

Evaluación de redes móviles 5G en entornos con aplicaciones IoT

David Delgado Dotor

Máster Universitario en Ingeniería de Telecomunicaciones UOC-URL

Consultor: Jose Lopez Vicario

Profesor responsable: Xavier Vilajosana

07/01/2020



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

FICHA DEL TRABAJO FINAL

Título del trabajo:	Evaluación de redes móviles 5G en entornos con aplicaciones IoT
Nombre del autor:	David Delgado Dotor
Nombre del consultor:	José López Vicario
Nombre del PRA:	Xavier Vilajosana
Fecha de entrega (mm/aaaa):	01/2020
Titulación:	Máster Universitario en Ingeniería de Telecomunicaciones UOC-URL
Área del Trabajo Final de Máster:	TFM – Telemática
Idioma del trabajo:	Castellano
Palabras clave:	5G IoT
Resumen del Trabajo (máximo 250 palabras): <i>Con la finalidad, contexto de aplicación, metodología, resultados i conclusiones del trabajo.</i>	
<p>El sector de las comunicaciones móviles celulares ha mostrado una gran actividad en las últimas décadas. Mediante un esfuerzo y determinación persistente, los operadores de telecomunicaciones están implementando una transformación digital para crear un mundo digital más avanzado, para poder así proporcionar a los usuarios una experiencia en tiempo real, bajo demanda.</p> <p>La quinta generación de redes móviles, 5G, es el comienzo del desarrollo de la digitalización para la interconexión de la sociedad. La expansión del alcance del servicio para redes móviles enriquece el ecosistema de la red de telecomunicaciones. La digitalización crea enormes oportunidades para la industria de la comunicación móvil, pero plantea desafíos estrictos hacia las tecnologías de comunicación móvil.</p> <p>Se espera que los sistemas de quinta generación admitan una gran variedad de escenarios de aplicaciones y casos de uso (por ejemplo, automoción, servicios públicos, ciudades inteligentes, atención médica) con requisitos distintos y variados. En este contexto, se prevén acuerdos a diferentes niveles entre los diferentes actores del mercado, que van desde compartir la infraestructura hasta exponer capacidades de red específicas como un servicio extremo a extremo (E2E) e integrar los servicios de los socios en el sistema 5G a través de un conjunto de abundantes capacidades y orientado al software.</p> <p>En el proyecto desarrollado se describen las diferentes arquitecturas en sistemas 5G, tecnologías de base y las principales características y requisitos que se pretenden cubrir con esta nueva generación de redes móviles. Después, se describe el concepto de Internet de las cosas y se analizan a nivel general las diferentes arquitecturas y requerimientos de los servicios de IoT, para posteriormente realizar una evaluación de las soluciones que intervienen en una red IoT, fundamentadas en 5G.</p>	

Abstract (in English, 250 words or less):

The mobile cellular communications sector has shown great activity in recent decades. Through persistent effort and determination, telecommunications operators are implementing a digital transformation to create a more advanced digital world, in order to provide users a real-time, on-demand experience.

The fifth generation of mobile networks, 5G, is the beginning of the development of digitalization for the interconnection of society. The expansion of the service scope for mobile networks enriches the ecosystem of the telecommunications network. Digitization creates huge opportunities for the mobile communication industry but brings up strict challenges towards mobile communication technologies.

Fifth generation systems are expected to support a wide variety of application scenarios and use cases (eg, automotive, public services, smart cities, medical care) with different and varied requirements. In this context, agreements are foreseen at different levels between the different market players, ranging from sharing the infrastructure to exposing specific network capabilities as an end-to-end (E2E) service and integrating the services of the partners into the 5G system through a set of abundant capabilities and software oriented.

In the developed project are described the different architectures in 5G systems, core technologies and the main features and requirements that are intended to be covered with this new generation of mobile networks. Afterward, the Internet of things concept is described and the different architectures and requirements of the IoT are analyzed at a general level, to subsequently perform an evaluation of the solutions involved in an IoT network, based on 5G.

Índice

1. Introducción	1
1.1. Contexto y justificación del Trabajo	1
1.2. Objetivos del Trabajo.....	4
1.3. Enfoque y método seguido	4
1.4. Planificación del Trabajo.....	5
1.5. Breve descripción de los otros capítulos de la memoria	6
2. Estado del Arte	7
2.1. Introducción	7
2.2. Evolución de las redes móviles.....	7
2.3. Modelos de negocio 5G	10
3. 5G New Radio (5G NR)	13
3.1. Arquitectura genérica del sistema LTE	13
3.2. Arquitectura del sistema 5G NR.....	15
3.2.1. 5G Core Network: Funciones de red.....	20
3.2.1.1. <i>User Plane Function</i> (UPF).....	21
3.2.1.2. <i>Access and Mobility Management Function</i> (AMF)	22
3.2.1.3. <i>Session Management Function</i> (SMF).....	23
3.2.1.4. Otras funciones de red	23
3.2.2. <i>Next Generation – Radio Access Network</i>	24
3.2.3. Modelo 5G QoS.....	26
3.2.4. Consideraciones de migración.....	28
3.2.5. Comparación y convivencia con LTE.....	30
3.3. Estandarización 5G	31
3.3.1. Organizaciones de regulación y estándares	31
3.3.2. Otras organizaciones involucradas	34
3.4. Espectro para 5G.....	35
3.4.1. Bandas de frecuencia para NR	35
3.4.2. Plan Nacional 5G en España.....	40
3.5. SDN y NFV en 5G	40
3.6. <i>Network slicing</i>	43
3.7. Casos de uso de 5G	46
3.7.1. Escenarios principales de utilización de 5G	47
4. Internet of Things (IoT)	50
4.1. Introducción.....	50
4.2. Estado del arte de CIoT en LTE y orientación a 5G	51

4.3.	Tecnologías principales de <i>Cellular IoT</i>	52
4.3.1.	Características de LTE-M	53
4.3.2.	Características de NB-IoT.....	54
4.4.	Requerimientos de los servicios de IoT	57
4.5.	Casos de uso de <i>Cellular IoT</i>	58
5.	Evaluación de redes 5G en entornos con aplicaciones <i>Cellular IoT</i>.....	60
5.1.	Introducción.....	60
5.2.	Propósito del estudio experimental	62
5.3.	Equipo Amarisoft OTS-100.....	62
5.3.1.	Hardware del equipo OTS-100	63
5.3.2.	Software del equipo OTS-100.....	63
5.3.3.	Parámetros de configuración NB-IoT del OTS-100.....	64
5.4.	Dispositivo NB-IoT	66
5.4.1.	Hardware NB-IoT.....	67
5.4.2.	Software NB-IoT	68
5.5.	Configuración y despliegue del escenario experimental	68
5.5.1.	Configuración de la red LTE-NB	68
5.5.2.	Configuración del dispositivo NB-IoT	69
5.5.3.	Monitorización y comprobación de la conexión (<i>attach</i>).....	71
5.5.4.	Monitorización y comprobación de la desconexión (<i>detach</i>)	76
5.6.	Valoración Económica del Trabajo	77
6.	Conclusiones	78
7.	Acrónimos.....	79
8.	Bibliografía.....	82
9.	Anexos	84
9.1.	Anexo A – Configuración del módulo LTEENB	84
9.2.	Anexo B – Código Arduino.....	87

Índice de figuras

Figura 1: Evolución de las generaciones de las redes móviles y servicios [3].	1
Figura 2: Tecnologías clave para habilitar 5G [4].	2
Figura 3: Planificación inicial del proyecto.	5
Figura 4: Diagrama de Gantt del proyecto.	5
Figura 5: Posibles caminos a 5G para la empresa [6].	11
Figura 6: LTE y su evolución [7].	13
Figura 7: Arquitectura del sistema LTE [8].	14
Figura 8: Red de acceso E-UTRAN [8].	14
Figura 9: Bloques generales del sistema 5G [9].	15
Figura 10: Modos de operación en redes móviles 5G [9].	16
Figura 11: Cronología de estandarización de 3GPP NR según IMT-2020 [7].	16
Figura 12: Representación general basada en servicios de la arquitectura 5G [10].	17
Figura 13: Representación de una arquitectura basada en servicios [9].	18
Figura 14: División entre el plano de control y el plano de usuario [9].	18
Figura 15: Arquitectura de Network slicing en NextGen [11].	19
Figura 16: Despliegue MEC integrado en red 5G [12].	19
Figura 17: Ejemplos del despliegue físico de MEC [12].	20
Figura 18: Arquitectura general de los sistemas 5G [13].	21
Figura 19: Identificación de la UPF en la arquitectura del sistema 5G [9].	22
Figura 20: Identificación de la AMF en la arquitectura del sistema 5G [9].	22
Figura 21: Identificación de la SMF en la arquitectura del sistema 5G [9].	23
Figura 22: Otras funciones de red en la arquitectura del sistema 5G [9].	23
Figura 23: Otras funciones de red en la arquitectura del sistema 5G [9].	24
Figura 24: Opciones de conexión entre NG-RAN y EPC o 5GC [7].	24
Figura 25: Interfaces NG RAN [14].	25
Figura 26: Arquitectura general de NG-RAN [14].	25
Figura 27: Modelo de QoS [28].	26
Figura 28: Modos de Session y Service Continuity [28].	27
Figura 29: El flujo de QoS [9].	27
Figura 30: Arquitectura general LTE (E-UTRAN)-NR DC [15].	29
Figura 31: Coexistencia NR-LTE en el enlace descendente y ascendente [7].	31
Figura 32: Coexistencia NR-LTE en el enlace ascendente [7].	31
Figura 33: Cronograma IMT-2020 de la ITU-R (diseñado en el año 2018) [16].	32
Figura 34: Calendario previsto por la 3GPP para las releases 14, 15 y 16 [7].	33
Figura 35: Expansión del ecosistema 5G [37].	34

Figura 36: Relación entre los organismos reguladores, organizaciones de desarrollo de normas, foros de la industria e industria móvil [7].	34
Figura 37: Redes 5G virtuales E2E diseñadas para satisfacer los requisitos de la aplicación [4].	42
Figura 38: Esquema conceptual de network slicing [20].	44
Figura 39: Funciones de red que componen network slices [28].	46
Figura 40: Clasificación de la ITU sobre los escenarios principales de redes 5G [29].	48
Figura 41: Mejoras de las capacidades clave de IMT-Advanced a IMT-2020 [4].	48
Figura 42: Capacidades clave en diferentes escenarios de uso [30].	49
Figura 43: La evolución de LTE IoT es fundamental para 5G [33].	51
Figura 44: Modos de operación de NB-IoT [36].	55
Figura 45: Características principales de las tecnologías LTE-M y NB-IoT [37].	58
Figura 46: Avances de 3GPP hacia los requisitos de 5G mMTC [38].	60
Figura 47: Equipo OTS-100 del fabricante Amarisoft utilizado para el experimento.	63
Figura 48: Módulos NB-IoT Bee, NB-IoT Shield y Arduino UNO [40].	68
Figura 49: Monitorización de los módulos LTE y de la celda standalone creada en el eNB.	69
Figura 50: Señalización de arranque del equipo OTS-100.	72
Figura 51: Mensajes RRC encargados de la gestión de la conexión.	72
Figura 52: Proceso de conexión (attach) del dispositivo NB-IoT.	73
Figura 53: Base de datos de suscriptores del LTEMME.	73
Figura 54: Log del ping realizado desde OTS-100 hacia el dispositivo.	74
Figura 55: Log del ping realizado desde el dispositivo NB-IoT hacia Google.	75
Figura 56: Visualización a través de WebTool del ping hacia el DNS de Google.	75
Figura 57: Proceso de desconexión (detach) del dispositivo NB-IoT.	76
Figura 58: Visualización del estado de desconexión del dispositivo.	76

Índice de tablas

Tabla 1: Características más destacadas de la tecnología 2,5G.	7
Tabla 2: Características más destacadas de la tecnología 2,75G.	8
Tabla 3: Características más destacadas de la tecnología 3,5G y 3,75G.	8
Tabla 4: Resumen comparativo de las diferentes generaciones de redes móviles.	9
Tabla 5: Tendencias emergentes en el sector de las TIC.	12
Tabla 6: División de las bandas de frecuencia en la release 15 del 3GPP para 5G NR.	38
Tabla 7: Bandas de frecuencia operativas definidas por 3GPP para NR.	39
Tabla 8: Hoja de ruta del Plan Nacional 5G en España.	40
Tabla 9: Resumen comparativo de las características principales de LTE-M, NB-IoT y EC-GSM-IoT.	53
Tabla 10: Resumen de las características principales de LTE-M y NB-IoT.	58
Tabla 11: Algunos ejemplos de los diferentes casos de uso de Cellular IoT.	59
Tabla 12: Componentes y características hardware del equipo OTS-100 [39].	63
Tabla 13: Componentes y características software del equipo OTS 100 [39].	63
Tabla 14: Funcionalidades NB-IoT del equipo OTS 100 [39].	64
Tabla 15: Herramientas software del equipo OTS-100 para interconectarse con el hardware	64
Tabla 16: Parámetros NB-IoT para configurar el módulo LTEENB del equipo OTS-100 [39].	66
Tabla 17: Parámetros de propiedades para configurar el módulo LTEMME del equipo OTS-100 [39].	66
Tabla 18: Componentes y características hardware de los dispositivos NB-IoT [40]. ...	67
Tabla 19: Herramientas software utilizadas para configurar el dispositivo NB-IoT.	68
Tabla 20: Parámetros más importantes configurados en el módulo LTEENB.	69
Tabla 21: Comandos AT utilizados durante la configuración y pruebas del dispositivo NB-IoT.	70
Tabla 22: Presupuesto para la realización del proyecto.	77

1. Introducción

1.1. Contexto y justificación del Trabajo

El incremento continuo en las expectativas de la calidad del servicio y comunicaciones móviles por parte de los usuarios obligan a las telecomunicaciones y tecnologías a estar en constante innovación. Asimismo, las tecnologías de redes móviles pasan por épocas/generaciones que permiten así satisfacer este incremento continuo de la demanda. La evolución de las distintas generaciones ha tenido como motor un cambio tecnológico que afectaba a la interfaz radio de los sistemas.

En los inicios del teléfono móvil, su único uso era llamar a otras personas. En concreto, la década de 1990 vino marcada por el crecimiento exponencial de usuarios de voz, y predominada por la tecnología GSM (*Global System for Mobile*) como estándar. Poco después, se introdujo la capacidad de enviar mensajes de texto a otros teléfonos móviles. Hoy en día se puede usar un teléfono móvil para hacer literalmente todo. Desde el pago de una compra en un comercio hasta hacer seguimiento de los hábitos de sueño, el teléfono inteligente de hoy casi no tiene límites [1]. El número total de suscripciones móviles fue de alrededor de 7.9 mil millones en el primer trimestre de 2019, con 44 millones de suscripciones nuevas agregadas durante este periodo [2].

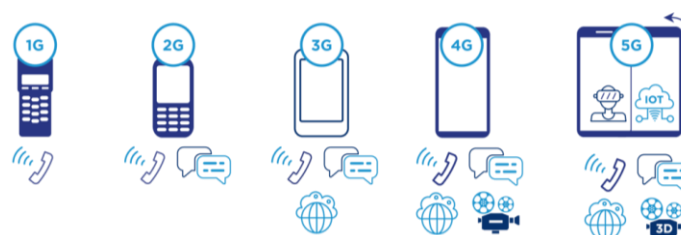


Figura 1: Evolución de las generaciones de las redes móviles y servicios [3].

En España las redes de telefonía móvil todavía cuentan con despliegues de las tecnologías 2G, 3G y 4G. Sin embargo, la tendencia de los operadores de telecomunicaciones es evolucionar hacia nuevas generaciones y poder así apagar las anteriores.

Actualmente, la cuarta generación (4G) permite a los usuarios experimentar velocidades elevadas que les permiten disfrutar de contenido multimedia, vídeos en *streaming*, videoconferencias, etc. No obstante, frente a las nuevas necesidades existentes y el desarrollo de nuevos dispositivos y tecnologías, desde el año 2015 han ido surgiendo iniciativas y nuevos servicios que no se pueden cubrir a través de la tecnología actual 4G LTE (*Long Term Evolution*).

La tecnología 5G permitirá que más dispositivos se conecten a la red al mismo tiempo. Si bien el uso de teléfonos inteligentes continúa creciendo, esto es especialmente importante porque 5G está configurado para facilitar nuevos desarrollos. Por ejemplo, el Internet de las Cosas (*Internet of Things*, IoT) donde una gran cantidad de dispositivos son conectados a la red, la realidad virtual la cual exige un gran ancho de banda, las comunicaciones vehículo-a-red (*Vehicle-to-Network*, V2N) donde la ultra baja latencia es un requisito fundamental, etc. La próxima generación de tecnologías de redes móviles, la quinta generación (5G), permitirá cubrir esos requisitos y superar los límites de los sistemas actuales. Este trabajo pretende desarrollar la idea de por qué la quinta

generación es necesaria y estudiar como cubriría los requisitos/necesidades de aplicaciones IoT.

Combinando tecnología de red y la investigación más reciente, 5G debería ofrecer conexiones que sean bastante más rápidas que las conexiones actuales, con velocidades de descarga promedio del orden de 1 Gbps. Las redes ayudarán a impulsar un gran aumento en la tecnología de IoT, proporcionando la infraestructura necesaria para transportar grandes cantidades de datos, así como un mundo más inteligente y conectado.

