia. Pero no basta con que el usuario 1 cumpla con este requisito, sino que debe cumplirse también para el resto de los usuarios. La fuerza del algoritmo reside en encontrar las direcciones donde esa premisa se cumple para todos los usuarios.

Revisando el diagrama, esa premisa se cumple y, por tanto, quiere decir que esos 4 usuarios son *pareables* y la interferencia mutua que se genera es baja.

Se trata de una implementación bastante compleja puesto que hay que generar un gran número de posibilidades hasta detectar la buena y no se puede garantizar que todos los usuarios sean *pareables*. Se trata de un algoritmo de procesamiento masivo que consume muchos recursos.

La Ilustración 48 muestra usuarios que se encuentran en un plano concreto y en un ángulo concreto, pero si se añade que, además del azimut, también tienen diferente tilt, el proceso de búsqueda debe realizarse en las 3 dimensiones, importando tanto la ganancia del *beam* en horizontal como la ganancia del *beam*



en vertical. Aunque parece un proceso más complicado, esto permite que haya más posibilidades de encontrar usuarios *pareables* puesto que en vertical los *beams* son menos anchos. Es más sencillo aparear 2 usuarios que están en diferentes posiciones en vertical, con diferente tilt, que 2 usuarios que están en distinto azimut, debido a la forma que tienen los patrones. Los patrones en vertical son más estrechos y por tanto concentran más la radiación. Pero, además, también hay que sumar el efecto del canal. Los ángulos elegidos en el diagrama no tienen por qué ser buenos ya que, debido a las reflexiones que existen en el canal, puede que, para el ángulo elegido, la señal al ser transmitida se degrade y no llegue al usuario.

Si solo se aplica esta técnica, no puede garantizarse que el usuario vaya a recibir una señal con suficiente calidad. Por lo que, además es necesario sumar el efecto del canal en todas las posiciones. Para ello, la estación base necesita saber cómo ve el terminal el canal en todas las direcciones, es decir, añadir a la gráfica el efecto del canal. La estación base debe saber para un azimut dado, la pérdida en *dB* del canal que ve el terminal. Si la pérdida es demasiado alta, por ejemplo, de 130 *dB*, no interesa enviar la señal en esa dirección.

Además, el patrón puede cambiar cada TTI. Para el caso de la banda de 3500 *MHz*, como la separación entre portadoras recomendada por el estándar es de 30 *KHz*, supone un TTI de 0,5 *ms* donde el nodo es capaz de recalcular todos los usuarios *pareables* y todos los lóbulos. La parte de cálculo de antena podrá realizarse cada 0,5 *ms*, pero la parte de estimación del canal es más lenta puesto que requiere feedback. [54]

Al deber tener en cuenta todos estos efectos, el algoritmo a desarrollar es extremadamente complejo.

Toda la explicación de *Massive MIMO* y técnicas de haz empleadas que se describen en la memoria se aplican para escenarios con frecuencias menores de 6GHz, particularizando sobre todo en el caso de la banda C puesto que es la utilizada en España, donde el *Massive MIMO* es completamente digital y se puede modificar la fase de todos los PAs de manera digital, simplemente multiplicando por un desfase.

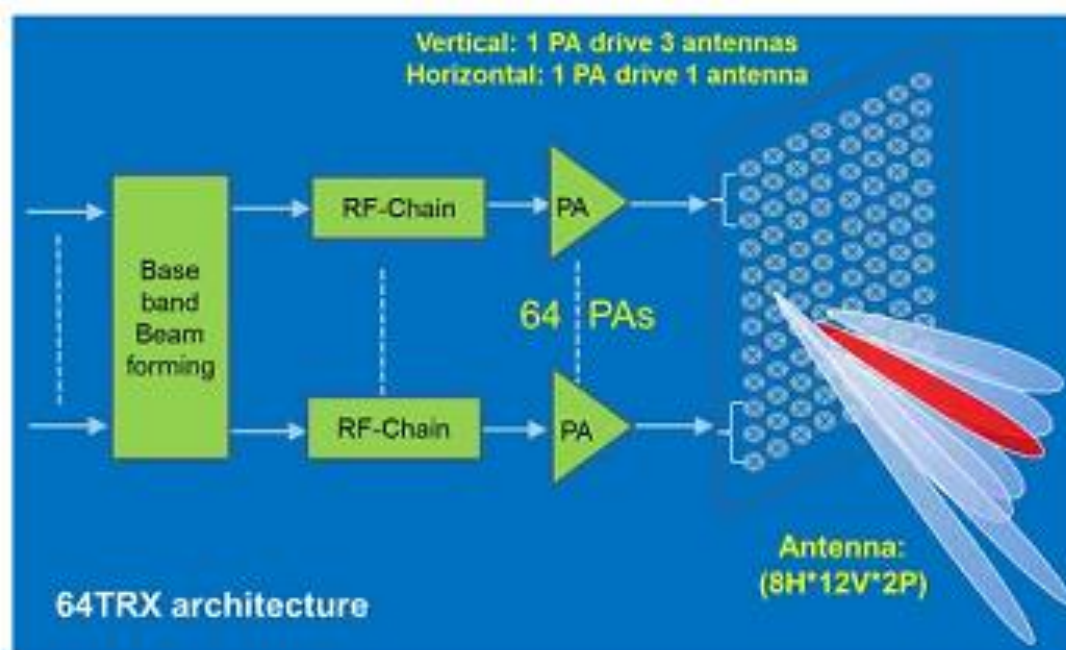


Ilustración 49: Implementación de MIMO masivo para frecuencias menores de 6 GHz [50]

La Ilustración 49 muestra el proceso que se sigue para implementar las antenas de Massive MIMO en los escenarios con frecuencias menores a los 6 GHz.

Para el caso de las bandas milimétricas, aquellas que están por encima de los 6 GHz, el beamforming ya no es tan útil puesto que el canal es tan sumamente agresivo y tan cambiante que, incluso aplicando las señales SRS, no se consigue precisión suficiente. En el escenario de bandas milimétricas, no compensa el esfuerzo computacional y constructivo de crear fases muy precisas de forma digital puesto que la característica del canal va a deshacer el *beamforming*. En estas bandas ya no hay 16 *layers* sino que se tienen solo 4. Estos 4 *layers* ya no se generan con Massive MIMO apuntando *beams*, sino que se crean por aislamiento de *beams*. Se divide la celda en 4 direcciones de forma estática, y si un usuario es afortunado y recibe 2 de esos *beams*, por ejemplo, como tiene doble polarización, se le pueden enviar 4 flujos (4 *layers*). Pero en este escenario, el objetivo no es ajustar los *beams* hacia el lugar donde está el usuario, puesto que esto no va a ser posible dadas las características del canal.

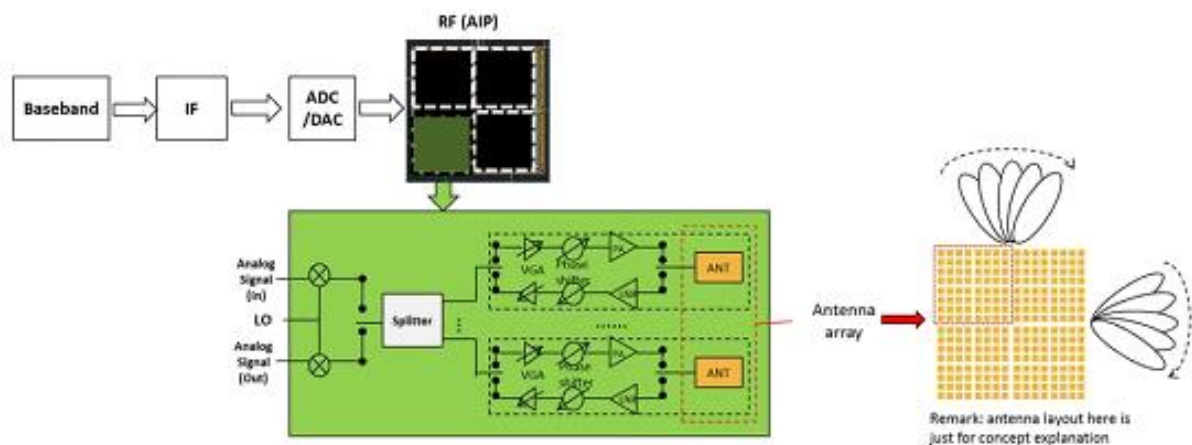


Ilustración 50: Implementación de MIMO masivo para frecuencias mayores de 6 GHz [50]



Por tanto, por encima de las frecuencias de 6 GHz no existe un concepto de *Massive MIMO* como tal y como máximo se aplica SU- MIMO con *beamforming* estático.

