

El sistema de comunicaciones móviles de próxima generación 5G y su caso de uso IoT

Autora: Susana Pérez Mantilla

Máster Universitario de Ingeniería de
Telecomunicación

Universitat Oberta de Catalunya

enero 2019



El verdadero progreso es el que pone la tecnología al alcance de todos.

Henry Ford

DEDICATORIA

A mi padre, por confiar siempre en mí y querer que cada día sea mejor persona y profesional.

A mi madre, por su amor y ser un ejemplo de superación.

AGRADECIMIENTOS

A mi familia.

A mi esposo que ha sido un apoyo incondicional durante todo el máster.

A mis tutores Jaume Anguera y Aurora Andujar por guiarme en cada fase del trabajo.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1.....	3
1. La Nueva Radio 5G	4
1.1 Introducción.....	4
1.2 Nueva Capa Física	6
1.3 Comparación y coexistencia con LTE.....	10
1.4 Requerimientos de NR	11
1.5 Opciones de arquitectura 5G.....	13
1.6 Aspectos clave para 5G.....	15
1.6.1 Bandas milimétricas.....	15
1.6.2 Agregación de portadoras / Conectividad Dual.....	17
1.6.3 MIMO y Modulaciones de alto orden	22
1.6.4 Densificación con Small Cells.....	23
1.6.5 Equipo de Usuario de Alta Potencia (HPUE)	24
1.7 Interfaz aire.....	26
1.7.1 Reparto del espectro radioeléctrico a nivel internacional	28
1.7.2 Reparto del espectro radioeléctrico en España.....	29
1.8 Principales aplicaciones.....	31
1.8.1 Extreme Mobile BroadBand (eMBB).....	32
1.8.2 Ultra-reliable MTC (uMTC).....	32
1.8.3 Massive Machine-Type Communications (mMTC).....	33
1.9 Network slicing	34
1.10 Antenas para NR.....	35
1.10.1 Antenas para UE en banda 3.5 GHz.....	35
1.10.2 Antenas para UE en bandas milimétricas	39
1.10.3 Antenas para BTS	41
1.11 Chipsets 5G.....	48
CAPÍTULO 2.....	49
2. Internet de las Cosas (IoT)	50
2.1 Introducción.....	50
2.2 Estado del arte en LTE y enfoque 5G.....	53
2.3 Protocolos IoT basados en IP.....	55
2.4 Redes de corto alcance y baja potencia	55
2.5 Redes de largo alcance y baja potencia	57
2.5.1 Dos tecnologías LPWA líderes: NB-IoT y LTE-M.....	59

2.5.2	LPWA propietarias: LoRA, Sigfox y otros.....	60
2.5.3	Soluciones LPWA celulares vs propietarias	68
2.6	Arquitectura IoT	70
2.7	Escenarios IoT.....	71
2.8	Casos de uso.....	73
CONCLUSIONES		76
BIBLIOGRAFÍA.....		81

LISTA DE ABREVIATURAS

3GPP	(3rd Generation Partnership Project) Proyecto de Asociación de Tercera Generación
6LoWPAN	(<i>IPv6 over Low power Wireless Personal Area Networks</i>), estándar basado en IPv6 para Redes de Área Personal y Baja Potencia
A	
AA	Antena Activa
ADR	(<i>Adaptive Data Rate</i>) Velocidad de Datos Adaptativa
AI	(Air Interface) Interfaz Aire
B	
BI	(<i>Business Intelligence</i>) Inteligencia digital aplicada a los negocios
BW	(<i>Bandwidth</i>) Ancho de banda
C	
CA	(<i>Carrier Aggregation</i>) Agregación de portadoras
CAGR	(<i>Compound Annual Growth Rate</i>) Tasa Compuesta de Crecimiento Anual
CC	(<i>Component Carrier</i>), en el contexto de CA se refiere a cada portadora añadida
CoMP	(<i>Coordinated MultiPoint</i>) sistema de coordinación de múltiples puntos
CP	(<i>Cyclic Prefix</i>) Prefijo Cíclico
CPGW	(<i>Control Plane Gateway</i>) Enrutador al plano de control
CSI	(<i>Channel Status Information</i>) Indicador del Estado del Canal
CSS	(<i>Chirp Spread Spectrum</i>) técnica de espectro ensanchado
D	
DAS	(<i>Distributed Antenna System</i>) Sistema de Antenas Distribuidas
DBPSK	(<i>Differential Binary Phase Shift Keying</i>) Codificación de Cambio de Fase Binaria Diferencial
DC	(<i>Dual Connectivity</i>) Conectividad dual
DL	(<i>downlink</i>) Enlace descendente
E	
E2E	(<i>end to end</i>) comunicaciones extremo a extremo
ECC	(<i>Envelope Correlation Coefficient</i>), coeficiente de correlación para analizar el patrón de radiación de las antenas
EHF	(<i>Extra High Frequency</i>) rango de Frecuencias “Extra” Altas
eMBB	(<i>Extreme Mobile BroadBand</i>) Banda Ancha Móvil Extrema
eNB	o eNodeB, es la estación base de LTE
EPC	(<i>Evolved Packet Core</i>), es el núcleo de la red LTE
F	
FD MIMO	(Full Dimension MIMO), ver MIMO
FDD	(<i>Frequency División Duplexing</i>) División de Duplexación por Frecuencia
F_{DL_high}	límite superior del rango de frecuencias en DL
F_{DL_low}	límite inferior del rango de frecuencias en DL
FR	(<i>Frequency Range</i>) Rango de Frecuencia
FSPL	(<i>Free Space Path Loss</i>) Pérdidas del Enlace en Espacio Libre
F_{UL_high}	límite superior del rango de frecuencias en UL
F_{UL_low}	límite inferior del rango de frecuencias en UL
FWA	(<i>Fixed Wireless Access</i>) Acceso Fijo Radio
G	
GFSK	(<i>Gaussian Frequency Shift Keying</i>) Codificación de Cambio de Frecuencia Gaussiana
gNB	o gNodeB, es la estación base de 5G
Gr	Ganancia de la antena receptora
Gt	Ganancia de la antena transmisora

H	
HetNet	Red Heterogénea
HPUE	(<i>High Power User Equipment</i>) Equipo de Usuario de Alta Potencia
I	
IEEE	(<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>) Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos
IETF	(<i>Internet Engineering Task Force</i>) Grupo de Trabajo de Ingeniería de Internet, es una organización internacional abierta de normalización
IMT 2020	(<i>International Mobile Telecommunications</i>) Proyecto de estandarización del 5G dirigido por la IMT
IoT	(<i>Internet of Things</i>) Internet de las Cosas
IP	(<i>Internet Protocol</i>) Protocolo Internet
ISM	(<i>Industrial, Scientific and Medical</i>) bandas sin licencia
K	
KPI	(<i>Key Performance Indicator</i>) Indicador clave de rendimiento
L	
LAA	(<i>Licensed Assisted Access</i>), combinación de espectro licenciado y no licenciado por medio de agregación de portadoras
LoRaWAN	(<i>Long Range WAN</i>) estándar de protocolo abierto LPWA desarrollado por LoRa Alliance, ver WAN
LPWAN	(<i>Low Power Wide Area Network</i>) Red de área amplia y baja potencia
LTB	(<i>Listen Before Talk</i>) Protocolo de escucha antes de emitir
LTCC	(<i>Low Temperature Cofired Ceramic</i>) Cerámica de Cocción a Baja Temperatura
LTE	(<i>Long Term Evolution</i>), cuarto estándar de comunicaciones móviles
M	
MBSFN	(<i>Multimedia Broadcast Services Single Frequency Network</i>) Servicios de Difusión Multimedia en Red de Frecuencia Única
MCL	(<i>Maximum coupling loss</i>) Pérdidas Máximas de acoplamiento
MIMO	(<i>Multiple Inputs Multiple Outputs</i>) sistema de antenas con Múltiples entradas Múltiples salidas
mMTC	(<i>massive Machine-Type Communications</i>) Comunicaciones tipo máquina masivas
<i>mmWave</i>	Bandas milimétricas
MSC	(<i>Critical Services</i>) Comunicaciones de servicios críticos
(<i>Mission</i>	
N	
NF	(<i>Noise Figure</i>) cifra de ruido
NG-UP/CPGW	(<i>Next Generation</i>) se refiere a la interfaz de próxima generación, ver NG
NSA	(<i>Non Stand Alone</i>) Modo de despliegue 5G no independiente
O	
OFDM	(<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>) Multiplexación por División Ortogonal de Frecuencia
P	
PA	(<i>Power Amplifier</i>) Amplificador de Potencia
P _{máx}	Potencia máxima de salida
P _{out}	Potencia de salida
Q	
QAL	(<i>Quad Antenna Linear</i>) Antena Quad Lineal
R	
RB	(<i>Resource Block</i>) Unidad más pequeña de recursos que se puede asignar a un usuario
RET	(<i>Remote Electrical Tilt</i>) ajuste remoto de la inclinación del haz de radiación de la antena

RRH	(<i>Remote Radio Head</i>), conocido como cabeza radio remota
Rx	Receptor
S	
SBA	(<i>Service Based Architecture</i>), Arquitectura basada en Servicio
SCS	(<i>Subcarrier Spacing</i>) Espaciamiento entre subportadoras
SDL	(<i>Supplemental Downlink</i>) Enlace Descendente Suplementario
SFI	(<i>Slot Format Indicator</i>) Indicador de formato de ranura
SFN	(<i>System Frame Number</i>), índice de la trama del sistema o contadora de 0 a 1023 (10 bits).
SHF	(<i>Super High Frequency</i>) rango de Frecuencias "Super" Altas
T	
TDD	(<i>Time División Duplexing</i>) División de Duplexación por Tiempo
TMA	(<i>Tower Mounted Amplifier</i>) Amplificadores montados en torre
TSG	(<i>Technical Specification Groups</i>) Grupos de especificaciones técnicas
TTI	(<i>Transmission Time Interval</i>) Intervalo de Tiempo de Transmisión
Tx	Transmisor
U	
UE	(<i>User Equipment</i>) Equipo de usuario, se refiere a los terminales de usuario
UHF	(<i>Ultra High Frequency</i>) rango de Frecuencias "Ultra" Altas
UL	(<i>uplink</i>) Enlace ascendente
uMTC	(<i>Ultra-reliable MTC</i>) Comunicaciones tipo máquina ultra confiables
UPGW	(<i>User Plane Gateway</i>) Enrutador al plano de usuario
URLLC	(<i>Ultra Reliable Low Latency Communications</i>) Comunicaciones de baja latencia ultra confiables
V	
V2X	(<i>Vehicle to anything</i>) Comunicaciones de vehículos con cualquier dispositivo.
W	
WAN	(<i>Wide Area Network</i>) Red de Área Amplia

INTRODUCCIÓN

El crecimiento continuo de la demanda de los usuarios por una mejor experiencia en los servicios y comunicaciones móviles ha producido que la industria se movilice en la búsqueda de nuevas soluciones. En sus inicios las redes celulares se diseñaron para aplicaciones de voz donde los canales de transmisión eran analógicos. En los años noventa, con la necesidad de más canales de voz y la aparición de la tecnología digital surgió la segunda generación de comunicaciones celulares 2G. La digitalización trajo consigo nuevos servicios como mensajes de texto y acceso a datos con conmutación de circuitos. Sin embargo, la baja velocidad de transferencia de datos ofrecida por el 2G no satisfacía la demanda de acceso a Internet. Esto condujo al desarrollo del 3G para brindar servicios de datos más rápidos y más capacidad de voz. Aunque nuevamente, con el aumento de la demanda y la aparición de nuevos servicios con requisitos más exigentes, como la transmisión de video en alta definición o en tiempo real, fue imprescindible la evolución a una cuarta generación conocida como LTE (*Long Term Evolution*).

En España las redes móviles aún cuentan con despliegue de las tecnologías 2G, 3G y 4G. Aunque la tendencia es evolucionar a nuevas generaciones apagando las anteriores esto es un proceso que suele tardar años, por ejemplo, el 2G tiene ya casi 20 años. Las principales razones son la complejidad en la migración de los servicios, la compatibilidad con lo nuevo y el coste que supondría para la red. Sin contar que los usuarios deben renovar también los terminales por cada cambio y por tanto las nuevas prestaciones deben compensar todos estos inconvenientes.

Hace alrededor de tres años han ido surgiendo iniciativas y nuevos servicios que no se pueden cubrir con 4G LTE. La realidad virtual o aumentada que exigen un gran ancho de banda, el Internet de las Cosas (IoT) donde millones de dispositivos son conectados a la red, las comunicaciones vehiculares donde la ultra baja latencia es fundamental, son algunos ejemplos de estos servicios. El 5G será el conjunto tecnologías y sistemas necesarios para manejar esos requisitos y superar los límites de los sistemas actuales.

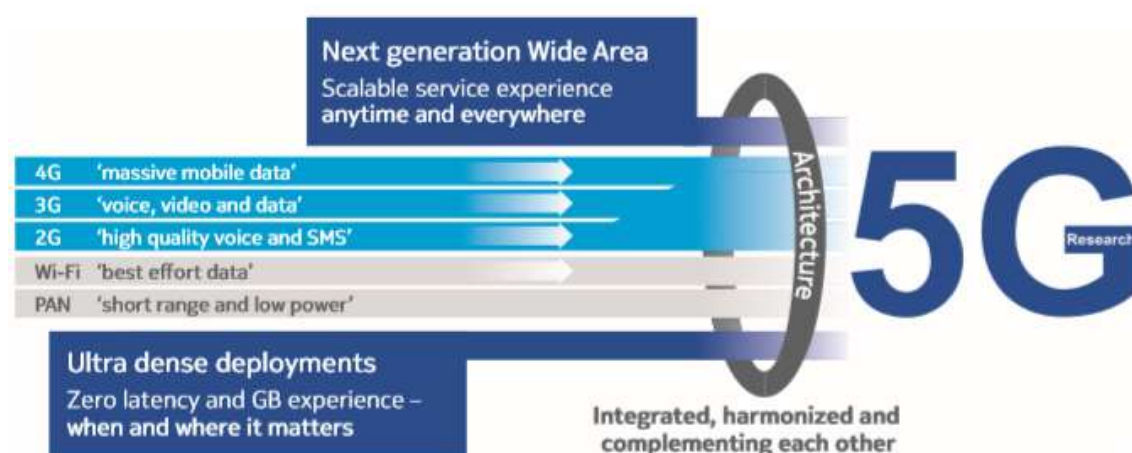


Figura 1. Integración de requisitos y tecnologías para formar el nuevo estándar 5G [1].

Inicialmente, el 5G estará disponible mediante mejoras en las tecnologías LTE, LTE Advanced y LTE Pro, pero luego evolucionará independientemente con la introducción de una nueva interfaz aire. La *New Radio* (NR) es la nueva interfaz aire que se está desarrollando para el 5G. Es la parte de radiofrecuencia del enlace entre el dispositivo móvil y la estación base activa¹ que se desarrollará desde cero para admitir una amplia variedad de servicios, dispositivos e implementaciones.

El 5G no será sólo una mejora en las velocidades de carga y descarga de datos, sino que será una red multiservicios, de baja latencia, banda ancha y gran cobertura. No significará que la capacidad sea de Gbps en cualquier sitio, aunque sería ideal, pero se priorizarán las ciudades y sitios como *hotspots*. Para brindar variados servicios con requisitos muy diferentes el 5G empleará la segmentación de red, funcionalidad conocida como Network Slicing, apoyándose en tecnologías como Redes Definidas por Software (SDN) y Virtualización de las Funciones de Red (NFV). Para aumentar la capacidad se utilizarán técnicas como el MIMO² Masivo, antenas activas, agregación de portadoras, modulaciones de alto orden y densificación con *small cells*. Así como un amplio rango del espectro radioeléctrico, desde frecuencias por debajo de 1 GHz hasta bandas milimétricas, para cubrir los distintos casos de uso. Para ampliar el rango de cobertura se consideran emplear bandas bajas del espectro, por ejemplo 700 MHz.

El sistema de comunicaciones móviles de próxima generación 5G no se utilizará solo para las comunicaciones entre personas, sino que tendrán también un papel importante las comunicaciones de tipo máquina, a veces denominadas Internet de las Cosas. Los dispositivos no solo serán gestionados de forma remota por personas, sino que también se comunicarán entre sí.

El presente trabajo evalúa los principales actores, tecnologías y soluciones que intervienen en una red 5G y en una red IoT basada en 5G. Se posiciona cada alternativa dentro de un mercado lo cual es un punto de partida para saber qué usar en función de las necesidades.

El Capítulo 1 describe la Nueva Radio 5G, su capa física, arquitectura y requisitos. Así como los tres casos de uso que han impulsado al 5G, entre ellos IoT. Se analizan las bandas de frecuencia que se emplearán, se describen las antenas diseñadas para cubrir las bandas 5G en teléfonos móviles y estaciones bases, y los *chipsets* comerciales.

Luego, en el Capítulo 2, se detalla el Internet de las Cosas como caso de uso de 5G. Se explica como IoT formará parte del estándar NR y los tipos de redes que se emplean para establecer las comunicaciones entre los dispositivos IoT (como sensores, alarmas, etc.) y el punto de acceso al núcleo de la red IoT. Se define la arquitectura de una red IoT, junto con los posibles escenarios y casos de uso.

¹ Estación base activa se refiere a aquella que es seleccionada en el proceso de handover

² *Multiple-Input Multiple-Output* (en español, Múltiple entrada Múltiple salida)

CAPÍTULO 1

La Nueva Radio 5G

1. La Nueva Radio 5G

1.1 Introducción

El 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*) reúne un conjunto de organizaciones (ARIB, ATIS, CCSA, ETSI, TSDSI, TTA, TTC) encargadas de definir los estándares de telecomunicaciones. Este proyecto cubre las tecnologías de redes de telecomunicaciones móviles, incluido el 5G. Las especificaciones abarcan todas las áreas del sistema, incluidos el acceso radio, la red de transporte principal y las capacidades de servicio. También incluye estudios para el acceso no radio a la red central y detalles de interoperabilidad con redes no licenciadas como la Wi-Fi [2].

Se trabaja en paralelo en versiones o *releases* que se encargan a grupos de trabajo específicos llamados *Technical Specification Groups* (TSG). De esta forma la evolución es constante y se abren nuevos frentes de trabajo a la vez (Figura 2. Estado actual de las Releases 14, 15 y 16 sobre LTE-A Pro y 5G .). Las primeras especificaciones sobre la Nueva Radio (NR) 5G comenzaron con la Versión 14 en marzo de 2016, donde se estudiaron los requerimientos para el 5G. Las Versiones 15 y 16 representan las dos fases de trabajo del 3GPP hacia el 5G donde quedarán completamente definidos los requisitos radio del terminal de usuario y de banda base, y el procedimiento para pruebas de funcionalidades y características. La Versión 15 estaba planificada para ser acabada en septiembre de 2018, pero con la finalización de la Versión 14 en junio de 2017, se aceleraron los trabajos del Grupo RAN del 3GPP y se entregó (congeló) el primer TSG en diciembre de 2017 referido al modo Non Stand Alone (NSA). El modo independiente (SA) se completaría en septiembre de 2018, pero también se completó a principios de junio de 2018. A inicios de 2018 se comenzó la Versión 16 que finalizará a finales de 2019 [3].

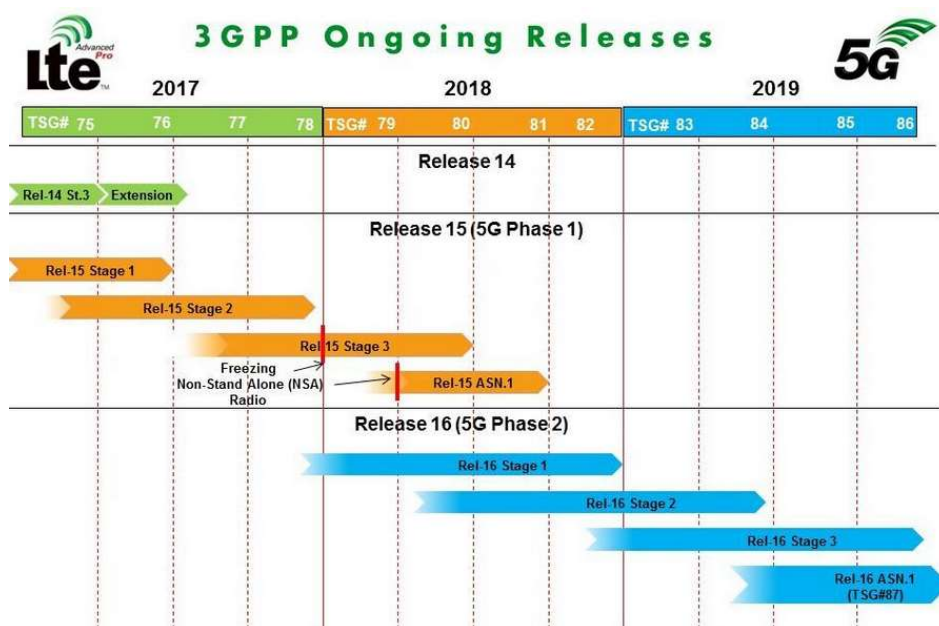


Figura 2. Estado actual de las Releases 14, 15 y 16 sobre LTE-A Pro y 5G [4].

Cada *Release* se compone de tres etapas, la etapa 1 hace una descripción del servicio desde el punto de vista del usuario, la etapa 2 plantea la arquitectura abstracta del sistema, y, por último, la etapa 3 es una implementación concreta de las funcionalidades y protocolos. La Figura 3. Especificaciones de la Nueva Radio por requisitos RF, de Banda Base y pruebas . muestra algunas de las especificaciones técnicas definidas para el 5G que corresponden con la Serie 38. Todas las especificaciones se pueden descargar de la propia web del 3GPP [5].

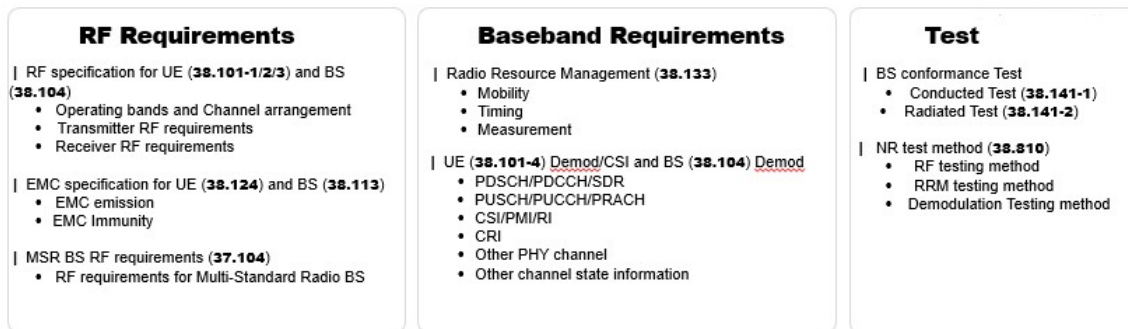


Figura 3. Especificaciones de la Nueva Radio por requisitos RF, de Banda Base y pruebas [6].

Uno de los requisitos para el 5G es la posibilidad de soportar un rango amplio de frecuencias y en particular en bandas milimétricas, conocidas como *mmWaves*. Dado que el acceso radio para LTE y HSPA no ha sido diseñado para ser optimizado en bandas de frecuencias milimétricas, el 3GPP en las Versiones 15 y 16 introduce una tecnología de acceso NR para el 5G la cual será lo suficientemente flexible para soportar no sólo las bandas menores a 6 GHz sino también frecuencias de hasta 100 GHz.

Los estudios apuntan a desarrollar finalmente una tecnología y una red de acceso NR para satisfacer una amplia gama de casos de uso que son agrupados en tres grupos (Figura 4. Nuevos escenarios de uso del 5G .): banda ancha móvil mejorada (eMBB), MTC masivo (mMTC) y comunicaciones de baja latencia ultra confiables (URLLC). Dicha agrupación radica en los requerimientos detectados para cada caso, como pueden ser la capacidad o la latencia. Más adelante en el apartado 1.8 se explican con más detalle.

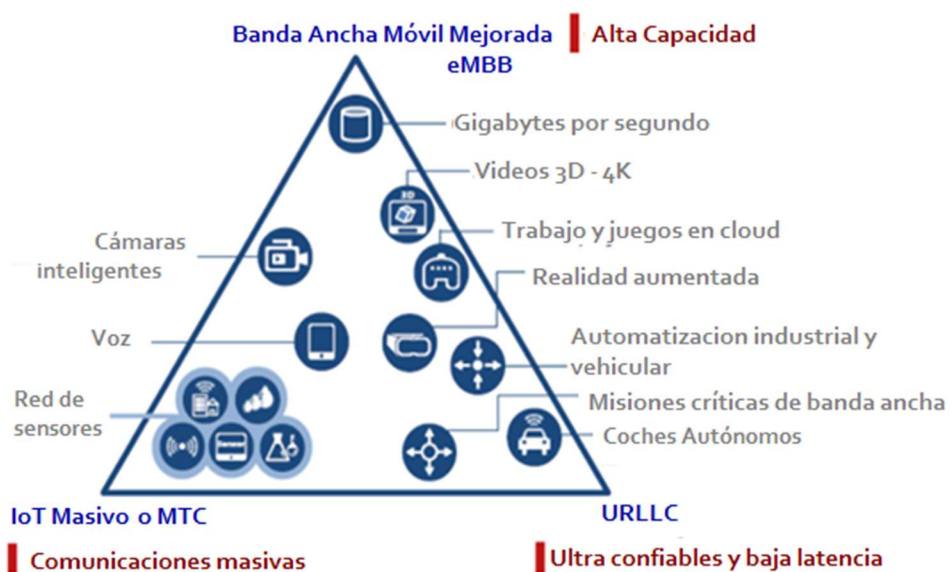


Figura 4. Nuevos escenarios de uso del 5G [7].

Se prevé que para 2020 ya esté completamente definido el 5G, por ello la ITU llama al programa de desarrollo de la NR: IMT-2020 (*International Mobile Telecommunications*). Al finalizar la lectura de este primer capítulo se entenderá que el 5G no es LTE mejorado, sino que es la posibilidad de contar con una red versátil que soporte una amplia gama de servicios y un gran número de usuarios.

1.2 Nueva Capa Física

Para poder soportar las diferentes aplicaciones, como eMBB, URLLC y MTC usando la misma tecnología 5G, se ha hecho necesario evolucionar la capa física a un modelo flexible y escalable. Se han modificado una serie de parámetros como el tamaño del espacio de subportadoras (SCS, *Subcarrier Spacing*), el prefijo cíclico (CP, *Cyclic Prefix*) y el intervalo de tiempo de transmisión (TTI, *Transmission Time Interval*).

El SCS es el ancho de banda que ocupa una subportadora y se representa como Δf . A diferencia de LTE que tiene un SCS fijo de 15 kHz, en 5G [8] el SCS es igual a $2^\mu * 15$ kHz, donde μ es la numerología y puede ser 0, 1, 2, 3 o 4 (5 soportado en la Versión 16). Las subportadoras de 15, 30 y 60 kHz se aplicarán a las frecuencias por debajo de los 6 GHz y las de 60, 120 y 240 kHz se aplicarán a frecuencias por encima de 6 GHz.

La Nueva Radio soporta dos longitudes del CP: normal y extendida, al igual que LTE. Las tramas pueden ser de tipo DL (*downlink*) o UL (*uplink*) y debido a las distintas numerologías su estructura varía. Sin embargo, como en LTE, mantienen una duración de 10 ms y se dividen en 10 subtramas de 1 ms cada una.

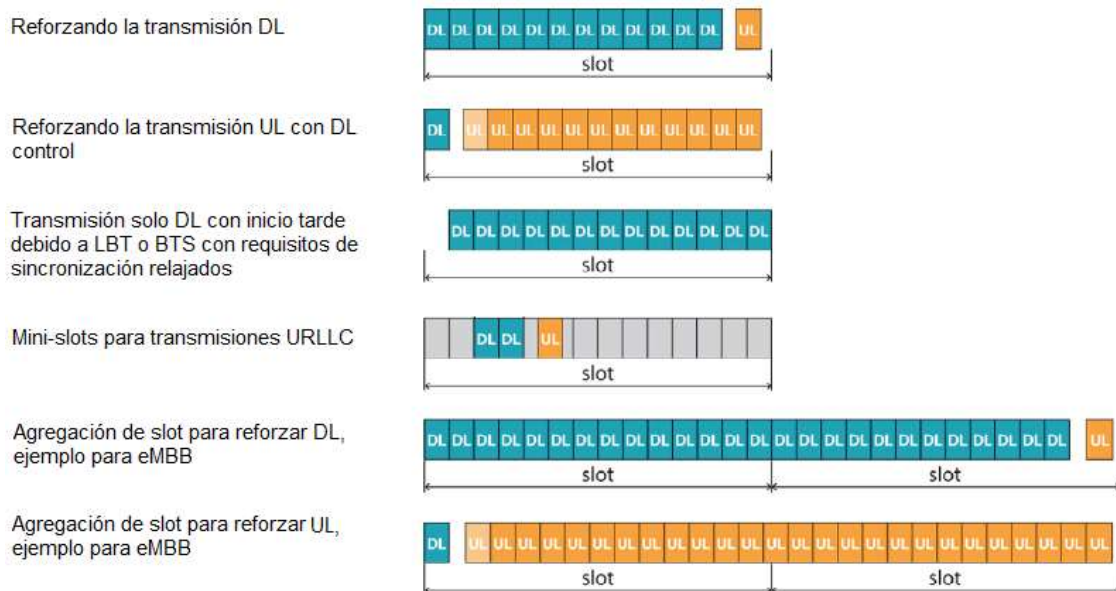
El número de *slots* por subtrama si varía en dependencia del valor de μ . Cada *slot* estará formado por 12 o 14 símbolos OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), dependiendo si el CP es normal o extendido. Además, los símbolos pueden ser de tres tipos DL, UL o flexible y los *slots* pueden ser solo DL, solo UL o mixtos. El SFI (*Slot Format Indicator*) le indica al UE (*User Equipment*) cuando un símbolo es de un tipo u otro. Existen 256 configuraciones o formatos dependiendo de la cantidad y disposición de símbolos (DL, UL, flexible) que haya en cada *slot*. Las configuraciones de la 56 a la 254 están reservadas y en la 255 el UE determina el formato del *slot*.

También existen los Mini *slots* que pueden tener 2, 4 o 7 símbolos y se emplean para aplicaciones que requieren muy baja latencia como URLLC, para permitir la coexistencia con LTE, por ejemplo, mediante el uso de subtramas MBSFN (*Multimedia Broadcast Services Single Frequency Network*) de LTE para NR, o para compatibilidad con espectro no licenciado. En la siguiente tabla se observa el valor del SCS para cada numerología, la cantidad de símbolos por *slot*, de *slots* por subtrama y por trama.

Tabla 1. Parámetros de capa física según la numerología, Tablas 4.2.1, 4.3.2-1/ 2 del TS 38.211 [8].

μ	SCS (kHz)	CP	No. símbolos/slot	No. slots/subtrama	No. slots/trama = No. slot/subtrama*10
0	15	Normal	14	1	10
1	30	Normal	14	2	20
2	60	Normal	14	4	40
2	60	Extendido	12	4	40
3	120	Normal	14	8	80
4	240	Normal	14	16	160
5	480	Normal	14	32	320

El 5G NR permite ajustar dinámicamente los símbolos UL y DL que componen un *slot* con el propósito de ajustarse a la carga de trabajo cambiante. La Figura 5. Diferentes configuraciones de un slot . proporciona algunos ejemplos para TDD, con períodos de guarda para la conmutación UL / DL.



* LTB: listen-before-talk

Figura 5. Diferentes configuraciones de un slot [9].

El SCS es una compensación entre la duración del símbolo y la escucha del prefijo cíclico. Cuando el SCS es menor, la duración del símbolo es mayor y el CP es más pequeño para evitar la interferencia entre símbolos (ISI), mientras que si el SCS es mayor la duración del símbolo es más corta y se usará un mayor CP para manejar la interferencia entre símbolos. Por ende, el prefijo cíclico es necesario para gestionar la interferencia entre símbolos debido a la existencia de señales que llegan por múltiples rutas. La selección del CP se determinará de acuerdo con el entorno (exterior o interior), la banda de frecuencia y el tipo de servicio.

Un *Resource Block* (RB) es definido por el 3GPP como 12 subportadoras consecutivas en el dominio de la frecuencia. En LTE el ancho de banda de los RBs era de 180 kHz fijos, pero en NR no lo es y su tamaño depende del SCS. En la siguiente tabla podemos ver su medida para ambos dominios en función del SCS:

Tabla 2. Ancho de banda (BW) del RB en el dominio del tiempo y la frecuencia.

μ	SCS (kHz)	CP	BW RB [kHz] en el dominio de la frecuencia = SCS*12	BW RB [ms] en el dominio del tiempo $= 1 \text{ ms}/2^\mu$
0	15	Normal	180	1
1	30	Normal	360	0.5
2	60	Normal	720	0.25
3	120	Normal	1440	0.125
4	240	Normal	2880	0.0625
5	480	Normal	5760	0.03125

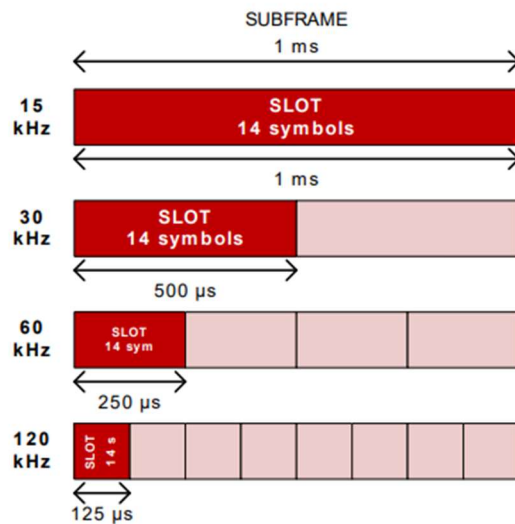


Figura 6. BW RBs en el dominio del tiempo [10].

En 5G NR se espera que el BW sea de 100 MHz en bandas por debajo de los 6 GHz y por encima de los 400 MHz en bandas milimétricas. Con su diseño se quiere superar el 90% de eficiencia espectral ofrecido por LTE y alcanzar el 99%, lo cual es una mejora significativa. Otra diferencia con respecto a LTE es que el NR no reserva ninguna subportadora central (DC) para los enlaces ascendente (UL) y descendente (DL). En LTE esta subportadora no transmite información ya que se emplea para facilitar los mecanismos de ajuste y sincronización en la frecuencia del receptor.

El ancho de banda mínimo y máximo que se necesita para una transmisión depende el número mínimo y máximo de RBs que se empleen, es decir de su BW. En la siguiente tabla aparecen los valores para cada numerología teniendo en cuenta la banda de guarda:

Tabla 3. BWs mínimo y máximo del canal.

μ	SCS (kHz)	Mín. RBs	Máx. RBs	Mín. BW del canal (MHz)	Máx. BW del canal (MHz)
0	15	24	275	4.32	49.5
1	30	24	275	8.64	99
2	60	24	275	17.28	198
3	120	24	275	34.56	396
4	240	24	138	69.12	397.44

El número máximo de RBs es calculado para cada SCS según la siguiente ecuación (suponiendo bandas de guarda simétricas) que se puede deducir fácilmente de la Figura 7:

$$No\ RBs = \frac{BW_{canal} - 2 * BW_{guarda}}{BW_{1RB}}$$

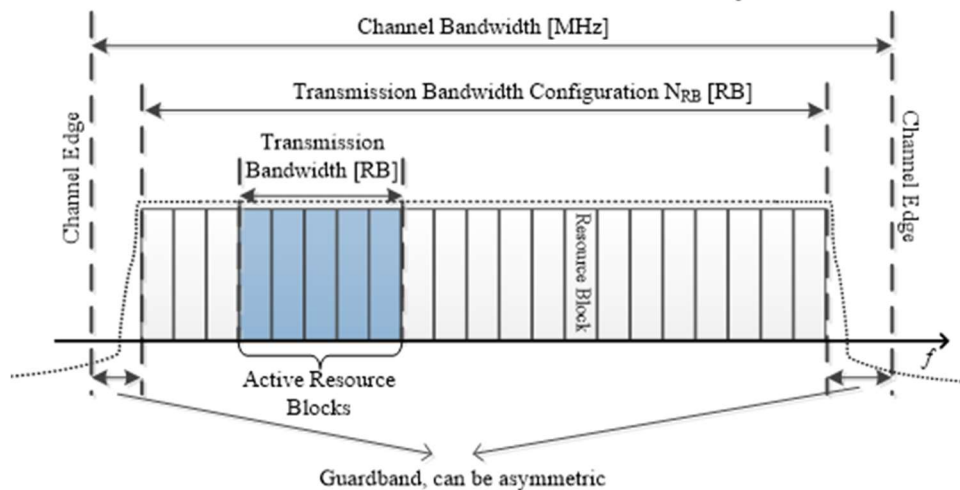


Figura 7. Definición del BW del canal y BW de transmisión [11].