Las redes 5G ya están comenzando a aparecer y se espera que se lancen en todo el mundo para 2020, trabajando inicialmente junto con la tecnología 4G existente para proporcionar conexiones más rápidas sin importar dónde se encuentre. Posteriormente, esta tecnología evolucionará gracias a la introducción de una nueva interfaz aire, *New Radio* (NR). Esta nueva interfaz radio se trata de la parte de radiofrecuencia entre la estación base y el dispositivo móvil.

Las tecnologías y técnicas avanzadas que podrían habilitar las redes 5G se presentan en la Figura 2.

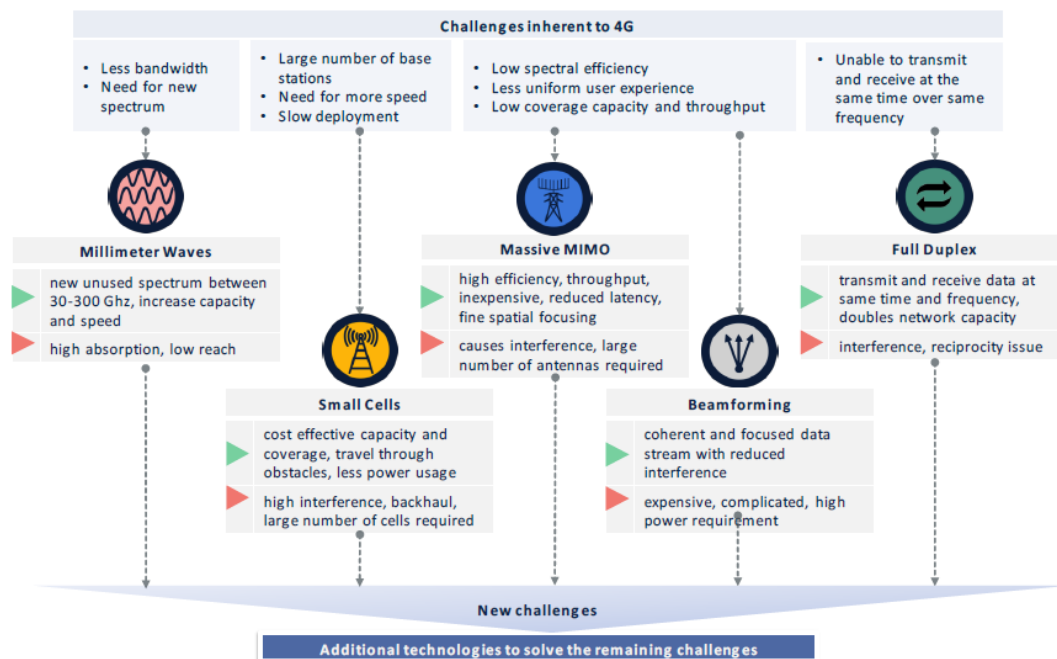


Figura 2: Tecnologías clave para habilitar 5G [4].

En la actualidad, las redes inalámbricas tienen un espectro limitado en áreas geográficas donde hay alta densidad de usuarios. Esto ha resultado en menos ancho de banda para los usuarios, lo que lleva a un servicio más lento y más conexiones perdidas. Una solución posible con 5G sería utilizar un nuevo espectro que nunca se ha utilizado para servicios móviles: las ondas milimétricas (*mmWave*). Esto aumentará enormemente la capacidad de las redes, pero tiene una propagación limitada¹ y no puede viajar a través de edificios y obstáculos. Para superar esto, los operadores podrían instalar miles de

¹ Las ondas milimétricas tienen capacidades de cobertura mucho más bajas debido a una mayor absorción, lo que será un desafío para los operadores de telecomunicaciones. Actualmente, la industria está luchando por modelar, comprender y aprender a planificar redes en casos como lluvias, nieve, cambios de follaje debido a las estaciones, etc.

estaciones base tipo *small cells*. Una estructura de red tan radicalmente diferente proporcionaría un uso más específico y eficiente del espectro.

Además, dos tecnologías que resultarían críticas para habilitar 5G son *massive MIMO* (*Multiple-Input Multiple-Output*) y *Beamforming*. Al presentar decenas de antenas en una sola matriz *massive MIMO* podría aumentar la capacidad de las redes móviles en un factor de 22 o más. *Beamforming* permitiría que un gran número de usuarios y antenas en un *array massive MIMO* intercambien más información a la vez mejorando las relaciones de señal a ruido. También, da como resultado un flujo de datos coherente y enfocado que puede alcanzar distancias más grandes, lo que aumenta la capacidad de las estaciones base en términos de número de suscriptores atendidos. Si bien el *massive MIMO* proporciona una mayor eficiencia espectral, actualmente se está investigando una nueva tecnología, llamada *full duplex*. Aunque hasta ahora se han realizado pocas pruebas de campo, se espera que esta tecnología aumente el rendimiento y reduzca la latencia, los cuales son requisitos críticos para 5G. Podría duplicar la capacidad de las redes inalámbricas al permitir que el transceptor transmita y reciba datos al mismo tiempo sobre la misma frecuencia.

Dada la gran novedad de la tecnología 5G NR, el objetivo del trabajo es presentar un estudio llevado a cabo para entender mejor en qué consiste 5G, cuáles son sus ventajas y sus principales diferencias con el paradigma 4G actual. Es por ello, que surge la necesidad de disponer de la máxima información posible sobre la arquitectura del sistema 5G NR, entender la nueva interfaz radio de la tecnología 5G, estudiar la estandarización y espectro contemplado para el desarrollo de la misma y analizar la importancia del concepto *Network Slicing* para las redes móviles 5G.

Dentro del amplio paradigma 5G, este trabajo se ha centrado en el contexto *Internet of Things* (IoT). Por este motivo, se presentarán conceptos sobre este contexto y se abordará el cómo 5G facilitará su implementación.

Con el objetivo de facilitar la comprensión de los escenarios principales de utilización de redes móviles 5G y el concepto de IoT, se evaluará el despliegue de una red privada LTE en un entorno con dispositivos *NarrowBand-IoT* (NB-IoT) y posteriormente, se explicará la estimación económica del despliegue realizado. Todo ello, con el correspondiente Plan de Pruebas para ratificar el funcionamiento de la red móvil empleada. Hay que destacar que la evaluación experimental se ha realizado utilizando las tecnologías LTE-M y NB-IoT, ya que 5G establece el uso de estas dos tecnologías para escenarios mMTC en las soluciones de despliegue.

1.2. Objetivos del Trabajo

Los objetivos del trabajo son los siguientes:

- Conocer el Estado del Arte de las redes móviles celulares.
- Definición y descripción de la arquitectura del sistema 5G NR partiendo de la arquitectura general del sistema LTE.
- Analizar la interfaz radio del sistema 5G, estudiar el concepto de *Network Slicing*, y su importancia en los sistemas 5G y descripción de la estandarización y espectro 5G.
- Definición y descripción general de *Internet of Things*, características, requerimientos y casos de uso de aplicación de IoT.
- Evaluación de un escenario mMTC 5G realizando el despliegue real de una red móvil LTE-NB en un entorno con dispositivos NB-IoT.

1.3. Enfoque y método seguido

El enfoque y método se ha seleccionado teniendo en cuenta los objetivos del proyecto.

La primera fase de la elaboración del proyecto ha sido la Fase de Análisis del estado del arte donde se explica el inicio de la tecnología 5G (publicación del servicio), las expectativas de esta nueva tecnología y el estado actual de estudio. A continuación, se ha puesto foco en la evolución de las diferentes generaciones de redes móviles hasta llegar a la última generación que existe actualmente y en la cual se centra este trabajo.

Posteriormente, se ha entrado en la Fase de Investigación: esta fase se ha centrado en la obtención de la información necesaria para el desarrollo del capítulo referente a la nueva radio 5G y el *Internet of Things*. Se ha puesto especial foco en la obtención y desarrollo de la información referente a la nueva radio 5G con el objetivo de explicar los puntos clave que hacen a esta nueva tecnología ser más atractiva que las anteriores. Además, se han desarrollado los escenarios principales de utilización de 5G.

Luego, se ha entrado en la Fase Analítica del Proyecto: una vez obtenido el hardware y software, se ha adoptado una postura analítica para evaluar la complejidad del despliegue de la red móvil LTE.

Por último, se ha entrado en la Fase de Evaluación: en esta fase se ha realizado un despliegue real de una red móvil privada LTE sobre un entorno con dispositivos NB-IoT.

Después de toda la investigación y análisis que se ha realizado a lo largo de este proyecto, se han obtenido una serie de conclusiones que se explican en detalle para concluir el trabajo.

1.4. Planificación del Trabajo

En este apartado se incluye el desarrollo de la planificación del Trabajo según el cronograma realizado originalmente y un resumen de la planificación real ejecutada con las desviaciones surgidas a lo largo del proyecto.

A continuación, se incluye la planificación inicial del proyecto, así como el diagrama de Gantt correspondiente.

	●	Nombre	Duración	Inicio	Terminado	Predecesores
1		Decisión de la temática del TFM	8 days	19/09/19 8:00	26/09/19 17:00	
2	■	Hito 0 - Decisión del proyecto y comunicación al consultor	0 days	26/09/19 17:00	26/09/19 17:00	1
3	■	INICIO: Trabajo Final de Máster	115,125 days	27/09/19 8:00	20/01/20 9:00	2
4	■	Realización del Plan del proyecto y Planificación	8 days	27/09/19 8:00	4/10/19 17:00	2
5	■	Búsqueda general de información y análisis sobre 5G e IoT	49 days	27/09/19 8:00	14/11/19 17:00	2
6	■	Hito 1 - Entrega PEC 1: Entrega de la planificación del trabajo	0 days	4/10/19 17:00	4/10/19 17:00	4
7		Corrección PEC 1 y revisión de comentarios	6 days	5/10/19 8:00	10/10/19 17:00	6
8	■	Explicación del Estado del Arte	6 days	5/10/19 8:00	10/10/19 17:00	6
9	■	Investigación y definición sobre redes móviles 5G e IoT	25 days	11/10/19 8:00	4/11/19 17:00	8
10	■	Arquitecturas LTE y 5G, diferencias y modelos de operación	25 days	11/10/19 8:00	4/11/19 17:00	8
11	■	Explicaciones de la Estandarización y Espectro 5G	10 days	5/11/19 8:00	14/11/19 17:00	10
12	■	Investigación y definición sobre Network slicing y QoS	6 days	15/11/19 8:00	20/11/19 17:00	11
13	■	Hito 2 - Entrega PEC 2: Primera entrega del proyecto	0 days	13/11/19 15:00	13/11/19 15:00	
14	■	Corrección PEC 2 y revisión de comentarios	6 days	14/11/19 8:00	19/11/19 17:00	13
15	■	Investigación y análisis sobre Internet of Things	20 days	14/11/19 9:00	4/12/19 9:00	13
16	■	Evaluación despliegue redes móvil 4G LTE en entornos NB-IoT	31 days	18/11/19 9:00	19/12/19 9:00	
17		Análisis del resto de conceptos teóricos	42 days	5/10/19 8:00	15/11/19 17:00	6
18	■	Hito 3 - Entrega PEC 3: Segunda entrega del proyecto	0 days	18/12/19 9:00	18/12/19 9:00	
19	■	Corrección PEC 3 y revisión de comentarios	6 days	19/12/19 9:00	25/12/19 9:00	18
20		Explicación de las conclusiones	21 days	18/12/19 9:00	8/01/20 9:00	18
21	■	Hito 4 - Entrega de la memoria final	0 days	7/01/20 17:00	7/01/20 17:00	
22	■	Realización de la presentación	6 days	8/01/20 8:00	13/01/20 17:00	21
23	■	Hito 5 - Entrega de la presentación	0 days	12/01/20 16:00	12/01/20 16:00	
24	■	Hito 6 - Inicio del tribunal	0 days	13/01/20 9:00	13/01/20 9:00	23
25	■	Revisión y respuestas consultas del tribunal	7 days	13/01/20 9:00	20/01/20 9:00	24
26	■	Hito 7 - Fin del tribunal	0 days	19/01/20 8:00	19/01/20 8:00	
27	■	FINAL Cierre del proyecto	0 days	19/01/20 17:00	19/01/20 17:00	26

Figura 3: Planificación inicial del proyecto.

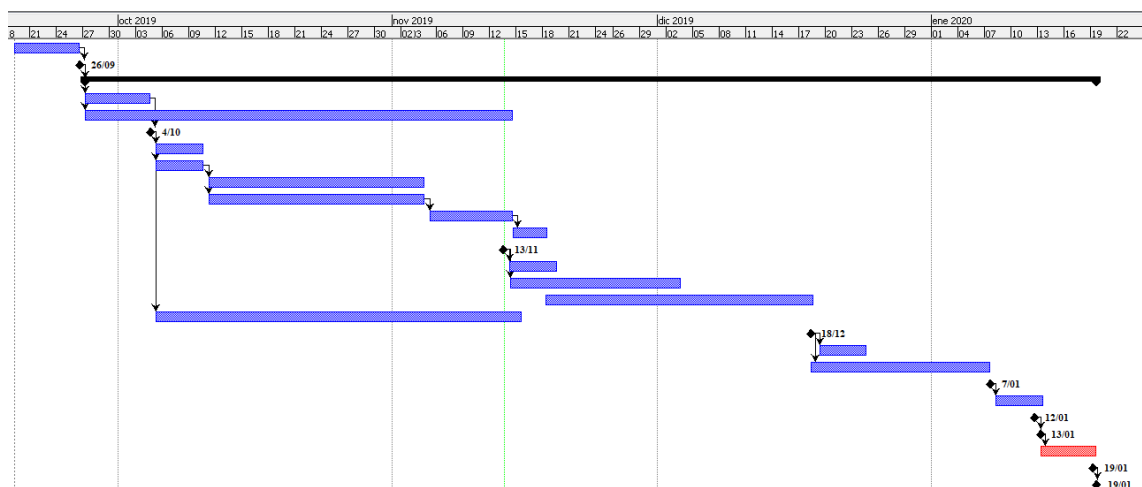


Figura 4: Diagrama de Gantt del proyecto.

Finalmente, el desarrollo del trabajo ha estado alineado, por lo general, con la planificación elaborada inicialmente. Las tareas enumeradas del 1 al 18 (ésta última correspondiente al Hito 3) en la Figura 3, se han realizado a tiempo. Sin embargo, han existido desviaciones en los tiempos planificados para la elaboración y maquetación del documento. Esto ha sido debido a varios motivos:

- Cambios en la estructura del documento: la estructura definida inicialmente ha ido variando a lo largo del trabajo debido a que la fase de búsqueda de información ha provocado ampliar o reducir contenidos. Además, la necesidad de adaptarse a los objetivos del propuestos también ha afectado a los cambios en la estructura. Todo ello, ha ocasionado un aumento en el tiempo previsto para la elaboración del documento.
- Disponibilidad del laboratorio de pruebas: debido al horario de los responsables del laboratorio y ocupación de este, la disponibilidad de acceso no ha sido la esperada inicialmente.
- La dedicación en la última parte del proyecto, correspondiente a las pruebas experimentales en laboratorio, se ha alargado más de lo previsto inicialmente por causas relacionadas con el nuevo entorno y su configuración.

1.5. Breve descripción de los otros capítulos de la memoria

La memoria del proyecto está dividida en cinco principales capítulos:

En el capítulo 1, se realiza una introducción al proyecto, justifica la necesidad del proyecto realizado y los objetivos del trabajo. También se incluye un apartado que describe la planificación del proyecto y sus desviaciones a lo largo del desarrollo realizado.

En el capítulo 2, se describe el Estado del Arte de las redes móviles, incluyendo escenarios de utilización de redes con tecnología 5G y prestaciones de estas, para desarrollar posteriormente los siguientes capítulos.

El capítulo 3 describe la nueva radio 5G (5G NR), su arquitectura, tecnologías de base e interfaz radio, así como la estandarización y reparto radioeléctrico factor clave para las comunicaciones móviles. Se analiza el concepto de *network slicing* y la importancia para la tecnología 5G.

Luego, en el capítulo 4, se detalla el concepto de *Internet of Things* como caso de uso de 5G. Se describen a nivel general las características y protocolos IoT, arquitectura y tipos de redes según el alcance. Se definen los requerimientos de los servicios de IoT, junto con algunos casos de uso de dispositivos IoT en distintos sectores.

En el capítulo 5, se realiza una evaluación sobre la utilización de redes móviles 5G en entornos con aplicaciones IoT, análisis de métricas de rendimiento obtenidas durante el experimento y observación de resultados para validar el cumplimiento de los requisitos que se establecen para este tipo de aplicaciones.

Por último, en el capítulo 6, se incluyen las conclusiones obtenidas de la realización del proyecto, así como una reflexión sobre el logro de los objetivos planteados inicialmente. Además, se incluye una descripción de las líneas de trabajo futuro a explorar que no han podido realizarse por extensión y tiempo.

2. Estado del Arte

2.1. Introducción

A diferencia de las generaciones anteriores de redes móviles, se espera que la tecnología de quinta generación (5G) transforme fundamentalmente el papel que desempeña la tecnología de telecomunicaciones en la sociedad. También se espera que 5G permita un mayor crecimiento económico y una digitalización generalizada de una sociedad hiperconectada, donde no solo las personas están conectadas a la red cuando sea necesario, sino también muchos otros dispositivos que crean virtualmente la sociedad con todo conectado (es decir, Internet de las cosas).

Sin embargo, la variedad de modelos de negocios y servicios que los sistemas 5G admitirán, lleva a numerosas estrategias que un operador móvil tiene disponibles para introducir servicios 5G. Dado que el alcance global y las economías de escala para equipos de red y dispositivos siguen siendo un componente vital para el éxito de las redes de telecomunicaciones móviles, es importante garantizar que, aunque diferentes operadores puedan seguir diferentes opciones de introducción y despliegue de 5G, esos dos principios se conserven.