La ganancia en estas bandas se encuentra en el ancho de banda. En las zonas de bandas milimétricas es muy probable que las celdas dispongan de 400 MHz en vez de 100 MHz. Además, el radio de cobertura es muy pequeño debido a la propia frecuencia, por lo que el volumen de usuarios que pueden entrar en una célula va a ser bastante menor que el de una celda macro de 3,5 GHz o 700 MHz. En conclusión, si hay 4 veces más ancho de banda en las frecuencias milimétricas que en la banda C, no compensa implementar un algoritmo tan complejo para el *Massive MIMO* que intente agrupar usuarios, cuando la demanda de usuarios va a ser mucho más baja. Ni económicamente, ni tecnológicamente es rentable.

Las bandas milimétricas se implementan típicamente en escenarios *hot spots*, no demasiado grandes, con coberturas de unos 100m.

NR Channel	FR1 (<6GHz)		FR2 (>6GHz)	
PSS/SSS/PBSC	Beamforming (8 beams)		Beamforming (64 beams)	
PDCCH	MU-MIMO	4 layers in 32T/64T 1 layer in 8T	MU-MIMO	2 layers
PDSCH	SU-MIMO	8 layers	SU-MIMO	4 layers
	MU-MIMO	16 layers in 32T/64T 4 layers in 8T	MU-MIMO	4 layers
PUCCH	Beamforming		Beamforming	
PUSCH	SU-MIMO	4 layers	SU-MIMO	4 layers
	MU-MIMO	8 layers in 32R/64R 4 layers in 8R	MU-MIMO	4 layers

Tabla 9: Técnicas multiantena en canales NR

La Tabla 9 muestra lo que pueden soportar los diferentes canales para frecuencias por debajo y por encima de los 6 GHz de acuerdo con lo establecido en el estándar. En la primera fila se muestran los valores para los canales de broadcast, en la segunda fila para el canal de control. La tercera, hace referencia al canal de datos, y la cuarta y quinta fila hacen referencia al canal de control en el enlace ascendente.

### 3.2.4. MOVILIDAD DEL HAZ

En 5G es necesaria la gestión de haces dentro de una célula para poder mover a los usuarios entre dichos haces a medida que estos se desplazan. A diferencia de la movilidad entre células, que se gestiona a nivel 3 (RRC), la movilidad entre *beams* dentro de una célula, se gestiona desde el nivel 1, es decir, en la capa física. [55]

La gestión de haces o *beam management*, se divide en las siguientes partes.

- Primero existe una adquisición inicial para acceder al sistema. El terminal determina el haz que le sirve mejor. En base al SSB que detecta mejor o a las señales de referencia CSI-RS enviadas en cada haz. El SSB realiza un barrido por todos los haces de la antena y una vez determina cuál es el *beam* más adecuado, realiza el acceso aleatorio utilizando los recursos de dicho haz.

- Posteriormente, existe un ajuste de haz para adaptarse a cambios graduales en el canal. Se basa en medidas L1-RSRP realizadas por el terminal sobre las señales de referencia CSI-RS de cada haz, y reportadas a la red. La red determina cuál es el haz más apto para el terminal.
- Y por último está la recuperación del haz, cuando cambios repentinos interrumpen la comunicación. El terminal busca un nuevo haz y realiza un acceso aleatorio a dicho *beam*.

El terminal también posee haces de recepción y ajusta autónomamente el más adecuado, tanto para transmitir como para recibir.

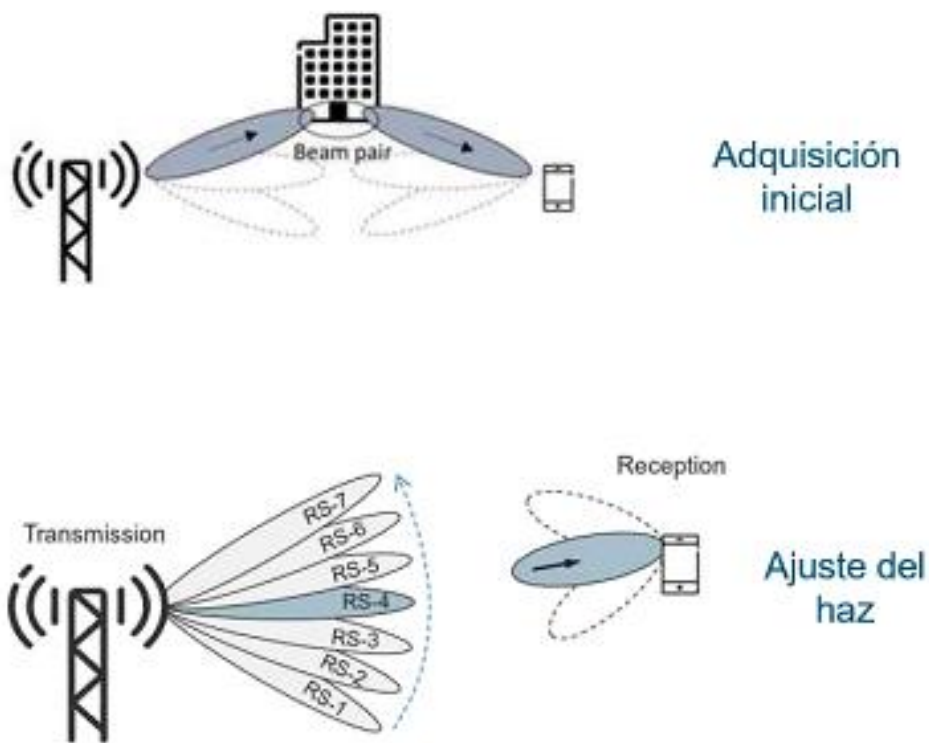


Ilustración 51: Funcionamiento de haces en MIMO Masivo [56]

En la Ilustración 51 se representa el proceso que sigue tanto la estación base como el terminal para implementar la gestión de haces.

Con el *Massive MIMO* surgen conceptos nuevos en el mundo de la radio que no existían antes. A medida que un usuario se mueve dentro del área de cobertura de una celda que tiene *Massive MIMO*, puede salir de un *beam* y entrar en otro. Este es el hecho genera la introducción del nuevo concepto en la gestión de redes radio, el *beam management*.

Un caso de uso típico en la gestión de haces sería un entorno urbano con edificios altos, como el que se da en ciudades grandes. En este escenario conviene un esquema de haces verticales.