Por último, las siguientes tablas muestran la cantidad de RBs que caben en el canal de transmisión, el ancho de banda del canal, así como el ancho de banda de guarda para cada valor de la numerología.

Tabla 4. Configuración del número de RB en el BW de transmisión y BW de guarda mínimo para $f < 6$ GHz [12].

μ	SCS (kHz)	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz	25 MHz	30 MHz
0	15	25	52	79	106	133	160
NRB / BW [MHz] / GB [kHz]		4.5	9.4	14.2	19.1	23.9	28.8
		242.5	312.5	382.5	452.5	522.5	592.5
1	30	11	24	38	51	65	78
NRB / BW [MHz] / GB [kHz]		4	8.6	13.7	18.4	23.4	28.1
		505	665	645	805	785	945
2	60	N/A	11	18	24	31	38
NRB / BW [MHz] / GB [kHz]			7.9	13	17.3	22.3	27.4
			1010	990	1330	1310	1290

μ	40 MHz	50 MHz	60 MHz	70 MHz	80 MHz	90 MHz	100 MHz
0	216	270					
NRB / BW [MHz] / GB [kHz]	38.9 552.5	48.6 692.5	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
1	106	133	162	189	217	245	273
NRB / BW [MHz] / GB [kHz]	38.2 905	47.9 1045	58.3 825	68 965	78.1 925	88.2 885	98.3 845
2	51	65	79	93	107	121	135
NRB / BW [MHz] / GB [kHz]	36.7 1610	46.8 1570	56.9 1530	67 1490	77 1450	87.1 1410	97.2 1370

Tabla 5. Configuración del número de RBs en el BW de transmisión y guarda mín. para mmWaves [13].

μ	SCS (kHz)	50 MHz	100 MHz	200 MHz	400 MHz
2		66	132	264	
NRB / BW [MHz] / GB [kHz]	60	47.5 / 1210	95 / 2450	190.1 / 4930	N/A
3		32	66	132	264
NRB / BW [MHz] / GB [kHz]	120	46.1 / 1900	95 / 2420	190.1 / 4900	380.2 / 9860

1.3 Comparación y coexistencia con LTE

El espectro de LTE está compuesto por 52 bandas, especificadas en el 3GPP, de las cuales 35 son FDD/SDL (*Supplemental Downlink*) y 17 son TDD. Los anchos de banda definidos son 1.4 MHz, 3 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz y 20 MHz y se emplea *Carrier Aggregation* (CA) para aumentar la capacidad. En la Rel-14 se han aprobado hasta 32 CCs aunque los operadores, debido al espectro disponible y su licenciamiento, emplean como máximo 5 CCs para un BW total de 100 MHz. Con estas características la capacidad máxima alcanzada por LTE alcanza 1 Gbps, combinando CA con MIMO 4x4 y modulación 256QAM. Para incrementar esta capacidad, se necesita más espectro, una forma de conseguirlo es usando bandas no licenciadas (*Licensed Assisted Access*, LAA) como puede ser la banda 46 (5150-5925 MHz).

En 5G será un requisito importante emplear BW de al menos 100 MHz por debajo de 6 GHz y 400 MHz por encima de 6 GHz. Por debajo de los 6 GHz casi todo el espectro está siendo empleado para otras tecnologías y sólo se encuentran 100 MHz consecutivos en la banda 41 (2.5 GHz) y en la banda C (3.3-4.2 GHz y 4.4-4.99 GHz).

El despliegue de 5G traerá consigo la existencia de nuevos nodos gNB que irán conectados entre sí y con los existentes nodos LTE (eNB) mediante la interfaz Xn. Por tanto, la Nueva RAN consistirá en nodos lógicos gNBs y eNBs que proporcionarán las terminaciones de protocolo NR y E-UTRA, respectivamente, a los planos de usuario y de control hacia el UE. La interfaz NG conecta a los nodos lógicos con el NG-CP/UPGWs.

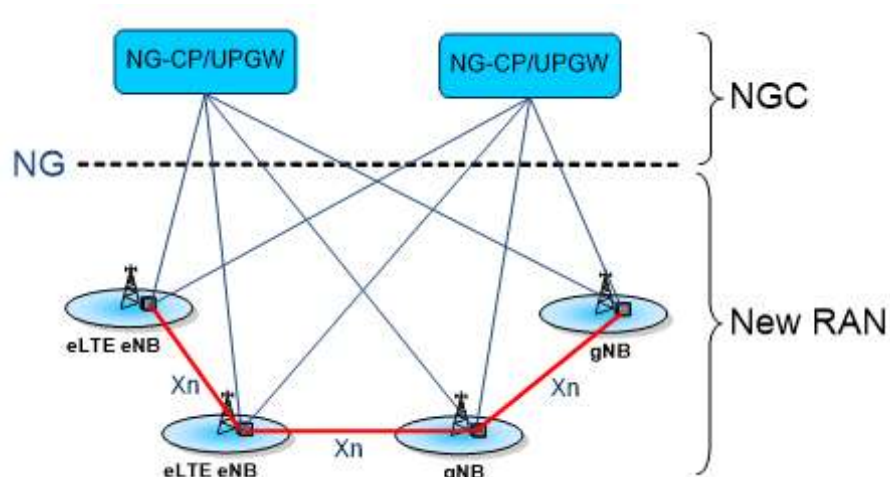


Figura 8. Red híbrida LTE – NR [14].

Tabla 6. Comparativa LTE vs NR [10].

Parámetro	LTE	NR
Máximo BW por CC	20 MHz	50 MHz (SCS= 15 kHz) 100 MHz (SCS= 30 kHz) 200 MHz (SCS= 60 kHz) 400 MHz (SCS= 120 kHz)
Máximo No de CCs	5 (actualmente, en LTE-A)	16
SCS	15 kHz	$2^{\mu} * 15$ kHz
Forma de onda	CP-OFDM para DL SC-FDMA para UL	CP-OFDM para DL CP-OFDM y DFT-S-OFDM para UL
Máximo No de subportadoras	1200 (12 subportadoras/RB x 100 RBs)	3300 (12 subportadoras/RB x 275 RBs)
Longitud de la Subtrama en tiempo	1 ms	1 ms
Latencia (interfaz aire)	10 ms	1 ms
Longitud de un slot	7 símbolos en 0.5 ms	14 símbolos (la duración depende del SCS) 2, 4 y 7 símbolos en mini slots
Acceso Inicial	Sin beamforming	Con beamforming
MIMO	8x8	8x8
Modo dúplex	FDD, TDD estático	FDD, TDD estático y dinámico

1.4 Requerimientos de NR

El objetivo del estudio de los requerimientos para las tecnologías de acceso de próxima generación consiste en poder identificar los escenarios de implementación, el rendimiento requerido y las principales capacidades funcionales.

Los requisitos para la RAN están especificados en la norma TR 38.913 y se han definido en términos de:

- KPIs (*Key Performance Indicators*), un grupo de indicadores clave de rendimiento y sus objetivos.
- Los escenarios de implementación: eMBB, mMTC y URLLC.
- Otros requisitos, por ejemplo, arquitectura, servicios y operación.

La siguiente tabla muestra un resumen de los principales KPIs, sus valores objetivos y los escenarios de aplicación:

Tabla 7. Requisitos mínimos para el 5G según la aplicación [15].

No	KPI	Valor objetivo	Aplicación		
			eMBB	mMTC	URLLC
1	Máx. Velocidad del dato	DL 20 Gbps UL 10 Gbps	X		
2	Máx. Eficiencia espectral	DL 30 bps/Hz UL 15 bps/Hz	X		
3	Velocidad del dato (experimentada por el usuario)	DL 100 Mbps UL 50 Mbps	X		
4	Capacidad de tráfico por área	10 Mbps/m ²	X		
5	Latencia en el plano de usuario	URLLC: 1ms eMBB: 4ms	X		X
6	Latencia en el plano de control	20 ms (10 ms recomendados)	X		X
7	Latencia para paquetes pequeños de baja frecuencia	< 10 s en UL @ MCL* = 164 dB		X	
8	Densidad de conexión	1,000,000 dispositivos/km ²		X	
9	Eficiencia energética	Cualitativo	X		
10	Duración de la batería en UE	> 10 años 15 años deseables		X	
11	Cobertura	MCL* = 164 dB, para una velocidad de datos de 160 bps		X	
12	Cobertura extrema	MCL* = 140 dB, para 2 Mbps/60 kbps DL/UL; MLC* = 143 dB para 1M/30k	X		
13	Confiabilidad	1-10 ⁻⁵ Probabilidad de éxito para TX 32 B en 1ms			X
14	Movilidad	Hasta 500 km/h	X		X
15	Tiempo de interrupción en movilidad	0 ms	X		X
16	Ancho de banda	>100 MHz <1 GHz en milimétricas	General/ No específico		

*Maximum coupling loss

Las velocidades de datos máximas serán superiores a 10 Gbps, pero lo más importante es que la velocidad de datos en borde de la celda (para el 95% de los usuarios) debe

ser del orden de 100 Mbps. Así el uso del acceso inalámbrico será tan rápido como el cableado. Sobre esta base, se han planteado opciones de acceso fijo radio 5G en ciudades donde no llega el cobre o la fibra óptica.

La duración de la batería es un requisito que viene de parte de los dispositivos IoT, sin embargo, también es importante en dispositivos más complejos como teléfonos móviles, laptops o *tablets*. Además, el consumo de energía del operador debe ser analizado.

1.5 Opciones de arquitectura 5G

En las arquitecturas de redes 2G y 3G el procesamiento y conmutación de voz y datos se hace mediante dos subdominios independientes: circuito conmutado (CS) para voz y paquete conmutado (PS) para datos. En redes LTE el EPC (*Evolved Packet Core*) es un *framework* que permite la convergencia usando el Protocolo Internet (IP). Esto permite a los operadores desplegar y operar un paquete de red para 2G, 3G, WLAN, WiMAX, LTE y acceso fijo (xDSL, fibra y Ethernet).

En 5G, para admitir y habilitar los casos de uso conocidos mencionados antes, se definió una nueva red central, denominada 5G *Next Generation Core* (NGC).

En la Rel-15 se propusieron dos arquitecturas: una representación completa del punto de referencia y una representación basada en el servicio (SBA, *Service Based Architecture*), decidiéndose al final por esta última para la arquitectura del futuro.

La arquitectura 5G NGC se define como basada en el servicio. La interacción entre las funciones de red se representa de dos formas: las funciones de red dentro del plano de control 5G (NG-CP) y las funciones de red que se conectan al plano de control 5G desde la red RAN. Las funciones de red dentro del plano de control 5G solo usarán interfaces basadas en servicios para sus interacciones. Esto difiere de la arquitectura LTE donde todo el núcleo tiene una representación de punto de referencia. Las interfaces de punto de referencia continuarán existiendo dentro del plano de radio y usuario. Además de la SBA, se han incluido otros dos nuevos conceptos: Plano de Control y Plano de Usuario, y Network Slicing.

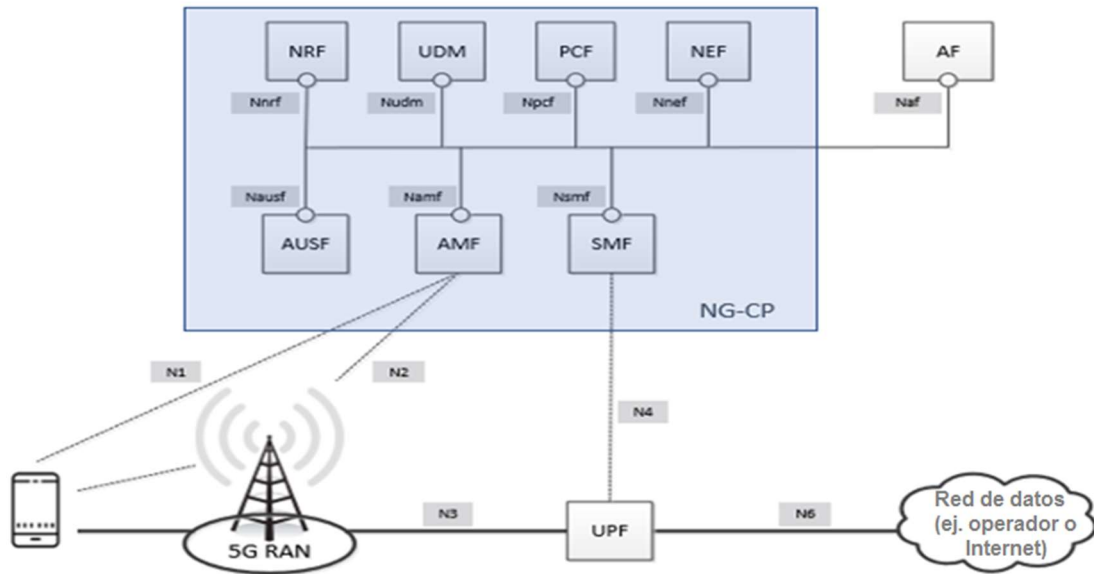


Figura 9. Arquitectura de Core 5G basada en servicios (SBA) según 3GPP [16].

Los planes de los operadores es comenzar por un despliegue Non Stand Alone (NSA), que consiste en usar el núcleo de red LTE como máster, y en un futuro cuando esté completamente desarrollada la tecnología migrar a una red solo 5G o Stand Alone (SA).

Existen 12 opciones de arquitectura para el despliegue del 5G, estas se encuentran definidas en las especificaciones del 3GPP. Las opciones 5, 6, 8 y 8A se consideran improbables y la opción 1 es la *legacy* (UE - LTE - EPC), por tanto, no se ilustran.

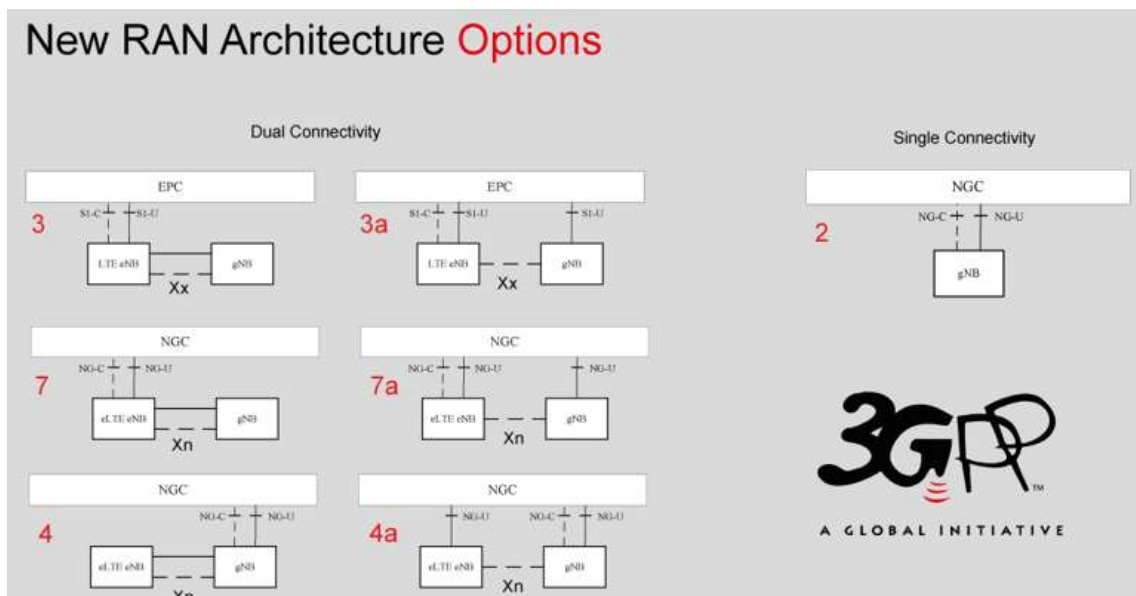


Figura 10. Opciones de Arquitectura 5G [17].

En la Opción 2, el gNB es conectado al NGC. En las Opciones 3 y 3A, el eNB LTE es conectado al EPC con Non Stand Alone NR, la conexión del plano de usuario al EPC se hace por medio del nodo LTE (Opción 3) o directamente (Opción 3A). En las Opciones 4 y 4A, el gNB es conectado al NGC con Non Stand Alone E-UTRA, la conexión del

plano de usuario E-UTRA al NGC se hace mediante el gNB (Opción 4) o directamente (Opción 4A).

Por último, en las opciones 7 y 7A, el eNB es conectado al NGC con Non Stand Alone NR, la conexión del plano de usuario NR al NGC se hace mediante el LTE eNB (Opción 7) o directamente (Opción 7A).

Como se aprecia en estas opciones de arquitectura hay dos variantes claras: desarrollar una red puramente 5G (Stand Alone) o una red híbrida LTE-5G (NSA). Esta última variante será la primera que desplieguen los operadores e implica utilizar la red LTE como anclaje para el plano de control.

En la siguiente figura el UE que se encuentra en un entorno de red en modo NSA se comunica siempre con el EPC mediante la Opción 3A. Para servicios LTE el UE envía el tráfico de control y usuario a través del nodo eNB y para comunicaciones 5G envía el tráfico de usuario a través del nodo gNB. Si el mismo UE opera en una red en modo SA se comunicaría solo con el NGC y enviaría todo el tráfico de control y de usuario a través del nodo 5G. Por tanto, el modo SA ofrece capacidad total de comunicación del plano de control y usuario por medio de una red 5G coexistiendo perfectamente con UEs NSA. SA aprovecha las tecnologías SDN/NFV para crear segmentos de red optimizados y desarrollar todo el potencial del 5G.

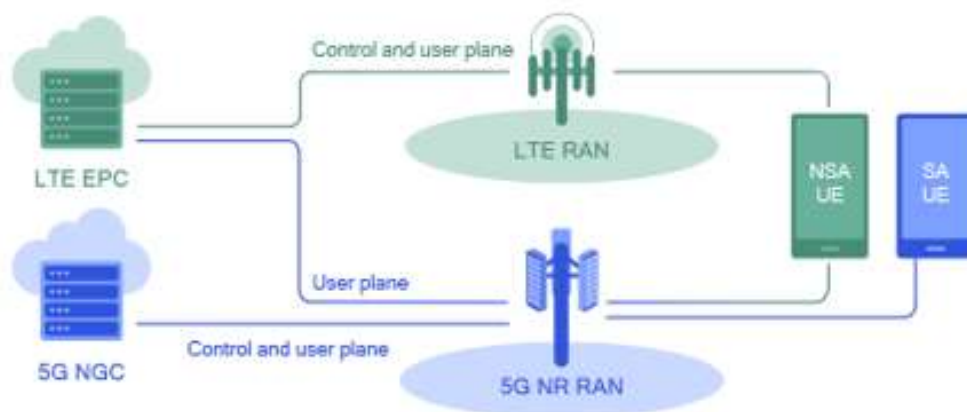


Figura 11. Modos SA y NSA [18].

1.6 Aspectos clave para 5G

Mediante la Nueva Radio los usuarios podrán disfrutar de nuevas aplicaciones como la Realidad Virtual, la Realidad Aumentada y videos de alta calidad 4K, mientras que la industria se beneficiará con aplicaciones novedosas como el transporte inteligente y la asistencia médica remota, lo cual creará grandes oportunidades. Todo esto sólo es posible mediante la introducción de nuevas tecnologías, las más importantes son mencionadas a continuación.

1.6.1 Bandas milimétricas

Las bandas milimétricas son aquellas que corresponden a las longitudes de ondas en el rango de 1 a 10 mm y las frecuencias de 30 a 300 GHz ($\lambda = c / f$), rango conocido como *Extra-High Frequency*. Sin embargo, cuando nos referimos a ellas en el contexto del 5G se incluyen las frecuencias por debajo de los 30 GHz, como la banda de 28 GHz, y frecuencias hasta los 100 GHz.

Las bandas milimétricas son prácticamente un requisito para el despliegue del 5G NR, esto se debe a dos motivos. En primer lugar, en la parte alta del espectro se encuentra mayor ancho de banda disponible y algunas aplicaciones del 5G, como eMBB, requieren un gran ancho de banda para operar. Al estar casi todo el espectro por debajo de los 6 GHz ocupado la alternativa es ir a bandas altas donde podemos hallar cientos de Hz libres. Y, en segundo lugar, la baja longitud de onda a estas frecuencias hace que al emplear MIMO masivo el elevado número de antenas no ocupe tanto espacio en la torre o en el UE.

El problema de las bandas milimétricas es su corto alcance (a penas 1 km) ya que las ondas milimétricas se atenúan más debido a los efectos atmosféricos, como los gases, la humedad y la lluvia. Estos pueden afectar el rendimiento y la calidad de la señal.

De modo que, por un lado, tenemos que ofrecen mayor capacidad y por tanto mayores velocidades de datos al poder contar con un mayor ancho de banda y más elementos de antena, pero a costa de reducir la cobertura. Esto da lugar a escenarios de uso, como podría ser un acceso inalámbrico de alta velocidad a hogares en sustitución de una conexión física por fibra óptica.

En la siguiente tabla podemos ver la relación que existe entre la frecuencia y las pérdidas en espacio libre (FSPL, *Free Space Path Loss*), y cómo a medida que aumenta la frecuencia aumentan las pérdidas, pero también disminuye la longitud de onda y por tanto el tamaño físico de los elementos radiantes.

Tabla 8. Bandas altas con sus respectivas longitudes de onda y pérdidas [19].

Bandas de frecuencia	Rango de frecuencias	Longitud de onda (λ)	FSPL a 1 m de distancia
UHF <i>Ultra High Frequency</i>	300 MHz – 3 GHz	10 – 1 dm	22 – 42 dB
SHF <i>Super High Frequency</i>	3 GHz – 30 GHz	10 – 1 cm	42 – 62 dB
EHF <i>Extra High Frequency</i>	30 GHz – 300 GHz	10 – 1 mm	62 – 82 dB

Donde las pérdidas en espacio libre serán [20]:

$$FSPL = 20 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f) + 20 \log_{10}\left(\frac{4\pi}{c}\right) - G_t - G_r$$

Por ejemplo, asumiendo las ganancias de las antenas transmisora y receptora (G_t y G_r) sean cero, para la distancia (d) de 1 km a la frecuencia (f) de 900 MHz las FSPL serán 91 dB y para 26 GHz serán 121 dB, que significan 30 dB más perdidos o una disminución de 1000 veces la potencia [21], [20]. Teniendo en cuenta la potencia de salida del

transmisor sea bastante alta y la sensibilidad del receptor lo suficientemente buena, vemos que para bandas milimétricas el radio de cobertura será aun así bajo.

1.6.2 Agregación de portadoras / Conectividad Dual

La agregación de portadora, conocida en inglés como *Carrier Aggregation (CA)*, es una técnica empleada para combinar múltiples CCs (*Component Carriers*) del espectro disponible. Puede ser intra-banda, donde dos o más CC se combinan en la misma banda (ejemplo: 5 MHz + 5 MHz en banda 1), o inter-banda donde se combinan dos o más CC de bandas diferentes (ejemplo: 5 MHz de banda 1 + 10 MHz de banda 7). Esto permite conseguir mayores velocidades de datos dado que el ancho de banda empleado es mayor.

La agregación de portadoras contiguas dentro de una banda es el caso más sencillo de implementar. Para el terminal o equipo de usuario el canal se considera como uno solo ampliado y se requiere un único transceptor. Sin embargo, habrá que garantizar que el UE pueda operar en un ancho de banda ampliado sin una reducción en el rendimiento. Para la estación base no hay cambios en los elementos RF, siempre que soporten el ancho de banda agregado. En el caso de portadoras no contiguas es algo más complicado, ya que la señal multiportadora ya no puede tratarse como una señal única y, por lo tanto, se necesitan dos transceptores. Esto afecta principalmente a los UEs donde el espacio, la energía y el costo son consideraciones primordiales.

En la NR la agregación de portadoras puede ser empleada en enlaces descendente, ascendente o en ambos, y también puede ser que una portadora emplee FDD y la otra TDD. Además, se puede combinar espectro licenciado y no licenciado.

En LTE-Advanced se pueden agregar hasta 5 CC, mientras que LTE-A Pro soporta hasta 32 CC, esto permite velocidades de 1 Gbps y 6 Gbps en MIMO 2x2 y 4 Gbps y 26 Gbps en MIMO 8x8, respectivamente.

Tabla 9. Velocidades pico DL en LTE-A y LTE-A Pro.

Tecnología	Máx. CC	Velocidades pico DL			
		SISO	MIMO 2x2	MIMO 4x4	MIMO 8x8
LTE-A	5 (hasta 100 MHz)	504 Mbps	~1 Gbps	~2 Gbps	~4 Gbps
LTE-A Pro	32 (hasta 640 MHz)	~3.2 Gbps	~6.5 Gbps	~13 Gbps	~26 Gbps

Los valores de la tabla anterior se han hallado en base a una modulación de 64QAM mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Velocidad pico DL (una portadora LTE)} = \frac{\text{No símbolos por time slot} * \text{No bits por símbolo}}{\text{Duración de un time slot}}$$

$$\text{Velocidad pico DL (una portadora LTE con 64QAM)} = \frac{7 * 6}{0.5 \text{ ms}} = 84 \text{ kbps}$$

El número de bits depende de la modulación, si asumimos una modulación de 64 QAM, será de 6. Una trama dura 10 ms y se compone de 10 subtramas de 1 ms cada una, en LTE cada subtrama contiene 2 *slots* de 0.5 ms cada uno. Y el número de símbolos por *slot* es 7, usando un tamaño de CP normal. Cada CC está compuesta por 1200 subportadoras (100RBs), así que para hallar la velocidad pico DL multiplicamos:

$$\text{Velocidad pico DL} = \text{No CC} * 1200 * \text{Velocidad pico DL (una portadora LTE)} * \text{Orden MIMO}$$

$$\text{Velocidad pico DL (LTEA; MIMO2x2)} = 5 * 1200 * 84 \text{ kbps} * 2 = 1 \text{ Gbps}$$

$$\text{Velocidad pico DL (LTEA; MIMO8x8)} = 5 * 1200 * 84 \text{ kbps} * 8 = 4 \text{ Gbps}$$

$$\text{Velocidad pico DL (LTEAPro; MIMO2x2)} = 32 * 1200 * 84 \text{ kbps} * 2 = 6.5 \text{ Gbps}$$

$$\text{Velocidad pico DL (LTEAPro; MIMO8x8)} = 32 * 1200 * 84 \text{ kbps} * 8 = 25.8 \text{ Gbps}$$

En el caso de usar una modulación de orden mayor como por ejemplo 256QAM la máxima capacidad alcanzada será de:

$$\text{Velocidad pico DL (una portadora LTE con 256QAM)} = \frac{7 * 8}{0.5 \text{ ms}} = 112 \text{ kbps}$$

$$\text{Velocidad pico DL (LTEA; MIMO8x8)} = 5 * 1200 * 112 \text{ kbps} * 8 = 5.4 \text{ Gbps}$$

$$\text{Velocidad pico DL (LTEAPro; MIMO8x8)} = 32 * 1200 * 112 \text{ kbps} * 8 = 34.4 \text{ Gbps}$$

La velocidad de datos real dependería de las condiciones del canal y del número de usuarios que comparten los recursos, por ejemplo, un UE en un canal con condiciones de propagación adversas podrá recibir QPSK (2 bit por símbolo) en lugar de 64QAM, lo cual reduciría la capacidad a un tercio. Además, si estimamos un *overhead* del 25% dado por señales de referencia, PDSCH, PBCH, las señales de sincronismo y codificación, la capacidad baja aún más.

$$\text{Velocidad pico DL (una portadora LTE con QPSK)} = \frac{7 * 2}{0.5 \text{ ms}} = 28 \text{ kbps}$$

$$\text{Velocidad pico DL} = \text{No CC} * 1200 * \text{Velocidad pico DL (una portadora LTE)} * \text{Orden MIMO}$$

$$\begin{aligned} \text{Velocidad pico DL (LTEA; SISO; 1CC; 64QAM)} &= 1 * 1200 * 84 \text{ kbps} * 1 = 100.8 \text{ Mbps} \\ &= 75 \text{ Mbps (con overhead de 25\%)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Velocidad pico DL (LTEA; SISO; 1CC; QPSK)} &= 1 * 1200 * 28 \text{ kbps} * 1 = 33.6 \text{ Mbps} \\ &= 25 \text{ Mbps (con overhead de 25\%)} \end{aligned}$$

En 5G cuando se emplea CA el tiempo de la trama y el SFN (*System Frame Number*) se alinean entre las celdas que pueden agregarse. El número máximo de CC configurados para un UE es 16 para DL y 16 para UL, menor que LTE-A Pro, pero el total de espectro agregado alcanza el 1 GHz. La velocidad de datos aproximada para un número de dado de portadoras será [22]:

$$\text{data rate (in Mbps)} = 10^{-6} \cdot \sum_{j=1}^J \left(v_{\text{Layers}}^{(j)} \cdot Q_m^{(j)} \cdot f^{(j)} \cdot R_{\text{max}} \cdot \frac{N_{\text{PRB}}^{\text{BW}(j),\mu} \cdot 12}{T_s^\mu} \cdot (1 - OH^{(j)}) \right)$$

Donde:

- J: No de CC en una banda o en la combinación de varias bandas
- $R_{\text{máx}} = 948/1024$

Para la j-ésima CC:

- V_{layers} : es el máximo número de *layers*.
- Q_m : es el máximo orden de la modulación, que será 2 para QPSK, 4 para 16QAM, 6 para 32QAM y 8 para 256QAM.
- f : es el factor de escala y puede tomar los valores: 1, 0.8, 0.75 y 0.4.
- μ : es la numerología definida en TS 38.211 y puede tomar valores entre 0 y 4.
- T_s^μ : duración promedio de un símbolo OFDM en una subtrama para el valor de μ . $T_s^\mu = \frac{10^{-3}}{14 \cdot 2^\mu}$
- $N_{\text{PRB}}^{\text{BW}}$: es la máxima cantidad de RB en el BW soportado por el UE.
- OH: overhead, que puede tomar los siguientes valores:
 0.14 → FR1 para DL
 0.18 → FR2 para DL
 0.08 → FR1 para UL
 0.10 → FR2 para DL

Para ver cuál es la máxima capacidad alcanzada por el NR en la sub-banda 6 GHz y en bandas milimétricas se probará incrementando el valor del número de CC. Suponiendo que la modulación es 256 QAM, el número de *layers* es 4, y tomando el máximo N_{RB} (ver Tabla 4. *Configuración del número de RB en el BW de transmisión y BW de guarda mínimo para $f < 6$ GHz*) los valores máximos teóricos son:

Tabla 10. Capacidad máxima del enlace en FR1 ($f < 6$ GHz).

CC	M	SCS [kHz]	Máx. No de RBs (N_{RB})	Máx. Throughput DL [Gbps]	Máx. Throughput UL [Gbps]
J=1	0	15	270	1.16	1.24
	1	30	273	2.34	2.5
	2	60	135	2.31	2.47
J=2	0	15	270	2.31	2.47
	1	30	273	4.67	5
	2	60	135	4.62	4.95
J=4	0	15	270	4.62	4.95
	1	30	273	9.35	10
	2	60	135	9.25	9.89
J=8	0	15	270	9.25	9.89
	1	30	273	18.7	20
	2	60	135	18.49	19.78

Tabla 11. Capacidad máxima del enlace en FR2 ($f > 24$ GHz).

CC	M	SCS [kHz]	Máx. No de RBs (N_{RB})	Máx. Throughput DL [Gbps]	Máx. Throughput UL [Gbps]
J=1	2	60	264 (200 MHz)	4.31	4.73
	3	120	264 (400 MHz)	8.62	9.46
J=2	2	60	264	8.62	9.46
	3	120	264	17.24	18.92
J=4	2	60	264	17.24	18.92
	3	120	264	34.48	37.84
J=8	2	60	264	34.48	37.84
	3	120	264	68.95	75.68

Basado en la numerología se han calculado los límites de capacidad y se comprueba que:

- La capacidad máxima depende del número de portadoras, el número de *layers*, la modulación empleada (o que llega al usuario), el factor de escala (se tomó 1) y el *overhead*.
- La capacidad en UL es mayor que en el DL ya que el *overhead* es más bajo en UL.
- La capacidad es la misma si duplicamos el número de portadoras y dividimos por 4 el espaciamiento de las subportadoras (SCS), puesto que el número de RBs se duplica lo que es equivalente a sumar dos veces la expresión entre paréntesis de la ecuación de capacidad.
- Debido al mayor BW disponible en las bandas milimétricas los valores teóricos de capacidad son mayores que en bandas por debajo de 6 GHz.
- La capacidad máxima en FR1 es de aproximadamente 20 Gbps UL/DL y en el FR2 de 69 Gbps DL/ 76 Gbps UL.

En cada banda de operación NR se ha especificado el ancho de banda del canal para cada SCS. En concreto, para la banda de 3.5 GHz (n78) el SCS para un BW de 100 MHz puede ser 30 o 60 kHz (Tabla 12. Anchos de banda de canal y SCS para la banda n78 (3.5 GHz), Tabla 5.3.5-1 de). Tomando 30 kHz para J=1 (1 CC) y $\mu=1$ el número máximo de RBs será de 273 (Tabla 4. *Configuración del número de RB en el BW de transmisión y BW de guarda mínimo para $f < 6$ GHz*), y el valor del OH será de 0.14 (DL) y 0.08 (UL) para esta frecuencia que está en el FR1. Asumiendo una modulación de 256 QAM (Q=8) la capacidad sería de aproximadamente 2.5 Gbps en DL/UL.

Tabla 12. Anchos de banda de canal y SCS para la banda n78 (3.5 GHz), Tabla 5.3.5-1 de [12].

Banda NR / SCS / Ancho de banda de la BTS														
Banda NR	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
n78	15		Si	Si	Si		Si	Si	Si					
	30		Si	Si	Si		Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
	60		Si	Si	Si		Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si

SCS menores, como por ejemplo 15 kHz, se emplearán en entornos macro exteriores (BTS tradicionales) con anchos de banda de 1, 5, 10 y 20 MHz y bandas por debajo de

los 3 GHz (tras la liberación del 2G/3G/4G y evolución al NR). Su objetivo principal es dar cobertura 5G.

Las bandas por encima de los 3 GHz (ejemplo 3.5 GHz) donde se pueden encontrar rangos de frecuencias vacíos de hasta 100 MHz son óptimos para entornos exteriores para dar capacidad en lugar de cobertura. Para ello un espaciamiento de subportadoras de 30 kHz es el adecuado pues como vimos en la tabla anterior es el que obtiene mayor *throughput*.

Para entornos interiores, como oficinas, se empleará espectro no licenciado por ejemplo la banda de 5 GHz con BW de cientos de mega hertz y un SCS de 60 kHz (emplea menos RBs y la capacidad es máxima).

Por último, las bandas milimétricas están enfocadas a aplicaciones que requieran una alta capacidad, como las comunicaciones eMBB. Por tanto, emplearán un SCS alto (60 o 120 kHz) que acompañado de un gran ancho de banda conseguirán niveles de capacidad muy elevados.

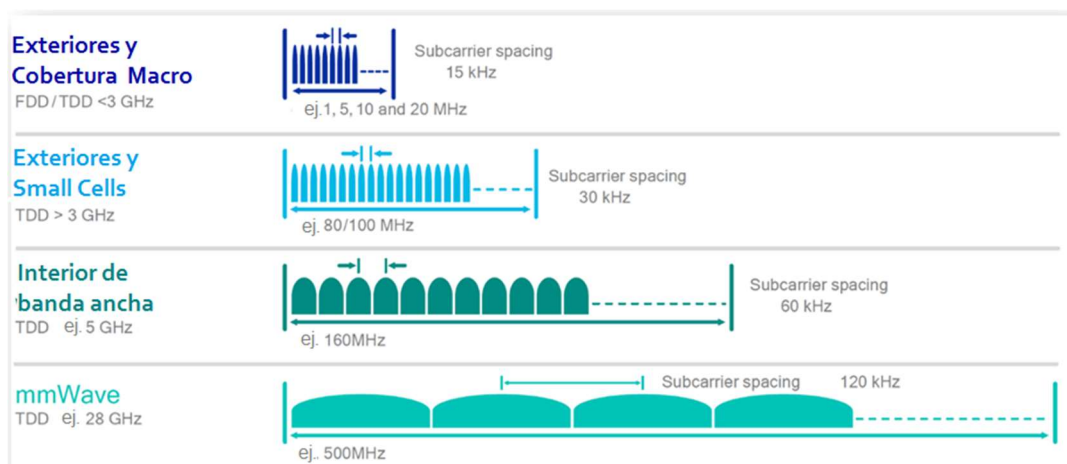


Figura 12. Relación del SCS con los distintos escenarios de aplicación [23].