2.2. Evolución de las redes móviles

El inicio de las redes móviles empezó con la generación cero, radioteléfonos conectados a la red de telefonía fija, pero con sus propios números. Esta tecnología estuvo disponible para terminales de “bolsillo” y además se montaban en vehículos.

Posteriormente, en la década de 1980, se lanzó el estándar de tecnología inalámbrica analógica de primera generación. Donde las estaciones base se conectaban al resto del sistema telefónico a través de sistemas digitales. Estas redes móviles, eran utilizadas únicamente para el envío y recepción de paquetes de voz únicamente.

En 1991, sin embargo, comenzó la existencia a nivel comercial del estándar *Global System for Mobile Communications*, conocido actualmente como GSM, estándar de facto a nivel mundial. En este estándar se basó la red móvil de segunda generación, 2G. Además del protocolo GSM, la red móvil 2G se basa también en otros protocolos como CDMA (*Code Division Multiple Access*), TDMA (*Time Division Multiple Access*), iDEN (*integrated Digital Enhanced Network*) y PDC (*Packet Data Convergence*). Este tipo de red móvil propició la aparición de la transferencia de paquetes de datos lo cual supuso un enorme paso en la evolución de las redes móviles. Las principales características son la generación de mensajes tipo SMS (*Short Message Service*) y el cifrado de datos.

Posterior al 2G y antes de llegar a las redes móviles de tercera generación, existen otro tipo de conexiones que, en realidad, son las que contemplan una mayor superficie en cuanto a cobertura a nivel global. Se trata de las redes móviles 2,5G y 2,75G, también conocidas como GPRS (*General Packet Radio Service*) y EDGE (*Enhanced Data rates for GSM Evolution*) respectivamente. Las características más destacadas son:

Tecnología 2,5G	Velocidad de transmisión de datos de entre 56 kbits/s y 115 kbps/s.
	Navegación WAP, envío de mensajes MMS y servicios IPV4.
	Tecnología de transmisión de datos GPRS.

Tabla 1: Características más destacadas de la tecnología 2,5G.

Tecnología 2,75G	Velocidad de transmisión de datos de hasta 236.8 kbits/s.
	Tecnología de transmisión de datos EDGE.

Tabla 2: Características más destacadas de la tecnología 2,75G.

Luego, la llegada de la tercera generación, 3G, establecida por la ITU (*International Telecommunication Union*) como IMT-2000. Esta tecnología permitió la posibilidad de transferir datos y voz de forma simultánea, velocidades de transmisión de datos de hasta 2 Mbps y tecnología de transmisión de datos W-CDMA (*Wideband Code Division Multiple Access*), lo que ha dado lugar al servicio de videollamadas sobre redes móviles. La transferencia de datos también permite, por ejemplo, correos electrónicos, descarga de aplicaciones, televisión móvil y similares. Contrariamente a lo que pronosticaban muchos estudios de mercado, la madurez alcanzada por el servicio de voz no se vio relevada por los servicios de datos en los primeros años.

Al igual que entre el cambio de segunda a tercera generación, entre el 3G y el 4G hay otro tipo de conexiones que, de igual forma, se denominan 3,5G y 3,75G. A modo resumen, las características más relevantes sobre 3,5G y 3,75G son las siguientes:

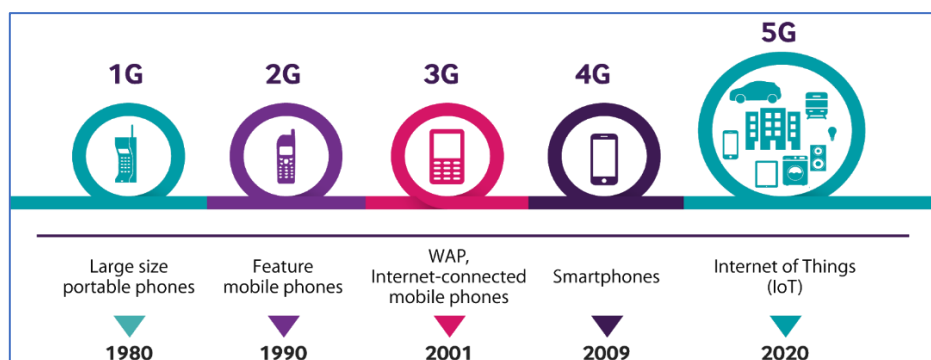
Tecnología 3,5G	Velocidades de transmisión (teóricas) de hasta 14 Mbps.
	Tecnología de transmisión de datos HSDPA.
Tecnología 3,75G	Tecnología de transmisión de datos HSUPA.

Tabla 3: Características más destacadas de la tecnología 3,5G y 3,75G.

Después, la llegada de la cuarta generación, 4G LTE, donde este tipo de redes están basadas completamente en el protocolo IP, siendo un sistema y una red, que se alcanza a la convergencia entre las redes de cable e inalámbricas. Para el despliegue de esta red, se tuvo que liberalizar la banda de 800 MHz. Algunas de las características más destacadas de esta generación son la compatibilidad con IPv6, velocidades entre 100 Mbps (movilidad) y 1 Gbps (reposo), cambio suave entre antenas, soporte para QoS (*Quality of Service*), baja latencia y una red diseñada para la transmisión y *streaming* de vídeo en alta definición. Desde los inicios del despliegue de esta tecnología, la cuarta generación ha sido optimizada, ahora con LTE *Advanced* o 4,5G se pueden alcanzar velocidades en descarga de hasta 300 Mbps.

Por último, la nueva generación, 5G, establecida por la ITU como IMT-2020 y actualmente bajo proceso de estandarización con previsión de finalización para el año 2020. La era de 5G, va más allá de redes móviles de banda ancha y pretende aportar soluciones para los desafíos de soportar áreas densamente pobladas (1,000 k conexiones por km²), comunicaciones ultra fiables y de baja latencia en torno a 1 ms, tasas de transferencia de 10 Gbps por conexión, conectividad para movilidad de alta velocidad (trenes de alta velocidad 500 km/h), banda ancha móvil de muy alta velocidad y capacidad con velocidades en movilidad superiores a 100 Mbit/s y picos de 1 Gbit/s, y universalización de *Internet of Things*. Los casos comerciales de los operadores requerirán que implementen celdas pequeñas a un ritmo más rápido y con una mayor densidad, lo que hará que sea aún más esencial tener procesos de regulación e instalación optimizados.

En la siguiente tabla se presenta un resumen comparativo entre las diferentes generaciones de redes móviles explicadas anteriormente, donde se han destacado las características más relevantes. Hay que tener en cuenta, que alguna de las características reflejadas para la tecnología 5G puede variar debido a que actualmente ésta se encuentra en proceso de estandarización.



	1G	2G	3G	4G	5G
Año de despliegue	1970 - 1980	1980 – 1990	2001	2009	2019 - 2020
Estándares	AMPS TACS NMT	GSM GPRS EDGE	UMTS HSPA	LTE	5G NR
Servicios	Sólo voz	Voz digital, SMS, roaming internacional y otros*	Voz digital, Internet de alta velocidad y otros**	Telefonía IP, TV móvil de alta definición y otros***	Mejora en telepresencia 3D, Internet táctil, realidad virtual, etc.
Tecnología	Analógica	Digital	Digital	Digital	Digital
Velocidad de descarga teórica	1 kbps a 2.4 kbps	14 kbps a 64 kbps	384 kbps a 2 Mbps	100 Mbps 1 Gbps (reposo)	1 Gbps a 10 Gbps
Técnica de acceso múltiple	FDMA	CDMA TDMA FDMA	CDMA WCDMA	OFDMA	OFDMA (numerología flexible) BDMA ²
Bandas de Frecuencia Europeas	800-900 MHz	900 MHz 1800 MHz	900 MHz 2100 MHz	800 MHz 1800 MHz 2600 MHz 3500 MHz No licenciadas	Anteriores + <i>mmWaves</i>
Ancho de banda	30 kHz	200 kHz 1.23 MHz	5 MHz	1.4, 3, 5, 10, 15 y 20 MHz (soporta <i>Carrier Aggregation</i>)	FR1 FR2
Latencia (orden de magnitud)	N/A	~ 600 ms	~ 50 ms	~ 10 ms	< 1 ms

Tabla 4: Resumen comparativo de las diferentes generaciones de redes móviles.

* Conferencia, llamada en espera, retención de llamada, transferencia de llamadas, bloqueo de llamadas, número de identificación de llamadas, autenticación y facturación basada en los servicios prestados.

** Acceso fijo inalámbrico a Internet, llamadas de video, televisión móvil, servicios basados en la localización, telemedicina, correo electrónico, buscapersonas, fax y mapas de navegación.

*** Videoconferencia, televisión 3D, computación en la nube, gestión de flujos múltiples de difusión y movimientos rápidos de teléfonos móviles, *Digital Video Broadcasting (DVB)*.

² El esquema *Beam Division Multiple Access (BDMA)* aumenta la capacidad del sistema de comunicación inalámbrica y maneja una gran cantidad de usuarios en sistemas 5G. Esta técnica es independiente de los recursos de frecuencia y tiempo y no solo resuelve el problema de la capacidad y eficiencia del ancho de banda, sino que también elimina el deterioro de la señal en el borde de la celda.

2.3. Modelos de negocio 5G

La nueva capacidad de diferenciación de servicios sin tener que construir diferentes redes físicas (*network slicing*) aumenta la posibilidad de servicios dirigidos a sectores económicos o industriales particulares, llamados “verticales”, así como a grupos de usuarios específicos. Por lo tanto, 5G tiene el potencial de cambiar los modelos de negocio para los operadores de red en relación con el mercado actual, donde los operadores de red han ofrecido servicios en gran medida estandarizados y la diferenciación se ha limitado a los planes de precios [4].

Esto también abre roles potencialmente nuevos para los intermediarios en la cadena de valor, posicionados por debajo de los operadores de red, que ofrecen agrupar y reempaquetar la conectividad para industrias particulares. Por ejemplo, los agregadores pueden proporcionar paquetes de conectividad transnacionales para industrias particulares. En general, es probable que haya oportunidades para la orquestación de diferentes redes, uniéndolas para crear servicios de conectividad para verticales específicos.

También, puede haber oportunidades para nuevos jugadores (conocido en inglés como *players*). Por ejemplo, es probable que 5G requiera una densificación significativa de las redes actuales a altas frecuencias para cumplir con los requisitos de ancho de banda. Esto puede crear nuevas oportunidades para que los operadores independientes adquieran sitios en áreas urbanas densas y espacios públicos interiores y desplieguen infraestructura 5G, ofreciendo servicios mayoristas que brinden parches de conectividad a los operadores 5G.

Dada la disponibilidad del espectro apropiado, los operadores de red tradicionales también podrían ser pasados por alto por los participantes enfocados en proporcionar conectividad para industrias específicas (por ejemplo, fábricas).

Los diseñadores de la adjudicación del espectro deben ser conscientes de estas posibilidades para la entrada ascendente, en lugar de suponer que los únicos compradores de espectro serán los operadores móviles establecidos. El espectro debe empaquetarse para permitir la entrada, por ejemplo, permitiendo a los licitantes ensamblar bloques más pequeños para dar flexibilidad sobre la cantidad de espectro adquirido.

A pesar de estas posibilidades transformadoras de 5G a largo plazo, actualmente existe un amplio consenso entre las partes interesadas de que los despliegues iniciales de 5G serán impulsados por una banda ancha móvil mejorada (*enhanced Mobile BroadBand*, eMBB). Se incentivará a los operadores para que implementen 5G reduciendo los costes unitarios de la capacidad de red y la necesidad de mantener una calidad de servicio competitiva frente al continuo crecimiento de los datos.

Es posible que solo eMBB no genere ingresos adicionales significativos de 5G para los operadores de red. La experiencia de migraciones anteriores de una tecnología móvil a la siguiente sugiere que los consumidores pagan una cantidad bastante similar a pesar de que las velocidades de datos han aumentado y los datos agrupados y las asignaciones de llamadas han crecido debido a la caída de los costes de la unidad de red.

A largo plazo, los incentivos de implementación de 5G dependen de los ingresos incrementales de los nuevos servicios. A su vez, los incentivos para desarrollar y comercializar nuevos servicios que dependen de 5G requerirán suficiente cobertura de

5G, lo que crea un problema de coordinación. Cualquier desarrollador comercial de un nuevo servicio o producto que se beneficie de la conectividad 5G querrá reducir su exposición al riesgo de que el despliegue de 5G sea lento o geográficamente limitado. Los desarrolladores tienden a seguir enfoques diversificados de conectividad, buscando desarrollar servicios que recurrirán sin problemas a redes móviles más lentas o menos capaces o que incluso podrían usar tecnologías bastante diferentes. Por ejemplo:

- Aplicaciones agrícolas de redes de sensores: es poco probable que este tipo de aplicaciones esperen hasta que 5G se vuelva omnipresente en las zonas rurales. Por el contrario, los desarrolladores que deseen lanzar nuevos productos y servicios al mercado adoptarán otras tecnologías provisionales que están fácilmente disponibles. Por ejemplo, evolución a largo plazo para máquinas LTE-M o NB-IoT.
- Comunicaciones celulares vehículo a todo (*Cellular Vehicle-to-everything, C-V2X*): tienen una ruta de desarrollo a través de 4G y no dependen de la disponibilidad de 5G. Los vehículos conectados necesitarán hacer uso de una amplia gama de estrategias de conectividad, que incluyen recurrir a redes de menor especificación y redes punto a punto.

Los requisitos para 5G derivan en última instancia de las tendencias globales establecidas de las Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC), ya que más industrias buscan las TIC para mejorar su productividad y desarrollar nuevos servicios y productos atractivos para sus clientes. Esto crea una demanda de conexiones más rápidas, mayor portabilidad, experiencia de mayor calidad y mayor seguridad de los datos móviles.

Con el objetivo de aumentar los bajos rendimientos en el sector de las telecomunicaciones se podrían adoptar los siguientes escenarios:

- Compartir la red: principalmente en la red de acceso radio, para reducir el gasto de capital (*Capital Expenditure, CAPEX*). Aunque se espera ver ahorros en los gastos operativos (*Operational Expenditures, OPEX*) a través de la digitalización, estas ganancias se compensarán con un mayor CAPEX resultante de una inversión sostenida en fibra y 5G. Sin embargo, si varios operadores usaran la misma infraestructura a través de acuerdos compartidos, el ahorro de costes podría ser aún mayor de lo esperado.
- Posibilidad de que la Comisión Europea adopte un enfoque más indulgente hacia la racionalización del mercado y la separación de las redes y empresas de servicios de los proveedores de servicios de comunicaciones, conocido en inglés como *Communications Service Providers (CSP)*. En muchos países europeos, los reguladores han impedido las fusiones y adquisiciones entre operadores móviles debido a la preocupación de que los precios subieran.

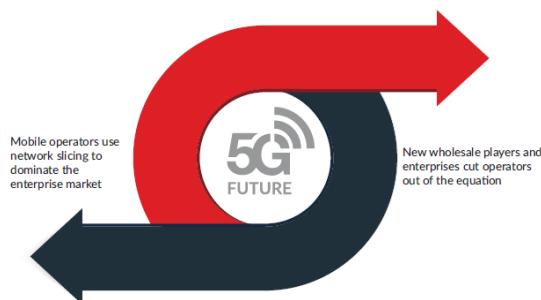


Figura 5: Posibles caminos a 5G para la empresa [6].

Los proveedores de servicios de comunicaciones y sus proveedores son optimistas sobre el futuro de sus negocios. También reconocen la necesidad de diversificar, pero no están seguros de qué nuevos modelos de negocio adoptar. A medida que comienza la implementación de 5G, muchos operadores están evaluando si ir más allá de la conectividad [6].

Utilizando *network slicing* y la red como servicio, conocido en inglés como *Network as a Service* (NaaS), los proveedores de servicios de comunicaciones esperan desarrollar nuevos modelos de negocio para ofrecer diferentes niveles de servicio a diferentes grupos de clientes.

A corto y mediano plazo, los proveedores de servicios de comunicaciones no tendrán que depender de 5G para entregar servicios de IoT porque la mayoría de ellos han construido redes de acceso inalámbrico de baja potencia utilizando LTE u otras tecnologías, pero la latencia es un problema en dichas redes.

En la siguiente tabla se muestran algunas de las tendencias emergentes en el sector de las TIC. Es probable que estos sean motores importantes de crecimiento, innovación y disrupción en muchas industrias, y 5G puede tener un papel importante en su apoyo [4].