Para poder implementar el *beamforming* con el *Massive MIMO* se necesita que el terminal aporte algún tipo de información sobre cómo ve el canal, para así poder construir los *beams* y apuntarlos a la zona de interés. Existen 2 posibles tipos de *feedback*. Los que son en base a las CSI-RS y los que son en base a las SRS. Las

señales CSI-RS y SRS son 2 tipos de señales de referencia, señales piloto, definidas en el estándar, que intervienen de la siguiente forma: [50]

- Las señales CSI-RS son similares a las señales piloto que ya existen en LTE. Se transmiten en recursos específicos con una información concreta para que el terminal la lea, estime cuál es la degradación que ha provocado el canal en esa señal piloto conocida e informe a la estación base. Aplicando este proceso, la estación base puede saber dónde está el usuario y enviarle la señal. El CSI-RS debe cubrir todas las posibles zonas donde el usuario va a poder recibir los datos. Si el CSI-RS no cubre completamente la zona donde el usuario puede recibir un *beam* de datos, poco a poco la estación base se queda sin información sobre cómo generar el *beam* hacia esa zona donde no hay CSI-RS. Por tanto, se trata de un requisito obligatorio: el CSI-RS debe cubrir siempre todos los posibles apuntamientos del *beam* de datos. Como se explica en otros apartados, dependiendo del número de elementos radiantes o transmisores que posean las antenas, se generan apuntamientos verticales y horizontales. Las CSI-RS se deben crear de tal forma que haya CSI-RS en cualquier posible dirección dentro de todo el posible rango de apuntamiento de los *beams* de datos. Se puede ver que este proceso es análogo a los rangos de apuntamiento de los *beams* de datos. Los 2 extremos de la comunicación, tanto estación base como terminal conocen la información que va a haber en los CSI-RS. En New Radio no se radian continuamente las señales piloto en la celda, únicamente se radian cuando hay algún usuario y, por tanto, datos. La ventaja reside en que como con el SSB ya se conoce la orientación aproximada en la que se encuentra el usuario, lo que se hace es únicamente radiar las señales piloto del CSI-RS que apuntan en esa dirección. De forma que si entra un usuario no hay por qué radiar hasta las 64 señales piloto (en el caso de tener una antena 64TRX), solo con radiar las CSI-RS más cercanas al usuario, es suficiente. El terminal que se encuentra en esa zona va a reportar información a la estación base sobre esas CSI-RS. Si entrara un segundo terminal a la celda en una posición muy alejada del primero, habría que crear nuevas CSI-RS para él. Otra ventaja es que estas CSI-RS no son individuales para el usuario, sino que varios usuarios pueden medir la misma CSI-RS. Por ejemplo, si 3 usuarios entran en la misma zona, los 3 pueden medir las mismas CSI-RS, sin necesidad de crear CSI-RS para cada usuario que entre en la celda. Por tanto, las CSI-RS se caracterizan por ser reutilizables. En el estándar también se define que las CSI-RS se pueden mapear en posiciones concretas. Existen diferentes opciones de mapeo de las CSI-RS en recursos, en subportadoras, pero siempre se intenta minimizar el número de recursos ocupados, para lograr que la interferencia entre celdas sea lo menor posible. Aun así, esta información no es del todo precisa puesto que los CSI-RS están orientados solo en determinadas posiciones y, además, la cantidad de información que puede aportar el terminal sobre cada CSI-RS es muy pequeña. El terminal únicamente puede reportar 2 tipos de información: cuánta potencia recibe y cómo de incorrelada está esa CSI-RS con respecto a otra en el punto donde se encuentra el terminal. Además, también hay que tener en cuenta que existe un desfase temporal entre que la estación envía la señal CSI-RS, el terminal la mide y contesta de vuelta a la estación base. Este retardo provoca que la estimación que calcula la estación base no sea totalmente precisa. Y, por otro lado, la información que recibe la estación base no posee completamente la

granularidad adecuada para poder enviar una indicación perfecta, es decir, existe un pequeño error de cuantificación que provoca que la estimación no sea del todo eficiente.

A futuro la señal CSI-RS también se utilizará para la movilidad. Permitirá decidir si se cambia o no de celda en función no solo del SSB sino también de cómo recibe los CSI-RS de otra celda. Si el terminal recibe CSI-RS muy nítidos de la celda vecina, le interesará hacer *handover* a dicha celda, a pesar de que el SSB no sea tan bueno.

Las señales CSI-RS son dinámicas, se encienden, apagan y se generan cuando hay usuarios. Se implementan para el canal del enlace descendente.

- La siguiente opción es realizar un proceso más astuto mediante las señales SRS. Las señales SRS ya existían en el sistema LTE, pero únicamente se utilizaban para el caso de TDD. Esto se debe a que la SRS es una señal que el terminal envía en el enlace ascendente, para unos recursos concretos y, además, se trata de una señal de banda ancha por lo que ocupa muchos PRBs. Es similar a un ruido, pero no se trata de un ruido aleatorio sino de uno concreto. El terminal envía la señal SRS en el *uplink*, se propaga por el canal y la estación base, sabiendo qué señal de banda ancha ha mandado el terminal, es capaz de deshacer el efecto del canal, es decir, la estación base, gracias a este proceso obtiene directamente cómo es el canal, obtiene las medidas y no necesita que el terminal reporte ese dato. Además, como para sistemas TDD, el canal de bajada y el de subida es el mismo, la misma frecuencia, solo que, en distinto tiempo, se puede decir que esa información que la estación base obtiene del *uplink* se trata de información muy precisa acerca de cómo va a ser también el canal en el *downlink* para cuando tenga que transmitir la propia estación base.

A diferencia de la señal CSI-RS que es una señal piloto, la SRS es una señal piloto que el terminal envía en el enlace ascendente para dar soporte al *Massive MIMO* del enlace descendente.

Se trata, por tanto, de una información sumamente valiosa para poder aplicar luego MIMO masivo puesto que se consigue información muy precisa de cómo va a ser el canal en el *downlink*.

Permite diseñar con mayor precisión los patrones de antena que se van a poder aplicar posteriormente en la implementación del *Massive MIMO*. Cuando el sistema se basa en señales SRS, el MIMO masivo va a ser mucho más preciso igual que también lo es la estimación del canal.

Por tanto, se concluye que es mucho más preciso que la estación base obtenga información sobre el canal en todos los PRBs y con esos datos decida cuál darle al usuario, que solo un reporte de una señal piloto discreta. Esto hace que las SRS se utilicen lo máximo posible en TDD.

Una ventaja de las señales SRS es que han sido diseñadas con características similares al ruido. Son señales que se envían en banda ancha, pero se les puede añadir varios ruidos sumados sin problema puesto que como la estación base qué ruido ha enviado cada usuario, es capaz de deshacer la información de cada uno de esos usuarios. Las señales SRS ocupan recursos, pero en esos mismos recursos se pueden incluir muchos usuarios, no es necesario enviar recursos específicos para la SRS de cada usuario. Aunque existe un número máximo puesto que, si se introduce demasiado ruido, las correlaciones no funcionan, pero si se dispusiera de recursos infinitamente grandes, podría sostener muchos usuarios mandando SRS.

Esta técnica también presenta un inconveniente y es también el hecho de que la señal es similar al ruido, aunque, como ya se ha mencionado, no es aleatorio. El problema que presenta es que, si el terminal se aleja mucho del centro de la celda, puede suceder que, esa señal que se ha creado se enmascare con ruido real de la celda. Es decir, existe un límite en el que las señales SRS se vuelven indistinguibles y acaban generando más error del beneficio que producen. Se trata de un punto a partir del cual la señal SRS llega tan degradada a la estación base que no cumple con su cometido. Cuando se alcanza este escenario, el nodo conmuta de SRS a CSI-RS, pasando del reporte del *uplink* automático a un reporte del *downlink*. Aunque se pierde precisión, va a ser mucho más preciso que el ruido que están generando las señales SRS.