Además de lo visto anteriormente, un UE puede configurarse con un enlace ascendente suplementario adicional (SUL) que puede emplearse en paralelo a un par de portadoras UL/DL FDD o una portadora bidireccional TDD. Se puede programar que el UE transmita en el SUL o en el enlace ascendente de la portadora que se está complementando, pero no en ambos al mismo tiempo [24].

La Tabla 5.2A.1-1 “*Band combinations for NR CA*” del 3GPP TS 38.101-3 V15.3.0 [25] resume las combinaciones de bandas con las cuales se puede hacer CA inter-banda de los rangos FR1 y FR2. La combinación incluye al menos una banda por debajo de 6 GHz y una banda milimétrica.

Otra idea planteada por el estándar es la *Dual Connectivity* (DC) que consiste en la agregación de al menos una banda LTE con bandas NR. En el modo Non Stand Alone NR (*Dual Connectivity* de LTE y NR) el usuario accede a la red LTE y luego es configurado para operar en NR. El UE puede conectarse simultáneamente a LTE y NR, o a LTE para el plano de control y NR para plano de usuario.

Las Tablas 5.2B.2/3.3-1 indican las bandas para DC intra-band (ejemplo LTE banda 41 y NR banda n41) y las tablas 5.2B.4.x (x=1...5 correspondiente a CC=2...6) indican las combinaciones entre bandas LTE y NR (ejemplo LTE banda 7 y NR banda 78) [25].



Figura 13. Dual Connectivity (DC) con portadoras LTE y NR [18].

1.6.3 MIMO y Modulaciones de alto orden

El empleo de técnicas como el MIMO o modulaciones de alto orden aumentan la eficiencia espectral (bps/Hz) por celda. Con el 5G se espera un incremento en la capacidad del canal y una forma de conseguirla es empleando de múltiples antenas en la estación base y en los terminales de usuario.

MIMO masivo significa tener al menos 8 antenas en cada extremo. El empleo de múltiples antenas en 5G está enfocado a dos objetivos. El primero es compensar la pérdida de cobertura ocasionada por el uso de bandas milimétricas, que como se vio en la Tabla 8. Bandas altas con sus respectivas longitudes de onda y pérdidas las FSPL son 100-1000 veces mayores que en $f < 6$ GHz usadas en LTE. Y el segundo objetivo es mejorar la eficiencia espectral, lo cual es importante sobre todo en el rango de sub-6 GHz donde NR tiene que competir con LTE. Esta mejora de la eficiencia se consigue con el empleo de múltiples antenas combinado con un indicador del estado del canal, llamado CSI (*Channel Status Information*). El CSI ayuda a la estación base a separar las señales transmitidas hacia o desde varios UEs en el dominio espacial.

Como es de esperar colocar esta cantidad de antenas en un dispositivo con las medidas de teléfonos actuales manteniendo buenos niveles de aislamiento y bajo ECC (*Envelope Correlation Coefficient*) es todo un desafío. En los apartados Antenas para UE en banda 3.5 GHz y Antenas para UE en bandas milimétricas se plantean las investigaciones que lo han conseguido con resultados aceptables. Por el lado de la estación base el número de antenas puede ser mayor, existen modelos de *arrays* con hasta 256 elementos. La NR soporta 1 *codeword* con 1-4 *layers* o 2 *codewords* con 5-8 *layers*.

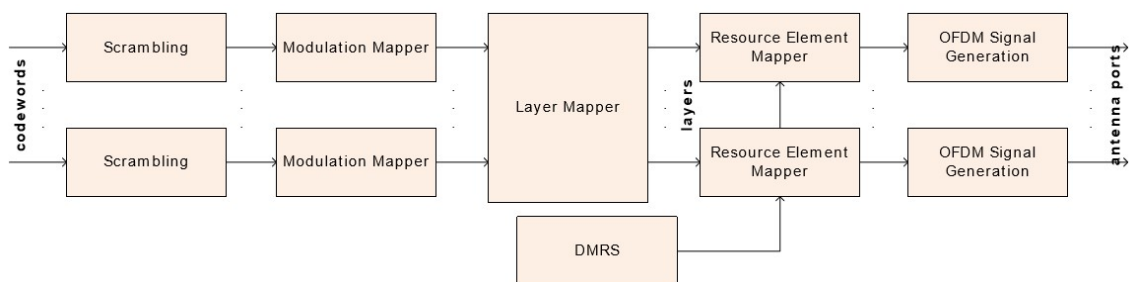


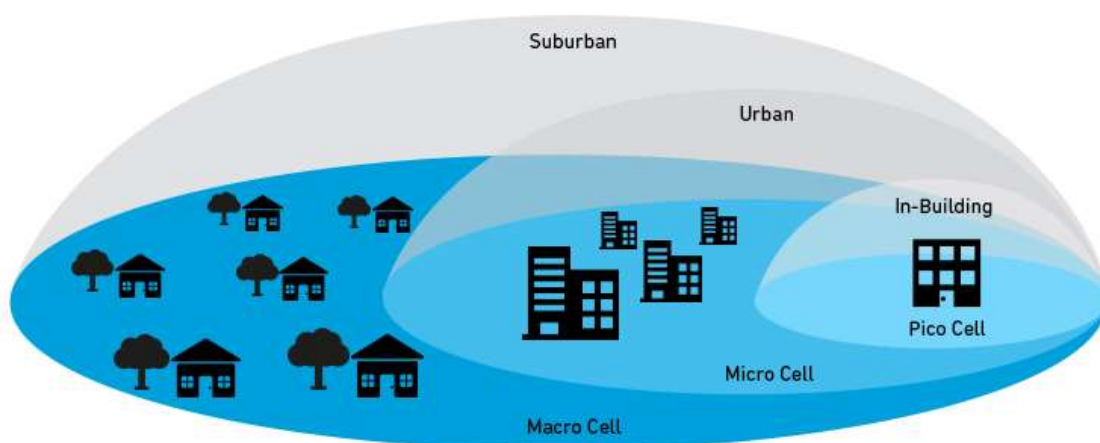
Figura 14. Cadena de procesamiento PDSCH [10].

En cuanto a las modulaciones, al igual que LTE, la NR soporta QPSK, 16QAM, 64QAM y 256QAM. Siendo mayor la capacidad mientras mayor el orden de la modulación (fórmula de Shannon). Además, el 3GPP ha incluido la modulación $\pi/2$ -BPSK en UL para reducir la potencia pico-promedio y aumentar la eficiencia del amplificador de potencia a velocidades de datos más bajas, lo que es importante para servicios mMTC, por ejemplo.

Puesto que el NR cubrirá una amplia gama de casos de uso, el orden de modulación aumentará. Por ejemplo, el esquema de 1024QAM puede formar parte de la NR ya que el *backhaul* de los servicios punto a punto fijos ya utilizan modulaciones superiores a 256QAM. Además, en función de la categoría del UE se especificarán distintos órdenes de modulación.

1.6.4 Densificación con Small Cells

Hoy en día la infraestructura de redes inalámbricas incluye una variedad de tecnologías como estaciones base macro, soluciones DAS (*Distributed Antenna System*) interiores y exteriores, entre otros, que conforman una red heterogénea (HetNet).



Cell Type	Output Power (W)	Cell Radius (km)	Users	Locations
Femtocell	0.001 to 0.25	0.010 to 0.1	1 to 30	Indoor
Pico Cell	0.25 to 1	0.1 to 0.2	30 to 100	Indoor/Outdoor
Micro Cell	1 to 10	0.2 to 2.0	100 to 2000	Indoor/Outdoor
Macro Cell	10 to >50	8 to 30	>2000	Outdoor

Figura 15. Alcance de cobertura, usuarios y escenarios según el tipo de BTS [26].

Una de las soluciones para lidiar con la demanda de capacidad en entornos densificados es el uso de *small cells*. Éstas pueden definirse como pequeñas estaciones base que hacen que la red se divida en un mayor número de celdas. Existen las pico, micro y femto cells, y se clasifican así de acuerdo con el radio de cobertura, el entorno si es interior o exterior, la potencia de salida y el número de usuarios soportados.

Su despliegue permite que el usuario disfrute de menores latencias y mayor capacidad, mientras que expande la cobertura a sitios como *hotspots* (estadios, eventos), ciudades densamente pobladas o calles muy concurridas. Al emplear celdas pequeñas en lugar

de una macro celda de una estación base convencional utilizamos portadoras en un área más reducida soportando un mayor número de usuarios a nivel de red y brindando a estos un mejor servicio.

La densificación mediante *small cells* en interiores y exteriores incrementa la capacidad de la portadora y mejora el rendimiento en los bordes de cobertura de la celda, además permite hacer un mayor reuso del espectro existente e incluso hay soluciones que permiten compartir las bandas de frecuencia por varios operadores.

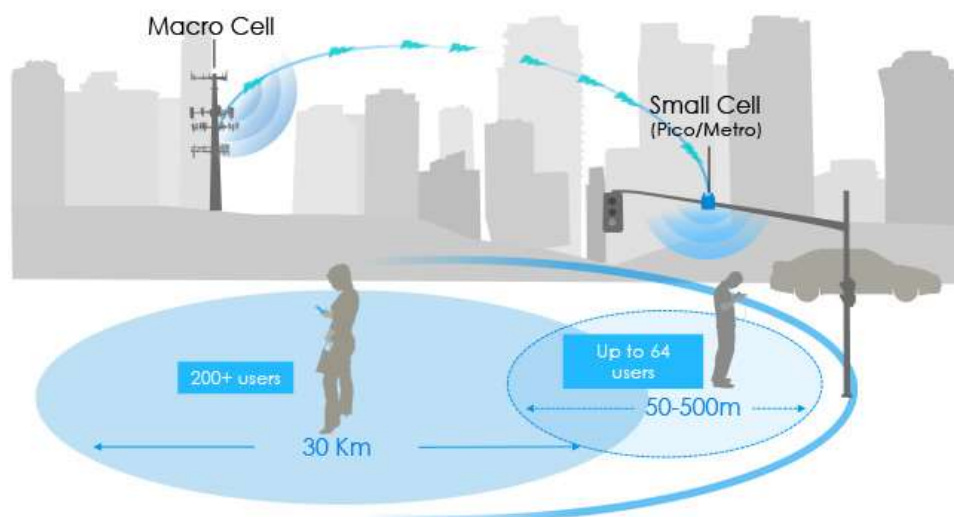


Figura 16. Área de cobertura dependiendo del tipo de celda [27].

Otras ventajas de las *small cells*, es su bajo coste en comparación con una BTS y que pueden ser instaladas con mayor facilidad por ejemplo en cabinas de teléfono, farolas o en plantas de oficina.

1.6.5 Equipo de Usuario de Alta Potencia (HPUE)

Debido a las limitaciones inherentes del enlace ascendente, como el número reducido de antenas y la controlada potencia transmisión en los UEs, es necesario buscar una alternativa para ganar cobertura. De acuerdo con un estudio realizado en redes LTE la diferencia en los niveles de cobertura DL/UL puede llegar a los 5 dB [28]. Una forma de mejorar la cobertura en UL es aumentando la potencia transmitida por el UE conocido como HPUE (*High Power User Equipment*). El problema es que al aumentar la potencia radiada aumentas también la potencia radiada hacia el usuario (SAR) y se calienta el dispositivo. De modo que, en cualquier caso, los límites de SAR máxima radiada al usuario (2 mW/ 10g) y de calentamiento del terminal (45°C) deben ser respetados.

Para LTE el 3GPP ha definido dos clases de HPUE: Clase 2 (+26 dBm) y Clase 3 (+23 dBm) para las bandas 14 [29] y 41 [30]. Para la NR se ha aprobado el empleo de HPUE en banda 3.5 GHz y se espera que otras bandas sean añadidas.

El elemento más crítico en el UE a la hora de aumentar la potencia de transmisión es el Amplificador de Potencia (PA). Las pérdidas después del PA varían dependiendo de la

arquitectura *front-end*. Para la banda 3.5 GHz las pérdidas de inserción se encuentran en el rango de 4 a 6 dB por tanto tendríamos que amplificar lo suficiente la señal para conseguir al menos 34 dBm de Pout del PA (para tener P_{máx} en el puerto de antena de 26 dBm). Sin embargo, éstos valores tan altos no son accesibles por los fabricantes de PAs. Un plan B es emplear dos antenas Tx (MIMO 2x2) en el UE con dos PAs Clase 3 (+23 dBm) y conseguir los 26 dBm deseados, aliviando los requisitos de P_{máx} del PA.

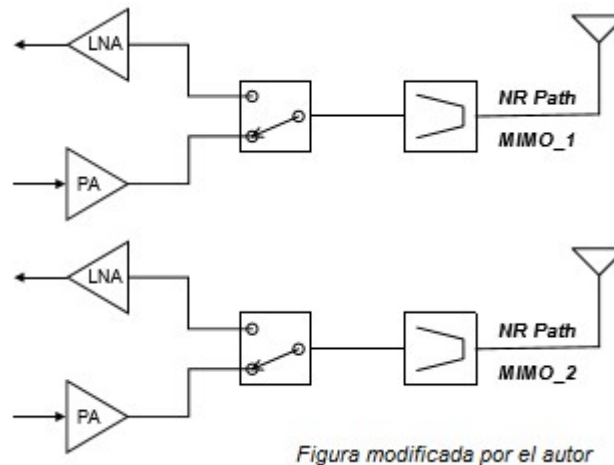


Figura 17. Arquitectura front-end NR empleando MIMO 2x2 [31].

Como se observa en la Figura 17. Arquitectura front-end NR empleando MIMO 2x2 ., se emplean dos PAs independientes para un esquema MIMO 2x2 con una portadora, y si empleamos dos portadoras en la misma banda (*intra-band*) también servirían estos dos PAs. Sin embargo, para dos portadoras en bandas distintas se necesitarán 4 PAs. La tabla muestra el efecto en el consumo de la batería al emplear distintas configuraciones.

Tabla 13. Consumo de batería del UE de acuerdo con la Clase y al número de PAs [31].

UE configuration	Class 3 (23dBm Tx power)		Class 2 (26dBm Tx power)	
	Active PAs	Battery power (mW)	Active PAs	Battery power (mW)
1CC, 2x2 UL MIMO	2 @ 20dBm	3600	2 @ 23dBm	5000
2CC intra, 2x2 UL MIMO	2 @ 20dBm	3600	2 @ 23dBm	5000
2CC inter, 2x2 UL MIMO	4 @ 17dBm	5600	4 @ 20dBm	7200

Para una potencia de transmisión total dada, hay un aumento significativo en el consumo de la batería a medida que aumenta el número de PA activos, y que este aumento es mayor para portadoras de distintas bandas que para portadoras de la misma banda. Sin embargo, el aumento en el consumo de batería es proporcional a la reducción del tiempo de transmisión, ya que el rendimiento aumenta con la ganancia de diversidad o MIMO. Si el aumento en el rendimiento es proporcionalmente mayor que el aumento del consumo de batería entonces al final habrá un ahorro de energía neto.

1.7 Interfaz aire

En función de poder manejar los distintos casos de uso 5G se requiere un amplio abanico de frecuencias, donde el espectro por debajo de los 6 GHz es más adecuado para soportar servicios mMTC donde es importante la cobertura, mientras que por encima de 6 GHz (hasta 100 GHz) es esencial para cumplir con la demanda de capacidad de eMBB. Se prevé una interfaz aire (AI) 5G general, compuesta por la evolución LTE-A y nuevas AIs adaptadas a diferentes servicios, bandas y tamaños de celdas. Se espera que coexistan tres esquemas de autorización o mezclas de estos para los usos del espectro 5G: modo de usuario primario, acceso compartido con licencia (LSA) y modo sin licencia. El uso exclusivo del espectro debe seguir siendo la solución principal y preferida, mientras que el uso compartido del espectro puede ser un complemento para aumentar la disponibilidad del espectro.

El incremento en la capacidad de un enlace de comunicación inalámbrica es posible mediante dos aspectos: el ancho de banda y el número de antenas (ley de Shannon). El ancho de banda actual que disponen los operadores para comunicaciones LTE, quitando el CA, es de 20 MHz y se emplean de forma general 2 antenas en los extremos, teniendo un MIMO 2x2.

Con el 5G se quiere dar un salto sustancial a estas capacidades y para ello se ha estudiado el espectro disponible en bandas milimétricas y actuales bandas 2G/3G/LTE, así como el incremento del número de antenas tanto en el lado de la estación base como del terminal móvil.

El 3GPP ha definido dos rangos de frecuencia que serán empleados por el 5G, estos son el FR1 y FR2 (FR: *frequency range*). El FR1 contiene el rango de frecuencias por debajo de los 6 GHz definido en el TS 38.101-1 y el FR2 las llamadas bandas milimétricas definidas en el TS 38.101-2.

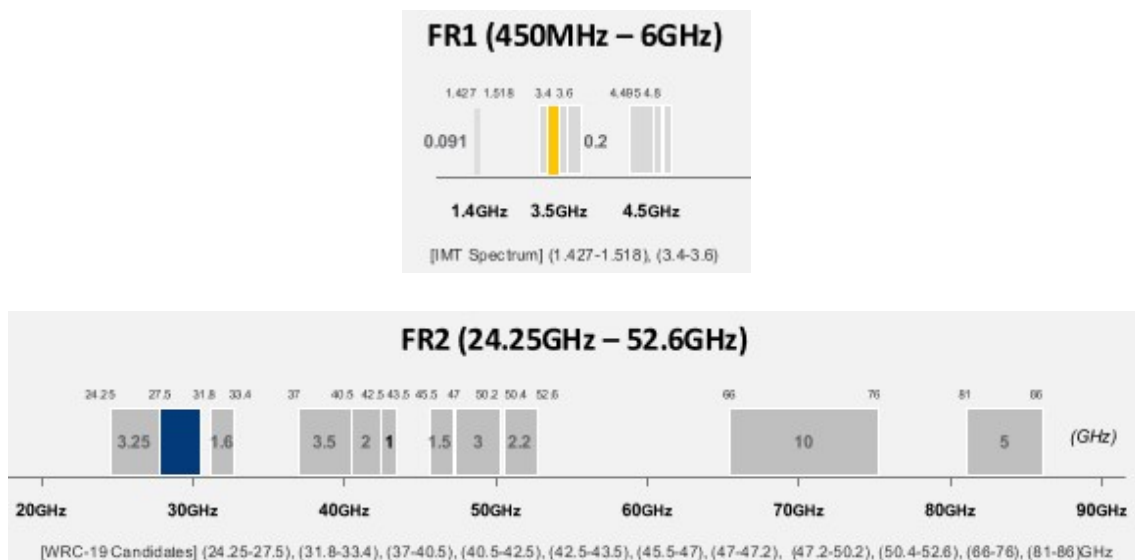


Figura 18. Rangos de frecuencia (FR) para NR [6].

A las bandas empleados en la NR se les coloca la letra “n” para diferenciarlas de su uso en LTE. En las siguientes tablas podemos ver en detalle los rangos de operación DL y UL para cada una de ellas, así como el modo empleado (FDD o TDD). Se han indicado aquellas bandas empleadas actualmente en España por los operadores de comunicaciones móviles para el despliegue de las redes 2G/3G/4G, que veremos en detalle en el apartado 1.7.2. También se indican las bandas previstas para el despliegue del 5G.

Tabla 14. Bandas de operación NR para el FR1 (<6 GHz), Tabla 5.2-1 de [11].

Bandas de operación NR	Uplink (UL)		Downlink (DL)		Modo Dúplex	Uso actual España
	BS recibe / UE transmite	F _{UL_low} – F _{UL_high}	BS transmite / UE recibe	F _{DL_low} – F _{DL_high}		
n1	1920 MHz – 1980 MHz		2110 MHz – 2170 MHz		FDD	UMTS
n2	1850 MHz – 1910 MHz		1930 MHz – 1990 MHz		FDD	
n3	1710 MHz – 1785 MHz		1805 MHz – 1880 MHz		FDD	2G, LTE
n5	824 MHz – 849 MHz		869 MHz – 894 MHz		FDD	
n7	2500 MHz – 2570 MHz		2620 MHz – 2690 MHz		FDD	LTE
n8	880 MHz – 915 MHz		925 MHz – 960 MHz		FDD	2G, UMTS
n12	699 MHz – 716 MHz		729 MHz – 746 MHz		FDD	
n20	832 MHz – 862 MHz		791 MHz – 821 MHz		FDD	LTE
n25	1850 MHz – 1915 MHz		1930 MHz – 1995 MHz		FDD	
n28	703 MHz – 748 MHz		758 MHz – 803 MHz		FDD	
n34	2010 MHz – 2025 MHz		2010 MHz – 2025 MHz		TDD	
n38	2570 MHz – 2620 MHz		2570 MHz – 2620 MHz		TDD	
n39	1880 MHz – 1920 MHz		1880 MHz – 1920 MHz		TDD	
n40	2300 MHz – 2400 MHz		2300 MHz – 2400 MHz		TDD	
n41	2496 MHz – 2690 MHz		2496 MHz – 2690 MHz		TDD	
n50	1432 MHz – 1517 MHz		1432 MHz – 1517 MHz		TDD	
n51	1427 MHz – 1432 MHz		1427 MHz – 1432 MHz		TDD	
n66	1710 MHz – 1780 MHz		2110 MHz – 2200 MHz		FDD	
n70	1695 MHz – 1710 MHz		1995 MHz – 2020 MHz		FDD	
n71	663 MHz – 698 MHz		617 MHz – 652 MHz		FDD	

Tabla 15. Bandas de operación NR para el FR1 (<6 GHz), Tabla 5.2-1 de [11] (continuación).

Bandas de operación NR	Uplink (UL)		Downlink (DL)		Modo Dúplex	Uso actual España
	BS recibe / UE transmite	F _{UL_low} – F _{UL_high}	BS transmite / UE recibe	F _{DL_low} – F _{DL_high}		
n74	1427 MHz – 1470 MHz		1475 MHz – 1518 MHz		FDD	
n75		N/A	1432 MHz – 1517 MHz		SDL	
n76		N/A	1427 MHz – 1432 MHz		SDL	
n77	3300 MHz – 4200 MHz		3300 MHz – 4200 MHz		TDD	5G
n78	3300 MHz – 3800 MHz		3300 MHz – 3800 MHz		TDD	5G
n79	4400 MHz – 5000 MHz		4400 MHz – 5000 MHz		TDD	5G
n80	1710 MHz – 1785 MHz		N/A		SUL	
n81	880 MHz – 915 MHz		N/A		SUL	
n82	832 MHz – 862 MHz		N/A		SUL	
n83	703 MHz – 748 MHz		N/A		SUL	
n84	1920 MHz – 1980 MHz		N/A		SUL	
n86	1710 MHz – 1780 MHz		N/A		SUL	

Tabla 16. Bandas de operación NR para el FR2 (>24 GHz) Tabla 5.2-2 de [11].

Bandas de operación NR	Uplink (UL) y Downlink (DL)		Modo Dúplex	Uso actual España
	BS transmite/recibe			
	UE transmite/recibe			
	F _{UL_low} – F _{UL_high}	F _{DL_low} – F _{DL_high}		
n257	26500 MHz – 29500 MHz		TDD	5G
n258	24250 MHz – 27500 MHz		TDD	5G
n260	37000 MHz – 40000 MHz		TDD	5G
n261	27500 MHz – 28350 MHz		TDD	5G

1.7.1 Reparto del espectro radioeléctrico a nivel internacional

Las bandas de frecuencias empleadas por cada país para el despliegue del 5G se están volviendo cada vez más claras. Las bandas por debajo de los 6 GHz están siendo en su mayoría empleadas por las actuales redes 2G, 3G (WCDMA), 4G (LTE/LTE-A) y WLAN, y ya se han comprobado sus buenas prestaciones desde el punto de vista radio. Por su parte, en bandas milimétricas, entre 24250 MHz y 52600 MHz, se puede asegurar una banda ancha porque no hay muchos servicios que empleen altas frecuencias, por tanto, ofrece transmisiones de datos de alta velocidad y gran capacidad.

De acuerdo con los reportes internacionales, las comunicaciones 5G emplearán diferentes bandas y modos de operación. En China, pionero en el despliegue del 5G, los primeros pilotos se harán en bandas sub-6 GHz en modo SA. Como punto de partida se implementará la comunicación de baja latencia ultra confiable (URLLC) por medio de una aplicación de realidad aumentada (AR) utilizando 5G.

En otros países se han dado pasos hacia el despliegue de aplicaciones eMBB usando el modo NSA y bandas milimétricas. En Estados Unidos se empleará para eMBB para establecer enlaces fijos de banda ancha y en países con gran densidad de población como Japón o Corea del Sur para mejorar la capacidad.

Tabla 17. Servicio inicial 5G por región [32].

Modos	Sub-6 GHz	Bandas mm
	Bandas 600 (n71) / 700 (n28) MHz, 2.5 (n41) / 3.5 (n78) / 4.5 (n79) GHz, etc.	28 (n257) / 39 (n260) GHz, etc.
Stand Alone (SA)	China, USA	
Non Stand Alone (NSA)	Europa, Japón, Corea del Sur, USA	Japón, Corea del Sur, USA



Figura 19. Reparto del espectro 5G a nivel internacional [6].

1.7.2 Reparto del espectro radioeléctrico en España

El reparto del espectro radioeléctrico o las bandas de frecuencias disponibles para el 5G es un factor clave para las comunicaciones móviles, ya que de este dependerá la capacidad de los servicios ofrecidos. En España la adquisición del espectro se realiza mediante subastas que lanza el Ejecutivo en las cuales los operadores se anotan para pujar por bloques de frecuencias disponibles.

De acuerdo con lo establecido por el Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias (CNAF) [33], la banda 3.4-3.8 GHz es considerada como “la banda principal para la introducción de servicios basados en 5G en Europa” y será la que se emplea de forma inicial para el lanzamiento del 5G en la Unión Europea. Para ver por qué la elección de la banda 3.5 GHz, se analizará cómo están repartidas las bandas de frecuencias en España para el uso del 2G GSM /3G UMTS /4G LTE/ 5G y los planes existentes para dar paso al NR 5G.

Actualmente, la telefonía móvil dispone de las bandas 800/ 900/ 1800/ 2100/ 2600/ 3500 MHz. Las bandas bajas al ser las que mayor cobertura y penetración en interiores ofrecen son muy cotizadas. En el pasado las bandas 700 MHz (1er DD) y 800 MHz (2do DD) eran de uso exclusivo de la Televisión Digital Terrestre (TDT) pero con los llamados dividendos digitales (DD) irán quedando a disposición de la telefonía móvil. Aún siguen quedando canales de 700 MHz ocupados por la TDT, pero se espera que a partir de 2019 comience el reajuste y salga a subasta también esta banda muy cotizada para el 5G. Más adelante veremos qué aplicaciones del 5G requieren bandas bajas y en cuales por el contrario las bandas altas son más adecuadas. La siguiente figura muestra cómo ha quedado el reparto de frecuencias en España tras las subastas de los últimos años. Las licencias suelen tener una duración de 10 a 20 años y los bloques subastados son de 5 o 10 MHz con un límite establecido y regulado de hasta 120 MHz por operador.

	movistar	vodafone	orange™	yoigo
700 MHz (Banda 12) 5G	-	-	-	-
800 MHz (Banda 20) 4G	20 MHz FDD	20 MHz FDD	20 MHz FDD	-
900 MHz (Banda 8) 2G y 3G	30 MHz FDD	20 MHz FDD	20 MHz FDD	-
1.800 MHz (Banda 3) 2G y 4G	40 MHz FDD	40 MHz FDD	40 MHz FDD	30 MHz FDD
2.100 MHz (Banda 1) 3G	30 MHz FDD 5 MHz TDD	30 MHz FDD 5 MHz TDD	30 MHz FDD 5 MHz TDD	30 MHz FDD 5 MHz TDD
2.6 GHz (Banda 7) 4G y 5G	40 MHz FDD 10 MHz FDD Madrid y Melilla	40 MHz FDD 20 MHz TDD	40 MHz FDD 10 MHz TDD 10 MHz FDD España excepto Castilla-La Mancha, País Vasco, Asturias, Galicia, Madrid Melilla	10 MHz TDD Madrid, Cataluña, Castilla-La Mancha y Andalucía
3.4/3.8 GHz (Banda 42-43) 5G	90 MHz TDD (40 MHz válidos hasta 2030) (50 MHz válidos hasta 2038)	90 MHz TDD (válidos hasta 2038)	100 MHz TDD (40 MHz válidos hasta 2030) (60 MHz válidos hasta 2038)	80 MHz TDD (válidos hasta 2030)

Figura 20. Reparto actual del espectro en España [34].

La banda de 700 MHz está en planes de subasta y se espera que ofrezca una velocidad mínima garantizada de 100 Mbps. Aunque sea una banda de baja capacidad ofrece una conectividad estable y gran alcance.

La banda 800 MHz fue liberada tras el primer DD para ser empleada en LTE. Su ventaja, al igual que 700 MHz, es el rango de cobertura que ofrece y constituye la principal apuesta de los operadores en despliegues LTE en zonas rurales. Actualmente cada operador dispone de 10 MHz UL y DL empleando FDD.

La banda 900 MHz es la empleada para el antiguo 2G y el no tan antiguo 3G, en esta banda Movistar dispone de 14.8 MHz repartidos en UL y DL mientras que Vodafone y Orange disponen de 10 MHz UL y 10 MHz DL.

Aunque no se mencione en la Figura 20. Reparto actual del espectro en España ., la banda 1500 MHz también conocida como banda L, ha llamado la atención en los últimos años como banda de apoyo al 5G. Esto quiere decir que se utilizaría en enlace descendente para aumentar las velocidades de descarga, se estiman de 1-3 Gbps. El espectro disponible va de 1452 a 1492 MHz.

Por su parte la banda 1800 MHz es actualmente empleada para LTE y 2G, y en el caso de LTE al igual que la banda 2600 MHz ofrece cobertura más limitada pero mayores capacidades que las bandas bajas. Por tanto, su uso radica en despliegues en entornos urbanos y en el caso de la banda 2600 MHz en interiores y *small cells*, y pensada también para 5G como complemento al 3.5 GHz.

La banda 1 o 2100MHz tiene su uso exclusivo al 3G desde su licitación en el año 2000, aunque en futuras migraciones se está pensado en usarla para LTE.

Finalmente, la comentada banda 3.5 GHz o banda C fue sacada a subasta en julio de 2018. Los 200 MHz subastados (3.6 – 3.8 GHz) fueron repartidos por los cuatro operadores participantes en bloques de 5 MHz con un precio de salida de 2.5 millones cada uno, un total de 40 bloques a 100 millones. Antes de la subasta Movistar y Orange ya disponían de 40 MHz de espectro en el rango 3.4-3.6 GHz y con la compra de 50 y 60 MHz respectivamente se han quedado con 90 y 100 MHz cada uno. Por su parte, Vodafone ha tenido que adquirir más espectro por seguir la competencia por el 5G, quedándose con 90 MHz. Más Móvil ya disponía de 80 MHz de espectro tras su compra de 40 MHz a Eircom y su fusión con Neutra [35, 36].

Como hemos podido ver la banda pensada para el lanzamiento inicial del 5G es la banda de 3400-3800 MHz, apoyándose luego en las bandas 700 y 1500 MHz cuando sean licitadas. Otra banda es la que también se está poniendo interés es la de 26 GHz la cual ofrecería menor cobertura, pero estaría pensada para sitios con mucha demanda de capacidad como *hotspots* (lugares de concierto, estadios, etc.) con velocidades de hasta 10 Gbps.

Una cosa que hay que tener en cuenta es la utilización por parte de los Servicios Fijos Satelitales (SFS) del espectro de las bandas L y C. En el caso de la banda C, aunque se ha aprobado su uso para telefonía móvil también está regulado su uso para comunicaciones satelitales debido a las buenas cualidades que ofrece (baja atenuación

por lluvia, alta disponibilidad y coberturas continentales). Actualmente existen 169 satélites en el mundo que operan a esta frecuencia, 52 de los cuales se han lanzado en los últimos 5 años, ofreciendo televisión vía satelital, comunicaciones de datos en áreas remotas y servicios humanitarios en caso de desastre [37].

1.8 Principales aplicaciones

Estamos en un mundo dominado por el 4G donde las redes heterogéneas actuales permiten comunicaciones de alta capacidad por medio del despliegue de *small cells*, comunicaciones con un gran número de dispositivos simples (sensores) por medio de NB-IoT (bajo despliegue actual), redes no licenciadas como Wi-Fi, Bluetooth y ZigBee y redes móviles que aumentan la capacidad por medio de técnicas de agregación de portadoras (CA) para aumentar ancho de banda o aumentar el número de antenas con MIMO 4x4. El 5G consistirá en conseguir cubrir la demanda de capacidad y disponer de aplicaciones que el 4G no permite, algunas de estas aplicaciones las podemos ver en la siguiente figura.

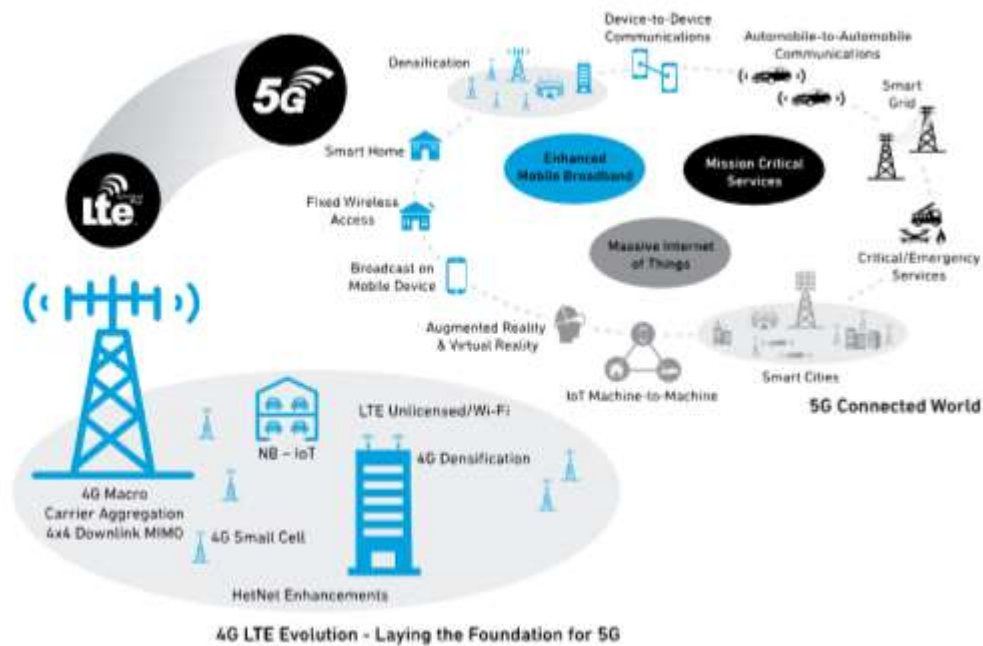


Figura 21. Casos de uso de NR [38].

Los principales servicios que ofrecen las redes 5G pueden ser agrupados en tres grupos: Banda Ancha Móvil Extrema (*Extreme Mobile BroadBand, eMBB*) con velocidades de datos de varios Gbps y acceso de banda ancha en grandes áreas de cobertura, Comunicaciones tipo máquina masivas (*Massive Machine-Type Communications, mMTC*) en las que se incluye el conocido IoT que requiere conectividad inalámbrica para millones de dispositivos de bajo coste y bajo consumo de potencia, y MTC ultra confiable (*Ultra-reliable MTC, uMTC*) o Comunicaciones de baja latencia ultra confiables (*Ultra-Reliable Low-Latency Communications, URLLC*) que requieren latencias muy bajas y un 99.99% de confiabilidad, por ejemplo las comunicaciones V2X (*Vehicle to anything*). Los requerimientos de cada uno de estos servicios están definidos en el 3GPP TR 22.864. La siguiente figura muestra los principales requisitos de cada grupo y que se detallan a continuación.