Tendencia principal	Papel clave de 5G
Conectividad: crecimiento en dispositivos, contenido y tráfico de datos.	<ul style="list-style-type: none"> Manejo del crecimiento de una manera rentable, de alta velocidad y eficiente de energía.
Proliferación de los servicios de valor agregado y de los mejores <i>players</i> : operadores que se adaptan a los tiempos cambiantes.	<ul style="list-style-type: none"> Admite la evolución de tipos de contenido más ricos como 4K, 8K, VR, AR, vídeos de 360°, etc. Permite que los operadores de telecomunicaciones compitan con los <i>players</i> a través de asociaciones y ofertas de calidad.
Tecnología de acceso inalámbrico fijo (FWA): la gran migración inalámbrica.	<ul style="list-style-type: none"> Utiliza bandas de frecuencia mucho más altas que las redes 4G actuales. Resolver el problema de la última milla ³.
Digitalización y análisis avanzado: lograr el máximo valor de cada cliente.	<ul style="list-style-type: none"> Digitalizar y revisar los modelos de negocio de las telecomunicaciones y las industrias adyacentes. Proporcionar análisis de datos para segmentar con precisión y generar el máximo valor de cada cliente.
<i>Internet of Things</i> (IoT): explosión de dispositivos conectados.	<ul style="list-style-type: none"> Conectado todo, desde dispositivos domésticos inteligentes hasta automóviles y robots autónomos. Mejorar las latencias de los sistemas 4G LTE actuales, lo que lleva a una mayor eficiencia.
Actualizaciones de red y seguridad: necesidad de seguridad por diseño.	<ul style="list-style-type: none"> Garantizar la calidad, seguridad y protección. Transformar la seguridad para que se la nueva área de ventaja competitiva para los operadores.
Consolidación, agrupación de servicios y fusiones y adquisiciones: vehículo atractivo para ingresar en nuevos mercados.	<ul style="list-style-type: none"> Aumentar la consolidación y las actividades de fusiones y adquisiciones entre operadores para obtener rendimientos de inversiones en redes 5G. Aumentar el intercambio de redes para lograr la densificación.

Tabla 5: Tendencias emergentes en el sector de las TIC.

³ La última milla es la parte de la red que llega a las instalaciones del usuario. La mayor parte de los costes y la mayor parte de la complejidad involucrada en las implementaciones de acceso fijo están asociadas con la última milla.

3. 5G New Radio (5G NR)

En este capítulo se describe la arquitectura de una red de comunicaciones móviles basada en las especificaciones del sistema 5G NR. Para ello, a partir de un análisis inicial de la arquitectura genérica adoptada en el sistema celular 4G actual, se identifican los bloques fundamentales que componen la arquitectura de red del sistema especificado por el 3GPP (*3er Generation Partnership Project*). Esta identificación permite acotar de forma clara cuáles son, y a qué criterios básicos de diseño obedecen, los nuevos componentes introducidos por el sistema 5G NR respecto a la red LTE.

3.1. Arquitectura genérica del sistema LTE

El trabajo en LTE se inició a finales de 2004 con el objetivo general de proporcionar una nueva tecnología de acceso radio centrada únicamente en datos con conmutación de paquetes. La primera versión de las especificaciones LTE, *release 8*, se completó en 2008 y la operación de la red comercial comenzó a finales de 2009. La *release 8* fue seguida por *releases* posteriores de LTE, que introdujeron funcionalidades y capacidades adicionales en diferentes áreas (Figura 6). Las *releases 10* y *13* son particularmente interesantes. La *release 10* es la primera versión *LTE-Advanced*, y la *release 13*, finalizada a finales de 2015, es la primera *release* de *LTE-Advanced Pro*.

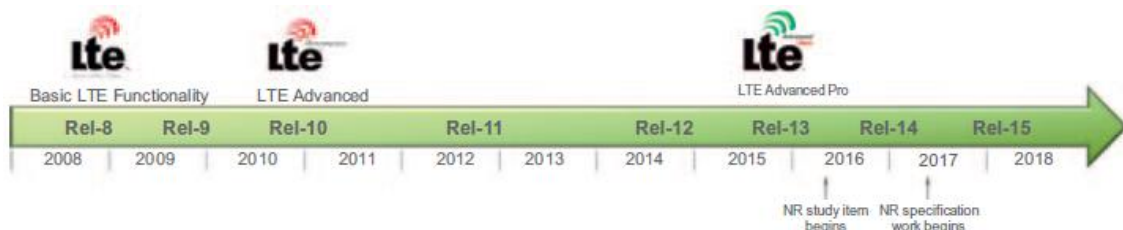


Figura 6: LTE y su evolución [7].

Atendiendo a la arquitectura general de los sistemas 3GPP, en la Figura 7 se ilustra de forma simplificada la arquitectura completa del sistema LTE, denominado formalmente en las especificaciones como *Evolved Packet System* (EPC). Los componentes fundamentales del sistema LTE son:

- Red de acceso E-UTRAN (*Evolved Terrestrial Radio Access Network*).
- Red troncal EPC (*Evolved Packet Core*).
- Subsistema IMS (*IP Multimedia Subsystem*).

La arquitectura se define en términos de entidades de red, cada una de las cuales agrupa una serie de funciones de red móvil. Las interacciones entre entidades de red se especifican a través de interfaces que las conectan.

La red de acceso E-UTRAN y la red troncal EPC proporcionan de forma conjunta servicios de transferencia de paquetes IP entre los equipos de usuario y redes de paquetes externas tales como plataformas IMS y/o otras redes de telecomunicaciones como Internet. Las prestaciones de calidad del servicio (QoS) de un servicio de transferencia de paquetes IP puede configurarse en base a las necesidades de los servicios finales que lo utilicen, cuyo establecimiento se lleva a cabo a través de plataformas de servicios externas y de forma transparente a la red troncal EPC.

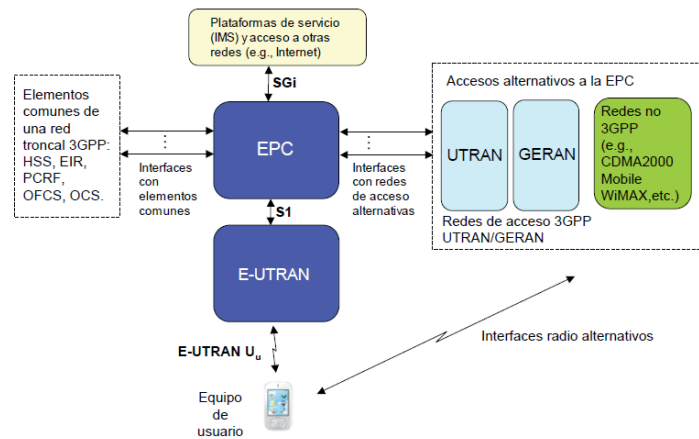


Figura 7: Arquitectura del sistema LTE [8].

Formalmente, el servicio de transferencia de paquetes IP ofrecido por la red LTE entre el equipo de usuario y una red externa se denomina servicio portador EPS (*EPS Bearer Service*). Asimismo, la parte del servicio de transferencia de paquetes que proporciona la red de acceso E-UTRAN se denomina E-UTRAN *Radio Access Bearer* (E-RAB).

Aunque no quede reflejado en la Figura 7, destacar que la interconexión de los diferentes equipos físicos donde se ubicarían las funciones tanto de la red troncal EPC como de la red de acceso E-UTRAN, se realiza mediante tecnologías de red basadas en IP. De esta forma, la red física que se utiliza para interconectar los diferentes equipos de una red LTE, y que se denomina comúnmente como red de transporte, es una red IP convencional [7].

La arquitectura de la red de acceso se compone de una única entidad de red denominada *evolved NodeB* (eNB), que constituye la estación base de E-UTRAN desde la 3GPP *release 8* hasta la 3GPP *release 14*. eNB integra todas las funciones de red y es por ello por lo que todos los protocolos específicos de la interfaz radio terminan en él. Mediante dichos protocolos, el eNB realiza la transmisión de los paquetes IP hacia/desde los equipos de usuario junto con los mensajes de señalización necesarios para controlar la operación de la interfaz radio. La interfaz radio soporta básicamente tres tipos de mecanismos de transferencia de la información del canal radio: difusión (*broadcast*) de señalización de control, envío de paquetes IP y transferencia de señalización de control dedicada entre un equipo de usuario y el eNB. Estos tres mecanismos, se pueden observar en la Figura 8.

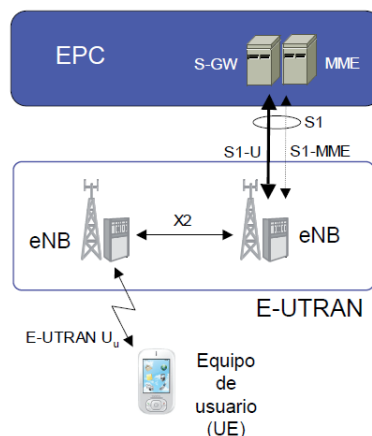


Figura 8: Red de acceso E-UTRAN [8].

Finalmente, se indican algunas de las limitaciones del sistema LTE:

- No es posible dividir partes de una entidad funcional y colocarlas en diferentes ubicaciones, por ejemplo, ubicar las funciones del plano de usuario del S-GW (*Serving Gateway*) para servicios críticos de demora cerca del eNB.
- Una entidad de red incluye funciones de control y de plano de usuario.
- Difícil de optimizar/personalizar la red para proporcionar diferentes comportamientos para aplicaciones con tipos de requisitos diferentes, por ejemplo, aplicaciones de retardo crítico frente a aplicaciones de alta velocidad de bits.

3.2. Arquitectura del sistema 5G NR

Al igual que en sistemas anteriores como por ejemplo LTE, la arquitectura del sistema 5G abarca tres grandes bloques constitutivos:

- **User Equipment (UE)**
- **5G Core Network (5GC):** responsable de las funciones no relacionadas con el acceso por radio, tales como autenticación, carga, configuración de conexiones de extremo a extremo, gestión de la movilidad, etc.
- **Next Generation – Radio Access Network (NG-RAN):** responsable de toda la funcionalidad del sistema relacionada con la radio.

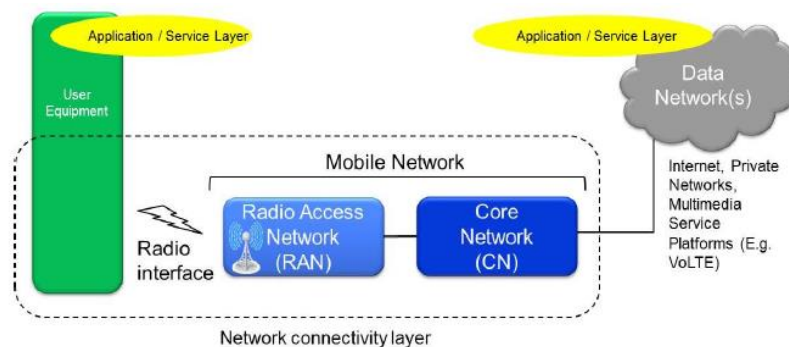


Figura 9: Bloques generales del sistema 5G [9].

La primera implementación móvil de 5G está diseñada para funcionar en modo *Non-Standalone* (NSA) para admitir el caso de uso de banda ancha móvil mejorada (eMBB). En el modo NSA, la conexión está anclada a LTE con portadoras 5G NR que se utilizan para aumentar la velocidad de datos y reducir la latencia. Una vez que se establezca la cobertura de 5G, se implementará el modo de operación *Standalone* (SA). En la siguiente ilustración (Figura 10) se muestran las diferentes arquitecturas para cada uno de los modos de operación de las redes móviles 5G, es decir, el modo *Non-Standalone* y el modo *Standalone*.

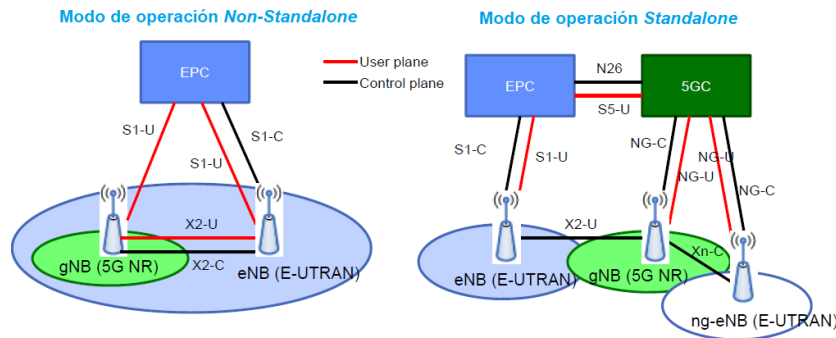


Figura 10: Modos de operación en redes móviles 5G [9].

El modo *Non-Standalone* (NSA) tiene las siguientes características:

- Las nuevas estaciones base 5G conocidas como gNB desde la 3GPP *release* 15 en adelante, están conectadas a la red central LTE (EPC). La gNB se explica en detalle más adelante (sección 3.2.2).
- Facilita las primeras implementaciones de 5G sin tener que introducir el 5G Core.
- LTE utilizado para la funcionalidad del plano de control (por ejemplo, acceso inicial, paginación, y movilidad), mientras que 5G NR solo proporciona el plano de usuario.
- Se basa en la conectividad dual entre LTE y 5G NR.

Por otro lado, el modo *Standalone* se diferencia del NSA por tener las siguientes particularidades:

- Proporciona funcionalidad completa del sistema 5G tanto en el *core* como en la RAN (*Radio Access Network*).
- El gNB está conectado al 5GC.
- El gNB maneja las funciones del plano de usuario y del plano de control.

Para cumplir con los requisitos establecidos para 5G en IMT-2020, el proyecto del 3GPP inició el desarrollo y la estandarización de la nueva arquitectura de sistemas 5G como se muestra en la Figura 11, definiendo la arquitectura de una nueva tecnología de acceso por radio conocido como *New Radio* (NR) y, en paralelo, el desarrollo de la nueva red central 5G, referida a 5GC.

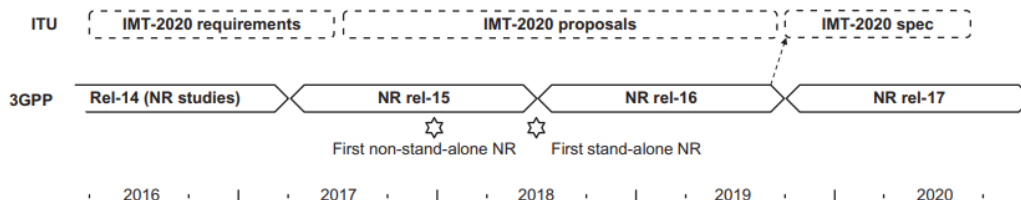


Figura 11: Cronología de estandarización de 3GPP NR según IMT-2020 [7].

La *release* de diciembre de 2017 de 5G NR no incluye una red 5G *Next Generation Core* (NGC) sino que se basa en una evolución del 4G *Evolved Packet Core* (EPC) existente, a menudo denominado EPC+. Esto significa que un dispositivo con capacidad 5G se

conectará a una radio 4G 3GPP *release 15* mejorada para el plano de control y radio 4G y/o 5G para los flujos de tráfico del plano de usuario. Además de este concepto, existen otros enfoques para la conectividad entre LTE y 5G NR con la *release 15* EPC.

5G a menudo se conoce como la próxima generación de tecnología de comunicaciones móviles, pero el potencial es más significativo que esto. 5G probablemente se convertirá en el futuro de las comunicaciones, admitiendo el acceso fijo y móvil. Aunque los diversos requisitos de eMBB, uRLLC (*ultra-Reliable and Low-Latency Communications*) y mMTC (*massive Machine Type Communications*) no serán compatibles desde el primer día, ha sido necesario un enfoque flexible para el diseño de NR para garantizar que los estándares 5G evolucionarán para cumplir con todos los requisitos. Este enfoque ha dado como resultado un diseño NR con numerología escalable (la numerología se refiere a la parametrización de la forma de onda), multiplexación de numerología e implementación de *Time Division Duplex* (TDD). TDD se adapta mejor a los servicios centrados en datos en los que el enlace *downlink* (conexión de la red al usuario) transportará significativamente más tráfico de datos que el enlace *uplink* (conexión del usuario a la red). TDD será la implementación más común en la mayoría de las bandas de frecuencia 5G iniciales, aunque debe tenerse en cuenta que también se admite la operación *Frequency Division Duplex* (FDD).

A continuación, se explican las principales características de la arquitectura del sistema 5G:

- **Modularidad:**

- En vez de especificar entidades de red, se logra un diseño más modular al especificar el conjunto de funciones de red (en adelante NF).
- Desacoplamiento más fuerte entre la arquitectura lógica y física, facilitando la virtualización de las diferentes NF que se ejecutan en hardware genérico.
- Las NF pueden implementarse físicamente de diferentes maneras, por ejemplo, todos en un solo nodo físico, distribuidos en múltiples nodos o ejecutándose en una plataforma en la nube.

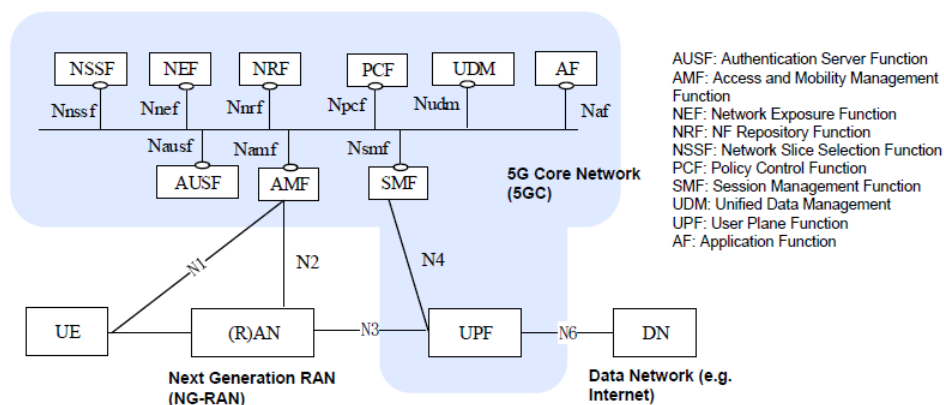


Figura 12: Representación general basada en servicios de la arquitectura 5G [10].

- **Arquitectura basada en servicios:**

- Cada NF expone una serie de servicios prestados a otras NF.
- Interfaces basadas en servicios.
- Esto proporciona más flexibilidad para definir las posibles interacciones entre NF.