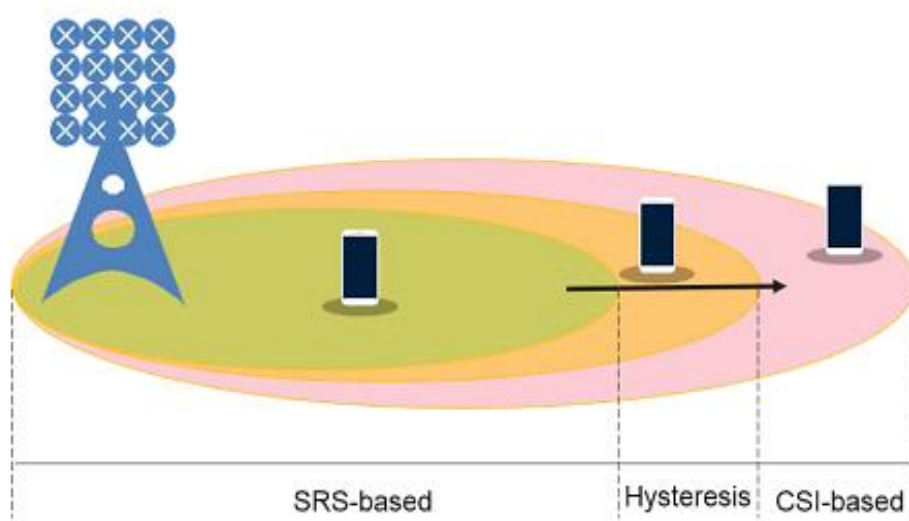


Ilustración 52: Cambio adaptativo de SRS a CSI-RS [50]

Se crea una zona donde se puede conmutar de un modo de trabajo a otro. Esto es lo que se representa en la Ilustración 52. Realmente, se trata de una situación muy extrema puesto que las señales SRS están tan bien diseñadas, que ofrecen una solución muy potente donde la degradación únicamente se produce en condiciones muy adversas. Para esbozar una idea de la calidad de esta solución, en más del 95% de los casos, se utilizan las señales SRS y solo en un porcentaje muy pequeño, zonas muy degradadas o muy ocultas, no sirven y es necesario conmutar a señales CSI-RS.

Tanto las señales CSI-RS como las señales SRS son técnicas obligatorias del estándar 5G.

### 3.2.5. ANTENAS ACTIVAS NEW RADIO: 8TRX, 16TRX, 32TRX Y 64TRX

En las antenas activas existen 192 elementos radiantes distribuidas en 8 columnas (para el caso de la antena 64TRX) por 12 filas de dipolos, aunque realmente activos son 4, y cada uno con 2 polarizaciones. De estos 192 elementos radiantes, se conectan, por detrás, a amplificadores de potencia únicamente 64. Y a cada uno de estos amplificadores se le puede introducir un desfase diferente. Son 32 apuntamientos físicos con 2 polarizaciones posibles cada uno, lo que hace un total de 64 apuntamientos.



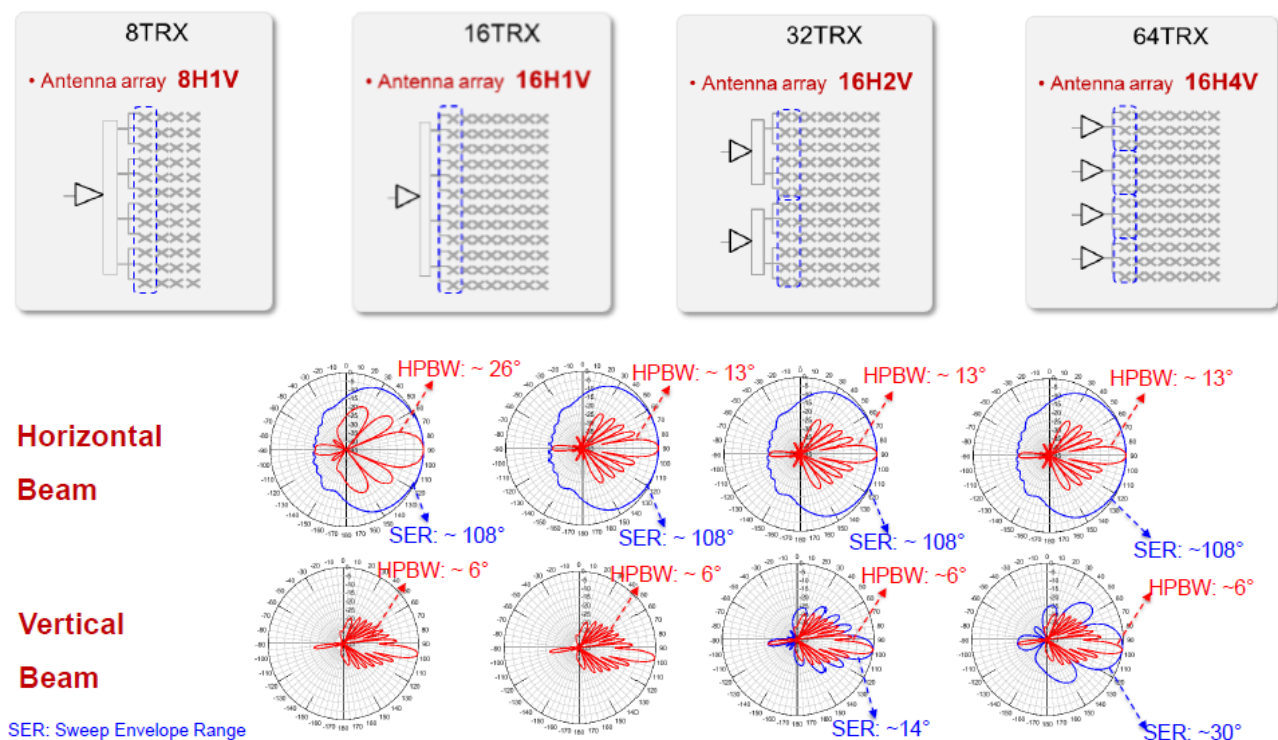


Ilustración 53: Configuraciones de antena para 5G [43]

Los diagramas de radiación que se muestran en la Ilustración 53 presentan valores típicos de la banda C (3500 MHz).

Se observan los 4 tipos de antena específicos que se han diseñado para la implantación de New Radio en la banda de 3500 MHz: las antenas con 8 transmisores, 16, 32 y 64. A continuación se describe el proceso de diseño de estas antenas referidos a la orientación de los dipolos y sus implicaciones constructivas en cuanto a los patrones. Los patrones son los diagramas de radiación que pueden verse en la mitad inferior de la Ilustración 53.

- Antena de 8 transmisores (8T u 8TRX): Técnicamente se formula con el nombre **8H1V**. Los nombres oficiales para las antenas nativas 5G y de sus arrays vienen dados por el número de filas, 8H, y el número de columnas, 1V. El número de columnas, 1V para este caso, se refiere a cuántas partes tiene en una señal activa. En horizontal existen 4 columnas de arrays con doble polarización. 8H se traduce en que a cada uno de esos dipolos se le puede asignar una señal activa diferente, de forma que se puede cambiar la fase de cada una de esas 8 señales en vertical (son las señales que se lanzan a cada una de esas columnas). 1V quiere decir que la señal que acomete a las columnas en vertical es la misma, es una única señal activa y no se pueden aplicar desfases diferentes en distintos dipolos en vertical. En resumen, a la señal en vertical se le pueden asignar 8 señales diferentes con distintos desfases, pero el 1V en vertical indica que en filas solo se puede meter 1 señal activa. Esto es lo que representa el triángulo de la Ilustración 53, 1 único PA. Este PA genera una señal, se distribuye en todos los arrays, pero es la misma señal que se introduce en todas las filas. Este tipo de construcción se traduce en que se puede generar apuntamiento horizontal, puesto que se puede mover el desfase de los arrays en vertical, pero no se puede crear apuntamiento vertical ya que la señal que entra

en las filas es la misma. La antena 8TRX se considera todavía una antena pasiva, aunque sea nativa de 5G y necesita una unidad radio aparte con las conexiones RF correspondientes.