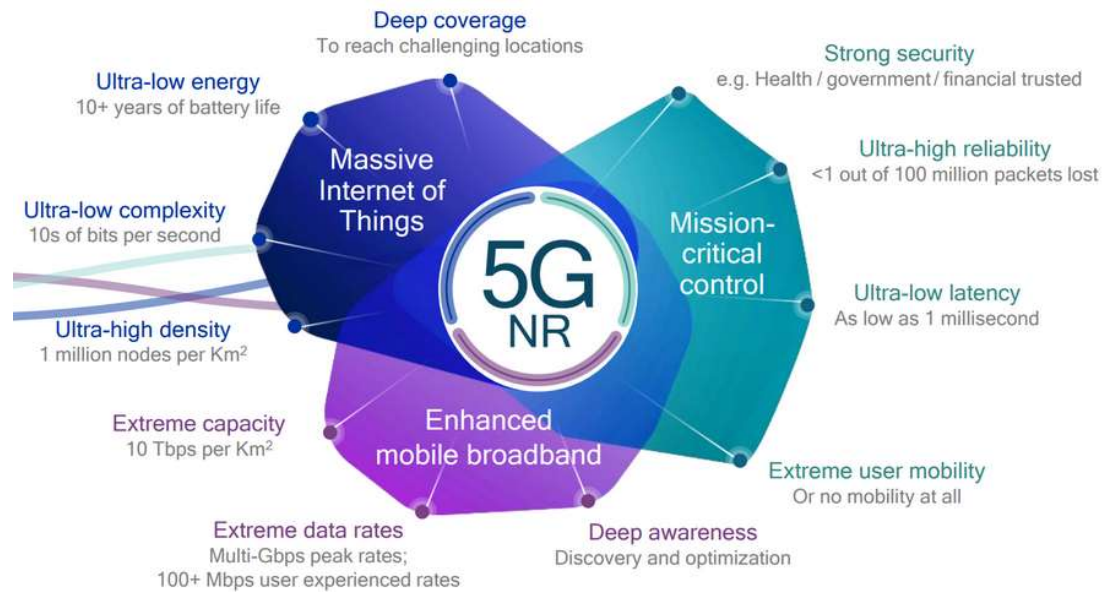


Figura 22. Características de los casos de uso 5G [39].

1.8.1 Extreme Mobile BroadBand (eMBB)

Definido en el TR 22.863, el concepto de eMBB está enfocado a tener mejor cobertura y mayores velocidades de carga y descarga de datos (Gbps) desde cualquier dispositivo y en cualquier ubicación (entornos urbanos densos, rural, alta movilidad, interiores). Se trata de ofrecer todo el potencial del 5G enfocado a experiencias de usuarios donde se demande máxima capacidad (tal y como harían las *small cells* en zonas de *hotspots*). Para ello se requiere un ancho de banda elevado (100 – 400 MHz) y por tanto tener que hacer uso del espectro licenciado, no licenciado y compartido. Donde hay disponible este ancho de banda tan elevado es en la parte alta del espectro, por encima de los 30 GHz.

Al proporcionar comunicaciones de alta velocidad de datos y baja latencia, la banda ancha móvil extrema (eMBB) ofrece una buena cobertura, mejorando la ofrecida por 4G. La capacidad por área de cobertura es muy alta (Tbps/km²) lo que hace que se puedan disfrutar de servicios en tiempo real con una calidad excelente. La conectividad y el ancho de banda son más uniformes en el área de cobertura y el rendimiento se degrada gradualmente a medida que aumenta el número de usuarios. Un ejemplo de este tipo de aplicaciones es la realidad virtual y aumentada (AR/VR). También la popularización de almacenar información en “la nube” ha aumentado el tráfico en el UL, a diferencia del pasado donde normalmente se hacían más descargas que cargas.

1.8.2 Ultra-reliable MTC (uMTC)

Este tipo de servicios uMTC definido en TR 22.862, conocido también como URLLC o *Mission-Critical Services*, requiere rendimiento de alta velocidad, pero sobre todo priorizando una baja latencia (menor a 1 ms) para conseguir control en tiempo real a velocidades de hasta 500 km/hr. A la vez que debe lograr una alta disponibilidad y confiabilidad en las comunicaciones, controlando la privacidad e integridad de los datos extremo a extremo y por ende la seguridad de los usuarios. Algunos ejemplos de aplicaciones uMTC son los coches autónomos (por ejemplo, los coches “*headless*” de

Google y Uber), sistemas de transporte público, drones, vehículos aéreos sin piloto, automatización industrial, cuidado de salud remoto y control de redes inteligentes.

Para asegurar que estas aplicaciones funcionen de forma segura debe prepararse un interfaz aire donde no exista conflicto entre las redes existentes. Una forma de lograrlo es densificando la red mediante *small cells* y redes de acceso fijo y usando frecuencias desde los 600 MHz a 80 GHz.

1.8.3 Massive Machine-Type Communications (mMTC)

A diferencia de las aplicaciones eMBB y uMTC, en mMTC (TR 22.861) la comunicación se realiza entre dispositivos sin existir ninguna o casi ninguna interacción humana. Además, al no requerir velocidades de Tx/Rx³ elevadas necesitan poco ancho de banda (típicamente 200 kHz), lo cual hace que sea fácil usar partes del ocupado espectro por debajo de 1 GHz. Así se consigue operar en bandas bajas que consiguen mayor alcance de cobertura.

Ericsson predice que el número de dispositivos conectados en 2022 será de 29 billones de los cuales 18 billones estarán relacionados con comunicaciones IoT. Incluso, se piensa que este año (2018) el número de dispositivos IoT (carros, máquinas, contadores, dispositivos portátiles, electrodomésticos) superará al número de teléfonos móviles. La mayor parte de los dispositivos IoT se comunicarán por medio de redes de corto alcance como Wi-Fi y Bluetooth, aunque el mayor aumento en el CAGR (*Compound Annual Growth Rate*) lo veremos en redes de largo alcance como redes móviles o WANs (*Wide Area Network*).

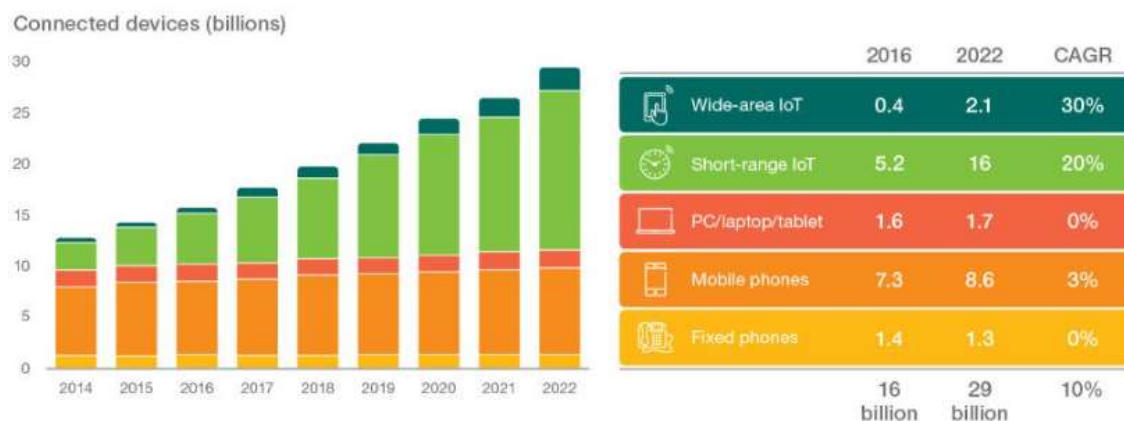


Figura 23. Predicción del número de dispositivos conectados [40].

Los dispositivos finales mMTC están caracterizados por ser bajos en coste y presentar un bajo consumo de potencia (vida de batería de hasta 10 años). Consiguen una buena cobertura *end-to-end* (E2E) siendo capaces de transmitir de forma masiva datos pequeños con velocidades de 1 a 100 kbps en entornos complejos como grandes edificios y áreas remotas. Para ahorrar batería emplean mecanismos de apagado cuando no transmiten o reciben nada. Además, las redes 5G y los dispositivos mMTC

³ Transmisión/Recepción

deben ser masivamente escalables siendo capaces de soportar entre cientos y miles de dispositivos conectados por kilómetro cuadrado.

Los ejemplos que se incluyen en esta categoría de servicios incluyen el monitoreo y la automatización de edificios, agricultura inteligente, logística, seguimiento y gestión de flotas. En el Capítulo 2 profundizaremos en los detalles de las aplicaciones IoT.

1.9 Network slicing

Diseñar una red que pueda manejar de forma simultánea los diferentes casos de uso de 5G es una labor compleja y extremadamente costosa. La alternativa para solventar esta problemática es usar una red segmentada. El Network slicing es la capacidad de adecuar una serie de funciones para optimizar el uso de la red a cada UE. En las redes 4G y 3G las mismas características se ofrecen a todo tipo de dispositivos, cuando las exigencias de cada tipo de aparato no son las mismas. El Network slicing es considerada clave para satisfacer los distintos casos de uso y los requisitos de la NR, incluidas la escalabilidad y flexibilidad que se puede presentar en un futuro. De este modo, los smartphones que demandan alta velocidad, o las cámaras de vigilancia que exigen una alta capacidad de transmisión de video, o los dispositivos controlados en remoto que requieren muy baja latencia serán tratados de forma diferenciada. En 5G cada dispositivo será atendido por una subred totalmente dedicada.

Cada caso de uso requiere que los parámetros de la red sean configurados de forma diferente en función de los requisitos. Por lo cual, cada caso de uso podría demandar su propio segmento de la red con velocidad, capacidad y cobertura asignadas para satisfacer las demandas de la aplicación. El concepto de *network slicing* permite que los elementos y las funciones de la red se puedan configurar y reutilizar fácilmente en cada segmento de la red para cumplir con requerimientos específicos.

En palabras de Rao Yallapragada, director de Intel el “Network slicing posibilita la creación de redes virtuales que emplean una infraestructura de red común”, “La implementación de *network slicing* proveerá una solución integral para una infraestructura flexible optimizada para abordar casos de uso futuros con requisitos diversos tales como velocidad, conexión, vida útil de la batería, latencia y costo. Incluyendo las redes de acceso por radiocomunicaciones y la red central, cada tajada puede configurarse con su propia arquitectura de red, mecanismo de ingeniería y provisionamiento de red” [41].

La arquitectura de las actuales de redes celulares se podría definir como monolítica, donde la red de transporte se encarga de facilitar el tráfico móvil a los usuarios. La división de la red en fragmentos permitiría que las redes 5G se dividan de forma lógica en múltiples redes virtuales, permitiendo que cada segmento se optimice para servir a una aplicación vertical específica proporcionando un servicio eficiente donde varias aplicaciones funcionen simultáneamente.

Los operadores deberán incorporar tecnologías como Redes Definidas por Software (SDN) y Virtualización de las Funciones de Red (NFV) para habilitar estos fragmentos lógicos de la red y poder adecuar la red a los futuros servicios del 5G. La combinación

de tecnologías del *cloud* con las capacidades de SDN y NFV proporciona las herramientas necesarias para permitir la segmentación. La segmentación de la red se hace de extremo a extremo, desde el núcleo hasta la RAN. En el núcleo, NFV y SDN virtualizan los elementos y las funciones de la red en cada segmento para satisfacer sus propios requisitos. En la RAN, la segmentación puede construir recursos de radio físicos (por ejemplo, punto de transmisión, espectro, tiempo) o recursos lógicos extraídos de recursos de radio físicos.

Un ejemplo de cómo funcionaría esta segmentación de la red 5G ha sido expuesto por Telefónica en el *Mobile World Congress* de 2017. En la prueba se presentó una red segmentada en 4 *slices* con aplicaciones de tres tipos AR, VR y comunicaciones críticas. Cada segmento tiene su ancho de banda, velocidad y latencia. La *slice* de RV, desarrollada junto con Huawei, reproduce objetos reales en un entorno virtual, en la RV todo el entorno es ficticio. Para ello ofrece un gran ancho de banda y una latencia muy baja. La *slice* de comunicaciones críticas, en concreto servicios de emergencia, se simuló con la ayuda de Netsia, en situaciones de desastre las redes de comunicaciones se saturan y con la segmentación se evitaría. La *slice* de RA fue probada en el contexto de Industria Digital 4.0, la prueba se hizo junto con Ericsson y consistía en prestar asistencia a un técnico en el campo reproduciendo mediante gafas una imagen real en alta definición conjuntada con imágenes virtuales. La RA añade información virtual a la información real existente. Esto solo es posible con latencias muy bajas, del orden de 1 ms para ser capaces de reproducir movimientos casi de forma instantánea [42].

1.10 Antenas para NR

Tanto en las estaciones base como en los dispositivos móviles las antenas empleadas soportan las actuales de bandas celulares para las redes 2G/3G/LTE, además los dispositivos móviles generalmente con tamaño reducido integran también antenas para Wi-Fi, Bluetooth y GPS. Ya que el apagado de las redes se hace de forma muy lenta y progresiva la NR tendrá que convivir con las tecnologías anteriores. Esto supone un desafío en cuanto al diseño de las antenas NR, que deben ocupar el espacio disponible en los terminales en el caso de UE, y en la torre en caso de BTS.

1.10.1 Antenas para UE en banda 3.5 GHz

Diseñar una antena para cumplir con los requerimientos actuales del 5G es un reto al cual se enfrentan los ingenieros de antenas. Las antenas deben soportar múltiples bandas, MIMO y tener un tamaño reducido para adecuarse a la demanda. Además, deben conseguir altos valores de aislamiento y un bajo ECC. Para disminuir acoplamiento entre las antenas, que son colocadas muy cerca una de otra, se emplean diversas técnicas como la línea neutral que es muy común para aumentar el aislamiento [43].

Las antenas que se encuentran en los smartphones para aplicaciones 4G LTE son generalmente sistemas con MIMO 2x2, donde la antena principal y la de diversidad se ubican en la parte superior e inferior del terminal respectivamente. Para lograr mayor eficiencia los elementos de las dos antenas se encuentran bien desacoplados consiguiendo tener dos caminos independientes [44].

Con el objetivo de mejorar aún más la capacidad, y satisfacer las necesidades del 5G, se ha introducido un esquema de MIMO masivo donde un mayor número de elementos se integran en el terminal. La tendencia apunta hacia antenas que funcionen en las bandas de 4G y 5G, con un número de elementos de entre 6 y 8.

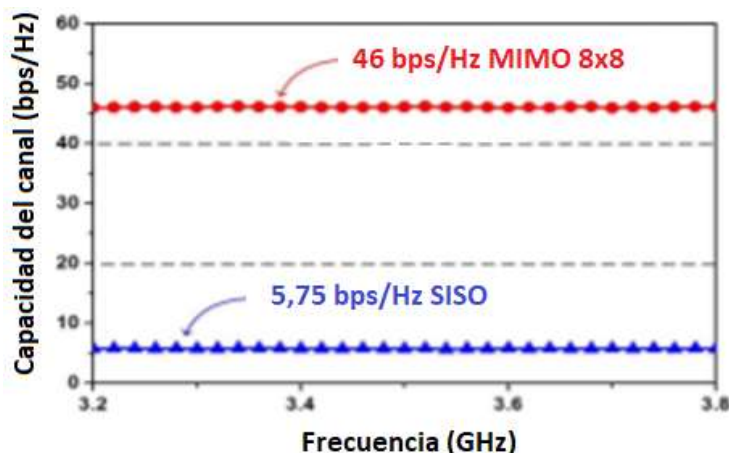


Figura 24. Límites de capacidad del canal ergódico.

Según [45], el límite superior de capacidad aproximado para un sistema MIMO 8x8 en un canal de desvanecimiento de Rayleigh con SNR (relación señal/ruido) de 20 dB puede alcanzar hasta 46 bps/Hz, que es aproximadamente 4 veces la limitación de capacidad (11.5 bps/Hz) para un MIMO 2x2 y 8 veces el de un sistema SISO [46], Figura 24. Límites de capacidad del canal ergódico.. Sin embargo, el desafío radica en colocar ambas antenas (4G y 5G) dentro de un terminal de tamaño reducido y teniendo en cuenta los requisitos de aislamiento y buen desacoplamiento que debe existir entre los elementos del array.

En los últimos años se han diseñado antenas 5G para smartphones que trabajan en bandas por debajo de los 6 GHz, en la banda 42 (3400–3600 MHz) [47, 48]. Estas antenas han conseguido niveles de aislamiento entre elementos del array por encima de los 12 dB y una capacidad por encima de los 35 bps/Hz. Aunque también se han planteado diseños con 16 antenas los resultados han reflejado una eficiencia del 30% debido al acoplamiento que se produce con los bordes del PCB. Otro efecto que hay que tener en cuenta en el diseño es el efecto de la mano del usuario en modo dato y modo lectura (descritos en las referencias anteriores).

Las redes celulares 5G que aplican tecnología MIMO masivo consiguen mejoras extraordinarias en la capacidad, las tasas de datos y la latencia, con una mayor flexibilidad y eficiencia en la red [49]. Para medir el rendimiento del MIMO se evalúa el parámetro ECC, que indica cuán independientes o incorrelados son los patrones de radiación de dos antenas o dos elementos de un array. Si los elementos están polarizados horizontal y verticalmente el ECC será nulo y el aislamiento óptimo [50]. Las antenas diseñadas encontradas en la literatura tienen valores de ECC por debajo de 0.35.

Las anteriores tecnologías 2G/3G/4G (698–960 MHz, 1710–2690 MHz) emplean esquemas de MIMO 2x2 y 4x4, con el 5G se pretende integrar un mayor número de antenas en los terminales móviles (más de cuatro) con el objetivo de proporcionar una

buena ganancia por diversidad y por multiplexación. Mediante la diversidad espacial y la multiplexación espacial, se consigue una mayor capacidad del canal y una mejor confiabilidad en la comunicación. En resumen, un sistema MIMO masivo es mejor ya que resiste mejor el desvanecimiento por trayectos múltiples y mejora el rendimiento de datos [51].

Puesto que la banda C es la principal apuesta para el despliegue del 5G, se han buscado diseños de antenas MIMO que cubran el rango de 3600-3800 MHz (bandas 42 y 43). Los diseños publicados en el IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) apuntan a antenas híbridas y duales que operan en banda 3.5 GHz (generalmente en el rango de 3400-3600 MHz) y bandas 3G/LTE. Las antenas con frecuencias 3G/4G generalmente se ubican en los extremos inferior y superior del terminal quedando libre los laterales para antenas 5G. El sustrato más comúnmente empleado es el FR4 con dimensiones de 150 mm×80 mm×0.8 mm, que es tamaño típico de los smartphones con pantalla de 5.7 pulgadas.

En la Figura 25. Antenas para smartphones en banda C. izquierda) Antena bibanda 3.3-3.6 GHz / 4.8-5.0 GHz con MIMO 8x8 . derecha) Antena tribanda 824–960 MHz /1710–2690 MHz con MIMO 2x2 / 3400-3600 MHz con MIMO 8x8 se representan dos diseños de antenas para teléfonos móviles en banda C. El diseño a) presenta monopolos doblados que resuenan en las dos bandas de interés, las pérdidas de retorno (RL) están por debajo de -6 dB, el aislamiento es menor que -13.75 dB, la eficiencia total está en el rango de 45-70% (cumple con el requisito de aplicaciones para teléfonos inteligentes) y el ECC es menor que 0.1.

En el diseño b) el Array 5G está formado por 8 antenas idénticas en forma de PIFA, la cual tiene dos ventajas, la primera es que no ocupa lugar en la placa y la segunda que tiene menores valores de SAR debido a las bajas radiaciones hacia la cabeza del usuario. En la banda C la eficiencia está en el rango de 73%–88% y la ganancia va de 3.4–4.6 dBi, el ECC es menor que 0.35 y la capacidad del canal es 42 bps/Hz con un nivel de SNR de 20 dB.

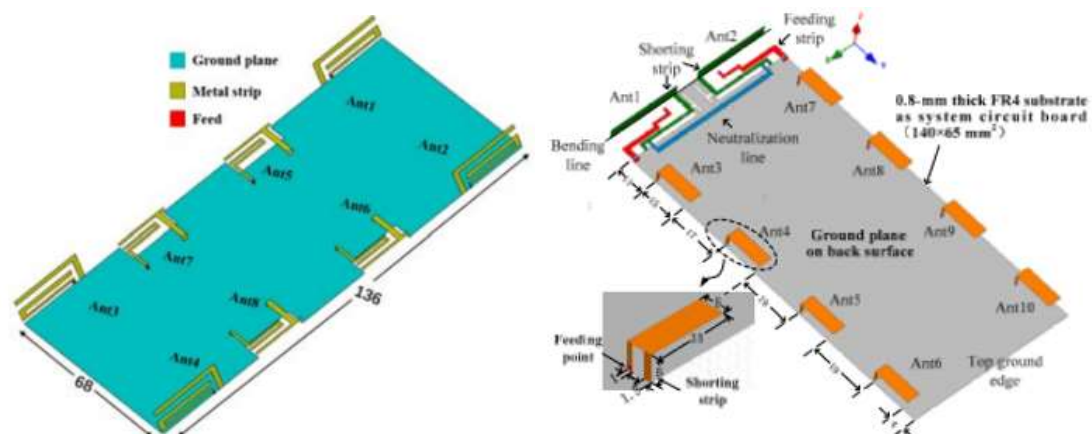


Figura 25. Antenas para smartphones en banda C. izquierda) Antena bibanda 3.3-3.6 GHz / 4.8-5.0 GHz con MIMO 8x8 [52]. derecha) Antena tribanda 824–960 MHz /1710–2690 MHz con MIMO 2x2 / 3400-3600 MHz con MIMO 8x8 [53].

Otros dos diseños posibles son mostrados en la Figura 26. Antenas para smartphones en banda C. c) Antena simple-banda 3400-3600 MHz, MIMO 8x8 . d) Antena tribanda 42/43 (3400-3800 MHz) con MIMO 8x8 y 46 (5150-5925 MHz) con MIMO 6x6, Antenas 1, 2, 3, 5, 7, 8, 10, 12 operan en 3.5 GHz y Antenas 1,2, 4, 6, 9, 11 operan a 5 GH. La antena c) está formada por elementos que emplean la forma QAL (*Quad Antenna Linear*) construida en base a una estructura *open-slot* de 1 x 60 mm² (60 mm equivale a 0.7 lambda en 3.5 GHz). Esta antena es simple-banda y cada elemento tiene una eficiencia superior al 45% y el ECC entre dos elementos es menor que 0.1. Para esta antena se realizó un estudio de la capacidad midiendo los niveles de SNR entre la antena del terminal y una antena de BTS diseñada separados a una distancia de 6 m [54].

De acuerdo con los resultados obtenidos en la antena c) se pudo observar que para el caso de MIMO 8x4. en un escenario real teniendo en cuenta los efectos de la mano, la capacidad medida alcanza los 22.4 bps/Hz lo cual se traduce a 4.4 Gbps en un BW de 200 MHz. Por tanto, es de esperar que para el caso de MIMO 8x8 la capacidad del canal esté por encima de los 30 bps/Hz, y en 200 MHz alcance los 6 Gbps lo cual es un valor muy prometedor para aplicaciones 5G.

La antena d) está compuesta por 3 antenas distintas: en forma de π invertida, de ranura abierta en forma de L invertida larga y de ranura abierta en forma de L invertida corta. La capacidad obtenida es de 34 y 26.5 bps/Hz en bandas 42/43 y 46 respectivamente.

Muchos otros diseños han sido presentados como [55, 56, 57, 58], todos estos con el objetivo conseguir una antena de pequeñas dimensiones para ajustarse a los tamaños de los teléfonos actuales, que cubra la banda 3.5 GHz, con alto aislamiento entre elementos (mayor que 12 dB), un ancho de banda por encima de 100 MHz, una ganancia aceptable y un nivel de ECC bajo para conseguir un buen uso del MIMO masivo.

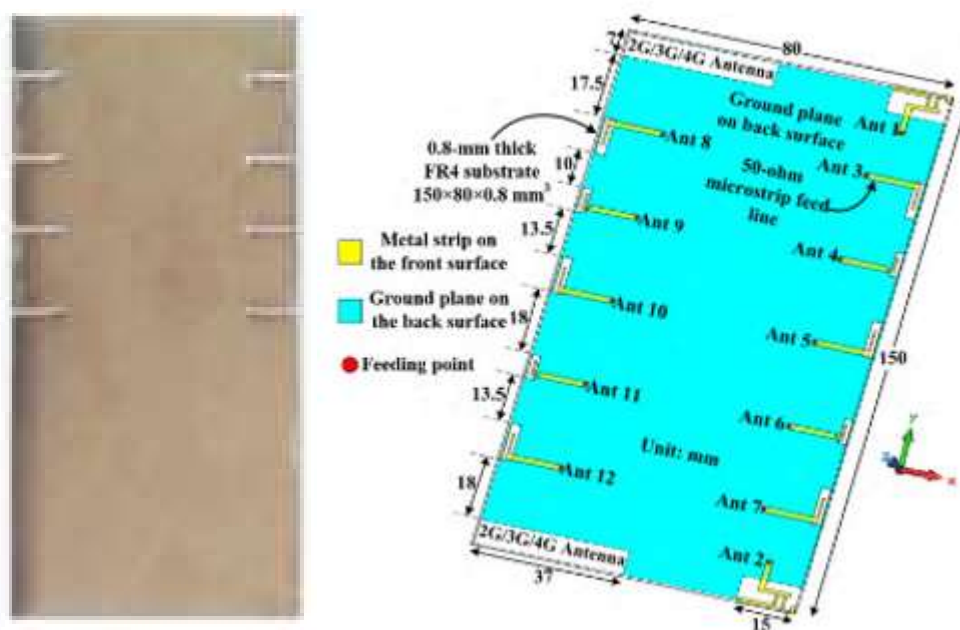


Figura 26. Antenas para smartphones en banda C. c) Antena simple-banda 3400-3600 MHz, MIMO 8x8 [59]. d) Antena tribanda 42/43 (3400-3800 MHz) con MIMO 8x8 y 46 (5150-5925 MHz) con MIMO 6x6, Antenas 1, 2, 3, 5, 7, 8, 10, 12 operan en 3.5 GHz y Antenas 1,2, 4, 6, 9, 11 operan a 5 GHz [60].

1.10.2 Antenas para UE en bandas milimétricas

El diseño de las antenas para el 5G se ha enfocado en bandas altas como son 28 GHz y 39 GHz. Estas frecuencias tan altas permiten añadir más elementos al array puesto que a más frecuencia menor λ y por tanto menores dimensiones. En [49] vemos una simulación de una antena de parche *microstrip* en *Low Temperature Cofired Ceramic* (LTCC) en estas bandas.

La transición coaxial perpendicular es la más adecuada para aplicaciones de *mmWave*, ya que se consiguen RL por debajo de los 14 dB y unas pérdidas de inserción menores a 0.4 dB en el rango entre DC y 40 GHz. En [49] se diseñó un parche de *microstrip* alimentado por coaxial impreso en el sustrato LTCC para obtener una antena de 64 elementos, es decir 8 columnas, cada columna con 8 parches (Figura 27. Array de antenas *microstrip* en *mmWave* para 38 GHz).

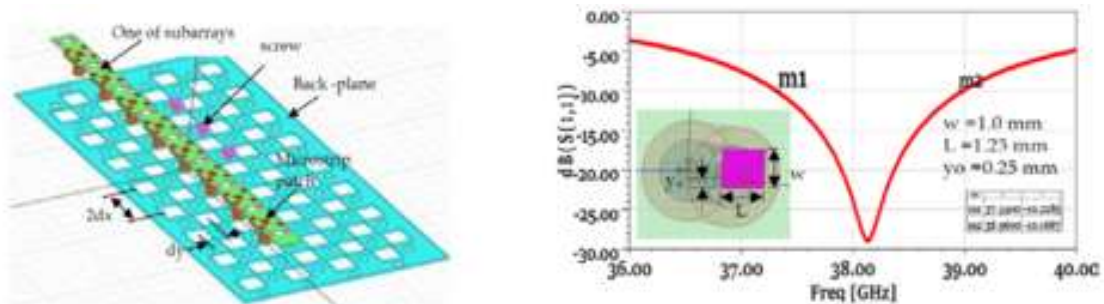


Figura 27. Array de antenas *microstrip* en *mmWave* para 38 GHz [49].

El valor de dx y dy es de 5.5 mm y 8.5 mm respectivamente, de forma tal que el tamaño de la antena de 64 elementos es aproximadamente 88 x 68 mm. Se observa como al emplear bandas milimétricas es posible aumentar el número de elementos de antenas y por ende trabajar con configuraciones de MIMO masivo.

1.10.2.1 Multi User MIMO

Otra idea que se ha desarrollado es la posibilidad de crear antenas con haces direccionables por fase en la dirección de cobertura, lo que se conoce como MU-MIMO. MU MIMO de alto orden se refiere a tener un número elevado de antenas en el lado de la BTS para transmitir o recibir señales multiplexadas espacialmente hacia y desde un gran número de terminales [61]. Consiste en dedicar un subconjunto de *streams* MIMO disponibles a usuarios individuales o a grupos de usuarios mejorando la capacidad general. La Figura 28. MU-MIMO en smartphones para comunicaciones 5G. muestra cómo quedaría el diseño de una antena con estas capacidades de ajuste:

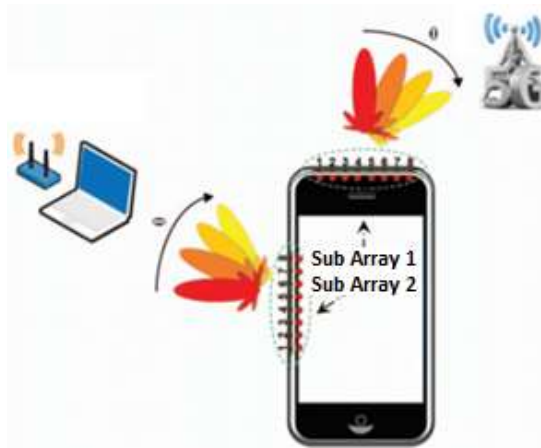


Figura 28. MU-MIMO en smartphones para comunicaciones 5G [62].

En este diseño cada array contiene 8 elementos que consisten en dipolos de dimensiones muy reducidas ($5.4 \times 0.65 \text{ mm}^2$) con ganancia por encima de los 4 dBi, RL $< -10 \text{ dB}$ en el rango de 27-29 GHz. La ganancia del array alcanza los 11 dBi (7 dB por encima de un solo dipolo).

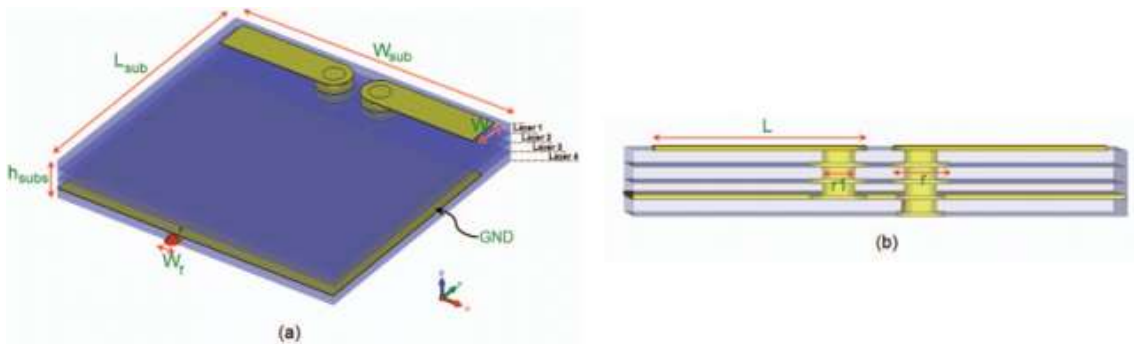


Figura 29. Geometría de un solo elemento de antena. a) vista 3D, b) vista lateral [62].

En la figura siguiente se observa la respuesta del haz de la antena al escanear el rango de 0 a 70° de elevación.

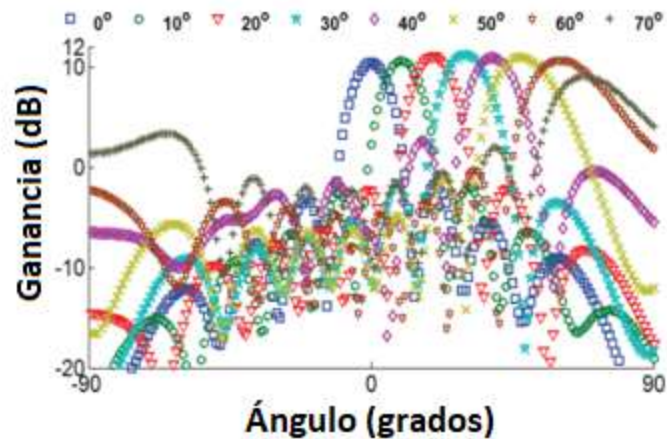


Figura 30. Ganancias de un dipolo no centrado a diferentes ángulos [62].

1.10.3 Antenas para BTS

Las antenas para estaciones base de telefonía móvil han experimentado una evolución en los últimos años. En los 90 donde sólo había 2G las antenas eran monobanda GSM900, luego en el año 2000 con el despliegue del 3G se hicieron multibanda y las señales se combinaban y se amplificaban por medio de amplificadores montados en torre (TMA) [63, 64, 65]. Alrededor del año 2011 se comenzaron a colocar elementos en lo alto de la torre llamados RRH (*Remote Radio Head*) que se conectaban a la banda base con fibra óptica y a la antena por cable de cobre. En 2015 se comenzaron a utilizar antenas activas (AA) que integran el RRH y la antena en un mismo elemento. En 2017 se comenzaron a utilizar antenas activas multibanda (MIMO) que integran el RRH y la antena en un mismo elemento. En 2020 se comenzaron a utilizar antenas activas multibanda (MIMO) que integran el RRH y la antena en un mismo elemento.

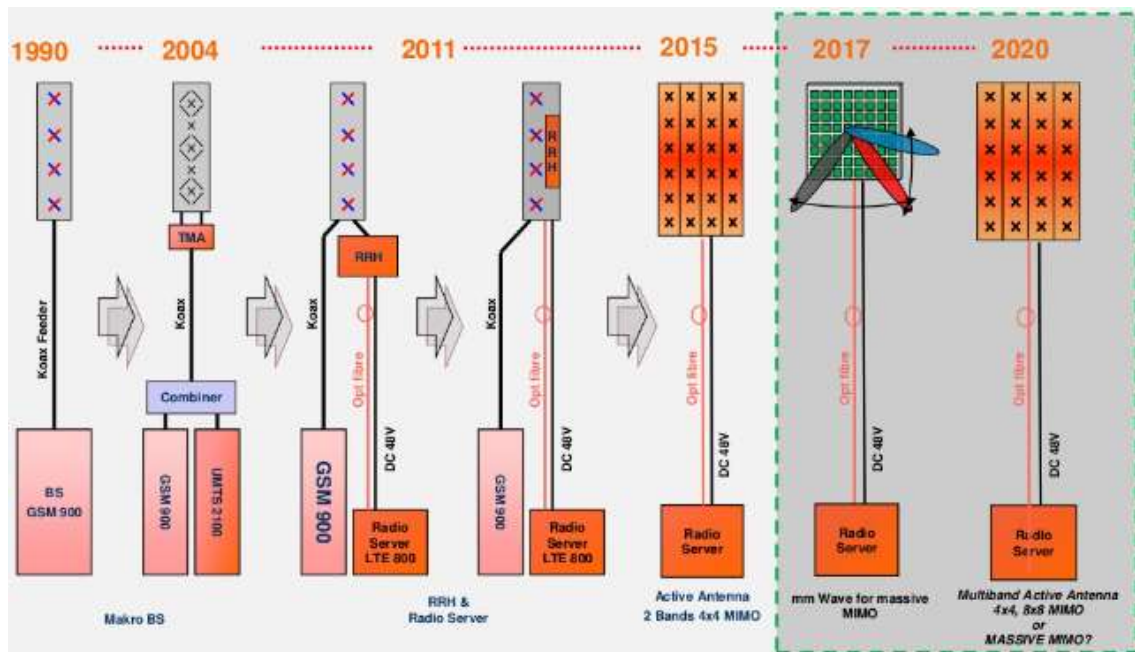


Figura 31. Evolución de las antenas, desde pasivas a activas [66].