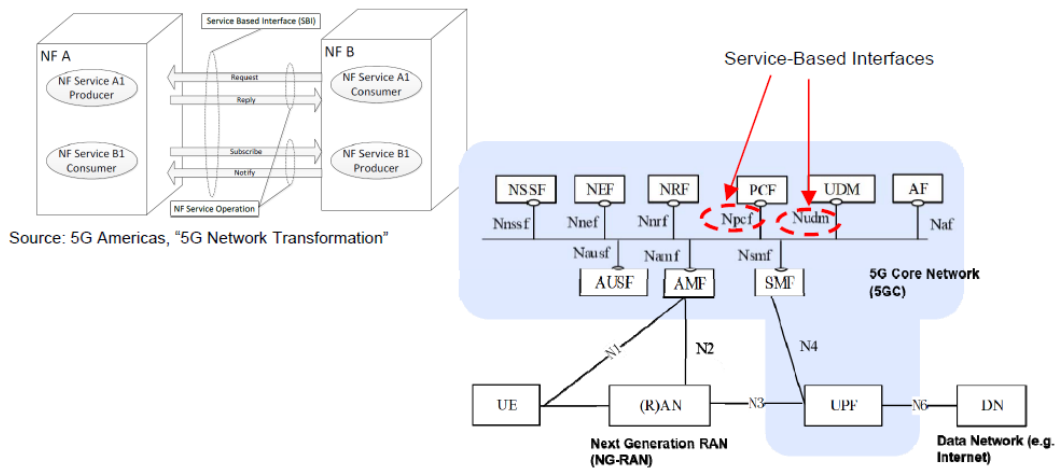


Figura 13: Representación de una arquitectura basada en servicios [9].

- **División de plano de control y plano de usuario:**

- Las NF responsables del plano de control son diferentes de los responsables del plano de usuario.
- Permite escalabilidad y evolución independientes, por ejemplo, asignar más capacidad al plano de control sin afectar al plano de usuario.
- Permite implementaciones flexibles, por ejemplo, ubicación centralizada en el plano de control o ubicación distribuida (remota) para el plano del usuario.

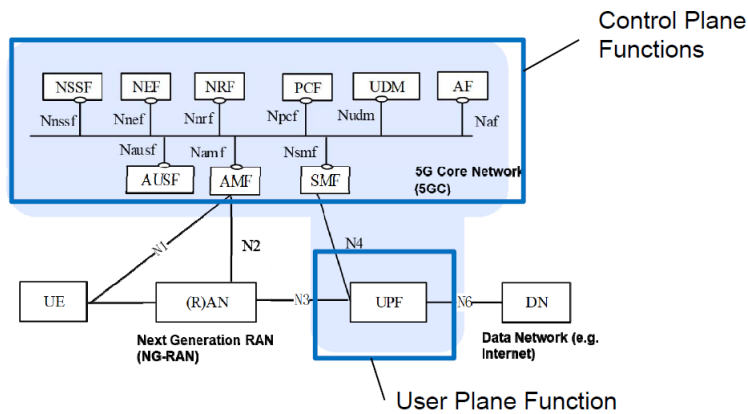


Figura 14: División entre el plano de control y el plano de usuario [9].

- **Soporte de Network Slicing:**

- Las NF se pueden instanciar individualmente para cada *network slice*, y ubicarse donde sea apropiado.
- De esta forma, se pueden crear múltiples *network slices*, cada uno compuesto por una colección de NF de plano de control y plano de usuario personalizados según las necesidades del *slice*. Por ejemplo, un *slice* de red puede incluir los NF para admitir servicios de banda ancha móvil con soporte de movilidad total, y otro para admitir aplicaciones industriales no móviles y de latencia crítica.

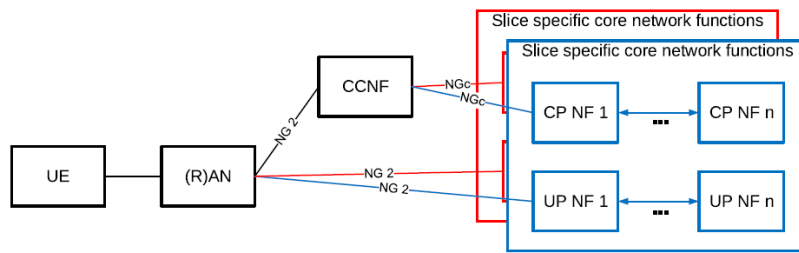


Figura 15: Arquitectura de Network slicing en NextGen [11].

- **Soporte de Multi-access Edge Computing (MEC):**

- *Edge Computing* es una evolución de la computación en la nube que lleva el alojamiento de aplicaciones desde los centros de datos centralizados hasta el borde la red, cerca de los usuarios y los datos generados por las aplicaciones.
- Aplicabilidad: descarga de cómputo, entrega de contenido distribuido y almacenamiento en caché, servicios de baja latencia, etc.
- Funciones 5G para admitir MEC:
 - Soporte para conectar el 5GC a una red de datos de área local (*Local Area Data Network, LADN*) donde se implementan las aplicaciones.
 - La *User Plane Function (UPF)* puede realizar enrutamiento local de cierto tráfico hacia la LADN. Los UPF se explican en detalle más adelante (sección 3.2.1.1).

La siguiente figura muestra cómo se implementa el sistema MEC de manera integrada en la red 5G.

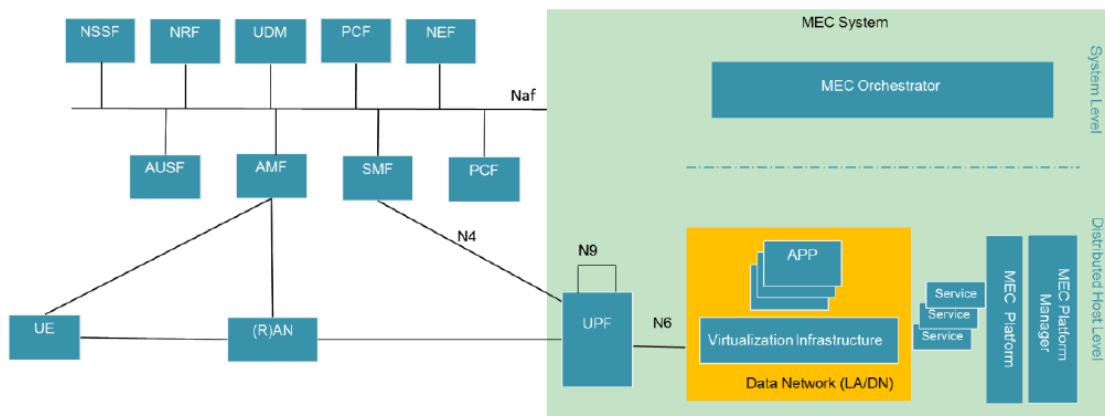


Figura 16: Despliegue MEC integrado en red 5G [12].

En el sistema MEC situado en el lado derecho de la Figura 17, el orquestador MEC es una entidad funcional a nivel de sistema MEC que, actuando como un AF, puede interactuar con la NEF o en algunos escenarios directamente con el objetivo 5G NFs. En el nivel de host MEC, es la plataforma MEC la que puede interactuar con estos 5G NF, nuevamente en el rol de un AF. El host MEC, es decir, las entidades funcionales a nivel de host, se implementan con mayor frecuencia en una red de datos en el sistema 5G. Si bien la función NEF como red central es una entidad de nivel de sistema desplegada centralmente junto con NF similares, también se puede implementar una

instancia de NEF en el borde para permitir el acceso al servicio de baja latencia y alto rendimiento desde un host MEC.

En términos de implementación física de hosts MEC, hay múltiples opciones disponibles basadas en varios requisitos operativos, de rendimiento o de seguridad. La siguiente figura ofrece un resumen de algunas de las opciones viables para la ubicación física de MEC.

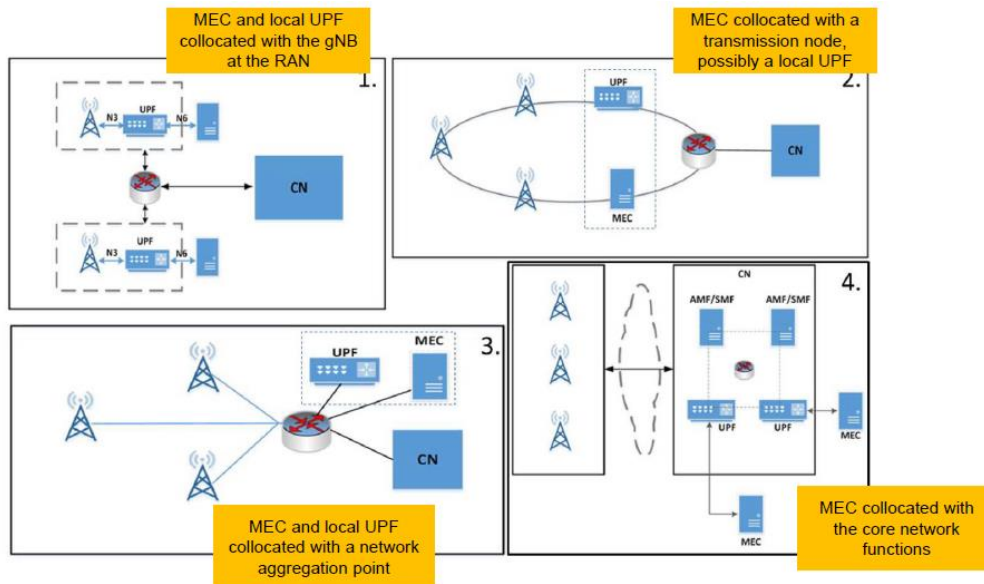


Figura 17: Ejemplos del despliegue físico de MEC [12].

3.2.1. 5G Core Network: Funciones de red

La arquitectura 5G Core Network (5GC) se basa en el EPC con tres nuevas áreas de mejora: arquitectura basada en servicios, soporte para el *network slicing* y división/desacoplo entre el plano de control (*Control Plane*, CP) y el plano de datos (*Data Plane*, DP).

Una arquitectura basada en servicios es la base del núcleo 5G. Esto significa que la especificación se centra en los servicios y las funcionalidades proporcionadas por la red central, en lugar de los nodos como tales. Esto es natural ya que la red central hoy en día ya está altamente virtualizada con la funcionalidad de red central que se ejecuta en hardware genérico. La arquitectura de red 5G basada en servicios tiene como objetivo cumplir de manera flexible y eficiente los requisitos de servicios móviles diversificados. Con la red definida por software (*Software Defined Networking*, SDN) y la virtualización de funciones de red (*Network Function Virtualization*, NFV) que admite la infraestructura física subyacente, 5G globaliza el acceso a la nube, el transporte y las redes centrales. Tal y como se explica más adelante (sección 3.5), la idea principal de introducir SDN es separar el plano de control fuera de los conmutadores y habilitar el control externo de datos a través de un componente de software lógico llamado controlador. Por otra parte, NFV aborda los requisitos de flexibilidad, agilidad y escalabilidad, y aprovecha la computación en la nube y su soporte para servicios virtualizados. Básicamente, NFV es un medio para hacer que la red sea más flexible y simple al minimizar la dependencia de las restricciones de hardware.

El *network slicing* es un término común en el contexto de 5G. Un *network slice* es una red lógica que atiende una necesidad comercial o del cliente y consta de las funciones necesarias de la arquitectura basada en servicios configuradas juntas.

La división del plano de control y del plano de datos o usuario se enfatiza en la arquitectura de red central 5G, incluyendo escalamiento independiente de la capacidad de los dos. Por ejemplo, si se necesita más capacidad de plano de control, debería ser sencillo agregarlo sin afectar el plano de usuario de la red.

La arquitectura consiste en el conjunto de funcionalidades representadas en la Figura 18.

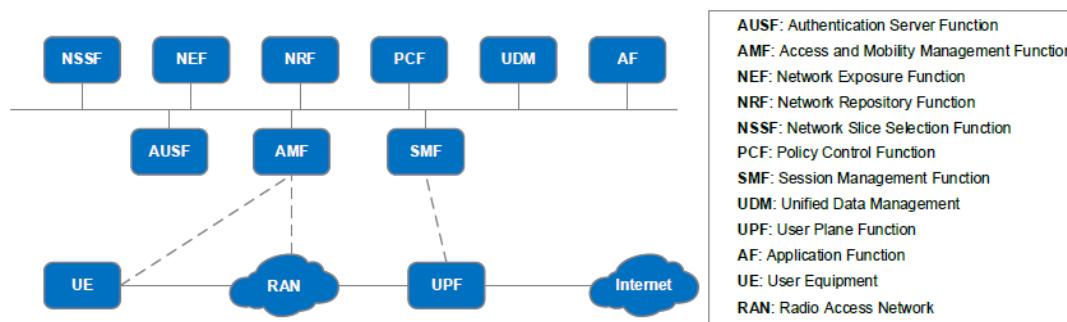


Figura 18: Arquitectura general de los sistemas 5G [13].

El diseño generalizado de las funcionalidades y una compatibilidad directa *Access Network – Core Network* permite que la red core 5G común funcione con diferentes redes de acceso. En 3GPP *release 15*, estos son el NG-RAN y el acceso WLAN (*Wireless Local Area Network*) no confiable (en inglés, *untrusted*) definidos por el 3GPP. Ya comenzaron los estudios sobre otros sistemas de acceso que pueden usarse en futuras versiones. La arquitectura del sistema 5G permite prestar servicio a ambas redes de acceso por el mismo AMF (*Access and Mobility Management Function*) y, por lo tanto, también a la movilidad sin interrupciones entre esos accesos 3GPP y no 3GPP. La función de autenticación separada junto con un marco de autenticación unificado es para permitir la personalización de la autenticación del usuario de acuerdo con las necesidades de los diferentes escenarios de uso, por ejemplo, utilizando diferentes procedimientos de autenticación por *network slice*. Algunas funciones proporcionan variantes que son más adecuadas para redes de acceso específicas, como ciertas funciones de calidad de servicio (QoS).

3.2.1.1. User Plane Function (UPF)

La **User Plane Function** (UPF) se ocupa de la comunicación del plano de usuario en el 5GC, actuando como una puerta de enlace entre la RAN y la red de datos externa (*Data Network, DN*), como por ejemplo Internet. Las principales funcionalidades de la UPF son:

- Enrutamiento y reenvío de paquetes.
- Almacenamiento en búfer de paquetes de enlace descendente y activación de notificación de datos de enlace descendente.
- Manejo de QoS.
- Mediciones de tráfico.

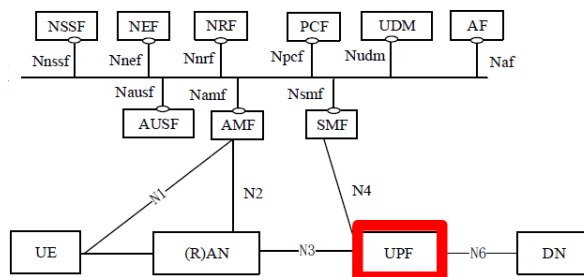


Figura 19: Identificación de la UPF en la arquitectura del sistema 5G [9].

Las especificaciones 3GPP admiten implementaciones con un solo UPF o múltiples UPF para una sesión de *Protocol Data Unit* (PDU) determinada, y el número de UPF admitidos para una sesión PDU no está restringido. Al igual que las generaciones anteriores, una red 5G conecta equipos de usuario (UE) a redes de datos externas. El servicio de conectividad 5G se denomina *PDU session*.

La selección de UPF es realizada por el *Session Management Function* (SMF). Las implementaciones en las que un UPF está controlado por un solo SMF o múltiples SMF (para diferentes sesiones de PDU) son compatibles.

La SMF puede utilizar las capacidades de detección de tráfico UPF para controlar al menos las siguientes características de la UPF:

- Detección de tráfico (por ejemplo, clasificación de tráfico de tipo IP, tipo Ethernet o tipo no estructurado).
- Informes de tráfico (por ejemplo, permitiendo el soporte de SMF para la carga).
- Aplicación de la QoS.
- Enrutamiento de tráfico.

3.2.1.2. Access and Mobility Management Function (AMF)

La **Access and Mobility Management Function** (AMF) es una función de plano de control encargada de manejar la señalización de control entre el UE y el 5GC. Las funcionalidades principales son las siguientes:

- Gestión de registro.
- Gestión de conexión para establecer la señalización del plano de control con un UE.
- Gestión de movilidad (por ejemplo, accesibilidad de UE en modo inactivo).
- Control y ejecución de paginación.
- Soporte de movilidad intra-sistema e intersistema.

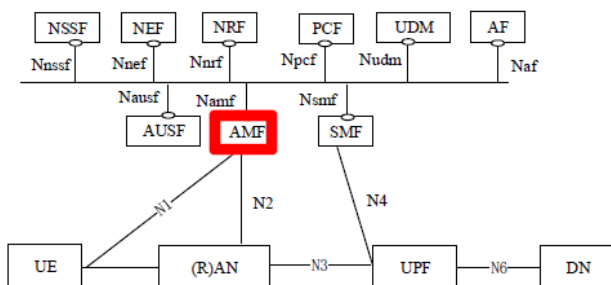


Figura 20: Identificación de la AMF en la arquitectura del sistema 5G [9].

3.2.1.3. Session Management Function (SMF)

La **Session Management Function (SMF)** es una función de plano de control a cargo de las siguientes funcionalidades principales:

- Establecimiento de sesión, modificación y liberación de la sesión.
- Asignación y gestión de direcciones IP de UE.
- Control de la aplicación de políticas y QoS.
- Configuración de la dirección del tráfico en la UPF para enrutar el tráfico al destino adecuado.