Realmente, para generar apuntamiento horizontal es necesario introducir diferentes desfases en las columnas, y para generar apuntamiento vertical, hay que introducir diferentes desfases en las filas. Esto es lo que se muestra en los diagramas inferiores de la Ilustración 53. Para 8H1V, el haz vertical genera un único patrón y los *beams* o haces suelen ser de unos 6°. Sin embargo, en horizontal, como se pueden introducir hasta 8 señales distintas, se crea un lóbulo y, además, en base a esos desfases, se apunta dicho lóbulo en horizontal, en azimut. Una antena 8H1V puede generar un lóbulo de unos 26° y puede moverse alrededor de 108° aproximadamente en horizontal.

- El siguiente paso con lo que ya se considera una antena activa, es la antena 16T o 16TRX. Formalmente se denomina *antena array 16H1V*. Como se ha comentado en el punto anterior, 1V significa que la señal en vertical es igual en todos los dipolos, por tanto, no hay apuntamiento en vertical. En horizontal existen hasta 16 señales diferentes, hay 8 columnas de doble polarización y esto permite tener un *beam* más estrecho. Al haber más dipolos en vertical, puede cerrarse más el *beam*. Se genera un *beam* más estrecho que el anterior, de unos 13° aproximadamente, con un rango de movimiento similar al que posee la antena 8T, de unos 108°. Queda patente que, con esta nueva construcción, se consigue más precisión enviando señal y encontrando usuarios *pareables* que con la configuración previa de 8TRX. El número de *beams* simultáneos que se pueden generar en los mismos recursos sin que se interfieran entre ellos va a ser mucho menor con 26° que con 13°. Teóricamente el doble, aunque en la práctica no es así en todos los casos.
- El primer salto importante en el desarrollo de antenas activas aparece con la antena 32TRX. Técnicamente se nombra como *16H2V* y se caracteriza por el paso a 2V. En este diseño se implementan 2 señales diferentes en los arrays verticales, en las filas. De manera que se logra generar apuntamiento en vertical. En horizontal siguen existiendo los 16H, como en la versión anterior, la parte horizontal no cambia con respecto a la antena 16TRX. En vertical, el *beam* sigue siendo de unos 6° aproximadamente, pero, gracias a los 2 desfases nuevos que se introducen para este modelo, dicho *beam* puede verse incrementado alrededor de cierto rango. Normalmente, suele poder incrementarse hasta más del doble del valor del ancho del *beam*, es decir, hasta unos 14°. Con este diseño se logran *beams* de 6° con un apuntamiento de 14°. Si la mayoría de los usuarios de la célula se encuentran en esos 14°, es relativamente simple dar servicio a esos usuarios únicamente con 14° de apuntamiento. Pero normalmente, en las celdas, sobre todo en entornos urbanos, no es suficiente con estos 32TRX y se hacen necesarias antenas de 64TRX.
- Para el 64TRX el nombre técnico asignado es *16H4V*. Este diseño sigue implementando 16H, con lo que no varía el patrón horizontal con respecto a los modelos anteriores, sin embargo, se incrementa la parte vertical a 4V. Al evolucionar a 4V se alcanzan 4 señales diferentes que se introducen en el eje vertical, generando un mayor rango de apuntamiento de los *beams*. Se pueden llegar a generar muchos más *beams* simultáneos apuntando a diferentes direcciones lo que se traduce en una mayor probabilidad de encontrar usuarios



*pareables*. Para el escenario de un entorno urbano interesa aumentar esta probabilidad puesto que la señal va a llegar rebotada en cualquier dirección. Para este modelo, el *beam* sigue siendo de unos 6° aproximadamente y el rango de apuntamiento para el *beam* pasa a ser de unos 30°.

En este modelo 16H4V no se pueden generar más de 4 haces simultáneos, puesto que, al introducir 4 desfases diferentes, se crean los 4 *beams* (4 patrones) distintos. Para el eje vertical se produce una capacidad de búsqueda de 4 usuarios de forma general. Esto no quiere decir que los usuarios vayan a estar lo suficientemente separados como para que los 4 *beams* no se solapen. En el eje horizontal se pueden buscar 8 normalmente (4 *beams* en vertical x 8 *beams* en horizontal cada uno con doble polarización hacen un total de 64 posibles *beams*).

Al generar haces más apuntados, se concentra más la señal en una dirección y, en consecuencia, se obtiene más ganancia. La diferencia de ganancia no se debe por tanto a que los PAs transmitan mayor o menor cantidad de potencia o sumen más o menos PAs, el incremento en ganancia se debe a la mejora de apuntamiento.

Puede surgir la pregunta de qué pasaría si se introdujesen también 16 dipolos en vertical, es decir diseñar una antena 16H16V. Si se implementara una antena con 16 señales en vertical, se obtendría una envolvente (SER) muy grande, pero no es realmente necesario. Cuando se instala una antena para cubrir una celda, los grados reales que hay que cubrir no son para toda la célula en sí, sino que el objetivo es llegar a alcanzar la parte más lejana puesto que las zonas próximas a la estación base, van a quedar perfectamente cubiertas por proximidad, ya que las pérdidas en esos puntos son menores. Por tanto, los grados que se indican en el patrón se orientan a la parte más lejana de la célula.

La diferencia de patrones entre la antena 64TRX y 32TRX, que se ha visto en la Tabla 8 del apartado sobre el *beamforming*, radica en cuál es capaz de soportarlo. La antena 64TRX soporta todos los patrones que se implementan en el software, pero la antena 32TRX, por cómo se construyen los *beams*, puede no soportar alguno de los escenarios debido a que no quepan los *beams*.

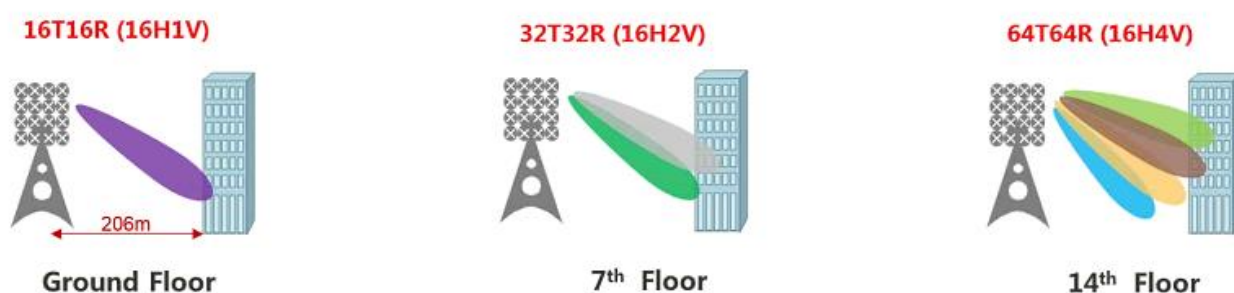


Ilustración 54: Comparativa de antenas para throughput en edificios altos [40]

En escenarios de Asia y China, donde abundan los edificios elevados, interesa tener antenas a no demasiada altura. Así es cómo se está desplegando actualmente en China las antenas activas con *Massive MIMO*. El objetivo es aprovechar los edificios de mediana altura e instalar celdas apuntando hacia arriba. Se configura un patrón vertical para la antena. Es lo que se muestra en las imágenes de la Ilustración 54. La primera imagen presenta un patrón que no tiene búsqueda vertical. A medida que se sube en plantas del edificio, se observa que la ganancia que produce la antena de 64TRX es mejor puesto que proporciona *beams* más elevados. Esta implantación se emplea en

ciudades donde hay una gran concentración de rascacielos y los emplazamientos situados en azoteas no llegan. Lo que se hace es instalar una antena para cubrir la calle y una antena para cubrir los rascacielos, es decir, 2 sectores, uno hacia abajo y otro hacia arriba.