La aparición de LTE trajo consigo la necesidad de desplegar antenas multibanda y multi-tecnología. Además, el aumento de la demanda de capacidad hizo que emplear MIMO fuera un aspecto fundamental. Para satisfacer las velocidades actuales se introdujo el concepto de antenas con MIMO Masivo que no ha tenido mucho despliegue hasta la aparición del 5G. Estas antenas además permiten conformación del haz hacia los usuarios. Las antenas activas (AAs) ha sido otro paso en la evolución de las antenas, estas integran la RRH dentro del radomo consiguiendo que las pérdidas por los cables sean nulas. Pasando de ver la antena como un elemento pasivo a ser un activo.

Actualmente la red está formada por antenas que soportan las bandas LTE 800, GSM/UMTS 900, GSM/LTE 1800, UMTS 2100 y LTE2600. Como se vio en el apartado 1.6.2 los operadores se reparten el espectro disponible en estas bandas para ofrecer el servicio a sus clientes, y el máximo BW que disponen es de 20 MHz, lo cual es insuficiente para algunas de las aplicaciones NR. De modo que existen dos opciones para poder ofrecer un servicio 5G:

- Incorporar las bandas 5G a las antenas actuales, sin MIMO Masivo, puede ser MIMO de alto orden 8T8R con bandas de operación NR: 700 MHz, 1500 MHz (Figura 34. Antena Commscope de 8 puertos con 1 array LB, 2 arrays UHB y 1 array L .).

- Añadir una antena en la torre que cubra las bandas 5G además de la actual con 2G/3G/4G. Puede ser una antena activa (Figura 42. Antena Activa Airscale de Nokia con MIMO Masivo 64T64R .), o una antena pasiva con MIMO o MIMO Masivo con bandas de operación NR: 3.5 GHz (Figura 35. Antena Commscope de 4 puertos con 2 arrays 3.5 GHz .) o *mmWave* (Figura 37. Tecnologías de antena para operar a 28 GHz. a) Radiadores impresos en placa. b) Guía de onda. c) LTCC .).



Figura 32. Antena MIMO Masivo vs antena tradicional con 8T8R.

Sin embargo, como es de esperar, no todas las bandas 5G tendrán la misma finalidad. Por debajo de 3 GHz lo más probable es que utilice un espectro pareado FDD que serviría para ofrecer una cobertura de área amplia de servicios 5G que no son compatibles con LTE. Podría emplearse un nuevo espectro como la banda de 700 MHz o un reajuste (*re-farming*) de una banda existente como 2100 MHz. Luego de que salga a subasta, se espera que la banda 700 MHz debido a su gran alcance se emplee en estaciones macro rurales para ofrecer cobertura 5G, como lo hace la banda 800 MHz en LTE. Y la banda L (1.5 GHz) sería para reforzar la capacidad del enlace descendente en entornos urbanos. Ambas bandas se pueden integrar, con relativa facilidad, a las antenas actuales, la banda 700 MHz formaría parte del array LB (Low Band) que ya incluye el 2do DD y va desde 790-960 MHz (bandas 800/900) y la banda L, o bien se incluiría en el array UHB (Ultra High Band) que va de 1695-2690 MHz (bandas 1800/2100/2600) o se añadiría como un array independiente en el panel.

En el rango de 3 a 6 GHz lo más probable es que se utilicen portadoras anchas en espectro no apareado TDD. Se utilizaría para proporcionar servicios 5G en áreas urbanas y se desplegaría como un sistema independiente (SA) o como un sistema no autónomo bajo el control de LTE (NSA). La banda pensada y pionera en Europa es la de 3.5 GHz e irá en un panel independiente y acompañado de MIMO Masivo o antenas activas.

Por su parte, las bandas milimétricas, por encima de 6 GHz y muy probablemente por encima de 24 GHz, se utilizarían para proporcionar capacidad en áreas urbanas densas como un complemento a otras bandas y también como un sistema independiente para proporcionar acceso inalámbrico fijo (FWA, *Fixed Wireless Access*).

La ganancia deseable de las antenas de BTS es del rango de 15 a 18 dBi, y deben cumplir con los requerimientos de aislamiento entre puertos, PIM, ROE, entre otros, que conduzcan a una red optimizada.

La Figura 33 muestra un ejemplo de antena para BTS con las bandas actuales 2G/3G/LTE. Con esta antena un operador podría tener MIMO 4x4 en LB y MIMO 8x8 en UHB, sin embargo, debido a las limitaciones actuales tanto de la tecnología como del poco espacio disponible en las torres, se opta por compartir las antenas entre dos o más operadores. Así que un operador con esta antena podría quedarse para sí con dos arrays UHB para tener MIMO 4x4 en UHB y dar a otro operador los otros dos arrays UHB, y quedarse con un array LB para tener MIMO 2x2 y ceder el otro.



Figura 33. Antena Commscope de 12 puertos con 2 arrays LB y 4 arrays UHB [67].

En caso de incluir la banda NR 700 MHz sería cuestión de colocar un combinador y tendría MIMO 4x4 (en caso de no compartir) o MIMO 2x2 (en caso de compartir). Para la banda L situada en un array independiente habría dos conectores 4.3-10.

Los puertos AISG se emplean para inclinar eléctricamente el tilt, se conoce como RET (*Remote Electrical Tilt*) a la posibilidad de dirigir el haz en el plano vertical para así apuntar a la zona de cobertura. Las varillas que se observan en la Figura 33 indican la inclinación del haz desde 0° (el horizonte) hasta 10-14° (hacia abajo).

Esta antena de la Figura 34 podría emplearse para la NR, su configuración permite MIMO 4x4 en bandas LTE1800 / UMTS2100 / LTE2600 (puertos amarillos), MIMO2x2 en bandas NR700 / LTE800 / 2G900 (puertos rojos) y MIMO 2x2 en banda L (puertos verdes).

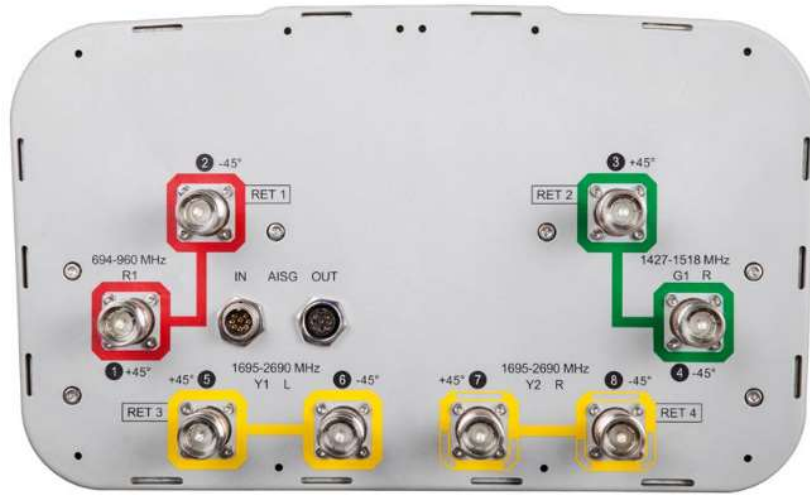


Figura 34. Antena Commscope de 8 puertos con 1 array LB, 2 arrays UHB y 1 array L [67].

La siguiente antena es un modelo simple banda 3.5 GHz con MIMO 4x4:



Figura 35. Antena Commscope de 4 puertos con 2 arrays 3.5 GHz [67].

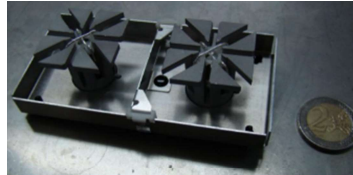


Figura 36. Tecnología con radiadores en 3.5-6 GHz [66].

En bandas milimétricas se consiguen arrays con más elementos de antena, la siguiente figura muestra las diferentes técnicas empleadas:

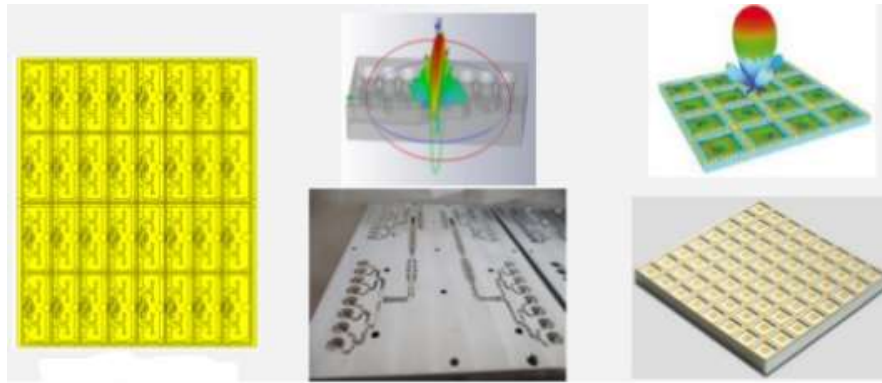


Figura 37. Tecnologías de antena para operar a 28 GHz. a) Radiadores impresos en placa. b) Guía de onda. c) LTCC [66].

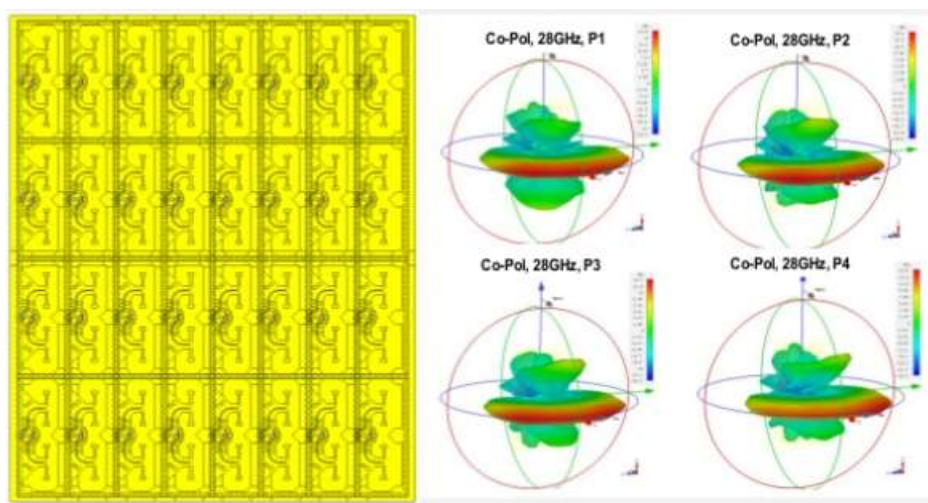


Figura 38. Array de 8x4 elementos de 28 GHz [66].

La opción de colocar una segunda antena en el mástil que cubra las bandas 5G es complicado. Como es de esperar el espacio en la cima de la torre es limitado dado que muchas ya son compartidas por varios operadores. En busca de soluciones se han desarrollado antenas híbridas LTE/5G, que operan en las bandas LTE con MIMO de orden 2 o 4, y en 5G 3.5 GHz con MIMO Masivo. El problema de este diseño es que las antenas activas disipan calor y habrá que analizar si es factible este tipo de diseño.



Figura 39. Antena tradicional 2G/3G/LTE vs Antena Activa [68].

1.10.3.1 MIMO Masivo

MIMO Masivo no es más que una extensión del MIMO tradicional, donde se emplea un mayor número de antenas (por lo general más de 8). La idea de emplear este tipo de antenas para el 5G parte de las limitaciones de cobertura de las bandas milimétricas. Al tener un radio de cobertura de metros, en lugar de kilómetros, una alternativa es emplear mayor número de antenas para conseguir haces más directivos y por ende mayor ganancia. El MIMO masivo mejorará la capacidad y entenderá la cobertura de la celda.

1.10.3.2 Full Dimension MIMO o 3D beamforming

El *Full Dimension* MIMO (FD-MIMO) es una de las tecnologías claves en 5G. Ha sido estudiada por el 3GPP para los sistemas LTE-A con el fin de aumentar el *throughput* con respecto al LTE convencional. Los sistemas FD-MIMO permiten que la precodificación dinámica y adaptativa se realice de forma conjunta en todas las antenas del array consiguiendo haces direccionales en azimut y elevación a una gran cantidad de usuarios. Puede ser empleada en conjunto con las AAs [61]. Por lo general la antena se conforma por 64x64 elementos o más. A diferencia de CoMP (*Coordinated MultiPoint*) y CA, un sistema FD-MIMO es capaz de mejorar el rendimiento de la red sin la necesidad de tener un sistema *backhaul* muy capaz o un amplio rango de frecuencias.

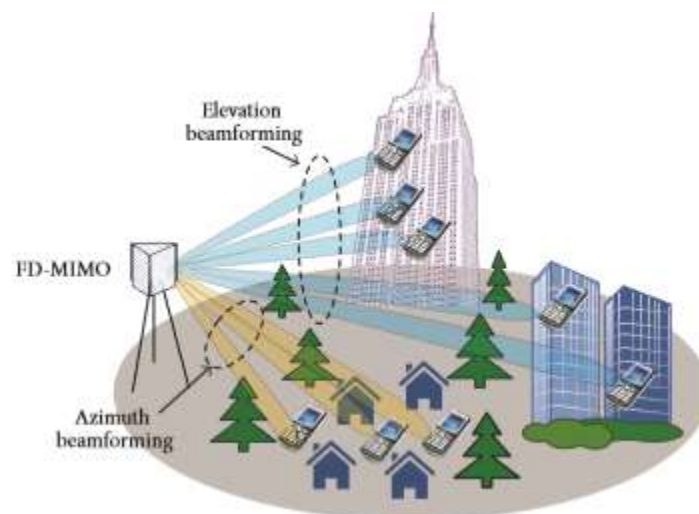


Figura 40. Diagrama conceptual de un sistema FD-MIMO realizando MU-MIMO [69].

1.10.3.3 Antenas Activas (AAs)

Como se vio anteriormente, a mayores frecuencias se incrementan las pérdidas de propagación en el aire, pero también las pérdidas en los *feeder* (cables coaxiales) aumenta. El coeficiente de atenuación de un coaxial es una función de la frecuencia de la señal y la construcción física del cable, a mayor frecuencia mayor atenuación. Esto conlleva a una degradación en la sensibilidad del receptor que se compensaría empleando elementos con una menor cifra de ruido (NF, *Noise Figure*) o incrementando la potencia transmitida. Una solución a estos problemas es el empleo de AAs, donde los elementos RF se colocan pegados a la antena con lo cual la NF total del sistema mejora ya que la ganancia se encuentra en la primera etapa (fórmula de Friss). Resumiendo, una AA es la integración de la parte radio (RRH) y la antena en una misma unidad física.

Los elementos que suelen componer la antena activa son: un amplificador en DL o un LNA (amplificador de bajo ruido) en UL, un filtro pasa banda, un adaptador de fase, y un combinador en UL o divisor en DL. Esta compactación de los elementos, con el amplificador cerca de la antena es ideal para entornos comprometidos de señal. La instalación es fácil ya que sólo requiere conexión al nodo con fibra, sin coaxiales, ni TMAs, ni combinadores, ni RRH. La desventaja que presentan es que al juntar la RRH y la antena en caso de avería los costes son mayores.

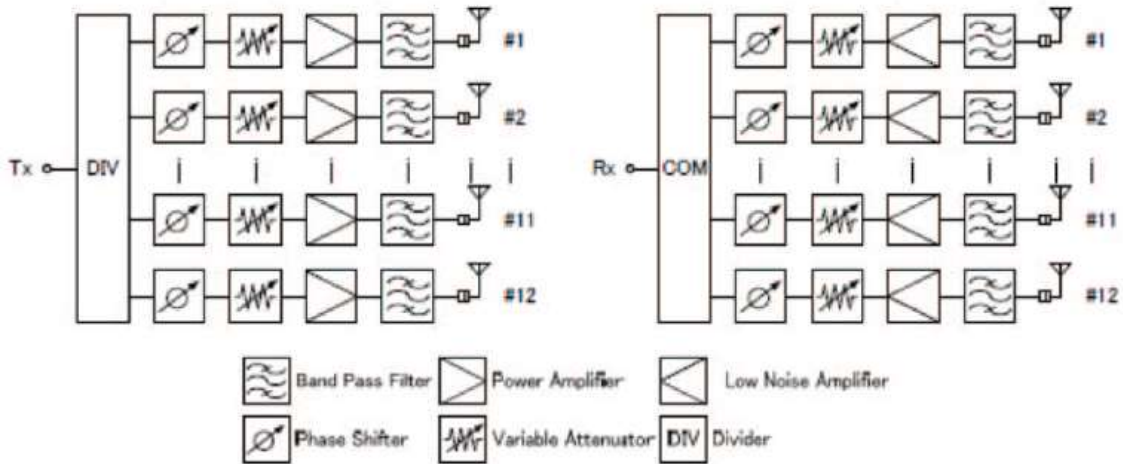


Figura 41. Elementos RF que componen una Antena Activa [70].

La siguiente figura muestra un ejemplo de antena activa con 64 elementos (8 filas x 8 columnas). Este tipo de antenas se emplearán para aumentar la capacidad de los *hotspots* y mejorar la penetración en interiores, al tiempo que proporcionan una cobertura extendida. Además, mejoran la eficiencia espectral, la eficiencia energética, y a nivel de celda consiguen una gran capacidad y un alto rendimiento de borde de celda. Son ideales para servir a las futuras aplicaciones de eMBB.

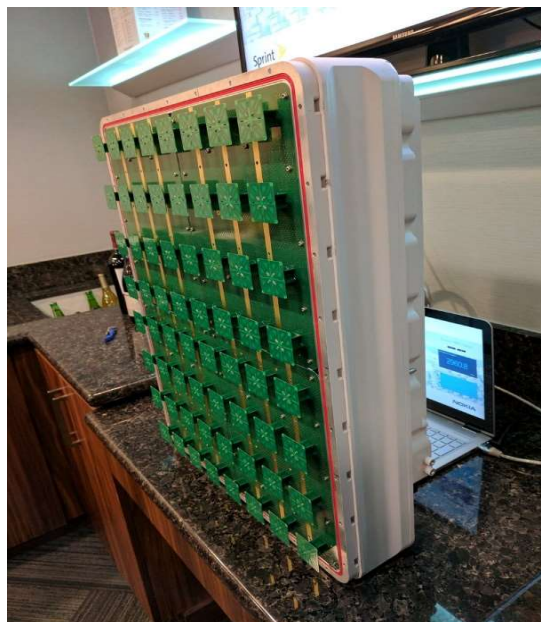


Figura 42. Antena Activa Aircscale de Nokia con MIMO Masivo 64T64R [71].

1.11 Chipsets 5G

A la par que evoluciona la tecnología 5G en estaciones base, los fabricantes de dispositivos móviles también han dado pasos apresurados para estar a la altura de las expectativas. Las principales marcas como HTC, LG, Samsung, Apple o Sony han anunciado que para 2019 ya tendrán los primeros teléfonos que soportan 5G. Pero detrás de estas grandes marcas se encuentran los fabricantes de los chipsets, entre los más conocidos están: Qualcomm Technologies, Intel, Nokia, Samsung Electronics, Xilinx, IBM y Qorvo.

Qualcomm, uno de los grandes fabricantes de chipsets y módems, ya ha anunciado el Snapdragon X50 5G que soportará hasta 5 Gbps de velocidades de descarga y bandas milimétricas [72]. Este modem emplea 4 módulos de la familia de antena QTM052 combinado con la familia de antena QPM56xx que opera por debajo de 6 GHz para ofrecer todo un abanico de frecuencias. El módulo QTM052 integra un transceptor, un circuito integrado de control de potencia, componentes *front-end* RF y un array de antenas que soporta las bandas 26.5-29.5 GHz, 27.5-28.35 GHz, y 37-40 GHz con un BW de hasta 800 MHz y MIMO 2x2 [73].

El modem de Qualcomm soporta características de movilidad avanzadas incluidos el *beam forming*, *beam steering* y *beam tracking* para mejorar el rango de cobertura de las *mmWaves*. Y en el caso de no movilidad es capaz de reemplazar las conexiones por FTTH por FWA. Además, para soportar el modo de conectividad dual (LTE/NR) el modem se integra con el procesador Snapdragon y un modem Gigabit clase LTE.

Por su parte, el gigante de chips Intel que ya era proveedor de Apple con sus módems gigabit XMM 756 para LTE, a mediados de 2019 lanzará el modem XMM 8160 para 5G que se empleará en los iPhones. Intel indica que este modem soportará velocidades de hasta 6 Gbps y que será un modem multimodo, lo cual significa que soportará NR SA y NSA, así como 2G/3G/LTE en un sólo chip. Tendrá capacidad para un amplio rango de frecuencias entre los 600 MHz a los 6 GHz TDD/FDD y soportará bandas milimétricas [74].

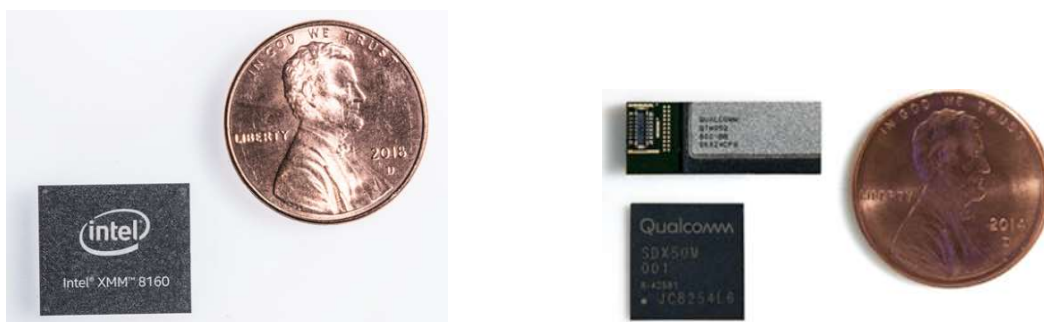


Figura 43. Modem Intel XMM 8160 [75] y Qualcomm SDX50 [76].

CAPÍTULO 2

Internet de las Cosas (IoT)

2. Internet de las Cosas (IoT)

2.1 Introducción

El Internet de las Cosas (IoT, *Internet of Things*) está creando un nuevo mundo “inteligente” en el que las personas pueden gestionar mejor sus vidas y las empresas sus negocios. La incorporación de IoT ayudará a tomar mejores decisiones de forma más rápida con la información oportuna y de mayor calidad. Para armonizar las necesidades de las personas con la industria las empresas deberán entender lo que los consumidores realmente quieren: soluciones inteligentes y servicios inteligentes que hagan su vida más fácil, saludable, segura, cómoda y eficiente. Se trata de encontrar soluciones IoT de seguridad, eficiencia energética, vida asistida y otras que aporten a la sociedad [77].

A raíz de la primera versión de las especificaciones NB-IoT y LTE-M definidas por el 3GPP en 2016, la cantidad de conexiones y redes en todo el mundo se ha acelerado. Tanto es así que, a finales de marzo de 2018, se lanzaron un total de 43 redes comerciales NB-IoT y LTE-M1 [78].

A medida que las conexiones globales activas de IoT aumentan se espera que las redes crezcan también con el fin de cubrir esta demanda. Según datos de *IoT Analytics*, Figura 44. Miles de millones de conexiones IoT globales, 2015-2025 ., se prevé un crecimiento en el número de dispositivos IoT conectados y activos de 7 a 22 billones entre 2018 y 2025. Y se espera que las redes de área amplia de baja potencia (LPWAN) sean un motor clave para este crecimiento.

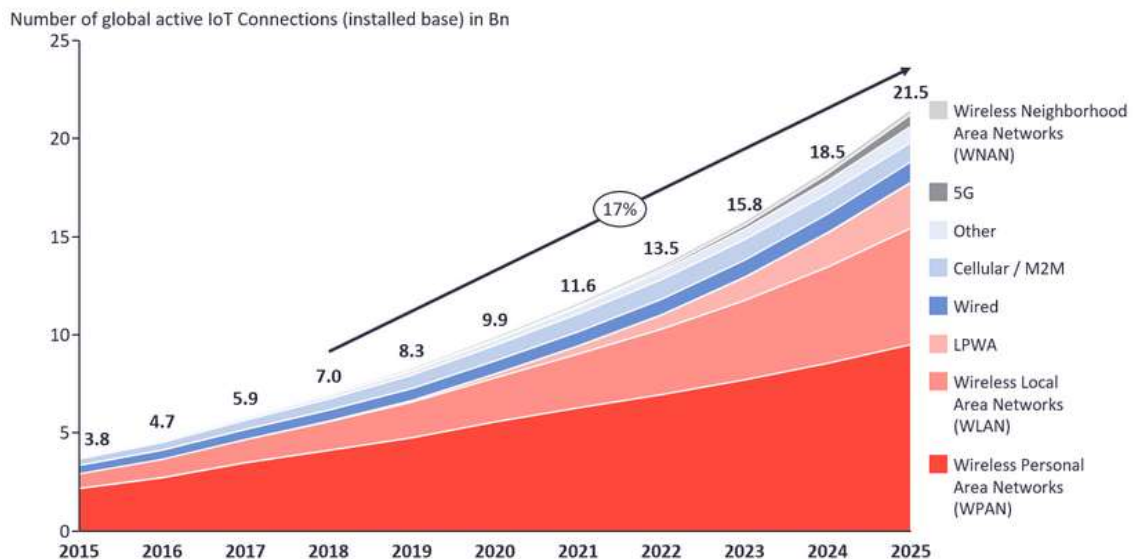


Figura 44. Miles de millones de conexiones IoT globales⁴, 2015-2025 [79].

⁴ No se incluyen ordenadores, *laptops*, teléfonos fijos o *tablets*. Se cuentan los nodos/dispositivos o *gateways* que concentran los terminales IoT, y no cada sensor. No se consideran las conexiones simples unidireccionales (como RFID o NFC). Cableada incluye Ethernet y Fielbuses; Celulares incluye 2G/3G/4G; LPWAN incluye redes de baja potencia de espectro licenciado y no licenciado; WPAN incluye Bluetooth,

El estado de adopción en de las redes LWPA se puede dividir en 9 segmentos de la industria: Transporte, Salud, Agricultura, Edificios e Infraestructuras, Hogar y consumo, Industriales, Minoristas, Ciudades inteligentes, Cadena de suministro y Logística, y Utilidades. Y dentro de estas industrias el mercado se divide en 5 tecnologías: Sigfox, LoRa, NB-IoT, LTE-M, Otras; 5 regiones: Asia Pacífico, Europa, América del Norte, Oriente Medio y África, América Latina; 2 tipos de espectro: Sin licencia y con licencia; 2 tipos de despliegue de red: redes públicas, redes privadas; y 2 tipos de ingresos: módulos IoT y planes de datos de conectividad. La Figura 45. Ingresos de la conectividad IoT por sector y ARPC total por conectividad a nivel mundial, 2013–2025 . muestra los ingresos producidos por las comunicaciones M2M (máquina a máquina) por sector a nivel global y en todos los valores aumentan cada año.

Cellular M2M connectivity revenue and ARPC, worldwide, 2013-2025

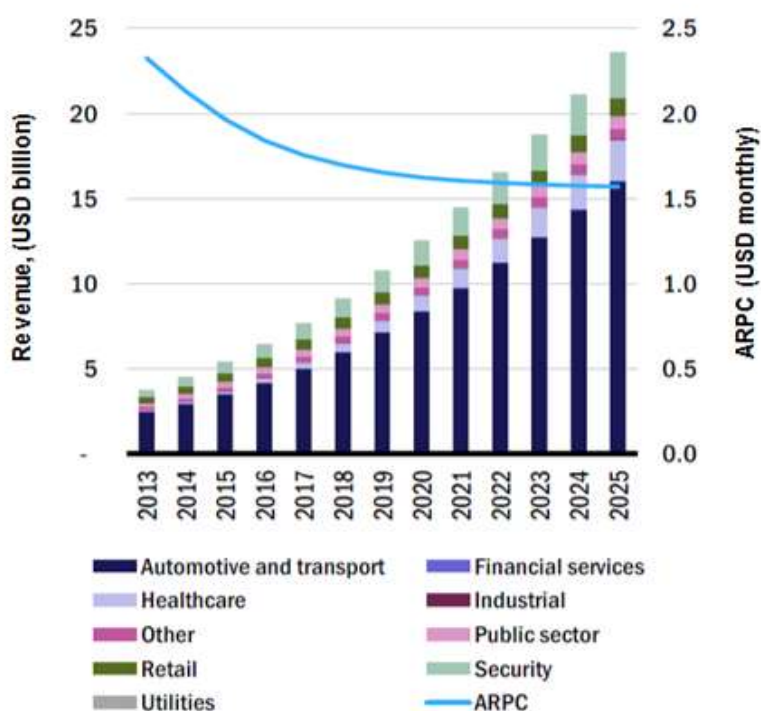


Figura 45. Ingresos de la conectividad IoT por sector y ARPC⁵ total por conectividad a nivel mundial, 2013–2025 [80].

Los despliegues de redes públicas mundiales y las implementaciones de redes privadas de IoT se están llevando a cabo rápidamente. Se prevé que la cantidad de dispositivos conectados haga crecer el CAGR un 109% por año hasta 2023, alcanzando más de mil millones de conexiones activas (Figura 46. Millones de conexiones globales LPWA, 2017-2023 .).

Hasta el día de hoy, el número de dispositivos móviles es predominante sobre la cantidad de portátiles, *tablets* o *routers*. Sin embargo, el número de dispositivos IoT seguramente superará los móviles cuando el 5G sea completamente lanzado y explotado. Según Kristin Paulin, Analista Senior de Ovum "El crecimiento de LTE no ha disminuido, ya que LTE agregó 239 millones de conexiones en todo el mundo en el

Zigbee, o similar; WLAN incluye Wi-Fi y protocolos similares; WWAN incluye redes malladas de largo alcance; Otras incluye satélite y otras redes no licenciadas de cualquier rango.

⁵ Average Revenue Per Connection (Ingresos medios por conexión)

tercer trimestre de 2018 (...) LTE continuará creciendo hasta bien entrado el 2022 y veremos una disminución en las suscripciones a partir de 2023 debido al crecimiento de 5G. En cualquier caso, GSM, HSPA y LTE se seguirán implementando en todo el mundo en 2023". Esta afirmación es muy real y constancia de ella es la actuación que van teniendo las operadoras españolas y de todo el mundo con las tecnologías radio.

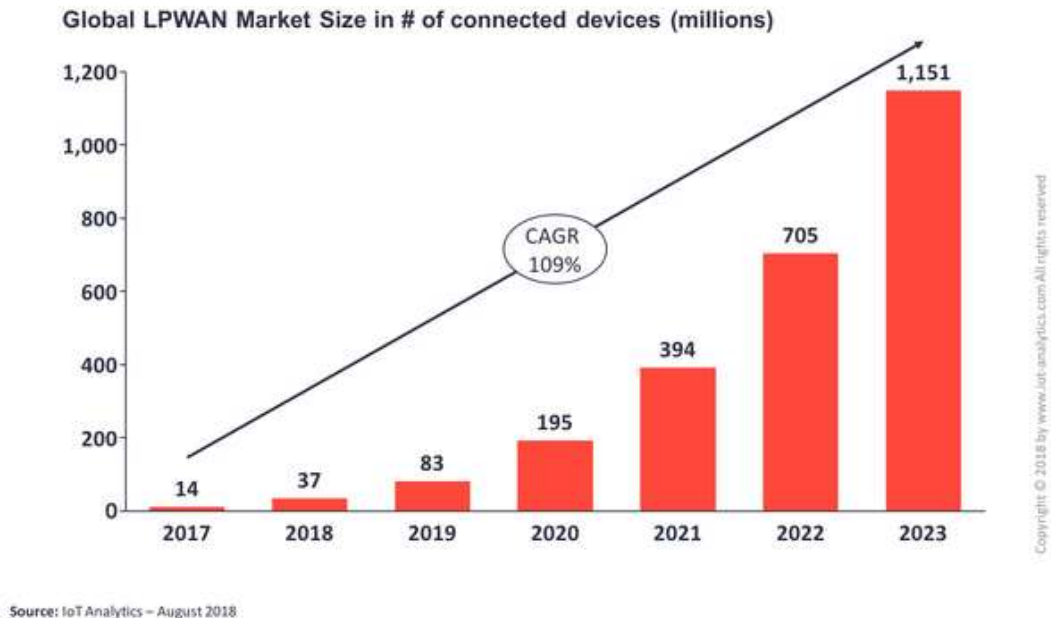


Figura 46. Millones de conexiones globales LPWA, 2017-2023 [79].

Los datos digitales están en todas partes, el VII Estudio anual del Universo Digital de EMC⁶ estimó que la cantidad total de datos digitales creados, replicados y consumidos en todo el mundo se duplica cada dos años y se predice que alcanzará los 40000 exabytes⁷ para el 2020. Sin embargo, según el estudio de EMC, solo el 22% de la información en el universo digital se considera datos útiles y en realidad se analiza menos del 5% de estos datos. Se prevé que con el IoT aumentarán los datos útiles a más del 35% para 2020 [77]. A estos datos útiles es a lo que hoy en día se le conoce como Big Data, y no es otra cosa que conjuntos extremadamente grandes de datos estructurados y no estructurados recopilados por numerosas fuentes y analizados para detectar patrones, tendencias y comportamientos utilizando tecnología avanzada como Hadoop y MapReduce. Pero hay otra faceta de los datos de IoT que es igualmente importante, y potencialmente útil: los datos pequeños.

Los conjuntos de datos pequeños se generan por dispositivos que tienen un fin muy concreto, estos pueden provenir de lecturas de temperatura en una casa, la velocidad en un coche o la frecuencia cardíaca en un marcapasos. Son datos que se suelen recopilar de forma periódica y que con el tiempo se vuelven bastante masivos, brindando por tanto mucha información.

⁶ Compañía fabricante de software y sistemas de almacenamiento de información, debe sus siglas a los apellidos de sus fundadores.

⁷ 1 terabyte es igual a 1,024 gigabytes, 1 petabyte es igual a 1,024 terabytes, y un exabyte es igual a 1,024 petabytes.

2.2 Estado del arte en LTE y enfoque 5G

Si bien es cierto que el 5G ofrece altas velocidades de datos y muy baja latencia y como se ha visto en el Capítulo 1 estas características constituyen imprescindibles para aplicaciones como eMBB y uMTC, para el caso de IoT no son requisitos. Los casos de uso de mMTC se caracterizan por ser tolerantes con la latencia y no exigir altas velocidades de transferencia de datos. Por lo que IoT no necesita grandes anchos de banda porque no requiere altas velocidades de transmisión de datos, ni transmitir grandes paquetes de datos, ni muy baja latencia. De modo que, todo esto puede ofrecerse perfectamente con una red LTE. Entonces, la cuestión es, ¿es realmente necesaria la red 5G para IoT? ¿La NR ofrece prestaciones que mejorarían las aplicaciones IoT?

Para soportar IoT, el 3GPP ha venido trabajando en distintas soluciones en la Rel-13 enfocadas en redes LTE y GSM, estas son:

- LTE-M, basado en LTE y que lleva a la introducción de equipos de usuario de categoría M1 que soportan velocidades de datos de hasta 800 kbps.
- NB-IoT, basado en LTE y que lleva a la introducción de equipos de usuario de categoría NB1. En agosto de 2015 el 3GPP comenzó a trabajar en una solución de banda estrecha denominada *Clean State CIoT* que concluyó con la introducción del NB-IoT. Puede desplegarse dentro de la banda LTE, en la banda de guarda o en espectro reasignado de GSM.
- EC-GPRS (GPRS de Cobertura Extendida), que es una evolución de la tecnología GPRS que busca una mejora de 20 dB de cobertura. En la Rel-13 se especifica como una solución IoT. Esta solución requiere de una red GSM.

La siguiente tabla muestra una comparativa entre estas tres soluciones en su actual desarrollo (Rel-13) para redes LTE y el comportamiento que tendrían en una red 5G.

Tabla 18. Comparativa entre redes celulares LPWA.