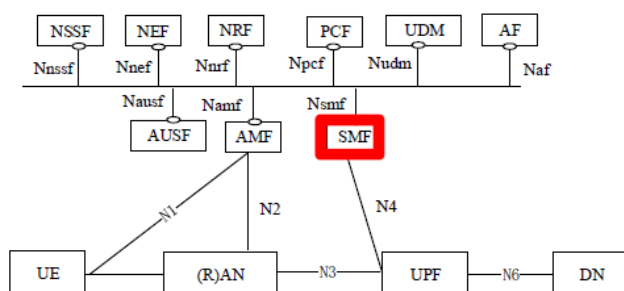


Figura 21: Identificación de la SMF en la arquitectura del sistema 5G [9].

3.2.1.4. Otras funciones de red

En la arquitectura del sistema 5G existen otras funciones de red además de las explicadas anteriormente. Estas son:

La **Policy Control Function (PCF)** proporciona reglas de política (por ejemplo, QoS autorizada para cada flujo de datos de servicio) a las funciones de red encargadas de hacerlas cumplir (por ejemplo, SMF).

La **Application Function (AF)** permite interactuar con las aplicaciones haciendo uso de la red. Esto se puede usar para aplicaciones que requieren control dinámico de políticas, por ejemplo, para modificar dinámicamente la velocidad de bits que se proporcionará. En función de las interacciones con estas aplicaciones, los requisitos de la política se proporcionan a la PCF.

La **Unified Data Management (UDM)** maneja la identificación de usuario, gestión de suscripción, autorización de acceso basada en datos de suscripción (por ejemplo, restricciones de *roaming*) y generación de credenciales de autenticación. La UDM utiliza datos de suscripción que pueden almacenarse en el *Unified Data Repository (UDR)*.

La **Authentication Server Function (AUSF)** proporciona el servicio de autenticación de UE.

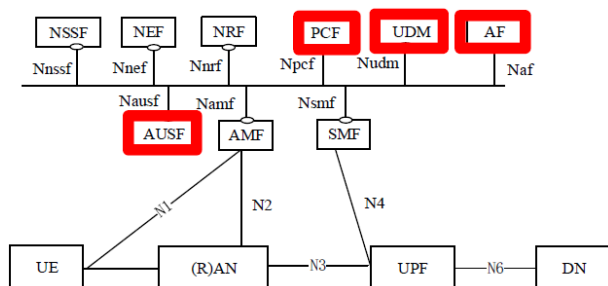


Figura 22: Otras funciones de red en la arquitectura del sistema 5G [9].

La **Network Slice Selection Function (NSSF)** admite la selección de las instancias de *Network Slice* que sirven a un UE.

La **Network Exposure Function (NEF)** se utiliza para exponer servicios de la red central 5G (5GC) hacia otras redes (por ejemplo, proveedores de terceros, verticales, etc). Esto permite la creación rápida de nuevos servicios utilizando la red central de 5G.

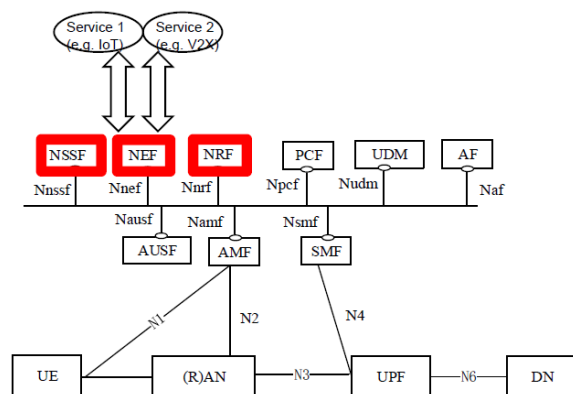


Figura 23: Otras funciones de red en la arquitectura del sistema 5G [9].

3.2.2. Next Generation – Radio Access Network

La *Next Generation – Radio Access Network (NG-RAN)* representa la red de acceso radio recientemente definida para 5G, donde esta es la función de red que conecta el equipo de usuario con la red central 5G (5GC). NG-RAN proporciona acceso radio NR y LTE. En el caso de la arquitectura NR, se consideran dos tipos diferentes de nodos (es decir, estación base), que pueden conectarse al 5GC:

- **gNodeB (gNB)**: hace referencia a la estación base 5G y funciona con la tecnología 5G NR, proporcionando servicios de plano de usuario NR y plano de control hacia el UE.
- **next generation eNodeB (ng-eNB)**: red de acceso LTE a partir de la 3GPP release 15 en adelante. Funciona con la tecnología LTE y proporciona servicios LTE/E-UTRA y terminaciones de protocolo de planos de control hacia el equipo de usuario (UE).

Una RAN que consta de ambos gNB para NR radio y ng-eNB para LTE se conoce como NG-RAN. Se pueden configurar diferentes opciones de conexión (Figura 24) entre la red central, incluidos 5GC y *Evolved Packet Core (EPC)* de LTE, y los nodos NG-RAN para lograr la compatibilidad con LTE y permitir la transición a nuevos sistemas 5G. Para una introducción temprana de NR en las redes LTE actuales, la configuración número 3 referida a la “operación no autónoma”, permite que el gNB se conecte al EPC. Las opciones 2, 4, 5 y 6 consisten en diferentes configuraciones “independientes”.

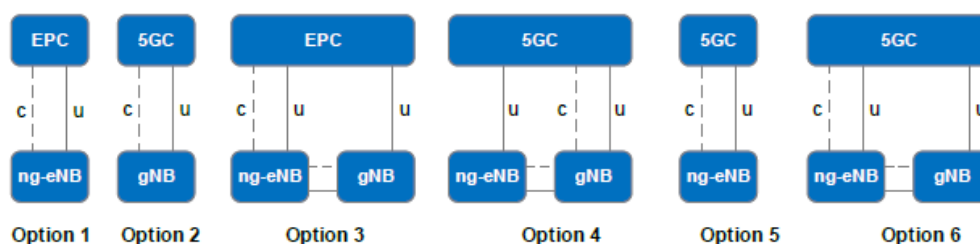


Figura 24: Opciones de conexión entre NG-RAN y EPC o 5GC [7].

Como se ilustra en la Figura 25, tanto gNB como ng-eNB están conectados al 5GC a través de las interfaces NG, más específicamente a la *Access and Mobility Management Function (AMF)* a través del NG-C (plano de control) y a la *User Plane Function (UPF)* a través del NG-U (plano de usuario). Además, los nodos gNB y ng-eNB están interconectados entre ellos por la interfaz Xn. El gNB se divide en la *Central Unit (gNB-CU)*, responsable del *Radio Resource Control (RRC)*, *Packet Data Convergence Protocol (PDCP)* y *Service Data Adaption Protocol (SDAP)*, y *Multiple gNB-Distributed Units (gNB-DU)*, que están a cargo de las entidades de protocolo restantes: *Radio Link Control (RLC)*, *Media Access Control (MAC)* y *Physical Layer (PHY)*.

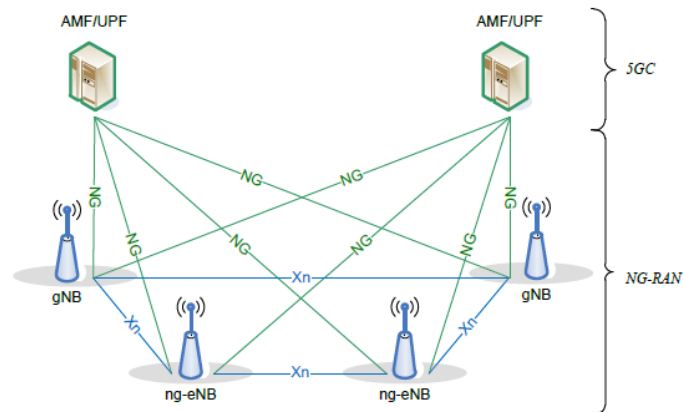


Figura 25: Interfaces NG RAN [14].

El gNB y el ng-eNB establecen la conexión con el equipo de usuario (UE) a través de la interfaz aérea. En este sentido, el espectro de radio está organizado en recursos de radio, denominados *Physical Resource Blocks (PRB)* para LTE y NR, que deben gestionarse adecuadamente. De hecho, gNB y ng-eNB están a cargo de realizar esta gestión mediante la definición de funciones *Radio Resource Management (RRM)*, incluido el *Radio Bearer Control*, *Radio Admission Control*, *Connection Mobility Control* o la asignación dinámica de recursos a las funciones de UE.

Tanto las arquitecturas del plano de usuario como del plano de control para NG-RAN siguen el mismo esquema de arquitectura de alto nivel, tal y como se muestra en la Figura 26.

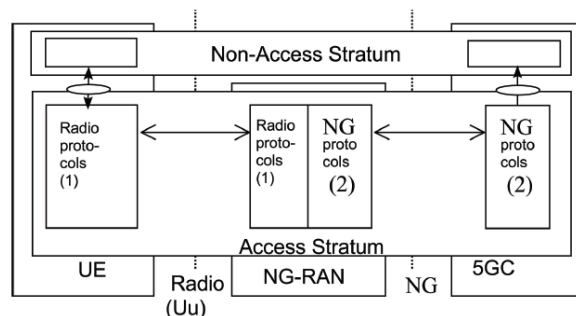


Figura 26: Arquitectura general de NG-RAN [14].

3.2.3. Modelo 5G QoS

Los servicios de datos son la base del soporte de la aplicación. En comparación con las generaciones anteriores, los servicios de datos ofrecen una flexibilidad considerablemente mayor para la personalización.

Una parte importante de esto es el nuevo modelo de QoS de la arquitectura del sistema 3GPP 5G, que se muestra en la Figura 27, que permite que los servicios de datos diferenciados admitan diversos requisitos de las aplicaciones mientras se usan los recursos radio de manera eficiente.

Los *Service Data Flows* (SDF) denotan datos del plano de usuario a los que se aplican ciertas reglas de QoS. Además, el modelo de QoS está diseñado para admitir diferentes redes de acceso, incluidos los accesos fijos donde QoS sin señalización adicional puede ser deseable. El marcado de paquetes estandarizado informa a las funciones de cumplimiento de QoS qué QoS proporcionar sin ninguna señalización de QoS. Mientras que la opción con señalización QoS ofrece más flexibilidad y granularidad QoS. También, la diferenciación simétrica de QoS sobre el enlace descendente y el enlace ascendente es compatible con una señalización de plano de control mínima por la QoS reflexiva.

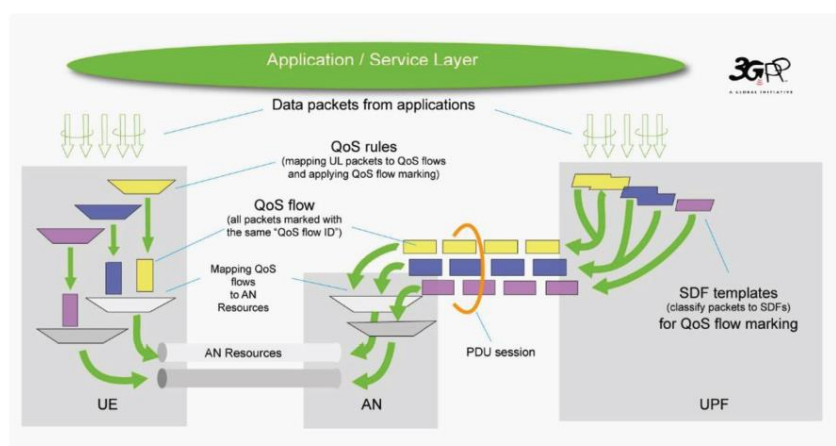


Figura 27: Modelo de QoS [28].

Una gran parte de la funcionalidad que proporciona conectividad de datos es para admitir el despliegue flexible de funciones de aplicación en la topología de red según sea necesario para la computación perimetral, que se admite, por ejemplo, a través de tres modos diferentes de *Session and Service Continuity* (SSC) o mediante la funcionalidad de *Uplink Classifiers* y *Branching Points*.

Los diferentes modos SSC se muestran en la Figura 28. Los modos SSC incluyen el modo más tradicional (SSC 1), donde el anclaje IP permanece estable para proporcionar soporte continuo de aplicaciones y mantenimiento de la ruta hacia el UE a medida que se actualiza su ubicación. Los nuevos modos permiten reubicar el anclaje IP. Hay dos opciones, *make-before-break* (SSC 3) y *breakbefore-make* (SSC 2). La arquitectura permite que las aplicaciones influyan en la selección de las características adecuadas del servicio de datos y el modo SSC.

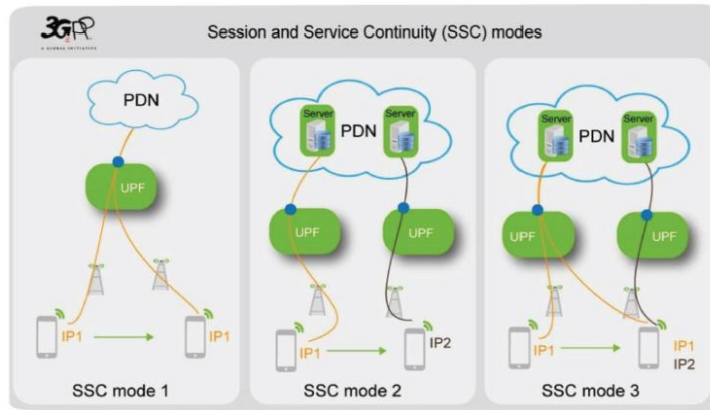


Figura 28: Modos de Session y Service Continuity [28].

Como se espera que las implementaciones de red 5G sirvan grandes cantidades de tráfico de datos móviles, es esencial una gestión eficiente de la ruta del plano de usuario. La arquitectura del sistema define, además de los modos SSC, la funcionalidad de los *Uplink Classifiers* y *Branching Points* para permitir romper e inyectar tráfico selectivamente hacia y desde las funciones de la aplicación en la ruta del plano de usuario antes del anclaje IP. Además, según lo permitido por las políticas, las funciones de aplicación pueden coordinarse con la red al proporcionar información relevante para optimizar la ruta del tráfico o pueden suscribirse a eventos del sistema 5G que pueden ser relevantes para las aplicaciones.

En referencia a los modelos 5G QoS basados en flujos de QoS, se pueden entender como como la granularidad más fina de QoS diferenciada en una sesión de *Packet Data Unit* (PDU). PDU proporciona el intercambio de paquetes entre un UE y una red de datos. El servicio de conectividad PDU se materializa a través de sesiones PDU establecidas a petición del UE. Cada sesión de PDU admite el intercambio de un solo tipo de PDU (IPv4, IPv6, IPv4v6, Ethernet, *unstructured*). El tráfico del plano de usuario que pertenece al mismo flujo de QoS recibe el mismo tratamiento de reenvío de tráfico.

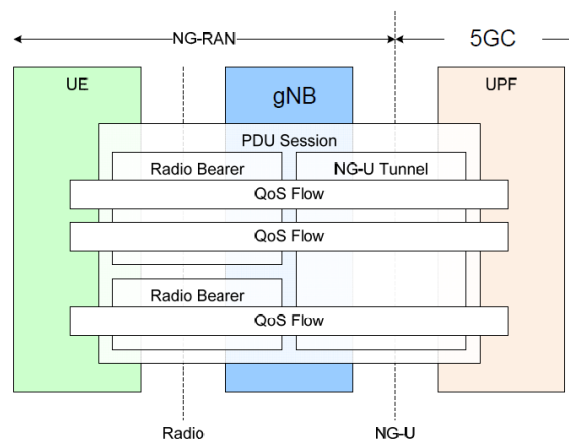


Figura 29: El flujo de QoS [9].

Para garantizar la QoS, los paquetes se asignan adecuadamente a QoS y *Data Radio Bearers* (DRBs). La gestión de DRB está oculta para el 5GC, allanando el camino para la convergencia entre las redes de acceso fijo y móvil. Cada flujo de QoS se caracteriza por:

- Un identificador de QoS 5G (5QI).
- Un valor de prioridad de asignación y retención (*Allocation and Retention Priority*, ARP).

El 5QI está asociado a las características de QoS que proporcionan pautas para establecer parámetros específicos de nodo para cada flujo de QoS. Ejemplos de características de QoS de 5QI son: tipo de recurso (*Guaranteed Bit Rate* (GBR), *delay critical* GBR o *non-GBR*), nivel de prioridad, presupuesto de retraso de paquete, tasa de error de paquete, ventana de promedio, volumen máximo de ráfaga de datos.

El modelo admite flujos que requieren una velocidad de bit de flujo garantizada (flujos QoS de GBR) y flujos que no requieren ninguno (flujos QoS que no son de GBR), cada uno de los cuales se caracteriza adicionalmente por:

- Flujos GBR QoS:
 - *Guaranteed Flow Bit Rate* (GFBR).
 - *Maximum Flow Bit Rate* (MFBR).
 - *Maximum Packet Loss Rate* (MPLR).
- *Non-GBR* QoS:
 - *Reflective QoS Attribute* (RQA).

Además, se especifica una velocidad de bit máxima agregada, conocida en inglés como *Aggregate Maximum Bit Rate* (AMBR), para cada sesión de PDU y para cada UE, lo que limita la velocidad de bit agregada que se puede esperar que se proporcione en todos los flujos de QoS *non-GBR* para una sesión de PDU específica o todos los flujos *non-GBR* de un UE, respectivamente.