Si en vez de rascacielos el escenario se caracteriza por presentar edificios de altura media, en vez de disponer 4 haces en vertical, es más práctico configurar el patrón para tener únicamente 2 y de esta forma conseguir enfocar más la energía en el eje vertical.

Con este análisis sobre el diseño de antenas activas, se puede ver que, gracias a su nueva configuración y la implementación de los algoritmos, se empieza a dar respuesta a los complejos escenarios que ya se plantean y a las demandas futuras que vendrán.

## 4. CONCLUSIONES

Tras llevar a cabo un análisis exhaustivo de la red de acceso radio de última generación, 5G New Radio, se concluye que se han estudiado todos los puntos que se planteaban al comienzo del trabajo.

La memoria final se ajusta a la planificación propuesta desde el comienzo del recorrido, donde además se ha ido comprobando de manera continuada su seguimiento.

El propósito final de este trabajo era obtener una visión global y detallada del nuevo sistema tecnológico 5G NR que está comenzando a implantarse en los diferentes países del mundo y que se presenta como solución a las nuevas demandas y necesidades que han surgido en los últimos años. Su completa evolución aún está en fase de desarrollo lo que le permite un amplio recorrido a futuro.

La investigación se ha centrado en su estandarización y arquitectura, contemplando las similitudes y diferencias con su predecesora, la red 4G. Y su implantación real sirviéndose de ésta en una etapa inicial para, poco a poco, evolucionar a una arquitectura completamente independiente en su despliegue final.

De igual modo, se han analizado los algoritmos principales que caracterizan a esta nueva tecnología:

- Se ha desarrollado el concepto de *Network Slicing* que logra que una única red física pueda dividirse en varias redes lógicas en función de los requisitos de cada uno de los servicios especializados. Gracias a la flexibilidad de la nueva capa física y a la reutilización de recursos se pueden satisfacer los futuros escenarios que se plantean.
- Por su parte, el *Dynamic Spectrum Sharing*, funcionalidad propia de los suministradores, permite obtener ciertas ventajas de 5G New Radio sirviéndose de las bandas de trabajo propias del LTE. Esta herramienta supone una gran ventaja para los operadores de telefonía móvil puesto que les permite poner al servicio de sus clientes una primera versión del 5G sin necesidad de realizar una inversión en hardware propio de New Radio.
- El *Beamforming* es una técnica para el conformado de haz. Permite generar haces apuntados a direcciones concretas por donde se envía la señal. La finalidad es alcanzar a los usuarios de forma determinada y eficiente concentrando la señal y evitando que ésta llegue a usuarios que no requieren ese servicio.
- La técnica de *Massive MIMO* tiene su mayor desarrollo e implementación en las bandas altas de frecuencia. Se caracteriza por poseer un número elevado de antenas en el lado transmisor. Se aprovecha su disposición en transmisión para generar un número elevado de haces. Cuantos más haces haya y la matriz de elementos radiantes sea más robusta, más estrechos y apuntados serán dichos haces. Lograr este apuntamiento es primordial a la hora de aumentar las posibilidades de encontrar usuarios *pareables* y así reutilizar recursos. Este procedimiento junto con el *beamforming* y la elaboración de distintos patrones permiten aprovechar al máximo las bondades que presenta el 5G y disfrutar de todas sus ventajas. Gracias a ellos se logra un aumento de la capacidad, del *throughput* y de la eficiencia.

- Por último, pero no menos importante, se realiza un estudio de las antenas activas. Las antenas activas, son antenas nativas de 5G diseñadas propiamente para esta nueva red móvil. Se describe en detalle los diferentes tipos existentes y su configuración física puesto que, en función de su disposición y la matriz que generen, permitirán crear mayor o menor número de haces. En estos nuevos diseños, la parte de inteligencia que aportaban las cabezas remotas en las tecnologías predecesoras y que eran dispositivos independientes a las propias antenas, están incluidos formando un único elemento. Gracias a este nuevo proceso de fabricación se puede implementar el *Massive MIMO*.

Con este análisis puede verse lo que engloba el sistema 5G y la infinidad de escenarios que se pueden explotar con él y que vendrán en los próximos años.

Debido a la duración del proyecto y a su limitación física recogida en la memoria no se han podido abordar todos los puntos que conforman la red 5G. Sin embargo, como líneas de trabajo futuras, este documento puede servir como punto de partida y a partir del mismo desarrollar temas nuevos y/o ahondar en los aquí mencionados. Como ejemplo, se muestran algunas categorías que podrían incluirse:

- Analizar las diferentes capas, como la capa física, y sus diferencias con las tecnologías previas.
- Realizar un estudio sobre el núcleo de red nativo para 5G New Radio.
- Estudiar la creación de la red *fronthaul*.
- Efectuar un análisis sobre los avances y detalles de las diferentes Releases de 5G.
- Estudiar los protocolos nativos de New Radio y compararlos con los existentes.
- Investigar en el desarrollo de la transmisión de datos y cómo intervienen los diferentes canales.

## 5. GLOSARIO

1G	1st Generation (mobile communication technology)
2G	2nd Generation (mobile communication technology)
3G	3rd Generation (mobile communication technology)
3GPP	3rd Generation Partnership Project
4G	4th Generation (mobile communication technology)
5G	5th Generation (mobile communication technology)
5GC	5G Core
5GCN	5G Core Network
5G DC	5G Dual Connectivity
5G NR	5G New Radio
5QI	5G QoS Identifier
AMC	Adaptive Modulation and Coding
AMF	Access and mobility Management Function
AMR	Adaptive Multi-Rate
APN	Access Point Name
AR	Augmented Reality
ARIB	Association of Radio Industries and Bussiness
AUC	Authentication Center
BCCH	Broadcast Control Channel
BCH	Broadcast Channel
BPSK	Binary Phase Shift Keying
BS	Base Station
BSC	Base Station Controller
BSS	Base Station System
BTS	Base Tranceiver Station
CA	Carrier Aggregation
CCCH	Common Control Channel
CD-SSB	Cell Defining SSB
CDM	Code Division Multiplex
CDMA	Code Division Multiple Acces
CE	Control Element
CG	Cell Group
CLI	Cross Link Interference
CoMP	Coordinated Multipoint
CQI	Channel Quality Indicator
CRB	Common Resource Block
CRI	CSI-RS Resource Indicator
CRS	Cell specific Reference Signal (LTE)
CS	Configured Scheduling o Circuit Switched
CSFB	Circuit Switched Fall Back
CSI	Channel-State Information
CSI-RS	Channel-State Information Reference Signal
CSS	Common Search Space
CWTS	China Wireless Telecommunications Standard
DC	Dual Connectivity
DCI	Downlink Control Information
DFT	Discrete Fourier Transformation
DL	Downlink
DMRS	Demodulation Reference Signal
DoNAS	Data over Non-Access Stratum
DRB	Data Radio Bearer
DSS	Dynamic Spectrum Sharing
eDRX	Extended Discontinuous Reception
EIR	Equipment Identity Register
eMBB	Enhanced Mobile Broadband
EMM	EPS Mobility Management
eMTC	Enhanced Machine Type Communication
EN-DC	EUTRA NR Dual Connectivity