Parámetros	LTE-M	NB-IoT	EC-GPRS	5G
Rango de cobertura (exteriores)	<11 km	< 35 km	< 35 km	< 15 km
MCL	156 dB	164 dB	164 dB	164 dB
Espectro	Licenciado (700-900 MHz)	Licenciado (700-900 MHz)	Licenciado (800-900 MHz)	Licenciado (700-900 MHz)
Ancho de banda	1.4 MHz o compartido	200 kHz o compartido	2.4 MHz o compartido	compartido
Velocidad de datos	<800 kbps	<30 kbps	<10 kbps	<1 Mbps
Duración de la batería	>10 años	>10 años	>10 años	>10 años
Disponibilidad	2016	2016	2016	2020

Como el objetivo del presente trabajo es la red 5G, se analizarán NB-IoT y LTE-M dejando fuera del estudio EC-GPRS que como se dijo funciona sobre GSM. Respecto a LTE-M, los dispositivos NB-IoT tienen las ventajas de presentar un costo menor, un

ahorro de energía mayor, y un rango de cobertura mayor. Pero tienen la desventaja de que la velocidad de datos es menor puesto que el ancho de banda es menor.

La integración de IoT en 5G está aún en fase de estudio y la especificación está por completarse [81] pero la industria no frena las expectativas al respecto. La reciente demostración del 5G en los “XXIII Juegos Olímpicos de Invierno 2018” en Pionchang, Corea del Sur y en la “Super Bowl LII” en Minnesota, Estados Unidos ha despertado aún más el interés de los operadores por esta tecnología. Sin embargo, sigue habiendo mucha confusión con respecto al 5G y cómo las empresas pueden emplearlo en sus estrategias de IoT. Para las empresas dedicadas a la agricultura, la salud, el transporte, la energía y ciudades inteligentes puede que al mirar en el mercado de las redes actuales ya encuentren una solución basada en LTE LPWA como NB-IoT y LTE-M que cumpla con sus necesidades. LPWA ofrece “las cuatro C” para las aplicaciones de IoT (bajo Costo, bajo Consumo, amplia Cobertura y alta Capacidad) permitiendo conectar a Internet a los dispositivos como sensores, alumbrado público, cadena de suministro (seguimiento de paquetes) u otros activos móviles (dispositivos de monitoreo de pacientes, collares de perro, contenedores de envío), entre otros [82].

Debido a sus inicios NB-IoT y LTE-M son conocidos como tecnologías 4G, pero también juegan un rol importante en un sistema 5G para soportar casos de uso 5G LPWA. El 3GPP ha indicado que LTE-M y NB-IoT formarán parte de 5G y son la única tecnología 5G para respaldar los casos de uso de 5G LPWA en el futuro previsible. Además, ha indicado a la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU) que presentará las tecnologías NB-IoT y LTE-M como candidatos para cumplir con los requisitos 5G LPWA descritos en IMT-2020 y que serán abordados como parte de la evolución del 5G. Como la mayoría de los actuales dispositivos NB-IoT y LTE-M son actualizables por *firmware* para ser compatibles con las funciones 5G NB-IoT y LTE-M no habrá problema en hacer el traspaso de LTE a 5G. En resumen, IoT continuará su desarrollo como parte de la evolución de la NR y será tratada como parte de esta tecnología.

Las tecnologías 3G UMTS y 4G LTE usan diferentes redes centrales, lo que crea una complejidad y costos adicionales que llevan a los operadores a despreciar las tecnologías 3G para llegar a una sola red central. Este problema no existe para la red de núcleo 5G que puede conectarse al 5G NR, así como a 4G LTE. El 3GPP está estudiando la manera de conectar NB-IoT y LTE-M a la red central 5G para asegurar la compatibilidad. Esto permitirá que los sistemas 5G del futuro admitan LTE, NR, NB-IoT y LTE-M utilizando la misma red central y es otra señal de que NB-IoT y LTE-M están en el camino al 5G.

A igual que en LTE, en la NR se ha seguido con la filosofía de integrar IoT en las bandas del espectro existentes y donde haya ancho de banda disponible. Esto proporciona una ruta compatible para integrar NB-IoT y LTE-M en la NR, sin incluir LTE.

La operación NB-IoT y LTE-M en banda NR se logra al incluir una estructura de trama y una numerología 5G compatibles con LTE, una configuración de frecuencia dúplex 5G NR que permite alinear las subportadoras 5G, NB-IoT y LTE-M y soportar una compatibilidad hacia adelante que hace posible que un UE de 5G califique la coincidencia en torno a los recursos de radio que toman las señales NB-IoT y LTE-M no programadas dinámicamente. Estas características ayudan a lograr el rendimiento deseado de convivencia 5G NR, NB-IoT y LTE-M [78].

2.3 Protocolos IoT basados en IP

Cada dispositivo/nodo que se comunica en Internet requiere una dirección única, incluidos los dispositivos IoT. Hasta hace unos años existía solamente el protocolo IPv4 que permitía 4.3 billones de direcciones únicas con sus 32 bits. Pero esta cantidad se quedó escasa y en 1998 el IETF (*Internet Engineering Task Force*) definió formalmente el protocolo IPv6 que consta de direcciones hexadecimales de 128 bits que proporcionan 3.4×10^{38} direcciones únicas (más o menos 340 undecillón⁸ de direcciones IPs). Como se vio antes en la Figura 46. Millones de conexiones globales LPWA, 2017-2023 . se prevé que el número de dispositivos IoT alcanzará el billón en 2023, si sumamos a estos el resto de nodos que requieren una dirección IP la cantidad planteada por IPv6 ya no parece tan grande.

El IETF también ha creado un estándar llamado 6LoWPAN (*IPv6 over Low power Wireless Personal Area Networks*), que esencialmente permite que el tráfico IPv6 se transmita a través de redes de malla inalámbricas de baja potencia. 6LoWPAN está diseñado para nodos y aplicaciones que requieren conectividad inalámbrica a Internet a velocidades de datos relativamente bajas, como bombillas y medidores inteligentes.

2.4 Redes de corto alcance y baja potencia

El estándar 802.11x (Wi-Fi, de Wireless Fidelity) del IEEE es probablemente la opción más popular para redes inalámbricas domésticas y de negocios. Los estándares 802.11b, 802.11g y 802.11n que operan en la banda de 2.4 GHz están disponibles casi de forma global, con una velocidad de hasta 11 Mbit/s, 54 Mbit/s y 300 Mbit/s, respectivamente. También existe el estándar IEEE 802.11ac, conocido como WIFI 5, que opera en la banda de 5 GHz y que disfruta de una operatividad con canales poco interferidos. Esta banda de 5 GHz ha sido habilitada puesto que, al no existir otras tecnologías como Bluetooth, microondas, ZigBee, y WUSB que la utilizan se producen muy pocas interferencias. Por ejemplo, Bluetooth que también opera en 2.4 GHz ha actualizado a la versión 2.1 para evitar estas interferencias con Wi-Fi. Debido a que la frecuencia de 5 GHz es mayor, su alcance es algo menor en comparación con los estándares que trabajan a 2.4 GHz (aproximadamente un 10%) [83]. Sin embargo, para el caso de terminales IoT, Wi-Fi no es la opción global ya que presenta velocidades de transmisión bastante altas lo cual consume bastante batería. De ahí que se analicen otras opciones.

Muchos dispositivos IoT, particularmente en “hogares inteligentes”, trabajan a baja potencia y con baterías muy pequeñas que están diseñadas para durar años. Estos dispositivos transmiten muchos conjuntos de datos pequeños (analizados en el apartado Introducción) y, por lo tanto, no requieren altas tasas de transferencia de datos. En comparación, los dispositivos Wi-Fi que funcionan con batería normalmente deben cargarse todos los días porque requieren tasas de transferencia de datos de alta velocidad.

⁸ 36 ceros

Bluetooth es otra tecnología de comunicaciones de baja potencia y corto alcance. Está diseñada principalmente para comunicaciones punto a punto entre dispositivos inalámbricos en una topología de picoredes. En 1999, Bluetooth desafió a Wi-Fi en el campo de batalla inalámbrico. A pesar de su débil WEP⁹, Wi-Fi prevaleció en este conflicto y Bluetooth se especializó en tecnologías personales, como teléfonos inteligentes, auriculares, teclados y ratones inalámbricos. Sin embargo, Bluetooth ha continuado estandarizando soluciones con el anhelo de ser vista como una red, estas son: Bluetooth de baja energía (BLE) y Bluetooth Mesh. Los dispositivos BLE, también conocidos como Bluetooth Smart o Bluetooth 4.0+ consumen mucha menos energía que los dispositivos Bluetooth actuales y pueden acceder directamente a Internet a través de Protocolos IoT basados en IPN. Bluetooth Mesh es una extensión de BLE que permite la conectividad a un conjunto más grande de dispositivos independientes (como bombillas inteligentes) que trabajan juntos en una red de malla. Al igual que la malla de Wi-Fi 802.11s, Bluetooth Mesh es un protocolo orientado a conexión y, por lo tanto, debe superar los mismos desafíos de latencia. Por lo tanto, es poco probable que se adopte ampliamente en IoT.

The Thread Group es una alianza creada por Google/Nest, Samsung, ARM Holding y otros para crear un protocolo de red de malla inalámbrica IoT para soluciones de “hogar inteligente”. Es un estándar abierto, pero se requiere una membresía pagada en Thread Group para acceder a la especificación completa. El protocolo Thread aprovecha varios estándares, como IPv6, 6LoWPAN e IEEE 802.15.4 para crear una red inalámbrica de malla local direccionable por IP de hasta 250 dispositivos. De hecho, Thread es la versión comercial de 6LoWPAN, como lo es Wi-Fi de IEEE 802.11. Proporciona redes de malla redundantes seguras, de baja potencia, con conectividad directa a Internet y servicios en la nube para dispositivos domésticos inteligentes [77].

ZigBee es un protocolo de red de malla inalámbrica de bajo costo y bajo consumo basado en el estándar IEEE 802.15.4-2003 [84]. Mientras que Thread se lanzó por primera vez en 2015, Zigbee ha existido desde 2005 y hoy en día tiene una penetración de mercado mucho mayor. ZigBee es un protocolo dominante en el mercado de redes IoT de baja potencia, con una gran base instalada en entornos industriales y productos domésticos inteligentes, por ejemplo, los dispositivos Echo Plus de Amazon [85]. Sus especificaciones recientes están enfocadas a IoT. Algunas de estas son: ZigBee PRO que proporciona la base para IoT y las soluciones inteligentes para el hogar; ZigBee GreenPower que minimiza las demandas de energía con dispositivos de recolección de energía autoalimentados y dispositivos que requieren baterías de larga duración, como interruptores, botones de emergencia o pánico, y sensores; ZigBee IP basado en IPv6, permite el control de dispositivos de bajo consumo y bajo costo a través de Internet e incluye funciones de red y seguridad robustas, está enfocado a las soluciones de Smart Energy; ZigBee ZCAL (*Consolidation Application Layer*) se usa para describir la funcionalidad de los dispositivos IoT por ejemplo, control de encendido y lecturas de temperatura; y finalmente, ZigBee 3.0 que combina ZigBee Pro, GreenPower y ZCAL, e incluye un conjunto de métodos para comisionar nodos en una red para producir productos IoT completamente interoperables en una “casa inteligente” [77].

⁹ Protocolo de cifrado de datos, cifra los datos en su red de forma que solo un destinatario específico pueda acceder a ellos. WEP codifica los datos mediante una “clave” de cifrado antes de enviarlo.

La Open Connectivity Foundation (OCF), anteriormente el Open Interconnect Consortium (OIC), se creó en febrero de 2016 y es una de las organizaciones de estándares más grandes para conexiones IoT. La OCF actualmente cuenta con más de 400 compañías miembros, entre ellas CableLabs, Cisco, Electrolux, Intel, Microsoft, Qualcomm, LG y Samsung [86]. La OCF reúne iniciativas IoT anteriores de Intel (IoTivity de la OIC) y Qualcomm (AllJoyn de la Alianza AllSeen), ambos proyectos en gran parte complementarios y superpuestos de código abierto bajo la Fundación Linux.

A pesar de haber cierta competencia entre estas tecnologías por ocupar parte del mercado, al final se ha logrado un equilibrio y cada una tendrá una función complementaria en el mundo de las comunicaciones IoT. Wi-Fi para compartir y distribuir contenido, Bluetooth para reemplazo de cables y accesorios, Thread y ZigBee para redes de baja potencia de control y detección, y OCF en la capa de aplicación [77].

2.5 Redes de largo alcance y baja potencia

Si bien es cierto que el conjunto de dispositivos finales son parte importante de la red IoT, su valor depende de la calidad de los canales de comunicación M2M. Para muchas de las aplicaciones de hogar el uso de estándares de bajo alcance de cobertura, como Bluetooth, Wi-Fi o ZigBee es una solución suficiente. Sin embargo, para aquellos casos donde la distancia desde el terminal al *gateway* supere las decenas de metros, como ciudades inteligentes, es necesario una red de largo alcance.

El mercado de redes de largo alcance y baja potencia (LPWAN) se encuentra actualmente en una fase de adopción tecnológica caracterizada por un alto grado de fragmentación y una huella de red que está aún lejos de ser global. Sin embargo, han ido apareciendo actores principales que han hecho que el mercado se consolide alrededor de ellos. Existen dos enfoques disponibles en LPWAN, el primero basado en tecnología celular, fundamentalmente NB-IoT y LTE-M, y el segundo basado en redes propietarias, especialmente LoRaWAN y Sigfox.



Figura 47. Tipos de redes de área amplia y baja potencia [87].

Las redes de área amplia de baja potencia (LPWAN¹⁰, por sus siglas en inglés) ofrecen una nueva clase de tecnología inalámbrica diseñada específicamente para aplicaciones de IoT de pocos datos. Algunos de estos escenarios donde la transmisión de datos es mínima son: la atención médica, donde muchos dispositivos de monitorización de pacientes transmiten la condición de un paciente a un servidor, o en la agricultura, donde se envía datos meteorológicos o de condición del suelo, o en ciudades inteligentes,

¹⁰ Se usa LPWA para referirse indistintamente a la tecnología y LPWAN para la red

donde los sensores envían el nivel del contenedor de basura o de contaminación del aire. En todos existe el mismo factor común, muchos datos pequeños sin exigencia de latencia, lo cual se cubre con las cuatro C mencionadas antes y que se explican a continuación (Figura 48. Características principales de LPWAN).

- Bajos costes de tecnología, que se consiguen con bajos requerimientos RF de ancho de banda, antenas, velocidades, etc. Con la reducción de los costes se consiguen despliegues más amplios, lo cuales es conveniente teniendo en cuenta el gran número de dispositivos requeridos. Mejora el retorno de la inversión.
- Bajo consumo de energía, para conseguir que las baterías duren 10 años o más en campo. También permite disminuir los costes de despliegue y mantenimiento, y poder tener activa una red de millones de dispositivos. Es como si el dueño de los teléfonos móviles fuera el propio operador, y se tuviera que encargar de que funcionen bien, aparte del inevitable mantenimiento de la red.
- Amplia cobertura, para que las aplicaciones puedan conectarse a dispositivos en entornos varios como espacios subterráneos, interiores y entornos rurales.
- Alta capacidad de conexión, para poder conectarse a una gran cantidad de dispositivos en un área determinada.

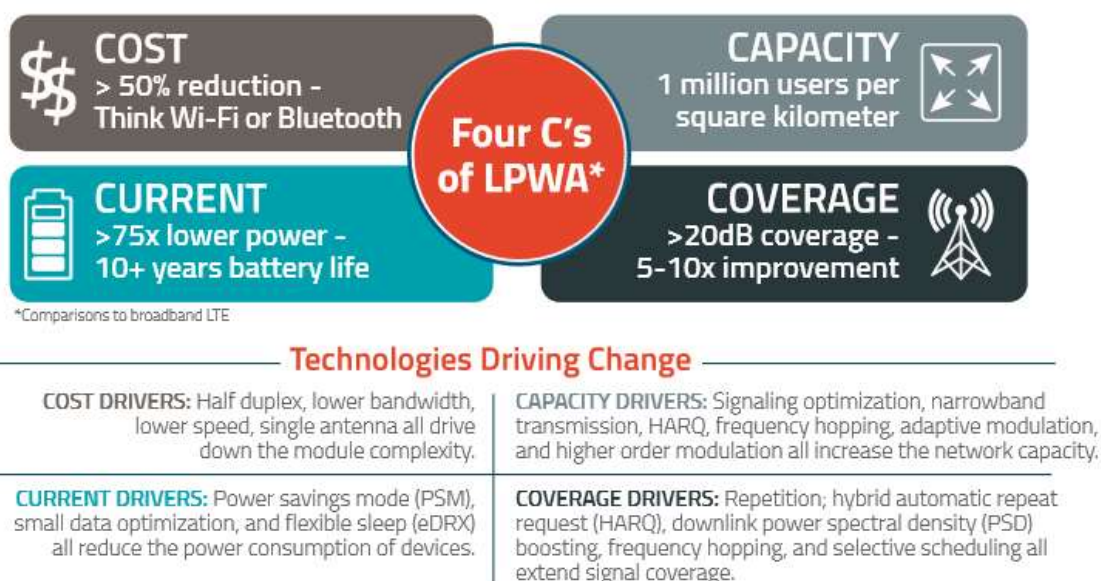


Figura 48. Características principales de LPWAN [87].

Además de las anteriores, otras características que presentan las redes LPWA son:

- Conectividad segura y autenticación fuerte
- Transferencia de datos optimizada para pequeños bloques de datos intermitentes
- Topología de red simplificada y despliegue
- Escalabilidad de red para actualización de capacidad

2.5.1 Dos tecnologías LPWA líderes: NB-IoT y LTE-M

Los principales operadores móviles, proveedores globales y desarrolladores están lanzando redes NB-IoT y LTE-M como parte integral de sus estrategias a largo plazo de 5G IoT. Las redes IoT que se desplegarán estarán gestionadas por un operador seguro y serán las basadas en el estándar 3GPP de LPWA en espectro licenciado. Con el 5G las redes permitirán ofrecer servicio a miles de millones de nuevos dispositivos que proporcionan conectividad completa de IoT.

LTE-M, Cat-M o LTE Cat-M1 son los términos conocidos para el estándar de tecnología LPWA de comunicaciones de tipo máquina LTE introducido por el 3GPP en la Release 13. Cat-M1 es la segunda generación de chips LTE para aplicaciones IoT, dado que anteriormente existía el Categoría 0. LTE-M permite la conexión masiva de dispositivos de baja complejidad, con un bajo consumo de energía y baja latencia. Proporciona una cobertura extendida reutilizando la banda existente LTE, usando parte del espectro LTE (*in-band*). Esto es una gran ventaja ya que la integración de Cat-M en redes LTE sólo requiere un parche de software y no requiere cambios en el hardware o en las antenas. También puede realizarse el despliegue de LTE-M en espectro independiente usando bandas dedicadas a esta tecnología. Al limitar el ancho de banda máximo del sistema a 1.4 MHz (a diferencia de los 20 MHz de Cat-0), Cat-M tiene casos de uso específicos en los que solo se requiere una pequeña cantidad de transferencia de datos.

IoT de banda estrecha (NB-IoT) o Cat-M2 es un estándar de tecnología radio introducido por el 3GPP también en la Release 13. Se caracteriza por una cobertura interior mejorada, compatibilidad con un gran número de dispositivos de bajo rendimiento, bajo consumo de energía y muy bajo costo. Las redes NB-IoT tienen baja sensibilidad de retardo y una arquitectura optimizada. Al igual que LTE-M, NB-IoT se puede implementar dentro de la banda LTE de un operador, o independiente para implementaciones en espectro dedicado. Además, debido al bajo ancho de banda que requiere, NB-IoT también se puede implementar en la banda de LTE. Algunos de las empresas que han prestado interés en esta tecnología son Huawei, Ericsson, Qualcomm y Vodafone, que han invertido en soluciones comerciales NB-IoT.

Tabla 19. Comparativa NB-IoT vs LTE-M [88].

Parámetros	NB-IoT	Cat-M
Estándar 3GPP	Release 13	
Rango de cobertura	20 dB o 164 dB MCL	
Duración de la batería	10 años	
Ancho de banda máximo	200 kHz	1.4 MHz
Desarrollo	En banda, banda guarda, Stand Alone	En banda
Velocidad de datos máxima	200 kbps	1 Mbps
Asignación de recursos	Preasignado	Dinámico
Potencia transmitida UE	23 dBm	20 dBm
Movilidad	No	Si
Tiempo Real	No	Si
Voz	No	Si

Requisitos de red	Mayormente actualizable por software	actualizable por software
-------------------	--------------------------------------	---------------------------

En general, las redes diseñadas para aplicaciones IoT son de bajo costo, utilizan velocidades de datos bajas, requieren una vida útil prolongada de la batería y en ocasiones operan en lugares remotos y de difícil acceso [78].

Aunque NB-IoT y LTE-M se han desarrollado para soportar redes IoT cada una cubre casos de uso diferentes (Figura 49. Casos de uso de NB-IoT vs LTE-M). En el caso de NB-IoT el ancho de banda de operación definido es muy bajo, 200 kHz, con lo cual las velocidades de datos son muy bajas, de centenas de kbps en DL y UL. NB-IoT está pensado para aplicaciones donde los dispositivos son estáticos, los datos transmitidos no son del tipo voz y no requiere intercambio en tiempo real, como puede ser el caso de sensores estáticos. Esto significa que las aplicaciones que requieran mayores velocidades y movilidad en los terminales finales deberán optar por la tecnología LTE-M. Como observa en la Figura 49 los casos de uso de LTE-M son más extensos y abarcan soluciones NB-IoT. En resumen, si se quieren abaratar costes es mejor NB-IoT, pero si el escenario exige prestaciones como voz, movilidad o mayores tasas de transferencias de datos habrá que optar por LTE-M.

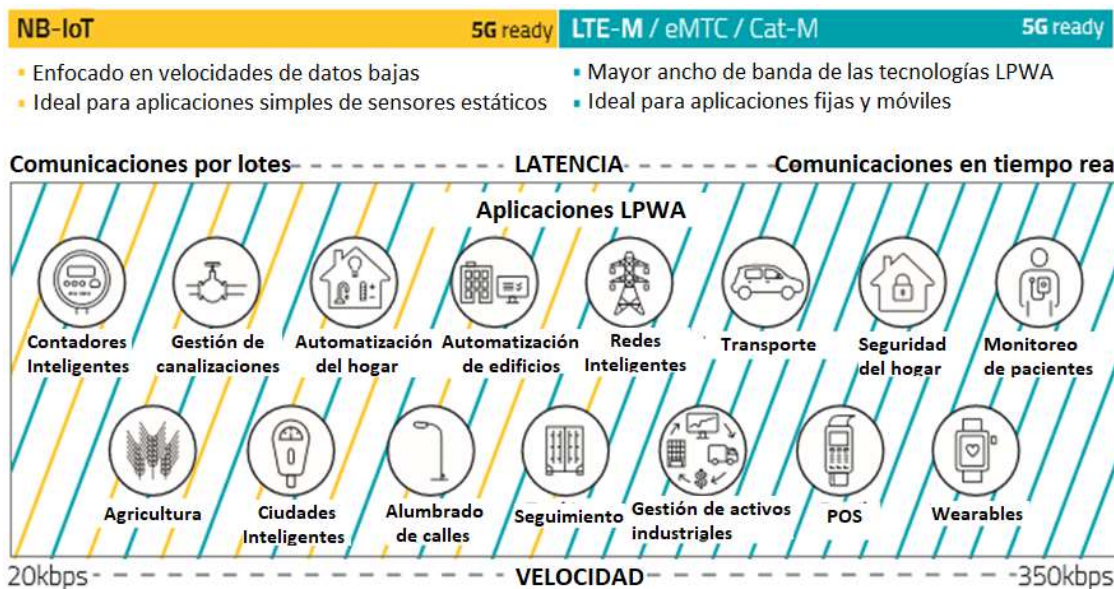


Figura 49. Casos de uso de NB-IoT vs LTE-M [87].

2.5.2 LPWA propietarias: LoRA, Sigfox y otros

LoRaWAN (*Long Range WAN*) es el estándar de protocolo abierto LPWA desarrollado por LoRa Alliance [89] que permite el funcionamiento de la tecnología LoRa. Permite que los dispositivos alimentados por batería se conecten a una red IoT durante un largo período de tiempo, utilizando un ancho de banda bajo (<500 kHz), en una red regional, nacional o global. Está pensado como un estándar de bajo coste con fácil acceso, ya que no exige suscripciones o contraseñas de acceso como Wi-Fi. Semtech es el productor de módulos y tecnologías LoRa, y ha estado desplegando redes LoRa en 15 ciudades de los EE.UU, en colaboración con Comcast.

Un caso de uso de esta tecnología es la red de sensores¹¹ de inundación en el río Calder de Calderdale, Reino Unido. El objetivo del proyecto era mantener a las personas mejor informadas sobre el nivel del río y avisar ante posibles riesgos de inundación (Figura 50. Imágenes del proyecto Calderdale con LoRaWAN .). La distancia desde los sensores hasta el *gateway* alcanza los 15 km en línea de visibilidad directa [90].

La Alianza LoRa define la arquitectura de la red LoRa como una topología en estrella donde los *gateways* funcionan como puentes que retransmiten los mensajes entre los dispositivos IoT y el servidor central. La conexión entre los *gateways* y el servidor se hace mediante el protocolo IP, mientras que los dispositivos y el *gateway* se conectan por red inalámbrica en espectro no licenciado. La comunicación generalmente es bidireccional, pero también soporta operaciones multidifusión (*multicast*), lo cual permite actualizaciones de software mediante enlace radio u otros mensajes de distribución masiva para reducir el tiempo de comunicación. Además, la comunicación se distribuye en diferentes canales de frecuencia y velocidades de datos, y la selección de esta última se realiza en función de la distancia y la duración del mensaje. Las tasas de datos de LoRaWAN varían entre 0.3 y 50 kbps. Debido a la tecnología de espectro expandido, las comunicaciones con diferentes velocidades de datos no interfieren entre sí y crean un conjunto de canales virtuales, lo que aumenta la capacidad del *gateway* [91].

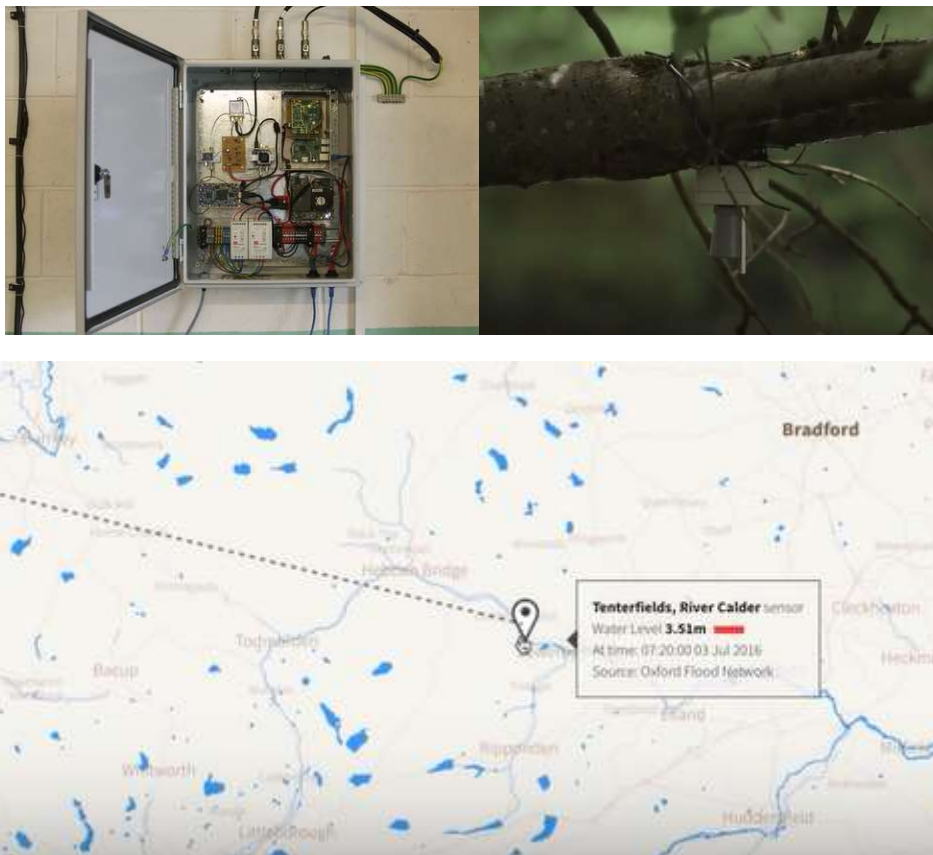


Figura 50. Imágenes del proyecto Calderdale con LoRaWAN [92].

Con el objetivo de maximizar la vida útil de la batería de los terminales IoT y la capacidad general de la red, el servidor de red LoRa emplea un esquema ADR (*Adaptive Data*

¹¹ El piloto en 2016 comenzó con un sólo sensor.

Rate) que administra la velocidad de datos y la salida de RF para cada dispositivo final individualmente.

Para abordar su amplia gama de aplicaciones y sus diversas necesidades LoRa presenta tres clases de dispositivos finales:

- Clase A: Dispositivos finales bidireccionales.
Estos dispositivos permiten comunicaciones bidireccionales en las que la transmisión UL de cada dispositivo final es seguida por dos ventanas de recepción DL cortas. Tiene la ventaja de ser la opción que menos potencia consume ya que solo actúa cuando emite y unos instantes después para recibir, pero tiene la desventaja de que el servidor debe esperar porque se abra la ventana de recepción del dispositivo para enviarle cualquier tipo de información.
- Clase B: Dispositivos finales bidireccionales con ranuras de recepción programadas
Además de las ventanas de recepción aleatoria del Clase A, estos dispositivos abren ventanas de recepción adicionales en horarios programados. El *gateway* envía una señal de sincronismo para asegurarse que el dispositivo abra la ventana en el tiempo programado. Tiene la ventaja de que se conoce el estado del terminal más a menudo.
- Clase C: Dispositivos finales bidireccionales con ranuras de recepción máximas
Estos dispositivos tienen las ventanas de recepción casi continuamente abiertas, ya que solo se cierran durante la transmisión. Como es lógico consumen mayor potencia, por lo que la batería dura menos.

Actualmente existen dos opciones de red LoRa, la red privada y la red pública. La privada puede ser administrada individualmente y comprende los dispositivos finales, *gateways* LoRa y un servidor de red LoRa. Mientras que la red pública es mucho más escalable puesto que incluye la red pública de un operador de telecomunicaciones que integraría los *gateways* en sus torres y puede tener un alcance nacional. Algunos de los proveedores actuales de redes LoRa son Bouygues, Orange Francia, KPN, Vodafone y Swisscom en Europa, y SingTel en Asia.

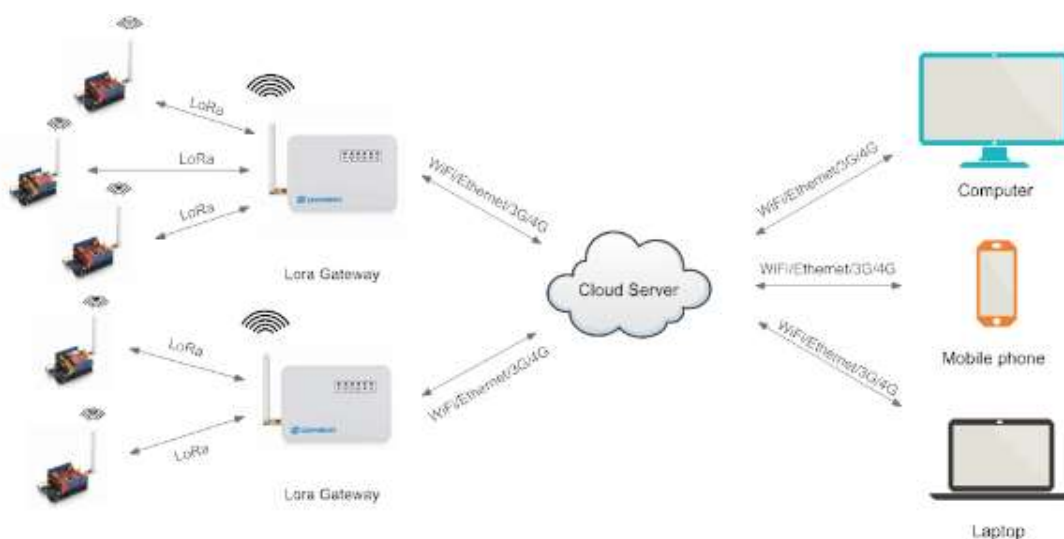


Figura 51. Arquitectura de una red LoRa [93].

Un ejemplo de un chip LoRa para dispositivos finales es el RN2483 de Microchip [94] que funciona en la frecuencia de 915 MHz y puede ser integrado en una placa LoRa para brindar todas las funcionalidades de comunicación del estándar (Figura 52. Placa con chip LoRa RN2483 integrado .).

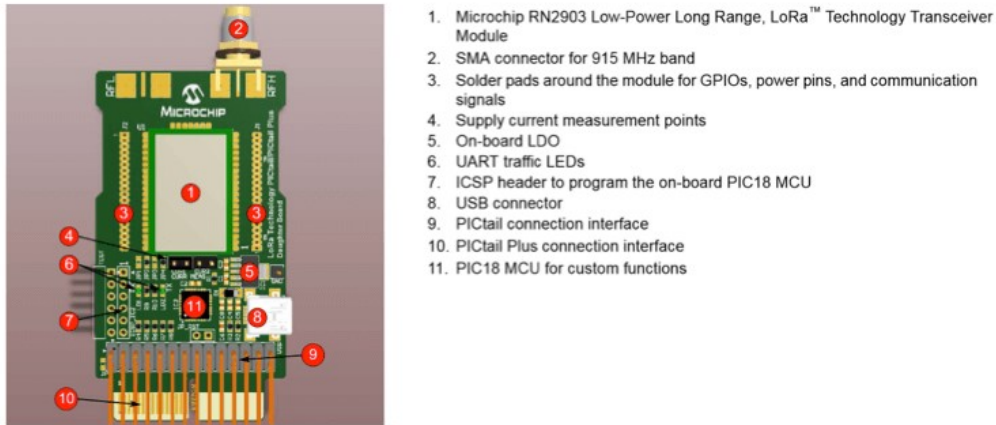


Figura 52. Placa con chip LoRa RN2483 integrado [95].

Otros fabricantes que también producen transmisores de baja potencia compatibles con LoRa son el modem SX 1272/73 de Semtech [96] que dispone de la tecnología *Chirp Spread Spectrum* (CSS) y que opera en el rango de 860 MHz a 1020 MHz, el microcontrolador inalámbrico CC1310 de Texas Instruments [97], y el transceptor RFM95W 868/915 MHz de HOPERF [98].

Entre los fabricantes de *gateways* LoRa se encuentra Microchip con el DV1644140-2 que opera en 915 MHz para la comunicación radio con los dispositivos y posee un puerto de Ethernet para la conexión con el servidor (Figura 53. Gateway Microchip DV1644140-2 para redes LoRaWAN).



Figura 53. Gateway Microchip DV1644140-2 para redes LoRaWAN [95]

Sigfox es una empresa francesa fundada en 2009 ubicada en Toulouse [99]. A diferencia de la red LoRa, la red Sigfox necesita asociarse con un operador para poder desplegarse. En España, *Sigfox Network Operator* ha conseguido proporcionar soluciones completas de extremo a extremo (dispositivos, conectividad de red y plataformas de monitoreo) asociándose con Cellnex Telecom, una empresa líder en infraestructura de telecomunicaciones. La red Sigfox en España se implementó en todo el país en 2014 completándose el despliegue en menos de un año, alcanzando el 94.5% de la población y el 70.8% del territorio. Otras empresas que han marcado acuerdos con Sigfox son Telefónica, Securitas Direct y Everis. Actualmente la red Sigfox conecta más de 1 millón de dispositivos IoT en España [100].

Un caso de uso de esta tecnología es la Red de Transmisión de Señales de Alarma (ATN) de Securitas Direct, las alarmas se conectan a la red Sigfox como una red de respaldo. Esto consigue que se puedan recibir alarmas aún cuando se mal utilicen inhibidores de frecuencia que actúan sobre las redes móviles o redes de espectro no licenciado conocidas como Wi-Fi. Además, es inmune a los cortes de electricidad o red cableada.