3.2.4. Consideraciones de migración

Cuando 5G se implementa por primera vez con NR, un escenario probable es desplegar NR en frecuencias más altas que para LTE. En este caso, la cobertura NR suele ser mucho más pequeña que la cobertura LTE, especialmente con frecuencias superiores a 6 GHz. Entonces, es deseable aprovechar la cobertura LTE existente para proporcionar cobertura y movilidad continua a nivel nacional, al tiempo que aumenta la capacidad del plano de usuario con NR en áreas con objetivo con alta carga de tráfico. La opción de Multi-RAT DC (*Multi-Radio Access Technology Dual Connectivity*) con el EPC (Figura 30) permite a los operadores lanzar el servicio NR de esta manera, aprovechando sus inversiones existentes para E-UTRAN y EPC. En esta opción, comúnmente conocida como 5G EN-DC (*LTE-NR Dual Connectivity*), un UE está conectado a un eNB que actúa como *Master Node* (MN) y a un en-gNB que actúa como *Secondary Node* (SN). Un en-gNB es diferente de un gNB en que solo implementa parte de la funcionalidad de la estación base 5G que se requiere para realizar funciones SN para EN-DC. El eNB está conectado al EPC a través de la interfaz S1 y al en-gNB a través de la interfaz X2. El en-gNB también puede conectarse al EPC a través de la interfaz S1-U y a otros en-gNB a través de la interfaz X2-U tal y como se observa en la siguiente imagen.

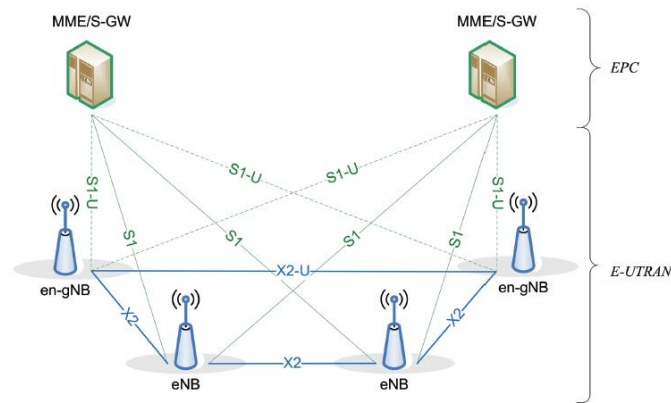


Figura 30: Arquitectura general LTE (E-UTRAN)-NR DC [15].

Cuando los operadores decidan introducir la red central 5G, esto “desbloqueará” un nuevo conjunto de posibles escenarios de implementación, entre los cuales el soporte para NR como una tecnología de acceso radio (*Radio Access Technology, RAT*) independiente, al mismo tiempo que se aprovecha los nodos LTE desplegados como nodos secundarios a través de *Dual Connectivity (DC)*.

Otra posibilidad para la introducción de la red central 5G es mantener LTE como el “ancla” principal, conectándolo a la red central 5G (5GC) mientras aprovecha NR como nodo secundario a través de DC. La elección entre implementar NR con 5GC como “ancla” y mantener LTE como “ancla” con el nuevo 5GC, generalmente será una decisión comercial de cada operador. Por lo general, dependerá de factores que incluyen la densidad de red LTE implementada, la disponibilidad de nuevas frecuencias, la tasa de aumento de la demanda de tráfico del usuario final y el “peso” relativo en el caso de negocios de nuevas funcionalidades (como, por ejemplo, *slicing*) que solo las redes nuevas pueden proporcionar.

En resumen, la transformación de la arquitectura de red incluye los siguientes aspectos:

- Redes complejas que incorporan múltiples servicios, estándares y tipos de sitios: las redes 5G deben poder proporcionar servicios diversificados de diferentes indicadores claves de rendimiento (*Key Performance Indicator, KPI's*), admitir accesos coexistentes de múltiples estándares (5G, LTE y WiFi) y coordinar diferentes tipos de sitios (estaciones macro, micro y pico bases). El desafío de diseño para crear una arquitectura de red capaz de soportar tal flexibilidad mientras se satisfacen las demandas de acceso diferenciadas es un esfuerzo para cumplir.
- Coordinación de tecnologías de conectividad múltiple: se espera que 5G coexista con LTE y WiFi durante un período prolongado de tiempo incorporando tecnologías de multiconectividad y la nueva interfaz aérea 5G. Las tecnologías de conectividad múltiple deben coordinarse en función de los requisitos de tráfico y movilidad de los equipos de usuario para proporcionar un rendimiento de transmisión suficiente y una continuidad móvil
- Implementación bajo demanda de servicios: la arquitectura de red 5G se diseñará en base a sitios de acceso y Centros de Datos (*Data Center, DC*) de tres capas. De acuerdo con los diferentes requisitos de servicio, la disponibilidad de fibra óptica y las asignaciones de recursos de red, los recursos *Radio Access Network (RAN)* en tiempo real y recursos en tiempo no real se pueden implementar en el sitio de acceso o en la parte de la nube de acceso. Esto

requiere además que la ubicación de la puerta de enlace (*Gateway*) del servicio también se pueda implementar en la nube de acceso o en el lado de la red central.

- Orquestación flexible de funciones de red: los requisitos de servicio varían con las diferentes funciones de red. eMBB requiere un gran ancho de banda. uRLLC requiere latencia ultra baja y alta confiabilidad. Las redes deben orquestar de manera flexible las capacidades de la red considerando las características del servicio, lo que simplifica significativamente las funciones de red y aumenta la eficiencia de red.
- Menor período de implementación del servicio: varios servicios han expandido el ecosistema de la red móvil y aumentado la complejidad de la implementación de la red. La implementación rápida de nuevos servicios requiere un conjunto mejorado de procesos de gestión del ciclo de vida que involucran diseño de red, implementación de servicios y *Operation and Maintenance* (O&M).

3.2.5. Comparación y convivencia con LTE

Como es difícil proporcionar una cobertura completa a frecuencias más altas, es importante el interfuncionamiento con sistemas que funcionan a frecuencias más bajas. En particular, un desequilibrio de cobertura entre el enlace ascendente y el enlace descendente es un escenario común, especialmente si están en diferentes bandas de frecuencia. La mayor potencia de transmisión para la estación base en comparación con el dispositivo móvil da como resultado que las velocidades de datos alcanzables del enlace descendente a menudo tengan un ancho de banda limitado, lo que hace que sea más relevante operar el enlace descendente en un espectro más alto donde puede haber un ancho de banda más amplio disponible. Por el contrario, el enlace ascendente suele tener una limitación de potencia, lo que reduce la necesidad de un ancho de banda más amplio. En cambio, se pueden lograr velocidades de datos más altas en espectros de baja frecuencia, a pesar de que hay menos ancho de banda disponible, debido a una menor atenuación de los canales de radio.

A través del interfuncionamiento, un sistema NR de alta frecuencia puede complementar un sistema de baja frecuencia. El sistema de frecuencia más baja puede ser NR o LTE, y NR admite el interfuncionamiento con cualquiera de estos. El interfuncionamiento se puede realizar a diferentes niveles, incluida la agregación de portadora intra-NR, conectividad dual con una capa de *Packet Data Convergence Protocol* (PDCP) común, y *handover*. Sin embargo, las bandas de baja frecuencia a menudo ya están ocupadas por las tecnologías actuales, principalmente LTE. Además, se planea implementar un espectro adicional de baja frecuencia con LTE en un futuro relativamente cercano. La coexistencia del espectro LTE/NR, es decir, la posibilidad de que un operador despliegue NR en el mismo espectro que un despliegue LTE ya existente se ha identificado como una manera de permitir el despliegue temprano de NR en espectros de baja frecuencia sin reducir la cantidad de espectro disponible para LTE.

El 3GPP identificó dos escenarios de coexistencia y guiaron el diseño NR:

- En el primer escenario, ilustrado en la Figura 31, existe una coexistencia de LTE/NR tanto en el enlace descendente como en el enlace ascendente. Tenga en cuenta que esto es relevante para los espectros emparejados y no emparejados, aunque se utiliza un espectro emparejado en la ilustración.

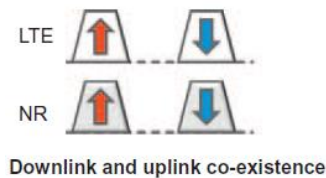


Figura 31: Coexistencia NR-LTE en el enlace descendente y ascendente [7].

- En el segundo escenario, ilustrado en la Figura 32, existe coexistencia solo en la dirección de transmisión del enlace ascendente, típicamente dentro de la parte del enlace ascendente de un espectro emparejado de baja frecuencia, con transmisión de enlace descendente NR que tiene lugar en el espectro dedicado a NR, típicamente a frecuencias más altas. Este escenario intenta abordar el desequilibrio del enlace descendente-enlace ascendente discutido anteriormente. NR admite un enlace ascendente suplementario (*Supplementary Uplink*, SUL) para manejar específicamente este escenario.

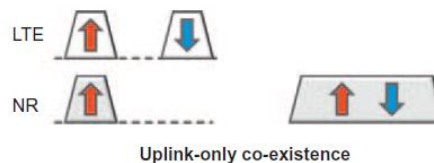


Figura 32: Coexistencia NR-LTE en el enlace ascendente [7].

La posibilidad de una numerología NR compatible con LTE basada en el espaciado de subportadora de 15 kHz, que permita redes de recursos de tiempo/frecuencia idénticos para NR y LTE, es una de las herramientas fundamentales para tal coexistencia. La programación flexible de NR con una granularidad de programación tan pequeña como un símbolo se puede usar para evitar transmisiones NR programadas para colisionar con señales LTE clave, como señales de referencia específicas de la célula, CSI-RS y las señales/canales utilizados para la inicial LTE acceso.

Los recursos reservados, introducidos por compatibilidad directa, también se pueden usar para mejorar aún más la coexistencia de NR-LTE. Es posible configurar recursos reservados que coincidan con las señales de referencia específicas de la celda en LTE, lo que permite una superposición NR-LTE mejorada en el enlace descendente.

3.3. Estandarización 5G

3.3.1. Organizaciones de regulación y estándares

La Unión Internacional de Telecomunicaciones, conocida en inglés como *International Telecommunication Union* (ITU), es el organismo especializado responsable de la regulación de radiofrecuencia a nivel mundial. Con la publicación del servicio 5G por parte de la *International Telecommunication Union-Radio communication* (ITU-R), definió la visión y los requisitos de rendimiento de los nuevos sistemas en las IMT-2020.

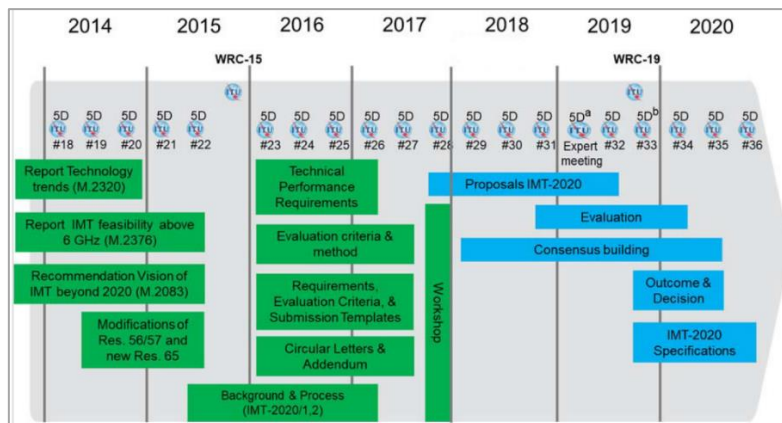


Figura 33: Cronograma IMT-2020 de la ITU-R (diseñado en el año 2018) [16].

Muchos grupos de investigación están llevando a cabo actividades de investigación y estandarización del sistema de comunicaciones móviles 5G activamente. El 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*) el cual une a siete organizaciones (ARIB, ATIS, CCSA, ETSI, TSDSI, TTA y TTC) encargadas de definir los estándares de telecomunicaciones, ha especificado nuevos casos de uso para 5G que no se pueden cumplir con 4G *Evolved Packet System* (EPS). Los casos de uso propuestos se pueden clasificar en cinco categorías de la siguiente manera:

- Banda ancha móvil mejorada: Ultra Alta Definición (*Ultra Hi-Definition*, UHD), presencia virtual.
- Comunicación crítica: robot/dron, emergencia.
- Comunicación masiva de tipo máquina: eSalud.
- Operación de red: *network slicing*, *interworking*.
- Mejora del vehículo a todo (V2X): conducción autónoma. Para el caso de redes celulares, C-V2X.

Es por ello, que es necesario reducir la latencia y conectar muchos dispositivos a la red al tiempo que aumenta la velocidad de datos para admitir los servicios anteriores. El sistema de comunicación móvil 5G permitirá no solo los servicios existentes, sino también nuevos servicios en varios campos.

El 3GPP trabaja en paralelo en versiones o *releases* que se encargan a grupos de trabajo específicos llamados *Technical Specification Groups* (TSG). De esta manera, la evolución es continua y se pueden abrir nuevas vías de trabajo a la vez. Cada *release* se estructura en 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.

El 3GPP ha estado trabajando en la estandarización del sistema de comunicación móvil 5G para la comercialización en el año 2020 (Figura 34). Por ello, la ITU llama al programa de desarrollo de la NR: *International Mobile Telecommunications-2020* (IMT-2020). La Red de Acceso Radio (RAN) y los aspectos de servicio y sistema (SA) se trabajan desde el grupo de trabajo comentado anteriormente TSG dentro del 3GPP. El TSG RAN está desarrollando documentos que cubren la arquitectura de acceso por radio y aspectos de protocolo de interfaz de radio de la nueva Tecnología de Acceso por Radio (RAT). SA *Working Group 2* (SA2) dentro de TSG SA estudia la arquitectura y las funciones principales del sistema de red 5G bajo el ítem de estudio del sistema de *Next Generation* (NextGen).

Las primeras especificaciones sobre la tecnología 5G comenzaron con la *release* 14 en marzo de 2016, donde se indicaban los requerimientos para los sistemas 5G no autónomos integrados en redes LTE de la generación anterior. Pero no es hasta las *releases* 15 (finalizada en el año 2018) y 16, esta última pendiente de finalización, donde quedan plenamente definidos los requisitos radio del terminal de usuario y de la banda base, así como el procedimiento para pruebas de funcionalidades y características. El alcance de la *release* 15 se amplía para cubrir 5G “autónomo”, con un nuevo sistema de radio complementado por una red central de próxima generación. También incluye mejoras en LTE e implícitamente el *Evolved Packet Core* (EPC). Respecto a la *release* 16 que tal y como se ha comentado anteriormente está en progreso, cubre temas tan diversos como el servicio de prioridad multimedia, servicios de capa de aplicación *vehicle-to-everything* (V2X), acceso satelital 5G, soporte de red de área local en 5G, convergencia inalámbrica y por cable para 5G, posicionamiento y ubicación de terminales, comunicaciones en dominios verticales y automatización de redes y nuevas técnicas de radio entre otros [5].

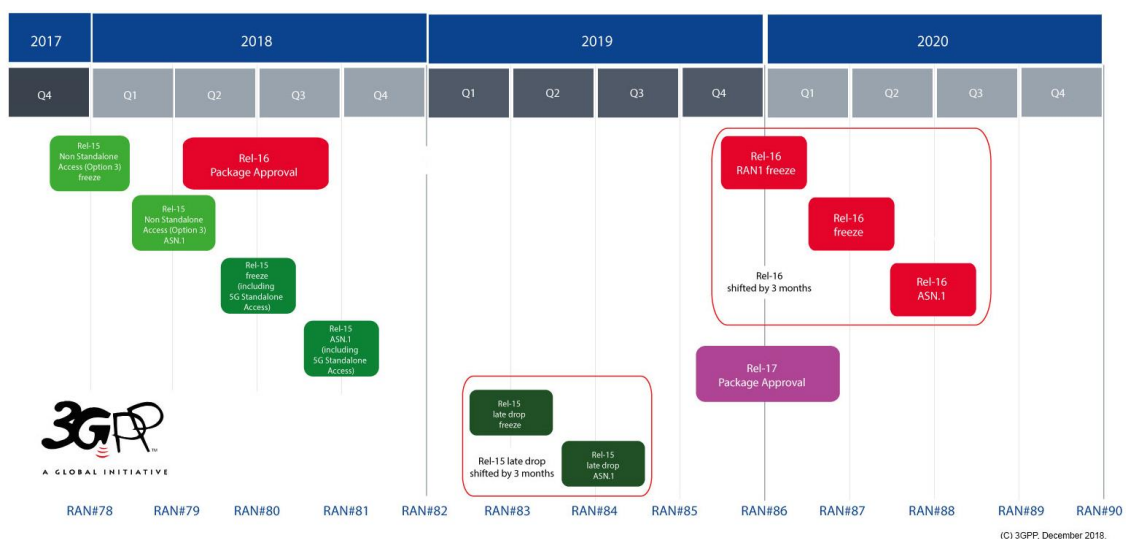


Figura 34: Calendario previsto por la 3GPP para las releases 14, 15 y 16 [7].

Entre las diferentes especificaciones técnicas definidas para el sistema 5G, se encuentra el requisito de soportar un rango amplio de frecuencias y en particular bandas milimétricas, conocidas como *mmWaves*. Las bandas actualmente utilizadas en sistemas 2G, 3G y 4G abarcan desde 450 MHz hasta alrededor de 6 GHz. Las bandas a diferentes frecuencias tienen diferentes características. En términos generales, las frecuencias más bajas son adecuadas para una cobertura de área amplia y las frecuencias más altas son utilizadas para aumentar la capacidad en despliegues densos.