eNB	EUTRAN NodeB
EPC	Evolved Packet Core
EPS	Evolved Packet System
EPS-FB	EPS-Fall Back
E-RAB	EUTRAN Radio Access Bearer
E-RAN	Enterprise Radio Access Network
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
EUTRA	Evolved Universal Terrestrial Radio Access
EUTRAN	Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network
FDD	Frequency Division Duplex
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FR1	Frequency Range 1
FR2	Frequency Range 2
GGSN	Gateway GPRS Support Node
GMSK	Gaussian Minimum Shift Keying
gNB	NR NodeB
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Global System for Mobile Communications
GW	Gateway
HARQ	Hybrid Automatic Repeat Request
HLR	Home Location Register
HPBW	Half Power Beamwidth
HSDPA	High Speed Downlink Packet Access
HSPA	High Speed Packet Access
HSS	Home Subscriber Service
HSUPA	High Speed Uplink Packet Access
IFFT	Inverse Fast Fourier Transformation
IMEI	International Mobile Equipment Identity
IMT-2000	International Mobile Telecommunications-2000
IMS	IP Multimedia Subsystem
IMSI	International Mobile Subscriber Identity
IoT	Internet of Things
IP	Internet Protocol
ITU	International Telecommunication Union
KPI	Key Performance Indicator
LAN	Local Area Network
LTE	Long Term Evolution
M2M	Machine-to-Machine
MAC	Medium Access Control
MBMS	Multimedia Broadcast Multicast Service
MBSFN	Multimedia Broadcast Single Frequency Network
MCG	Master Cell Group
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MME	Mobility Management Entity
mMTC	Massive Machine Type Communications
MN	Master Node
MR-DC	Multi Radio Dual Connectivity
MS	Mobile Subscriber
MSC	Mobile Switching Center
MU-MIMO	Multi User MIMO
NAI	Network Access Identifier
NAS	Network Access Stratum
NB	NodeB o Narrow Band
NCGI	NR Cell Global Identifier
NE-DC	NR EUTRA-Dual Connectivity
NGC	Next Generation Core
NGEN-DC	NG RAN EUTRA-NR Dual Connectivity
NG-RAN	NG Radio Access Network
ng-eNB	Next Generation Evolved NodeB
NR	New Radio

NR-PSS	New Radio PSS
NR-SSS	New Radio SSS
NS	Network Slicing
NSA	Non-Stand Alone
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
PA	Power Amplifier
PAPR	Peak-to-Average Power Ratio
P-GW	Packet Gateway
PBCH	Physical Broadcast Channel
PCI	Physical Cell Identity
PDCCH	Physical Downlink Control Channel
PDCP	Packet Data Convergence Protocol
PDN	Packet Data Network
PDSCH	Physical Downlink Shared Channel
PLMN	Public Land Mobile Network
PRACH	Physical Random Access Channel
PRB	Physical Resource Block
PS	Packet Switched
PSS	Primary Synchronization Signal
PTRS	Phase Tracking Reference Signal
PUCCH	Physical Uplink Control Channel
PUSCH	Physical Uplink Shared Channel
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QCI	QoS Class Identifier
QoS	Quality of Service
QPSK	Quadratur Phase Shift Keying
RACH	Random Access Channel
RAN	Radio Access Network
RAT	Radio Access Technology
RB	Resource Block o Radio Bearer
RBG	Resource Block Group
RDSI	Red Digital de Servicios Integrados
RET	Remote Electrical Tilt
RF	Radio Frequency
RIM	Remote Interference Management
RNC	Radio Network Controller
RNS	Radio Network System
RRC	Radio Resource Control
RRH	Remote Radio Head
RRU	Remote Radio Unit
RSRP	Reference Signal Received Power
RSSI	Received Signal Strength Indicator
RTP	Real Time Protocol
RTPC	Red Telefónica Pública Conmutada
RTT	Round Trip Time
RU	Radio Unit
S-GW	Serving Gateway
SA	Stand Alone
SAE	System Architecture Evolution
SAE GW	System Architecture Evolution Gateway
SCell	Secondary Cell
SC-FDMA	Single Carrier FDMA
SCH	Shared Channel
SCS	Subcarrier Spacing
SD	Slice Differentiator
SDAP	Service Data Adaptation Protocol
SGSN	Serving GPRS Support Node
SI	System Information
SIB	System Information Block



SIM	Subscriber Identity Module
SMS	Short Message Service
SINR	Signal to Interference plus Noise Ratio
SN	Secondary Node
SNR	Signal to Noise Ratio
S-NSSAI	Single-Network Slicing Selection Assistance Information
SON	Self-Organizing Network
SpCell	Special Cell
SR	Scheduling Request
SRB	Signaling Radio Bearer
SRS	Sounding Reference Signal
SS	Synchronization Signal
SSB	Synchronization Signal and PBCH Block
SSS	Secondary Synchronization Signal
SST	Slice/Service Type
SU-MIMO	Single User MIMO
TCI	Transmission Configuration Indicator
TCP	Transmission Control Protocol
TDD	Time Division Duplex
TDMA	Time Division Multiple Access
TIA	Telecommunications Industry Association
TPC	Transmit Power Control
TTI	Transmission Time Interval
UDP	User Datagram Protocol
UE	User Equipment
UL	Uplink
Um	Interfaz aire (2G)
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System
UPF	User Plane Function
URLLC	Ultra-Reliable and Low Latency Communications
USIM	UMTS Subscriber Identity Module
V2X	Vehicle to X communication
VLR	Visited Location Register
VoLTE	Voice over LTE
VR	Virtual Reality
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access
WLAN	Wireless LAN
X2	Interfaz entre los eNBs
xNB	NR NodeB o EUTRA NodeB
Xn	Interfaz entre los gNBs
Xn-C	Xn-Control Plane
Xn-U	Xn-User Plane
XR	Extended Reality

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] E. Dahlman, S. Parkvall, J. Skold, "5G NR : the next generation wireless access technology", Amsterdam: Academic Press, 2018.
- [2] Demystifying 3GPP – An insider's perspective to how 4G and 5G standards get created, «Qualcomm,» [En línea]. Available: <https://www.qualcomm.com/news/onq/2017/08/02/demystifying-3gpp-insiders-perspective-how-4g-and-5g-standards-get-created>. [Último acceso: Septiembre 2020].
- [3] Blog CNMC, «CNMC,» [En línea]. Available: <https://blog.cnmc.es/2010/05/21/conceptos-basicos-del-telecos-evolucion-de-las-comunicaciones-moviles-del-gsm-al-lte/>. [Último acceso: 2020].
- [4] Rahnema, M., «Overview of the GSM system and protocol architecture,» *IEEE Communications Magazine IEEE Commun. Mag. Communications Magazine, IEEE*, vol. 31, nº 4, pp. 92-100, 1993.
- [5] «Bibingus,» [En línea]. Available: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/11141/fichero/PFC%252F4+Red+GSM.pdf>. [Último acceso: 2020].
- [6] Y. S. Rao, Wing-Cheong Yeung and A. Kripalani, «"Third-generation (3G) radio access standards",» *2000 International Conference on Communication Technology Proceedings*, vol. 2, pp. pp. 1017-1023, 2000.
- [7] Vijay K. Garg, «Science Direct,» Network COnroller, 2007. [En línea]. Available: <https://www.sciencedirect.com/topics/computer-science/network-controller>. [Último acceso: 2020].
- [8] Martin Sauter, "From GSM to LTE-Advanced : An Introduction to Mobile Networks and Mobile Broadband", West Sussex, United Kingdom: Wiley, 2014.
- [9] T. Nihtilä, V. Tykhomyrov, O. Alanen, «"System performance of LTE and IEEE 802.11 coexisting on a shared frequency band",» de *2013 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, Shanghai, China, 2013.
- [10] Telefonica, "Progragrama superior redes de acceso: Introducción a infraestructuras móviles", Madrid: Escuela Telefónica, 2018.
- [11] Rohde & Schwarz España, «Redeweb,» Destino 4G, Octubre 2010. [En línea]. Available: [https://www.redeweb.com/\\_txt/671/82.pdf](https://www.redeweb.com/_txt/671/82.pdf). [Último acceso: Octubre 2020].
- [12] Fundación In-nova, "Comunicaciones móviles LTE—4G, con introducción al 5G", Castilla La Mancha: Formación activa - curso, 2020.
- [13] Universidad de Alicante, «Master Móviles,» 2017. [En línea]. Available: <https://mastermoviles.gitbook.io/tecnologias2/conectividad-movil.-tecnologias-3g-4g-wifi-y-bluetooth>. [Último acceso: Octubre 2020].