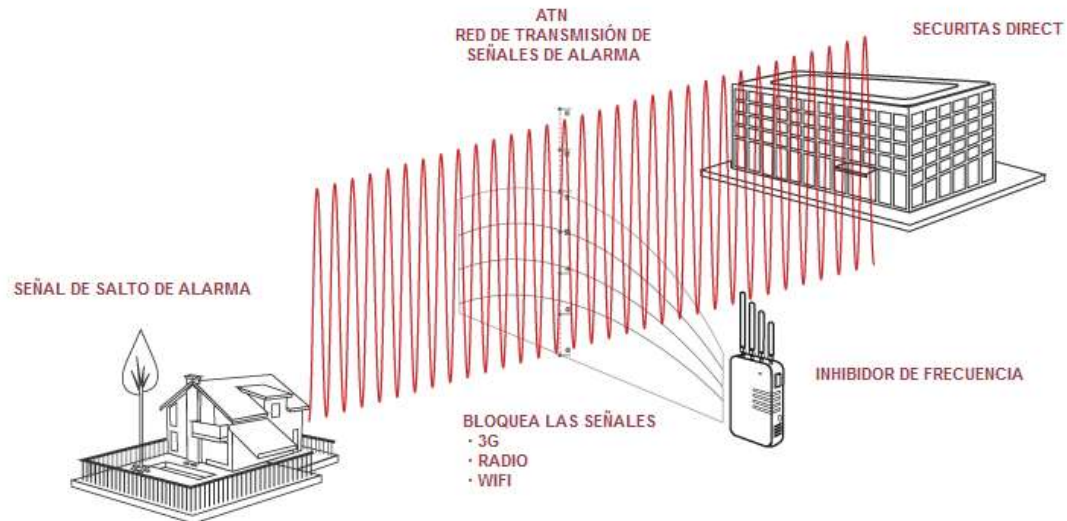


Figura 54. Ejemplo de red Sigfox en Securitas Direct [101].

La tecnología Sigfox utiliza la tecnología de radio *Ultra Narrow Band* (UNB) y opera en las bandas sin licencia ISM (*Industrial, Scientific and Medical*). Cuenta con módulos capaces de enviar mensajes 12 bytes de carga en UL y 8 bytes en DL, con una frecuencia máxima de 140 transmisiones por día¹² y una velocidad de entre 100 y 600 bps dependiendo de la región. Utiliza 200 kHz de las bandas disponibles y no autorizadas públicamente para intercambiar mensajes de radio a través del aire. El espectro que emplea actualmente es de 868 a 869 MHz y de 902 a 928 MHz según la región (868 MHz en Europa, 902 MHz en los EE.UU.), y cada mensaje ocupa 100 Hz. Una trama Sigfox por tanto tendrá 26 bytes como máximo.

La transmisión no está sincronizada entre el dispositivo y la red. El dispositivo emite cada mensaje 3 veces en 3 frecuencias diferentes y las estaciones base monitorean el espectro en busca de señales UNB para demodular. Ambos tienen un ID único que los identifica dentro de la red. Las señales van moduladas en DBPSK (*Differential Binary Phase Shift Keying*) y GFSK (*Gaussian Frequency Shift Keying*), y el dispositivo no espera confirmación por parte de la estación base.



Figura 55. Arquitectura de una red Sigfox [102].

¹² En general un módem Sigfox no puede transmitir más de 30 segundos/hora (un 1.66% del tiempo, es decir, aproximadamente 6 mensajes/hora como máximo, si un mensaje dura 5 seg.)

Como se mencionó antes, Sigfox sólo soporta el modelo de operador de red mediante el cual se realizan suscripciones anuales/objeto conectado. El despliegue fuera de Francia se realiza por parte de los Operadores de Red Sigfox seleccionados, por ejemplo, Arqiva en el Reino Unido, Aerea en los Países Bajos, Abertis Telecom en España y El Towers en Italia.

Aunque las redes LoRa y Sigfox se posicionan de manera similar en el mercado de IoT, tienen importantes diferencias tecnológicas y de marketing. Por su parte SigFox aspira a convertirse en un operador global de IoT, mientras que la Alianza LoRa desea proporcionar una tecnología que permita a otras compañías habilitar implementaciones globales de IoT. Ambos estándares convivirán los siguientes años, ya que cada uno responde a necesidades distintas.

Como se aprecia en el mapa de la Figura 56. Cobertura de la red Sigfox, incluida España . ambas redes tienen bastante despliegue a nivel global, en España hay presencia de ambas.

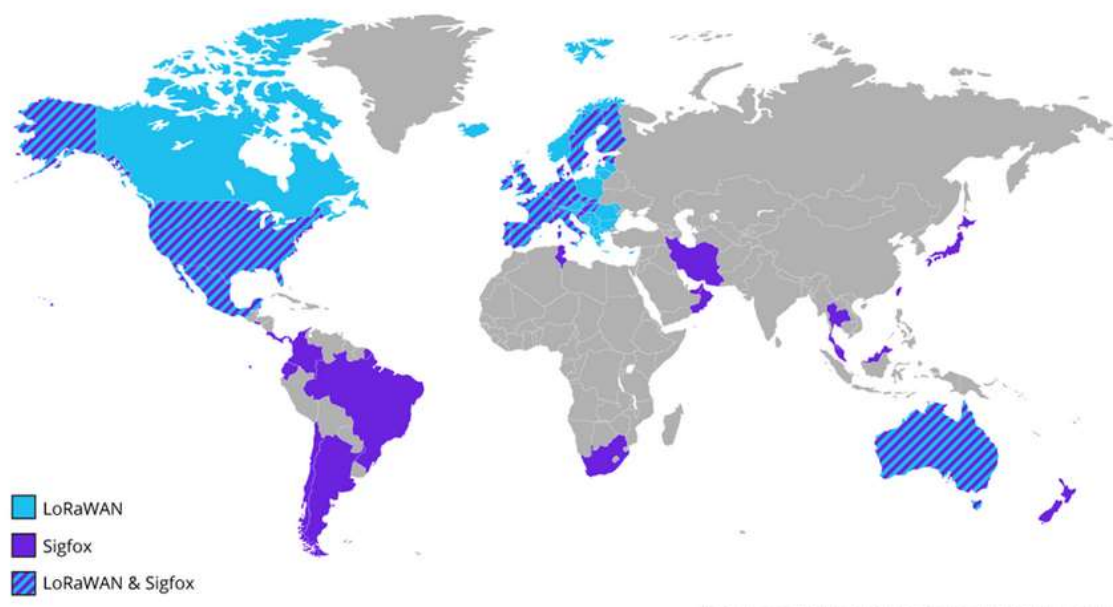


Figura 56. Cobertura de la red Sigfox, incluida España [103].

Una diferencia entre los dispositivos finales es que los terminales LoRa pueden operar en UL/DL en un mismo dispositivo. Los dispositivos clases A, B y C vistos antes permiten operar de forma bidireccional, como transmisor y receptor (en distintas ventanas de tiempo). Mientras que Sigfox requiere de dos módulos radio, un transmisor y un receptor. Por lo tanto, LoRa está más adaptado a los escenarios de comando y control.

Ambas tecnologías ofrecen funciones de seguridad, sin embargo, solamente Sigfox hace identificación y autenticación de usuarios.

En cuanto a la API, SigFox ofrece una API muy simple para integrar el módulo de radio. Sin embargo, LoRa ofrece una API de bajo nivel altamente configurable, que hace posibles diferentes optimizaciones. Por tanto, la integración del módulo de radio LoRa es más compleja que la de SigFox.



Otra diferencia que determina que cada LPWAN tenga casos de uso distintos es la cantidad de bytes soportados. Los mensajes de SigFox están limitados a 12 bytes,

mientras que en LoRa la longitud del mensaje es definida por el usuario. Así que la única limitación para LoRa es el cumplimiento de la normativa que la duración de los mensajes radio no exceda los cinco segundos. Así que para aplicaciones que necesiten mayor velocidad de datos es mejor LoRa.

Tanto LoRa como Sigfox, ofrecen una alta resistencia al bloqueo de la comunicación porque las comunicaciones se establecen del lado del dispositivo sin ninguna autorización de la red.

La siguiente tabla resume las características de cada tecnología:

Tabla 20. Comparativa entre LoRa y Sigfox [104], [105], [95], [106], [107].

Parámetros		
Rango de cobertura (km)	15-20 rural 3-8 urbano	30-50 rural 3-10 urbano
Bandas ISM	EU: 433/868 MHz US: 915 MHz	EU: 868 - 869 MHz US: 902 - 928 MHz
Ancho de banda	<500 kHz	100 Hz
Enlace ¹³	~160 dB	~160 dB
UL/DL simétricos	Depende del modo. Puede ser.	No
Modulación	SS chip	DBPSK y GFSK
Tamaño de los paquetes	Definido por el usuario	12 bytes
Velocidad de datos	0.3-50 kbps	100 bps
Máximo número de mensajes por día	Ilimitado	140 (UL)
Dispositivos por punto de acceso	100 mil	1 millón
Duración de la batería	~10 años	~10 años
Potencia máxima de salida	20 dBm	20 dBm
Inmunidad a interferencias	Muy alta	Baja
Coexistencia con otras redes	Si	No
Seguridad	AES CCM (128 bit) ¹⁴ para encriptación y autenticación	Sin encriptación
Movilidad	Si	Limitada, sin localización
Tipo de red	privada y pública	pública
Topología	Estrella	Estrella
Estándar	LoRaWAN	No tiene.
Estado de disponibilidad	Listo	Listo
Estrategia de mercado	Adaptación del estándar por operadores de telecomunicaciones	Nuevo operador/competidor IoT, trato directo con clientes

¹³ El "Enlace" da una estimación de las pérdidas totales que puede sufrir la señal entre los dispositivos finales (como sensores) y los puntos de acceso a la red teniendo en cuenta la ganancia y sensibilidad del transmisor y receptor en cada extremo.

¹⁴ *Advanced Encryption Standard Counter with CBC-MAC*

Compatibilidad de dispositivos	SemTech	Avnet, Telit, Texas Instrument, etc.
--------------------------------	---------	--------------------------------------

Otra solución propietaria que ha entrado en el mercado es Neul promovida por Huawei y u-Box. A esta tecnología se ha asociado Vodafone España que la ha añadido a su porfolio de redes LPWA para ofrecer servicios IoT [108]. Otras redes LPWA no licenciadas son Symphony Link, Ingenu, RPMA, y Weightless.



Figura 57. Tecnologías LPWA para IoT [79].

2.5.3 Soluciones LPWA celulares vs propietarias

Hasta aquí se han analizado las principales soluciones de redes de área amplia y baja potencia que emplean el espectro licenciado de las redes móviles actuales y las soluciones para espectro no licenciado. Ahora se analizarán las diferencias entre estas redes en cuanto a ancho de banda, cobertura, aplicaciones, elementos de la red, etc.

- Ancho de banda soportado

La red que opera en menor ancho de banda es Sigfox, le siguen LoRa y NB-IoT con casi el mismo BW, y finalmente LTE-M que supera el mega Hertz.

- Arquitectura de la red

Las redes LoRa y Sigfox necesitan un punto intermedio para funcionar, en el caso de LoRa se emplean *gateways* que actúan de forma transparente entre el servidor Cloud y los dispositivos finales, y en Sigfox esta función la realizan las estaciones base de

Sigfox. Mientras que en NB-IoT y LTE-M los dispositivos se conectan a la estación base de comunicaciones móviles. Pero en cualquiera de los casos hay un punto intermedio de conexión entre los dispositivos y el servidor de la red LPWA.

- Espectro requerido

Para todos los casos se están empleando bandas bajas del espectro, por debajo de 1 GHz. El objetivo es conseguir mayor rango de cobertura, ya que se conoce que estas bandas tienen mejor penetración en interiores y menos difracción frente a obstáculos voluminosos como árboles o edificios. La diferencia entre las redes LPWA celulares y las propietarias es que las primeras, como su nombre lo indica, emplean el espectro licenciado disponible, en el caso de NB-IoT el ancho de banda es menor (200 kHz) y puede incluso usar bandas de guarda y en caso de LTE-M la porción requerida es mayor (hasta 1.4 MHz). Para LoRa y Sigfox que operan en espectro no licenciado esto tiene la ventaja de requerir menos inversión radioeléctrica (antes vimos los costes que supone la compra del espectro), pero al ser espectro libre cualquiera pudiera hacer uso de este y verse afectado por interferencias.

- Velocidades de datos

Las soluciones más rápidas son las tecnologías celulares que presentan 200 kbps y 1 Mbps, para NB-IoT y LTE-M respectivamente. En el caso de Sigfox la capacidad es 2000 veces menor que la de NB-IoT y 10000 veces menor que la de LTE-M. LoRa presenta una capacidad mayor que Sigfox, pero menor que NB-IoT.

- Casos de uso

Cada tecnología tiene su fin específico, aunque algunos casos de uso se pueden cubrir con varias soluciones IoT. LoRa se considera ideal para aplicaciones cuyos dispositivos establecen conexiones poco frecuentes (por ejemplo, un par de veces en un día) y deben ofrecer una larga vida útil de la batería a muy bajo costo. En comparación, NB-IoT funciona mejor para las aplicaciones deben comunicarse con más frecuencia y necesitan tener una latencia mínima. La red más lenta la presenta Sigfox (100 bps) y la más rápida LTE-M (hasta 1 Mbps). Para un operador que busque alternativas, puede optar aliarse con Sigfox, o desarrollar su propia red LPWA bajo el estándar LoRaWAN, o emplear el espectro disponible 4G/5G para desplegar NB-IoT o LTE-M, estas dos últimas en función de las velocidades de datos que requieran los servicios IoT que ofrecerá. Los principales operadores de telecomunicaciones son los principales clientes para los estándares de comunicación M2M, sin embargo, la tecnología LoRa también puede ser utilizada por operadores que no son de telecomunicaciones. Las iniciativas de redes que son de múltiples creadores pueden acceder fácilmente e implementar soluciones de IoT basadas en LoRa, The Things Network es un ejemplo.

- Cobertura

Mientras que las tecnologías celulares requieren de una red 4G o 5G existente para operar, las soluciones propietarias emplean sus propias estaciones base o redes de enlace con el servidor. Por ello, en entornos rurales o suburbanos donde las redes móviles tienen menor huella de cobertura, sobre todo el 5G en sus inicios, las soluciones propietarias tendrán mayor oportunidad. Además, los costes de instalación de una estación base Sigfox o *gateway* LoRa es inferior al coste de un eNB LTE o gNB 5G.

- Ahorro de batería

Dado que las redes LPWA celulares funcionan en un espectro licenciado, los dispositivos deben sincronizarse con la red a intervalos relativamente frecuentes, lo cual consume energía de la batería. Las arquitecturas de LPWAN de espectro no licenciado no requieren dicha sincronización con la red y la aplicación marcará cuánto tiempo podrán estar los dispositivos finales en modo de ahorro de batería, sin transmitir o recibir datos. Por lo que la vida de la batería es mayor en LPWAN propietarias.

2.6 Arquitectura IoT

Al hacer un proyecto IoT hay tres preguntas que deben ser planteadas: ¿Qué se quiere medir? ¿Cómo se quiere conectar? y ¿Qué se quiere hacer con los datos? La primera pregunta resolverá el problema de qué dispositivos IoT se deben utilizar (sensores, geolocalizadores, etc.). Luego analizando el entorno donde se colocará este dispositivo se responderá a la cuestión de ¿cómo se quiere conectar?, si es interior o exterior, si requiere movilidad o no. Y finalmente, se analiza el tratamiento que se le quiere dar a los datos recopilados, si solo se almacenarán para hacer análisis tipo BI (*Business Intelligence*) o si servirán a aplicaciones para uso en tiempo real, entre otros. Una vez se resuelvan las preguntas, quedará clara la arquitectura del sistema IoT. En cualquier caso, los bloques de la arquitectura son: los dispositivos finales, la red de acceso (estación base, *gateway*, etc.), una plataforma de almacenamiento física o virtual y la aplicación de usuario.

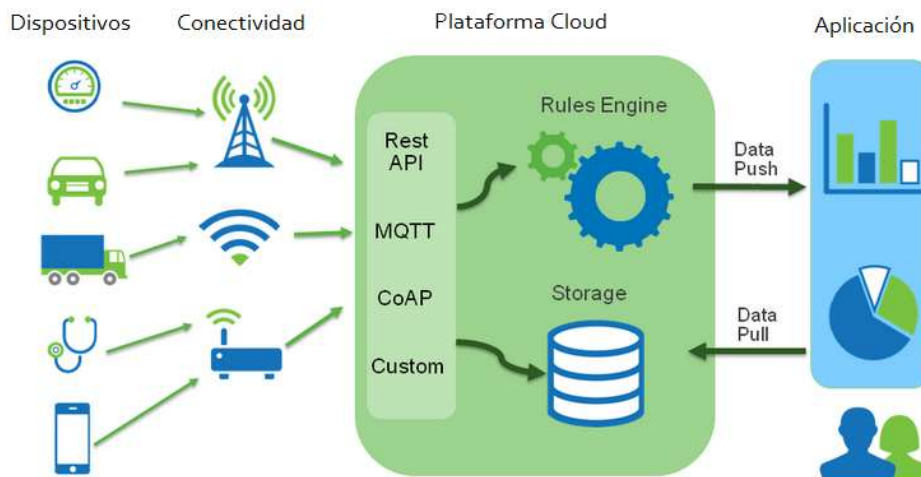


Figura 58. Arquitectura de red IoT [109].

Las plataformas en la nube para IoT reciben los datos recogidos por los dispositivos IoT, los almacenan y brindan servicios de valor añadido. Pueden ser plataformas de terceros o plataformas propias desarrolladas por los usuarios. Tienen las ventajas de brindar escalabilidad al ser almacenamiento virtual contratado, contar con bases de datos (usualmente NoSQL como MongoDB o Cassandra) y tratamiento de Big Data con Hadoop o Spark. Las siguientes figuras muestran la arquitectura IoT de los grandes gigantes de la información en la nube, Amazon Web Services (AWS) y Google [109].

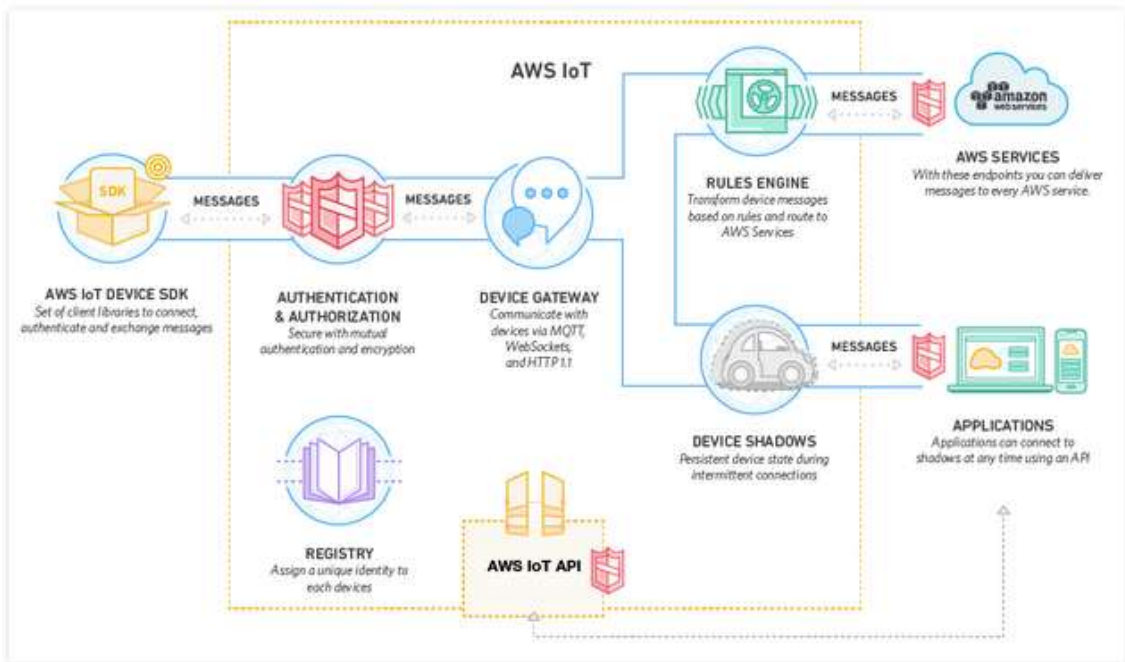


Figura 59. Arquitectura IoT de AWS [110].

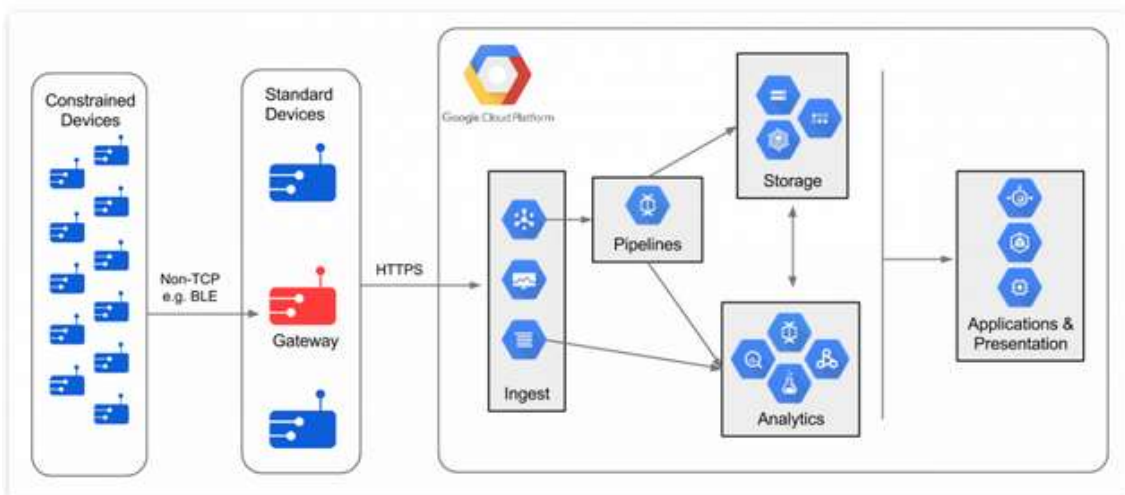


Figura 60. Arquitectura IoT de Google [111].

2.7 Escenarios IoT

Existe una gran variedad de campos de aplicación y en cada uno de ellos los dispositivos IoT varían en forma y funcionalidades. Pero en la mayoría de los casos los datos obtenidos por el dispositivo se transfieren a través de Internet a un servidor remoto que realiza el análisis y procesamiento de estos.

Podríamos hacer una clasificación de los escenarios en dos tipos, un primer tipo donde el terminal o dispositivo IoT está del lado exterior y puede estar en movimiento, y un segundo escenario donde el dispositivo se encuentra en el interior de un edificio/hogar y generalmente es inmóvil. En ambos escenarios se emplean redes inalámbricas para

conectarse con los dispositivos finales, ya que a pesar de tener menos velocidades y estabilidad que las redes cableadas, vencen la limitación de la movilidad impuesta por los cables. Para las instalaciones del tipo interior generalmente se emplean redes existentes de corto alcance como pueden ser Wi-Fi o Bluetooth y para las del tipo exterior se emplean redes móviles que emplean tecnologías como NB-IoT y Cat-M1. Como es de esperar las comunicaciones exteriores presentan un mayor reto en cuanto a propagación, cobertura y costes ya que la infraestructura, en caso de existir, debe ser compatible y adecuada a los requisitos de las aplicaciones IoT.

La Figura 61. Ejemplo de redes IoT usando redes locales y de largo alcance . muestra dos ejemplos, uno de cada tipo de escenario, donde se representa por un lado una aplicación IoT para controlar la temperatura del hogar (interior) y, por otro lado, una aplicación para conocer la ubicación en tiempo casi real de una bicicleta (exterior). En ambos casos el factor común es que la comunicación se hace vía Internet.

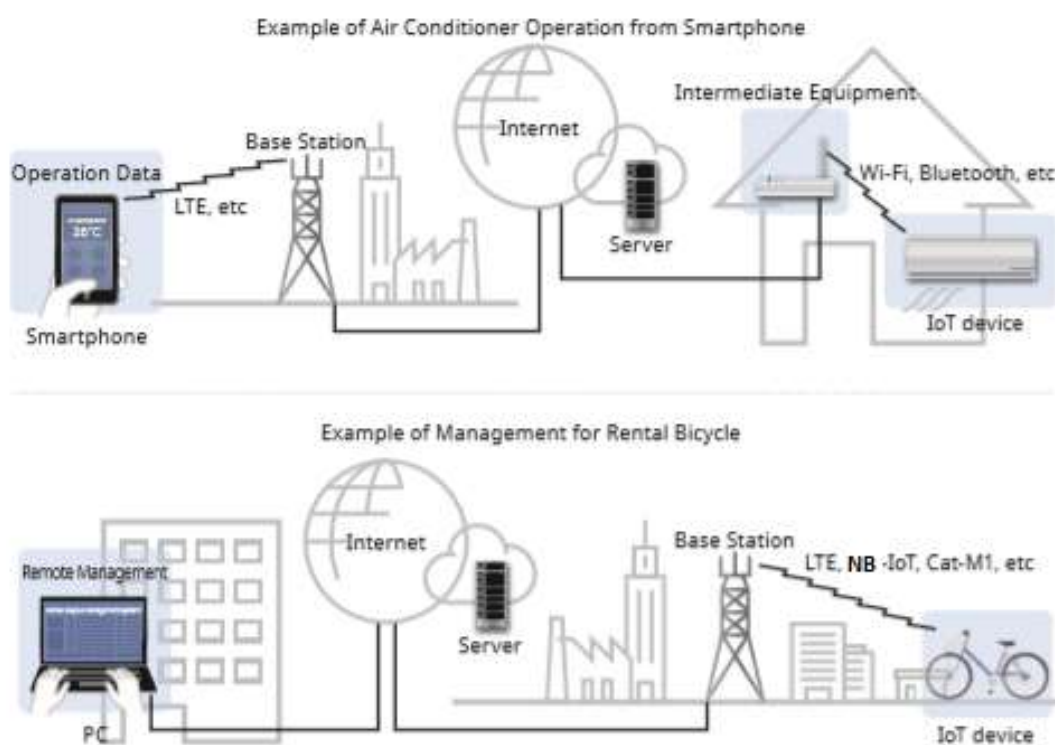


Figura 61. Ejemplo de redes IoT usando redes locales y de largo alcance [112].

La parte diferencial de la arquitectura de la red IoT es la forma de conexión entre el dispositivo IoT con el Servidor Cloud Internet. Se puede hacer mediante tres vías, a través de una red de corto alcance Wi-Fi o Bluetooth, mediante una estación base celular, o por medio de una red LPWA no licenciada. La conexión por medio de la red de corto alcance se suele usar en caso de terminales estáticos y de interior, como control de temperatura en hogares, y se emplea un *router* intermedio que se conectará al dispositivo por Wi-Fi o Bluetooth y al servidor por cable, por ejemplo, Ethernet. La conexión por medio un nodo LTE o NR usando espectro licenciado o redes LPWA de espectro no licenciado aplican a escenarios donde el dispositivo es móvil y/o de exterior. En estos dos últimos casos la red inalámbrica es de largo alcance y puede ser NB-IoT, LTE-M, LoRa o Sigfox, como se vio antes en el Redes de largo alcance y baja potencia.

El enlace entre el terminal y el servidor es una estación base, o un nodo LTE/NR o un *gateway*. Por tanto, se podría asociar el escenario donde el dispositivo es de interior y estático a redes locales, y el caso de exterior con movilidad a redes LPWA. En resumen, los tres escenarios de conexión entre el dispositivo IoT y el servidor cloud son:

- Dispositivo IoT → [enlace Wi-Fi/Bluetooth] → *Router* Casa → [enlace por cable] → Servidor Cloud Internet
- Dispositivo IoT → [enlace NB-IoT/LTE-M] → BS → [enlace por cable] → Servidor Cloud Internet
- Dispositivo IoT → [enlace LoRa/Sigfox/Neul] → *Gateway* remoto → [enlace por cable] → Servidor Cloud Internet

Luego, la parte de conexión del servidor Cloud con la aplicación final puede hacerse por medio de cable Ethernet a un PC, o por cable a un nodo NR y de este por aire a un smartphone, etc., según el tipo de aplicación.

2.8 Casos de uso

Los sectores y áreas de aplicación de soluciones 5G son muy amplios y representan una alternativa de mejora de productividad e incremento en la rentabilidad para las empresas. Como se observa en las Figura 4. Nuevos escenarios de uso del 5G y Figura 62., los casos de uso relacionados con eMBB están en su mayoría enfocados a comunicaciones que requieren muy alta capacidad (ejemplo: videos en UHD, holográficos, contenidos de VR/AR), en URLLC con comunicaciones críticas ultra confiables (ejemplo: vehículos autónomos, energía, o automatización de procesos en fábricas) y en IoT con aplicaciones de millones de dispositivos donde los datos transmitidos son pequeños y la latencia no es primordial (ejemplo: sensores, logística, ciudades inteligentes, y algunas V2x).

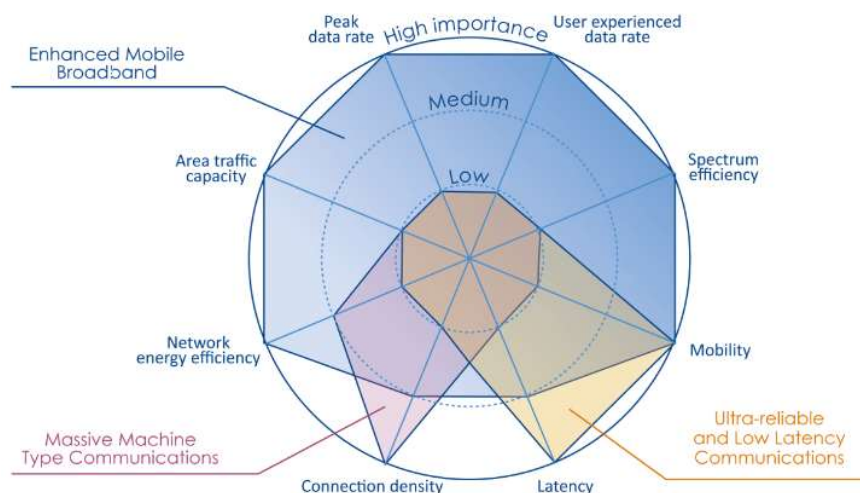


Figura 62. Requisitos para los diferentes casos de uso 5G [113].

Algunos de los casos de uso IoT son:

- Monitoreo de salud

Las aplicaciones IoT se utilizan para la telemedicina, control de pacientes en tiempo real, diagnósticos anticipados, etc.

- Hostelería

Prevenir la caducidad de alimentos, realizar pedidos automáticos y seguimiento. Controlar, supervisar y gestionar los equipos de climatización, iluminación, refrigeración y flujo de agua.

- Flotas de vehículos

Rastrear y proteger activos, gestionar a los vehículos, evitar robos y gestión de movimientos son algunas de las operaciones que se pueden llevar a cabo con tecnología IoT. Localización de un producto en tiempo real.

- Agricultura y ganadería

Permitir el seguimiento y control de magnitudes como la temperatura, humedad, luminosidad y demás parámetros que influyen en la producción. Tiene la ventaja de poder contar con parámetros medidos precisos, a diferencia de los informes meteorológicos que pueden ser generales o inexactos, y además evita tener que hacer medidas y análisis de forma manual. IoT consigue llevar a la agricultura de un ambiente dependiente del clima a un entorno totalmente automatizado optimizando así la producción. Con respecto a la ganadería, el seguimiento biométrico de los animales y su geolocalización son posibles usando IoT.

- Ciudades inteligentes

Las ciudades inteligentes o *smart cities*, son los lugares donde se notará más la introducción de aplicaciones IoT. Se espera que se puedan solventar problemas que afectan a las ciudades tales como la contaminación o el derroche de los suministros. Poder controlar la gestión de suministros ya sea, el agua, el gas o la electricidad permite el ahorro de estos recursos y evita malos usos.

Uno de los grandes problemas actuales es la contaminación del aire. El empleo de sensores de medida de calidad del aire son el primer eslabón en la cadena de prevención.

La incorporación de sensores y sistemas inteligentes de control de bombas permite regular mejor el flujo de agua e identificar problemas en tanques, tuberías y el sistema de alcantarillado. Controlar la calidad del agua, horarios de riego, aguas pluviales, inundaciones y consumos de agua en el hogar son algunas de las soluciones IoT.

Otra iniciativa, es la gestión eficiente del tráfico que además de mejorar la afluencia de coches permite controlar los niveles contaminación. Los datos de posición y velocidad de los usuarios se envían a través del móvil con lo cual se conforma un estado general de las carreteras.

El manejo de operaciones en toda la ciudad como, por ejemplo, el control del alumbrado a través de sensores conectados con la red de farolas, permiten atenuar automáticamente la luz según la lectura de la luminosidad o aumentar el brillo cuando se detecten peatones o ciclistas. Otros proyectos relacionados con la seguridad pública podrían incluir sistemas de video vigilancia con análisis avanzados, drones contra

incendios forestales, y sistemas de reporte y monitorización de incidentes para los ciudadanos [114]. Además del control de aparcamientos, detección de contenedores de basura llenos, detección de fugas de gas o humo, alarmas de incendios, rastreo de vehículos robados, entre muchos otros. Incorporar todas estas mejoras a edificios, hogares y oficinas haría más eficiente, económica y segura la vida.

Cada caso tiene sus requerimientos de red: velocidad, latencia, movilidad, entre otros. En la Tabla 21. Valores exigidos según el tipo de aplicación. se ejemplifican algunos casos de uso y sus requisitos [115]. La columna “Solución IoT” se ha completado con las tecnologías que se han presentado en esta tesis de acuerdo a los parámetros expuestos en la Tabla 19. Comparativa NB-IoT vs LTE-M . y Tabla 20. Comparativa entre LoRa y Sigfox , , , , .

Tabla 21. Valores exigidos según el tipo de aplicación.

Aplicación	Velocidad de datos	Movilidad del UE	Latencia	Batería	Solución IoT
Automatización y Monitorización (ej. Agricultura)	0.1-500 kbps	fijo	Puede ser alta	10 años	LoRa, SigFox, NB-IoT, LTE-M
Dispositivos portátiles	10s Mbps	5 km/h	baja	1 semana	LTE-M
Cuidado de la salud	50-500 kbps	< 5 km/h	baja	2 años	LTE-M
Vehículos	10s Mbps	10-150 km/h	baja	Depende de la distancia	LTE-M
Smart cities (ej. Farolas, alarmas)	0.1-500 kbps	fijo	baja	10 años	LoRa, SigFox, NB-IoT, LTE-M
Control de flotas	100s kbps	10-150 km/h	baja	3 meses	LTE-M
Seguridad	0.5-8 Mbps	fijo	baja	conectado	LTE-M

CONCLUSIONES

El 3GPP proporciona los estándares tecnológicos que establecen las bases para el 5G. En este trabajo se han descrito los componentes básicos y características de la interfaz radio NR de acuerdo con este estándar. Se prevé que para 2020 las especificaciones estén completadas, no obstante, en base a la Versión 15 ya se han lanzado pilotos de 5G con muy buenos resultados. Las versiones 16, 17 y posteriores del 3GPP continuarán agregando funcionalidades y detalles de los tipos de servicios y casos de uso.

Se espera que el 5G se convierta en la nueva generación de comunicaciones móviles que brinde una alta capacidad. LTE se mantendría como apoyo dando cobertura hasta que el despliegue de la NR 5G sea mayoritario. Tradicionalmente cada generación se ha introducido en las mismas bandas de frecuencia que las anteriores (por debajo de 3 GHz), y a medida que el número de suscriptores aumentaba se tomaba parte del espectro de los sistemas anteriores para satisfacer dicha demanda. En el caso del 5G, ha ocurrido algo diferente ya que inicialmente, se empleará espectro desocupado, como las bandas C y milimétricas. Esto permitirá a los operadores realizar pruebas sin tener que ajustar el espectro existente. Las bandas milimétricas presentan mayores pérdidas de propagación que las bandas bajas y por tanto la cobertura es menor. De modo que, la necesidad de emplear las bandas sub-3 GHz a NR apresurará el apagado de las generaciones antiguas. Este proceso sin duda tomará varios años, como ha ocurrido con el 2G y 3G que siguen estando activos hoy desde 1990. Sin duda, el éxito de cualquier nueva tecnología radicará en la capacidad de los operadores y los usuarios de saltar a un nuevo sistema.

Un estudio de 5G Américas publicado recientemente [116] refleja el comportamiento que tendrá el número de conexiones móviles en cada generación. Como se muestra en Figura 63. Número de conexiones globales 2G/3G/4G/5G de 2018 a 2023 . las

conexiones 5G, que aparecerán de forma comercial en 2019, aumentarán de forma significativa cada año y se espera que hasta 2020 las conexiones LTE también aumenten. Por su parte las generaciones más antiguas como 2G (GSM) y 3G (HSPA) comenzarán a disminuir y la razón es la introducción de redes 5G.