- [14] «Tech Play On,» 3 Agosto 2018. [En línea]. Available: <http://www.techplayon.com/lte-enodeb-scheduler-and-different-scheduler-type/>. [Último acceso: Octubre 2020].
- [15] 3GPP TS 36.211, «3GPP,» [En línea]. Available: <https://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/98-lte>. [Último acceso: Octubre 2020].
- [16] 3GPP Release 15, «3GPP,» Marzo 2017. [En línea]. Available: <https://www.3gpp.org/release-15>. [Último acceso: Octubre 2020].
- [17] 3GPP Release 15, «3GPP,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.3gpp.org/release-15>. [Último acceso: Octubre 2020].
- [18] 3GPP Release 16, Julio 2020. [En línea]. Available: <https://www.3gpp.org/release-16>. [Último acceso: Octubre 2020].
- [19] 3GPP Release 17, «3GPP,» Diciembre 2020. [En línea]. Available: <https://www.3gpp.org/release-17>. [Último acceso: Octubre 2020].
- [20] 3GPP Release 17, «3GPP,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.3gpp.org/news-events/2098-5g-in-release-17-%E2%80%93-strong-radio-evolution>. [Último acceso: Diciembre 2020].
- [21] 5G HUB, «5G Hub,» Marzo 2019. [En línea]. Available: <https://5ghub.us/5g-en-dc-architecture-and-interfaces/>. [Último acceso: Noviembre 2020].
- [22] «"2018 IEEE 5G World Forum",» *IEEE Communications Magazine*, p. 119, Abril 2018.
- [23] «IEEE Communications Magazine,» Diciembre 2017. [En línea]. Available: <https://medium.com/5g-nr/5g-nr-the-new-radio-interface-for-5g-2b769a59ea80>. [Último acceso: Noviembre 2020].
- [24] M. Kottkamp, A. Pandey, D. Raddino, A. Roessler, R. Stuhlfauth, "5G New Radio. Fundamentals, procedures, testing aspects", Munich, Alemania: Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG, 2019.
- [25] Telefónica, "Acceso Móvil - Introducción", Madrid: Curso Telefónica, 2020.
- [26] 3GPP TS 38.104, «3GPP,» Enero 2018. [En línea]. Available: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3202>. [Último acceso: Noviembre 2020].
- [27] Huawei, *Huawei 5G Workshop*, Madrid: Huawei, 2020.
- [28] Huawei, "Planificación red 5G", Madrid: Curso Huawei, 2020.

- [29] Huawei, «"New 5G, New Antenna",» *5G Antenna White Paper*, p. 20, 2019.
- [30] "5G Standards: What You Need to Know", «SDX Central,» Octubre 2017. [En línea]. Available: <https://www.sdxcentral.com/5g/definitions/5g-standards/>. [Último acceso: Noviembre 2020].
- [31] Telefónica & Huawei, *"Global Antenna Technology Industry Forum"*, Munich, Alemania: Telefónica & Huawei, 2018.
- [32] Telefónica, *"Fundamentos de 5G: LTE, 5G & IoT"*, Madrid: Curso Telefónica, 2020.
- [33] Ericsson, *"Ericsson: Narrow Band IoT & Cat-M"*, Madrid: Ericsson Paper, 2019.
- [34] Huawei, *"Power Control in 5G"*, Madrid: Ponencia Huawei, 2020.
- [35] R. Ferrús, O. Sallent, J. Pérez-Romero, R. Agustí, «"On 5G radio access network slicing: radio interface protocol features and configuration",» *IEEE Communications Magazine*, vol. 56, nº 5, pp. 184-193, 2018.
- [36] Telefónica, *"Fundamentos de 5G: Network Slicing"*, Madrid: Workshop Telefónica, 2020.
- [37] Telefónica, *"Fundamentos de 5G: DSS"*, Madrid: Workshop Telefónica, 2020.
- [38] Ericsson, *"Ericsson: Optimización DSS"*, Madrid: Ponencia Ericsson, 2020.
- [39] J. Anguera, A. Pérez, *"Teoría de Antenas"*, Universidad Ramon LLull, 2008.
- [40] Huawei, *"Huawei 5G Planning training: Challenges of optimal site selection"*, Madrid: Workshop Huawei, 2020.
- [41] C. Puente, J. Anguera, C. Borja, «"Dual-band dual-polarized antenna array",» vol. US Pat. 6, nº 937, p. 206.
- [42] Commscope, «Commscope,» Commscope antennas - Base station antennas, 2019. [En línea]. Available: <https://es.commscope.com/product-type/antennas/base-station-antennas-equipment/base-station-antennas/itemrrv4-65b-r6h4/>. [Último acceso: Diciembre 2020].
- [43] Huawei, *"Challenges of new technology"*, Madrid: Ponencia Huawei, 2020.
- [44] Huawei, *"5G Massive MIMO Explained"*, Madrid: Workshop Huawei, 2019.

- [45] Nokia, *"5G O.S - RF Coverage and Mobility: Beamforming"*, Madrid: Workshop Nokia, 2020.
- [46] M. Kottkamp, A. Pandey, D. Raddino, A. Roessler, R. Stuhlfauth, «"Antenna technology for beamforming",» de *"5G New Radio: Fundamentals, procedures, testing aspects"*, Múnich, Alemania, Rohde & Scharz GmbH & Co. KG, 2019, pp. 177-182.
- [47] Nokia, *"Coverage and Mobility: Beam Pattern"*, Madrid: Workshop Nokia, 2020.
- [48] K. Kahng, I. Yang, J. Anguera, J. Yong Lee, «"Design of Four MIMO Handset Antennas",» de *European Conference on Antennas and Propagation, EUCAP*, Gothenburg, Sweden, 2013.
- [49] J. Anguera, A. Andújar, R. M. Mateo, S. Kahng, «"A 4x4 MIMO Multiband Antenna System with Non-Resonant Elements for Smartphone Platforms",» de *European Conference on Antennas and Propagation, EUCAP*, Paris, Francia, 2017.
- [50] Huawei, *"Massive MIMO solutions"*, Madrid: Ponencia Huawei, 2020.
- [51] Telefónica, *"EET Acceso Radio: Espectro Radioeléctrico"*, Madrid: Escuela Telefónica, 2018.
- [52] Jon Mundy, «5G.co.uk,» Octubre 2017. [En línea]. Available: <https://5g.co.uk/guides/what-is-massive-mimo-technology/>. [Último acceso: Noviembre 2020].
- [53] Ericsson, *"Módulo Móvil 3 - Construcción"*, Madrid: Workshop Ericsson, 2020.
- [54] M. Kottkamp, A. Pandey, D. Raddino, A. Roessler, R. Stuhlfauth, «"Massive MIMO",» de *"5G New Radio: Fundamentals, procedures, testing aspects"*, Múnich, Alemania, Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG, 2019, pp. 180-184.
- [55] M. Kottkamp, A. Pandey, D. Raddino, A. Roessler, R. Stuhlfauth, «"Beam mobility procedure",» de *"5G New Radio: Fundamentals, procedures, testing aspects"*, Múnich, Alemania, Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG, 2019, pp. 387-395.
- [56] Nokia, *"mMIMO and Beamforming Antenna Optimization"*, Madrid: Workshop Nokia, 2020.