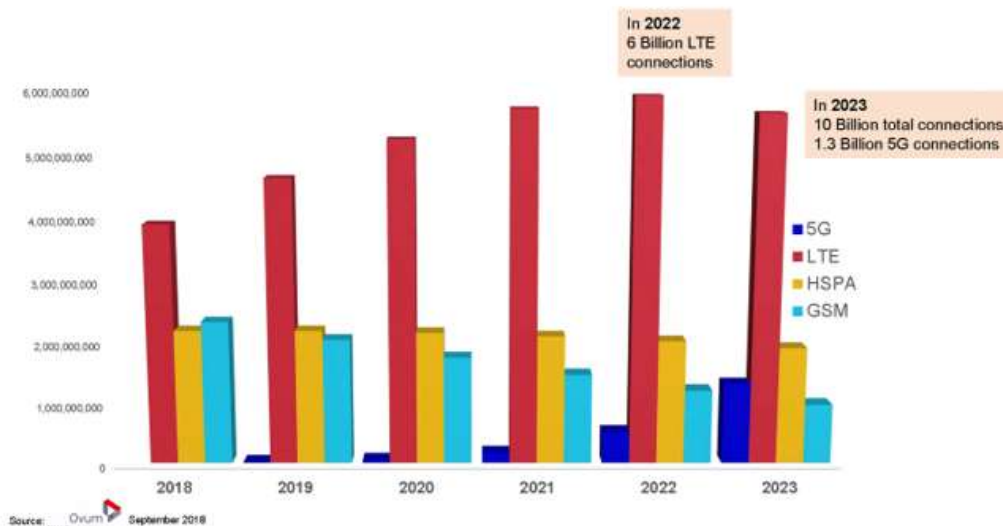


Figura 63. Número de conexiones globales 2G/3G/4G/5G de 2018 a 2023 [116].

El empleo de bandas milimétricas ha traído consigo que se busquen técnicas para compensar la baja cobertura que ofrecen estas frecuencias tan altas. En un principio el modo de operación Non Stand Alone permitirá usar frecuencias bajas de LTE para dar cobertura y frecuencias altas de 5G para dar capacidad. Los terminales de usuario deberán operar en ambas bandas, esto se conoce como *Dual Connectivity*. Si bien esta implementación puede permitir que la NR proporcione un aumento de capacidad sin grandes cambios en la red, para una transición completa a NR, se desplegará NR en modo independiente o Stand Alone. En este modo el gNB será independiente del eNB de LTE.

Eventualmente, será necesario que la NR se despliegue en bandas bajas también. En este caso se ha pensado en la banda de 700 MHz, en España, como una candidata. Aunque en un futuro es inevitable que se haga *re-farming* del espectro sub-3 GHz para dar paso al 5G y reubicar el LTE a frecuencias ocupadas por 2G y 3G. Por lo tanto, se necesita una mayor granularidad en la asignación de recursos de radio entre NR y LTE. NR soporta que su portadora se superponga en frecuencia con LTE.

Para mejorar la eficiencia espectral, así como la capacidad NR emplea técnicas como la agregación de portadoras, MIMO Masivo, modulaciones de alto orden, duración de símbolos OFDM escalables y antenas activas. En 5G el número máximo de CC configurados para un UE es 16 para DL y 16 para UL, menor que en LTE-A Pro que son 32 CC, pero el total de espectro agregado es mayor (hasta 1 GHz) con lo cual se consiguen velocidades de datos mayores. La capacidad máxima depende del número de portadoras, el número de *layers*, la modulación empleada (o que llega al usuario), el factor de escala y el *overhead*. Debido al mayor BW disponible en las bandas milimétricas los valores teóricos de capacidad son mayores que en bandas por debajo de 6 GHz. La capacidad máxima teórica en FR1 es de aproximadamente 20 Gbps UL/DL y en el FR2 de 69 Gbps DL/ 76 Gbps UL.

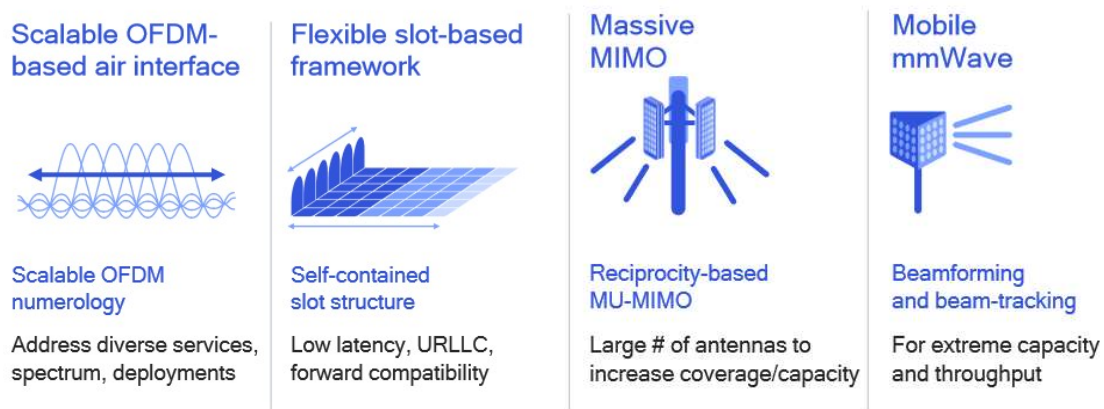


Figura 64. Características de la Nueva Radio 5G [117].

En 5G se han catalogado tres grupos de aplicaciones: eMBB, uMTC o URLLC, y mMTC. Las eMBB priorizan la capacidad, las uMTC la baja latencia y la confiabilidad del dato, y las mMTC la cantidad de dispositivos soportados. Al igual que LTE, la NR emplea OFDM como técnica de transmisión, pero el espaciamiento entre subportadoras no es fijo, sino que puede ser 15, 30, 60, 120 y 240 kHz. Esto es un cambio de concepto importante, ya que permite adecuar la señal a cada caso de uso. SCS bajos, se emplearán en entornos macro exteriores (BTS tradicionales) con anchos de banda de 1, 5, 10 y 20 MHz y bandas por debajo de los 3 GHz para dar cobertura. Un SCS de 30 kHz se empleará en las bandas por encima de los 3 GHz (ejemplo 3.5 GHz) donde se pueden encontrar rangos de frecuencias vacíos de hasta 100 MHz, en entornos exteriores para dar capacidad. Para entornos interiores se empleará espectro no licenciado, por ejemplo, la banda de 5 GHz con BW de cientos de MHz y un SCS de 60 kHz (emplea menos RBs y la capacidad es máxima). Por último, las bandas milimétricas están enfocadas a aplicaciones que requieran una alta capacidad, como las comunicaciones eMBB. Por tanto, emplearán un SCS alto (60 o 120 kHz). Otra forma de hacer frente a los diversos requisitos que exigen los distintos casos de uso es segmentar la red. En el Capítulo 1 se explica que es el Network Slicing y su importancia.

Los diseños de antena de UE son muy diversos, pero todos van enfocados a obtener ganancias altas, gran aislamiento y un bajo ECC para sacar provecho del MIMO. Todo esto en el espacio reducido de los teléfonos móviles modernos. Se han buscado en los artículos del IEEE las características de estas antenas y se han presentado los modelos más novedosos en banda 3.5 GHz y milimétricas, por ser las primeras en el despliegue del 5G. También se han analizado las antenas de BTS para ver cómo se está posicionando la industria al respecto. Se han estudiado las antenas activas como una forma novedosa de integrar la parte activa a la antena tradicional con el fin de evitar las pérdidas producidas por los cables coaxiales. En estas antenas la conexión a la banda base se hace directo a través de una fibra óptica. Se han explicado las técnicas de MIMO Masivo y FD-MIMO en antenas macro como mecanismos para aumentar el *throughput*.

Uno de los tres casos de uso de 5G son las comunicaciones masivas tipo máquina y dentro de estas se encuentra el Internet de las Cosas. De todos los casos de uso de 5G quizás este sea el que más despliegue tenga en los próximos años. Se prevé que para 2025 el número de dispositivos finales IoT (sensores, cámaras, lectores) alcanzará los 22 billones y que en 2018 ya son 7 billones los que está activos (Figura 44. Miles de

millones de conexiones IoT globales, 2015-2025). Para cubrir estas demandas las redes inalámbricas también aumentarán. Las redes de corto alcance y baja potencia como Wi-Fi, Bluetooth o Zigbee serán las protagonistas de los enlaces en interiores, mientras que las redes de largo alcance y baja potencia LPWA, serán las que brinden el enlace en los exteriores.

En las redes de corto alcance, aunque pudiera pensarse que Wi-Fi es la mejor solución, no siempre lo es. Wi-Fi presenta velocidades de transmisión bastante altas lo cual consume bastante batería, así que para algunos casos no es factible. De forma resumida, Wi-Fi se emplea para compartir y distribuir contenido, Bluetooth para reemplazo de cables y accesorios, Thread y ZigBee para redes de baja potencia de control y detección, y OCF en la capa de aplicación [77].

Dentro de las redes LPWA hay dos tipos, las que emplean espectro licenciado como son NB-IoT y LTE-M, y las que no como son LoRa o Sigfox. Y ahí es donde se enlaza el mundo del 5G con IoT. Aunque IoT fue desarrollado inicialmente para operar sobre una red LTE, con la aparición de la NR ha pasado a formar parte de este estándar y el 3GPP lo ha estudiado para que opere sobre la red 5G. En el caso de las soluciones licenciadas se emplearía parte del espectro NR para ubicar la portadora NB-IoT o LTE-M.

Así mismo, IoT ha impulsado a la aparición del 5G. La necesidad de poder conectar un mayor número de dispositivos por área, la latencia para paquetes pequeños y el aumento de la cobertura (Tabla 7. Requisitos mínimos para el 5G según la aplicación) son algunas de las razones. Dado que 5G es capaz de transmitir datos de manera más rápida que LTE, las empresas podrían implementar más dispositivos conectados sin poblar demasiado la red y evitando problemas de latencia. Según Zhiguo Ding, profesor en la Universidad de Lancaster, UK: “El 4G está bien por ahora. Sin embargo, si miramos dentro de cinco o diez años, es obvio que 4G no podrá cumplir con sus requisitos para las nuevas aplicaciones que se avecinan” [118].

Las empresas en búsqueda de nuevas oportunidades y desafíos encontrarán en IoT una fuente de datos que apoyarán la producción y el análisis de la información. En cuanto a elegir la mejor solución, dependerá de los requisitos de la aplicación. La red que opera en menor ancho de banda es Sigfox, le siguen LoRa y NB-IoT, y finalmente LTE-M que supera el mega Hertz. Por tanto, si se desean velocidades de transmisión de datos altas es mejor LTE-M. Actualmente, NB-IoT y LoRa representan aproximadamente el 70% del mercado IoT y se espera que aumenten su participación en el mercado a casi el 85% en los próximos 5 años [119].

Los operadores podrán elegir una o varias de estas soluciones, en el caso de NB-IoT y LTE-M los dispositivos se conectan a la propia estación base del operador, mientras que las redes LoRa y Sigfox necesitan un punto intermedio para funcionar. En redes LoRa se emplean *gateways* que actúan de forma transparente entre el servidor Cloud y los dispositivos finales, y en Sigfox esta función la realizan las estaciones base de Sigfox. Por tanto, Sigfox requiere un acuerdo previo con el Operadores de Red Sigfox. Para LoRa y Sigfox operar en espectro no licenciado tiene la ventaja de requerir menos inversión radioeléctrica, a costa de sufrir más interferencias. Otro plus es que al no requerir sincronización con la red 5G la duración de la batería es mayor.

Algunos de los proveedores actuales de redes LoRa son Bouygues, Orange Francia, KPN, Vodafone y Swisscom en Europa, y SingTel en Asia. Las empresas que han marcado acuerdos con Sigfox en España son Telefónica, Securitas Direct y Everis. Otra solución propietaria que ha entrado en el mercado es Neul promovida por Huawei y u-Box. A esta tecnología se ha asociado Vodafone España que la ha añadido a su portfolio de redes LPWA para ofrecer servicios IoT [108].

Entre los operadores que están desarrollando NB-IoT están China Mobile (China, Hong Kong), China Telecom (China), Chunghwa Telecom (Taiwán), Cosmote (Grecia), KT (Corea del Sur), Mobitel (Sri Lanka), Telstra (Australia), TIM (Italia), T-Mobile (Austria, Alemania, Países Bajos, Polonia), Turkcell (Turquía) y Vodafone (Australia, República Checa, Irlanda, Italia, Países Bajos, España, Turquía). Las redes LTE-M están siendo ofertadas por AT&T (EE. UU., México), Etisalat (EAU), KDDI (Japón), KPN (Países Bajos), Orange (Bélgica), Telstra (Australia), Turkcell (Turquía) y Verizon (Estados Unidos) [120].



Figura 65. Principales razones para el 5G [117].

El presente trabajo analiza en detalle las 4 tecnologías LPWA más importantes hoy en día: Sigfox, LoRa, LTE-M y NB-IoT. Se analizan sus características técnicas, arquitectura y modelo de negocio. Se presentan además algunos ejemplos de implementaciones exitosas de LPWA para ofrecer una buena representación de dónde se encuentra el mercado en la actualidad. Se evalúan soluciones de corto alcance y su aplicación. Presentándose finalmente el modelo de una red IoT, y las arquitecturas que proponen líderes en soluciones Cloud como Google y Amazon.

Se espera que el 5G se implemente primero en las principales áreas metropolitanas, por lo que las aplicaciones de IoT que se usarán primero para conectarse probablemente sean soluciones de *smart cities* como farolas o semáforos. Sin embargo, 5G finalmente conectará todo, desde dispositivos domésticos inteligentes hasta sensores en la agricultura en áreas rurales. Sin IoT, no será posible hablar una cuarta revolución industrial, Big Data, Inteligencia Artificial o cualquier tipo de productos TIC que penetren en nuestra vida.

Los productos con capacidad 5G NR ya están disponibles comercialmente, y se espera que los teléfonos inteligentes lleguen en 2019. 5G NR es una realidad, pero el progreso realizado hasta el momento indica que los despliegues comerciales de 5G serán a partir de 2020.

Para desarrollar este trabajo se han consultado más de 100 fuentes bibliográficas, entre estas: sitios web de los principales fabricantes de tecnología móvil, más de 50 artículos del IEEE, especificaciones técnicas del 3GPP relacionadas con el 5G e IoT, noticias

recientes en sitios webs fiables e informes que exponen las principales empresas de ofrecen acceso red, servicios, productos y/o soluciones basadas en estas tecnologías. Para combinar el material bibliográfico se han realizado consultas a expertos en la industria y se han leído numerosas entrevistas a profesionales del sector de las telecomunicaciones algunos citados en el trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Nokia, «5G use cases and requirements,» Espoo, Finlandia, 2016.
- [2] «3GPP sitio oficial,» [En línea]. Available: <http://www.3gpp.org/about-3gpp/about-3gpp>. [Último acceso: 2018].
- [3] 3GPP, «3GPP a Global Initiative,» 16 julio 2018. [En línea]. Available: <https://www.3gpp.org/release-16>. [Último acceso: diciembre 2018].
- [4] «3GPP sitio web,» [En línea]. Available: <http://www.3gpp.org/specifications/releases>. [Último acceso: 2018].
- [5] «3GPP sitio oficial,» 2018. [En línea]. Available: <http://www.3gpp.org/DynaReport/38-series.htm>.
- [6] 3GPP TSG RAN WG4 Chairman (Samsung), «NR Radio Frequency and co-existence,» 2018.
- [7] «SDX Central, ITU-R IMT 2020,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.sdxcentral.com/5g/definitions/5g-standards/>.
- [8] 3GPP, «TS 38.211: NR; Physical channels and modulation,» 2018.
- [9] A. A. Zaidi, S. Faxér, M. Andersson, R. Baldemair, Z. Wang y V. Molés-Cases, «5G NR physical layer design,» Stockholm, Sweden, 2017.
- [10] J. Campos, «Understanding the 5G NR Physical Layer,» Keysight, 2017.
- [11] 3GPP, «TS 38.104: NR; Base Station (BS) radio transmission and reception (Release 15),» 2018.
- [12] 3GPP, «TS 38.101-1: NR; User Equipment (UE) radio transmission and reception; Part 1: Range 1 Standalone (Release 15),» 2018.

- [13] 3GPP, «TS 38.101-2: NR; User Equipment (UE) radio transmission and reception; Part 2: Range 2 Standalone (Release 15),» 2018.
- [14] N. Morris, L. Kibet y M. Stephen, «Towards Device Driven 5G: Radio Resource Allocation Perspective,» de *Proceedings of Sustainable Research and Innovation Conference*, JKUAT Main Campus, Kenya, 2018.
- [15] E. Mohyeldin, «Minimum Technical Performance Requirements for IMT-2020 radio interface(s). ITU-R Workshop on IMT-2020 terrestrial radio interfaces,» 2016. [En línea]. Available: https://www.itu.int/en/ITU-R/study-groups/rsg5/rwp5d/imt-2020/Documents/%E2%80%8BS01-1_Draft%20Report%20Requirements%20for%20IMT-2020.pdf.
- [16] 5G Américas, «5G Network Transformation,» 2017. [En línea]. Available: http://www.5gamericas.org/files/3815/1310/3919/5G_Network_Transformation_Final.pdf.
- [17] 3GPP, «First 5G NR Specs Approved,» 2017. [En línea]. Available: http://www.3gpp.org/news-events/3gpp-news/1929-nsa_nr_5g. [Último acceso: diciembre 2018].
- [18] Qualcomm Technologies, Inc. y compañías afiliadas., «Designing 5G NR, the 3GPP Release 15 global standard for a unified, more capable 5G air interface,» 2018.
- [19] G. Pfeifer, «5G Technology Introduction, Market Status Overview and Worldwide Trials,» 2017.
- [20] J. Anguera y A. P. Jiménez, *Teoría de Antenas*, 2008.
- [21] Pasternack, *Free Space Path Loss Calculator*.
- [22] 3GPP, «TS 38.306: NR; User Equipment (UE) radio access capabilities,» 2018.
- [23] Medium Corporation, «5G NR: The New Radio interface for 5G,» diciembre 2017. [En línea]. Available: <https://medium.com/5g-nr/5g-nr-the-new-radio-interface-for-5g-2b769a59ea80>.
- [24] 3GPP, «TS 38.300 V15.3.1: NR; Overall description; Stage-2,» 2018.
- [25] 3GPP, «TS 38.101-3 V15.3.0: NR; User Equipment (UE) radio transmission and reception; Part 3: Range 1 and Range 2 Interworking operation with other radios,» 2018.
- [26] T. Nguyen, «Small Cell Networks and the Evolution of 5G (Part 1). Qorvo,» Mayo 2017. [En línea]. Available: <https://www.qorvo.com/design-hub/blog/small-cell-networks-and-the-evolution-of-5g>.
- [27] «CDN,» [En línea]. Available: https://cdn.mobilesyrup.com/wp-content/uploads/2016/01/rr_backhaul.jpg.
- [28] 3GPP, «TR 36.824: Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); LTE coverage enhancements,» 2016.
- [29] 3GPP, «TR 36.837: Public safety broadband high power User Equipment (UE) for band 14,» 2013.

- [30] 3GPP, «TR 36.886: Study on Network-Assisted Interference Cancellation and Suppression (NAIC) for LTE,» 2014.
- [31] Terminal Working Group, «GTI Sub-6GHz 5G Device White Paper. 21th GTI Workshop,» CMCC, Sprint, 2018.
- [32] Anritsu, «Anritsu,» septiembre 2018. [En línea]. Available: <https://www.anritsu.com/en-us/test-measurement/technologies/5g-everything-connected/5g-world-freq>. [Último acceso: 2018].
- [33] «BOE-A-2017-12318. Orden ETU/1033/2017, de 25 de octubre, por la que se aprueba el cuadro nacional de atribución de frecuencias,» [En línea]. Available: <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2017-12318>.
- [34] «Xataka móvil,» agosto 2018. [En línea]. Available: <https://www.xatakamovil.com/mercado/vodafone-orange-movistar-se-reparten-espectro-subasta-para-5g-542-millones-euros>. [Último acceso: 2018].
- [35] «Cinco días,» junio 2018. [En línea]. Available: https://cincodias.elpais.com/cincodias/2018/07/20/companias/1532101839_393302.html. [Último acceso: 018].
- [36] «ADSL Zone,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.adslzone.net/2018/07/25/movistar-orange-subasta-5g-36-38-ghz/>.
- [37] Intelsat, «Infográfico de la banda C,» [En línea]. Available: http://www.intelsat.com/wp-content/uploads/2014/04/Infographic_C-band_Spanish.pdf. [Último acceso: diciembre 2018].
- [38] L. Miller, 5G RF for dummies, 2017, p. 53.
- [39] «NG-voice,» [En línea]. Available: <https://www.ng-voice.com/5g-new-radio/>. [Último acceso: 2018].
- [40] Ericsson, «Internet of Things forecast,» [En línea]. Available: <https://www.ericsson.com/en/mobility-report/internet-of-things-forecast>.
- [41] 5G Américas, «Network Slicing es una gran promesa para la optimización de las redes de 5G,» 2016. [En línea]. Available: <http://www.5gamericas.org/es/newsroom/press-releases/network-slicing-es-una-gran-promesa-para-la-optimizacion-de-las-redes-de-5g/>. [Último acceso: 2018].
- [42] M. Cid, «Telefónica demuestra las utilidades del network slicing en 5G: una subred para cada necesidad,» febrero 2018. [En línea]. Available: <https://www.xatakamovil.com/conectividad/telefonica-demuestra-las-utilidades-del-network-slicing-en-5g-una-subred-para-cada-necesidad>. [Último acceso: 2018].
- [43] Z. Ding, T. Yao, X. Liu, X. Wang y Z. Liu, «An Eight-Port Dual-Band Antenna Array for 5G Smartphone Applications,» de *2018 Cross Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology Conference (CSQRWC)*. IEEE, 2018.
- [44] C.-H. Lin, H.-Y. Liu y C.-Y.-D. Sim, «An Introduction to MIMO Antenna Array Designs for Future 5G Smartphone Applications,» de *2018 IEEE International Symposium on*

- [45] H. Shin y J. H. Lee, «Capacity of multiple-antenna fading channels: Spatial fading correlation, double scattering, and keyhole,» *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 49, nº 10, p. 2636–2647, 2003.
- [46] K.-L. Wong, C.-Y. Tsai, J.-Y. Lu, D.-M. Chian y W.-Y. Li, «Eight MIMO Antennas for 5G Smartphones and their MIMO capacity verification,» de *2016 URSI Asia-Pacific Radio Science Conference*, 2016.
- [47] Y.-L. Ban, C. Li, C.-Y.-D. Sim, G. Wu y K.-L. Wong, «4G/5G Multiple Antennas for Future Multi-Mode Smartphone Applications,» *IEEE*, vol. 4, p. 2981–2988, 2016.
- [48] M.-Y. Li, Y.-L. Ban, Z.-Q. Xu, G. Wu, C.-Y.-D. Sim, K. Kang y Z.-F. Yu, «Eight-Port Orthogonally Dual-Polarized Antenna Array for 5G Smartphone Applications,» *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 64, nº 9, pp. 3820 - 3830, 2016.
- [49] C.-N. Hu y D.-C. Chang, «Millimeter- Wave (mmW) Antenna Design for 5G Massive MIMO applications,» de *2018 Cross Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology Conference (CSQRWC)*, 2018.
- [50] «Antenna Theory,» [En línea]. Available: <http://www.antenna-theory.com/definitions/envelope-correlation-coefficient-ecc.php>. [Último acceso: 2018].
- [51] Y. Li, C.-Y.-D. Sim, Y. Luo y G. Yang, «12-Port 5G Massive MIMO Antenna Array in Sub-6GHz Mobile Handset for LTE Bands 42/43/46 Applications,» *IEEE Access*, vol. 8, pp. 344-354, 2018.
- [52] Z. Ding, T. Yao, X. Liu, X. Wang y Z. Liu, «An Eight-Port Dual-Band Antenna Array for 5G Smartphone Applications,» de *2018 Cross Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology Conference (CSQRWC). IEEE*, Xuzhou, 2018.
- [53] M.-Y. Li, C. Li, Y.-L. Ban y K. Kang, «Multiple Antennas for Future 4G/5G Smartphone Applications,» de *2016 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Advanced Materials and Processes for RF and THz Applications (IMWS-AMP)*, Chengdu, 2016.
- [54] K.-L. Wong, C.-Y. Tsai, J.-Y. Lu, D.-M. Chian y W.-Y. Li, «Compact Eight MIMO Antennas for 5G Smartphones and Their MIMO Capacity Verification,» de *2016 URSI Asia-Pacific Radio Science Conference (URSI AP-RASC)*, 2016.
- [55] X. Shi, M. Zhang, S. Xu, D. Liu, H. Wen y J. Wang, «Dual-Band 8-Element MIMO Antenna with Short Neutral Line for 5G Mobile Handset,» de *11th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)*, 2017.
- [56] K.-L. Wong, J.-Y. Lu y L.-Y. Chen, «8-antenna and 16-antenna arrays using the quad-antenna linear array as a building block for the 3.5-GHz LTE MIMO operation in the smartphone,» *Microwave and Optical Technology*, pp. 174-181, 2016.
- [57] M. Abdullah, Y.-L. Ban, K. Kang, M.-Y. Li y M. Amin, «Compact Four-Port MIMO Antenna System at 3.5 GHz,» *IEEE*, pp. 656-660, 2017.

- [58] K.-L. Wong, J.-Y. Lu y L.-Y. Chen, «Asia-Pacific Microwave Conference (APMC),» de *16-Antenna array in the smartphone for the 3.5-GHz MIMO operation*, 2015.
- [59] K. Lu, C. Yu, J.-Y. Tsai, J.-Y. Lu y D.-M. Chian, «Compact Eight MIMO Antennas for 5G Smartphones and their MIMO capacity verification,» Seoul, Korea, 2016.
- [60] Y. Li, C.-Y.-D. Sim, Y. Luo y G. Yang, «12-Port 5G Massive MIMO Antenna Array in Sub-6-GHz Mobile Handset,» *IEEE*, vol. 6, pp. 344-354, 2018.
- [61] I. Tzanidis, Y. Li, G. Xu y J. C. Zhang, «2D Active Antenna Array Design for FD-MIMO System and Antenna Virtualization Techniques,» *International Journal of Antennas and Propagation*, pp. 1-9, julio 2015.
- [62] N. Ojaroudiparchin, M. Shen y G. F. Pedersen, «Multi-Layer 5G Mobile Phone Antenna for Multi-User MIMO Communications,» de *23rd Telecommunications forum TELFOR*, Serbia, Belgrade, 2015.
- [63] C. Puente, J. Anguera y C. Borja, «Dual-band dual-polarized antenna array». US Patente 6,937,206.
- [64] C. Puente, C. Borja, A. Teillet, D. Kirchoffer y J. Anguera, «Slim triple band antenna array for cellular base stations». US Patente 8,497,814.
- [65] J. Anguera, «Fractal and broadband techniques on miniature, multifrequency, and high-directivity microstrip patch antennas,» Universidad Politécnica de Cataluña.
- [66] Kathrein, «Slideshare,» enero 2017. [En línea]. Available: <https://www.slideshare.net/KarvaCarbi/antenna-evolution-from-4g-to-5g-70581361>.
- [67] Commscope, «Sitio web de Commscope,» [En línea]. [Último acceso: 2018].
- [68] Deutsche Telekom, «Youtube,» mayo 2018. [En línea]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=xckhBfuzG1s>. [Último acceso: 2018].
- [69] I. Tzanidis, Y. Li, G. Xu, J.-Y. Seol y J. Z. Zhang, «2D Active Antenna Array Design for FD-MIMO System and Antenna Virtualization Techniques,» *International Journal of Antennas and Propagation. Hindawi*, vol. 2015, nº 873530, p. 9, 2015.
- [70] I. Oshima, «Development of Base Station Antennas for 5G Mobile Communication System,» de *2016 IEEE International Workshop on Electromagnetics: Applications and Student Innovation Competition (iWEM)*. IEEE, 2016.
- [71] «Cellular Insights,» marzo 2017. [En línea]. Available: <https://cellularinsights.com/sprints-gigabit-class-lte-network-goes-live-in-new-orleans/>. [Último acceso: 2018].
- [72] «Anritsu,» [En línea]. Available: <https://www.anritsu.com/en-GB/test-measurement/technologies/5g-everything-connected/5g-anritsu-advantage>. [Último acceso: 2018].
- [73] «Qualcomm,» [En línea]. Available: <https://www.qualcomm.com/products/qtm052-mmwave-antenna-modules>. [Último acceso: 2018].

- [74] A. Eassa, «The Motley Fool,» noviembre 2018. [En línea]. Available: <https://www.fool.com/investing/2018/11/13/intel-pulls-in-xmm-8160-5g-modem.aspx>.
- [75] «Newsroom,» [En línea]. Available: <https://newsroom.intel.com/news/intel-accelerates-timing-intel-xmm-8160-5g-multimode-modem-support-broad-global-5g-rollouts/> .
- [76] «Adslzone,» [En línea]. Available: <https://www.adslzone.net/2018/07/23/qualcomm-antena-5g-moviles/>.
- [77] L. Miller, Internet of Things for dummies, 2017.
- [78] GSMA, «Mobile IoT in the 5G Future, NB-IoT and LTE-M in the context of 5G,» 2018.
- [79] «IoT Analytics,» 2018. [En línea]. Available: <https://iot-analytics.com/lpwan-market-report-2018-2023-new-report/>.
- [80] 5G Américas, «Tecnologías celulares para habilitar la Internet de las Cosas,» 2016.
- [81] 3GPP, «TR 38.825 (Rel-16) Study on NR industrial Internet of Things (IoT),» 2018.
- [82] G. Vos, «Sierra wireless,» mayo 2018. [En línea]. Available: <https://www.sierrawireless.com/iot-blog/iot-blog/2018/05/lte-m-nb-iot-5g-networks/>.
- [83] Wikipedia, «Wikipedia,» [En línea]. Available: <https://es.wikipedia.org/wiki/Wifi>. [Último acceso: 2018].
- [84] ZigBee Alliance, «ZigBee Protocol Overview,» 2012.
- [85] B. Crum, «Amazon Alexa,» julio 2018. [En línea]. Available: <https://developer.amazon.com/es/blogs/alexa/post/d14a5a94-52f3-43aa-a56c-6424a71d30be/reach-and-delight-more-customers-with-your-zigbee-certified-devices-and-amazon-alexa>. [Último acceso: 2018].
- [86] «Sitio oficial de Open Connectivity,» [En línea]. Available: <https://openconnectivity.org/foundation/membership-list>. [Último acceso: 2018].
- [87] Sierra Wireles, «What is LPWA?,» 2018.
- [88] Y. Hwang, «IoT for all,» agosto 2018. [En línea]. Available: <https://www.iotforall.com/cellular-iot-explained-nb-iot-vs-lte-m/>. [Último acceso: diciembre 2018].
- [89] «Sitio oficial LoRa Alliance,» [En línea]. Available: <https://lora-alliance.org/>. [Último acceso: 2018].
- [90] A. Back, «Design Spark,» febrero 2016. [En línea]. Available: <https://www.rs-online.com/designspark/the-things-network-calderdale> . [Último acceso: diciembre 2018].
- [91] Farnell, «Farnell,» [En línea]. Available: <https://nl.farnell.com/lorawan-as-an-iot-network-solution>.

- [92] Design Spark RS, «Youtube,» agosto 2016. [En línea]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=TxMpNsS-oro>. [Último acceso: diciembre 2018].
- [93] «Aprendiendo Arduino,» marzo 2018. [En línea]. Available: <https://aprendiendoarduino.wordpress.com/category/lora/>.
- [94] Microchip, «Especificaciones técnicas del dispositivo LoRa RN2483».
- [95] «Farnell,» agosto 2017. [En línea]. Available: <https://uk.farnell.com/lorawan-as-an-iot-network-solution>. [Último acceso: 2018].
- [96] Semtech, «SX 1272/73 Development Kit,» 2014.
- [97] «web oficial de Texas Instruments,» [En línea]. Available: <http://www.ti.com/product/cc1310>. [Último acceso: 2018].
- [98] «web oficial de Hoperf,» [En línea]. Available: http://www.hoperf.com/rf_transceiver/lora/RFM95W.html. [Último acceso: 2018].
- [99] «web oficial de Sigfox,» [En línea]. Available: <https://build.sigfox.com/>. [Último acceso: 2018].
- [100] Sigfox, «Web de Sigfox,» 2018. [En línea]. Available: <https://partners.sigfox.com/companies/sigfox-spain>.
- [101] Securitas Direct, «Securitas Direct,» [En línea]. Available: <https://www.securitasdirect.es/es/servicios/inhibidores-de-frecuencia>. [Último acceso: 2018].
- [102] «WND Group,» [En línea]. [Último acceso: 2018].
- [103] «Network World España,» abril 2018. [En línea]. Available: <https://www.networkworld.es/telecomunicaciones/la-plataforma-iot-de-libelium-anade-cobertura-lpwan-para-latinoamerica-australia-y-asiapacifico>. [Último acceso: 2018].
- [104] F. Zafari, «Slideshare,» abril 2016. [En línea]. Available: <https://www.slideshare.net/fahim1989/an-overview-of-lora-sigfox-and-ieee-80211ah>.
- [105] R. V. Salcedo, «Slideshare,» junio 2016. [En línea]. Available: <https://fr.slideshare.net/RobertVivancoSalcedo/understand-lpwa-tetchnologies-sigfox-and-lora>.
- [106] [En línea]. Available: https://cdn-images-1.medium.com/max/800/0*jzHQz8D3YvL9Clta.jpg.
- [107] D. Sharma, «Quora,» mayo 2017. [En línea]. Available: <https://www.quora.com/What-are-the-pros-and-cons-of-Lora-versus-SigFox-as-Low-power-Wireless-Area-Networks-LPWAN>. [Último acceso: 2018].
- [108] J. Triquet, «La tecnología me gusta,» [En línea]. Available: <http://director-it.com/index.php/es/ssoluciones/comunicacion-entre-maquinas/202-¿cuál-es-la-diferencia-entre-sigfox-y-lora.html>. [Último acceso: 2018].

- [109] «Aprendiendo Arduino,» [En línea]. Available: <https://aprendiendoarduino.wordpress.com/category/iot/>. [Último acceso: 2018].
- [110] I. Massingham, «SlideShare,» 2016. [En línea]. Available: <https://www.slideshare.net/AmazonWebServices/getting-started-with-aws-iot-61240940>. [Último acceso: diciembre 2018].
- [111] M. Kavis, «Forbes,» 2016. [En línea]. Available: <https://www.forbes.com/sites/mikekavis/2016/02/28/investors-guide-to-iot-part-3-iot-platforms-and-services/#36601812c792>. [Último acceso: diciembre 2018].
- [112] Anritsu, «Assuring Communications Quality of IoT Devices,» Onna, Atsugi-shi, Kanagawa, 2018.
- [113] ETSI, «Why do we need 5G?,» [En línea]. Available: <https://www.etsi.org/technologies-clusters/technologies/5g>. [Último acceso: diciembre 2018].
- [114] Universidad de Alcalá, «Universidad de Alcalá, Máster en IoT,» julio 2018. [En línea]. Available: <https://www.master-internet-of-things.com/casos-uso-tecnologias-iot-entornos-urbanos/>. [Último acceso: 2018].
- [115] 4G Américas, «Cellular Technologies Enabling the Internet of Things,» 2015.
- [116] 5G Américas, «Global Forecast 2023: 10 Billion Mobile Connections Including 1.3 Billion 5G Connections,» 2018.
- [117] Qualcomm Technologies, Inc. y sus compañías asociadas, «Making 5G NR a Commercial Reality,» 2018.
- [118] A. Hellemans, «Spectrum IEEE,» 2015. [En línea]. Available: <https://spectrum.ieee.org/tech-talk/computing/networks/5g-taking-stock>. [Último acceso: diciembre 2018].
- [119] E. Pascua, «IoT Analytics,» 27 septiembre 2018. [En línea]. Available: <https://iot-analytics.com/lpwan-market-report-2018-2023-new-report/>.
- [120] G. Kim, «Spectrum futures,» febrero 2018. [En línea]. Available: <https://spectrumfutures.org/23-mobile-operators-launch-nb-iot-or-lte-m-networks/>.