Con la introducción de 5G, el exigente escenario de uso de *enhanced Mobile Broadband* (eMBB) y los nuevos servicios relacionados, requerirán velocidades de datos aún más altas y alta capacidad en implementaciones densas. Si bien muchas de las primeras implementaciones de 5G se realizarán en bandas ya utilizadas para generaciones móviles anteriores, las bandas de frecuencia superiores a 24 GHz (las conocidas como bandas *mmWaves*) se consideran como un complemento de las bandas de frecuencia inferiores a 6 GHz.

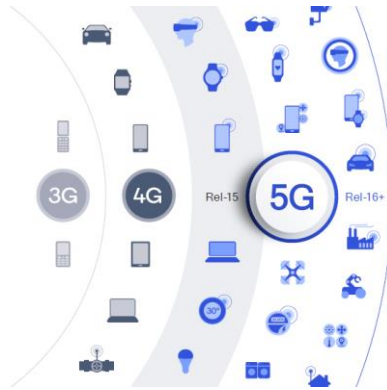


Figura 35: Expansión del ecosistema 5G [37].

En consecuencia, el 3GPP en las *releases* 15 y 16 introduce una tecnología de acceso NR para 5G la cual será lo suficientemente flexible para soportar no sólo las bandas inferiores a 6 GHz sino también frecuencias de hasta 100 GHz. En definitiva, las diferentes *releases* y estudios apuntan a desarrollar una tecnología y una red de acceso para la nueva radio que satisfaga una amplia variedad de casos de uso.

3.3.2. Otras organizaciones involucradas

La industria inalámbrica realiza la investigación, el desarrollo, la implementación y el despliegue de sistemas de comunicaciones móviles en un esfuerzo internacional coordinado mediante el cual se acuerdan especificaciones comunes de la industria que definen el sistema completo de comunicaciones móviles. El trabajo depende en gran medida de la regulación global y regional, en particular para el uso del espectro que es un componente esencial para todas las tecnologías de radio.

Hay una serie de organizaciones involucradas en la creación de especificaciones técnicas y estándares, así como la regulación en el área de comunicaciones móviles. Estas se pueden dividir en tres grupos: organizaciones de desarrollo de normas, organismos reguladores y administraciones, y foros de la industria.

En la Figura 36 se muestra una vista simplificada de la relación entre los diferentes organismos y organizaciones reguladoras.

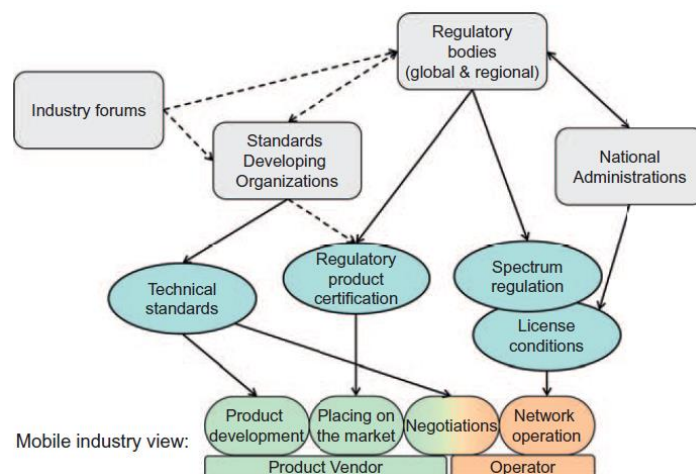


Figura 36: Relación entre los organismos reguladores, organizaciones de desarrollo de normas, foros de la industria e industria móvil [7].

Las *Standards Developing Organizations* (SDO) desarrollan y acuerdan estándares técnicos para los sistemas de comunicaciones móviles, a fin de hacer posible que la industria produzca e implemente productos estandarizados y proporcione interoperabilidad entre esos productos. La mayoría de los componentes de los sistemas de comunicación móvil, incluidas las estaciones base y los dispositivos móviles, están estandarizados hasta cierto punto. También existe un cierto grado de libertad para proporcionar soluciones patentadas en los productos, pero los protocolos de comunicaciones se basan en estándares detallados por razones obvias.

Las SDO generalmente son organizaciones industriales sin fines de lucro y no están controladas por el gobierno. Sin embargo, a menudo escriben estándares dentro de un área determinada bajo el mandato de los gobiernos, otorgando a los estándares un estatus más alto. Existen SDO nacionales pero debido a la difusión global de los productos de comunicaciones, la mayoría de las SDO son regionales y también cooperan a nivel mundial. Como ejemplo, las especificaciones técnicas de GSM, WCDMA / HSPA, LTE y NR son creadas por 3GPP, que es una organización global de siete SDO regionales y nacionales en Europa (ETSI), Japón (ARIB y TTC), Estados Unidos (ATIS), China (CCSA), Corea (TTA) e India (TSDSI).

Los organismos reguladores y las administraciones son organizaciones dirigidas por el gobierno que establecen requisitos legales y reglamentarios para vender, implementar y operar sistemas móviles y otros productos de telecomunicaciones. Una de sus tareas más importantes es controlar el uso del espectro y establecer condiciones de licencia para los operadores móviles que reciben licencias para usar partes del espectro radio frecuencia (RF) para operaciones móviles. Otra tarea es regular la comercialización de productos a través de la certificación reglamentaria, asegurando que los dispositivos, las estaciones base y otros equipos estén homologados y se demuestra que cumplen con la normativa pertinente.

3.4. Espectro para 5G

3.4.1. Bandas de frecuencia para NR

Históricamente, las bandas para la primera y segunda generación de servicios móviles se asignaron a frecuencias alrededor de 800 - 900 MHz, pero también en algunas bandas más bajas y más altas. Cuando se lanzó 3G (IMT-2000), la atención se centró en la banda de 2 GHz y con la continua expansión de los servicios IMT con 3G y 4G, se agregaron nuevas bandas en frecuencias más bajas y más altas, que actualmente abarcan desde 450 MHz hasta alrededor de 6 GHz. Si bien las nuevas bandas de frecuencia, previamente no explotadas, se definen continuamente para las nuevas generaciones móviles, las bandas utilizadas para las generaciones anteriores también se utilizan para la nueva generación. Este fue el caso cuando se introdujeron 3G y 4G y también será el caso de 5G.

Las bandas a diferentes frecuencias tienen diferentes características. Debido a las propiedades de propagación, las bandas a frecuencias más bajas son buenas para despliegues de cobertura de área amplia, en entornos urbanos, suburbanos y rurales. Las propiedades de propagación de frecuencias más altas las hacen más difíciles de usar para una cobertura de área amplia y, por esta razón, las bandas de frecuencias más altas se han utilizado en mayor medida para aumentar la capacidad en despliegues densos.

Con la introducción de 5G, el exigente escenario de uso de eMBB y los nuevos servicios relacionados requerirán velocidades de datos aún más altas y alta capacidad en implementaciones densas. Si bien muchas de las primeras implementaciones de 5G se realizarán en bandas ya utilizadas para generaciones móviles anteriores, las bandas de frecuencia superiores a 24 GHz se consideran como un complemento de las bandas de frecuencia inferiores a 6 GHz. Con los requisitos de 5G para velocidades de datos extremas y áreas localizadas con demandas de capacidad de tráfico de área muy altas, se considera la implementación utilizando frecuencias aún más altas, incluso por encima de 60 GHz. Refiriéndose a la longitud de onda, estas bandas a menudo se denominan bandas de onda milimétricas (mm).

3GPP define continuamente nuevas bandas, principalmente para la especificación LTE, pero ahora también para las nuevas especificaciones NR. Muchas bandas nuevas se definen solo para operación NR. Ambas bandas emparejadas, donde se asignan rangos de frecuencia separados para el enlace ascendente y el enlace descendente, y bandas no emparejadas con un solo rango de frecuencia compartida para el enlace ascendente y el enlace descendente, se incluyen en las especificaciones de NR.

Las bandas emparejadas se usan para la operación *Frequency Division Duplex* (FDD), mientras que las bandas no emparejadas se usan para la operación *Time Division Duplex* (TDD). Tenga en cuenta que algunas bandas no emparejadas se definen como bandas *Supplementary Downlink* (SDL) o *Supplementary Uplink* (SUL). Estas bandas están emparejadas con el enlace ascendente o descendente de otras bandas a través de la agregación de portadora.

Existe un interés considerable a nivel mundial para que el espectro esté disponible para implementaciones de 5G. Esto es impulsado por operadores y organizaciones de la industria, pero también cuenta con el apoyo de organismos reguladores en diferentes países y regiones. En la estandarización, 3GPP ha centrado sus actividades en bandas donde es evidente un alto interés. El espectro de interés se puede dividir en bandas a frecuencias bajas, medias y altas:

- Las **bandas de baja frecuencia** corresponden a las bandas LTE existentes por debajo de 2 GHz, que son adecuadas como capa de cobertura, proporcionando una cobertura amplia y profunda, incluso en interiores. Las bandas con mayor interés aquí son las bandas de 600 y 700 MHz, que corresponden a las bandas de 3GPP NR n71 y n28. Como las bandas no son muy anchas, se espera un ancho de banda máximo de 20 MHz en las bandas de baja frecuencia. Para el despliegue temprano, la banda de 600 MHz se considera para NR en los EE.UU., mientras que la banda de 700 MHz se define como una de las llamadas bandas pioneras para Europa. Además, se identifican varias bandas LTE adicionales en el rango inferior a 3 GHz para un posible reaprovechamiento y se les ha asignado números de banda NR. Como las bandas en general ya están desplegadas con LTE, se espera que NR se despliegue gradualmente en una etapa posterior.
- Las **bandas de frecuencia media** están en el rango de 3 - 6 GHz y pueden proporcionar cobertura, capacidad, así como altas velocidades de datos a través del ancho de banda de canal más amplio posible. El mayor interés a nivel mundial está en el rango de 3300 a 4200 MHz, donde 3GPP ha designado las bandas NR n77 y n78. Debido a las bandas más anchas, son posibles anchos de banda de canal de hasta 100 MHz. Se pueden asignar hasta 200 MHz por operador en este rango de frecuencia a largo plazo, donde la agregación de portadora podría usarse para desplegar el ancho de banda completo. El rango

3300 a 4200 MHz es de interés mundial, con algunas variaciones vistas regionalmente. El rango de 3400 - 3800 MHz es una banda pionera en Europa, mientras que China e India planean 3300 - 600 MHz y en Japón se está considerando 3600 - 4200 MHz. Se consideran rangos de frecuencia similares en América del Norte (3550 - 3700 MHz y discusiones sobre 3700 - 4200 MHz), América Latina, Medio Oriente, África, India, Australia, etc.

- Las **bandas de alta frecuencia** están en el rango de *mm-Wave* por encima de 24 GHz. Las frecuencias más altas suelen implicar rangos más cortos y el aumento del ancho de banda disponible. Es por ello, que estas bandas de frecuencia serán más adecuadas para la cobertura de puntos de acceso con una capacidad local muy alta y pueden proporcionar velocidades de datos muy altas. El mayor interés está en el rango de 24.25 a 29.5 GHz, con las bandas 3GPP NR n257 y n258 asignadas. Se definen anchos de banda de canal de hasta 400 MHz para estas bandas, con anchos de banda aún mayores posibles a través de la agregación de portadora. La banda 27.5 - 28.35 GHz se identificó en una etapa temprana en los EE.UU., mientras que 24.25 - 27.5 GHz, también llamada "banda de 26 GHz", es una banda pionera para Europa, señalando que no todo puede estar disponible para 5G. Diferentes partes del rango más amplio 24.25 - 29.5 GHz se están considerando globalmente. El rango 27.5 - 29.5 GHz es el primer rango planeado para Japón y 26.5 - 29.5 GHz en Corea. En general, esta banda puede verse como global con variaciones regionales. El rango 37 - 40 GHz también está planeado para los EE.UU. Y rangos similares alrededor de 40 GHz también se consideran en muchas otras regiones, incluida China. En general, las frecuencias más altas como 24 - 86 GHz se utilizan, sobre todo, para los radio enlaces punto a punto y satelitales. Las frecuencias de onda milimétricas se utilizarán para temas de capacidad además de para los despliegues masivos de *small cells* (o microceldas⁴). La motivación principal de utilizar *small cells* es proporcionar a los usuarios finales una experiencia celular mejorada en áreas urbanas congestionadas, ofreciendo las siguientes tres características: aumentar la capacidad en áreas con altas densidades de usuarios, mejorar la cobertura y tasas de datos disponibles y extender la vida útil de la batería del dispositivo al reducir el consumo de energía.

NR puede desplegarse tanto en bandas IMT existentes como en bandas futuras que pueden identificarse en WRC o en organismos regionales. La posibilidad de operar una tecnología de acceso radio en diferentes bandas de frecuencia es un aspecto fundamental de los servicios móviles globales. La mayoría de los dispositivos 2G, 3G y 4G tienen capacidad multibanda, cubriendo las bandas utilizadas en las diferentes regiones del mundo para proporcionar itinerancia global. Desde la perspectiva de la funcionalidad de acceso por radio, esto tiene un impacto limitado y las especificaciones de la capa física, como las de NR, no asumen ninguna banda de frecuencia específica. Sin embargo, dado que NR abarca un rango tan amplio de frecuencias, hay ciertas disposiciones que están destinadas solo a ciertos rangos de frecuencia.

Muchos requisitos de RF se especifican con diferentes requisitos entre bandas. Este es ciertamente el caso de NR, pero también de generaciones anteriores. Ejemplos de requisitos de RF específicos de la banda son la potencia de transmisión máxima permitida, los requisitos/límites de emisión *Out-Of-Band* (OOB) y los niveles de bloqueo

⁴ Las *small cells* o microceldas son estaciones base de rango medio, con un alcance de entre 10 metros y 2 kilómetros. Se tratan de nodos de acceso radio de baja potencia que ayudan a proporcionar servicio tanto en áreas interiores como exteriores.

del receptor. Las razones de tales diferencias son restricciones externas variables, a menudo impuestas por los organismos reguladores, en otros casos, diferencias en el entorno operativo que se consideran durante la estandarización.

Las diferencias entre bandas son más pronunciadas para NR debido al amplio rango de bandas de frecuencia. Para la operación NR en las nuevas bandas de *mm-Wave* por encima de 24 GHz, tanto los dispositivos como las estaciones base se implementarán con tecnología parcialmente novedosa y habrá un uso más extendido de *massive MIMO*, formación de haz y sistemas de antena avanzados altamente integrados. Esto crea diferencias en cómo se definen los requisitos de RF, cómo se miden para la evaluación del rendimiento y, en última instancia, también cuáles son los límites para los requisitos. Las bandas de frecuencia dentro del alcance de la *release 15* en 3GPP se dividen por esta razón en dos rangos de frecuencia:

Designación rango de frecuencia	Rango de frecuencia	Ancho de banda
Frequency Range 1 (FR 1) Incluye todas las bandas existentes y nuevas por debajo de 6GHz. Se superpone con frecuencias 4G LTE.	450 MHz a 6 GHz	5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100 MHz
Frequency Range 2 (FR 2) Extiende las bandas de operación en frecuencias <i>mmWave</i> . Incluye nuevas bandas en el rango 24.25 - 52.6 GHz.	24.25 GHz a 52.6 GHz	50, 100, 200, 400 MHz

Tabla 6: División de las bandas de frecuencia en la *release 15* del 3GPP para 5G NR.

Estos rangos de frecuencia pueden ampliarse o complementarse con nuevos rangos en futuras *releases* de 3GPP.

Las bandas de frecuencia donde operará NR están en espectros emparejados y no emparejados, lo que requiere flexibilidad en la disposición dúplex. Por esta razón, NR es compatible con la operación FDD y TDD. Algunos rangos también se definen para SDL o SUL.

3GPP define las bandas operativas, donde cada banda operativa es un rango de frecuencia para el enlace ascendente y/o descendente que se especifica con un determinado conjunto de requisitos de RF. Cada una de las bandas operativas tiene un número, donde las bandas NR están numeradas n1, n2, n3, etc. Cuando el mismo rango de frecuencia se define como una banda operativa para diferentes tecnologías de acceso por radio, se utiliza el mismo número, pero se escribe de manera diferente. Las bandas 4G LTE se escriben con números arábigos (1, 2, 3, ...), mientras que las bandas 3G UTRA se escriben con números romanos (I, II, II, ...).

La *release 15* de las especificaciones 3GPP para NR incluye 26 bandas operativas en el rango de frecuencia 1 y tres en el rango de frecuencia 2. Las bandas para NR tienen un esquema de numeración con números asignados de n1 a n512 usando las siguientes reglas:

1. Para NR en bandas reaprovechadas de LTE, los números de banda LTE se reutilizan para NR, simplemente agregando una "n".
2. A las nuevas bandas para NR se les asignan los siguientes números:
 - El rango n65 a n256 está reservado para las bandas NR en el rango de frecuencia 1 (algunas de estas bandas se pueden usar para LTE).
 - El rango n257 a n512 está reservado para nuevas bandas NR en el rango de frecuencia 2.

El esquema conserva los números de banda y es compatible con versiones anteriores de LTE (y UTRA) y no genera ningún número LTE nuevo por encima de 256, que es el máximo actual posible. A las nuevas bandas solo para LTE también se les pueden asignar números no utilizados por debajo de 65. En la *release* 15, las bandas operativas en el rango de frecuencia 1 están en el rango n1 a n84. Las bandas en rango de frecuencia 2 están en el rango de n257 a n260. Todas las bandas para NR se resumen en la siguiente tabla, que también muestran la asignación de frecuencia correspondiente definida por el ITU-R.

Bandas de operación NR	Uplink (UL) BS receive / UE transmit F _{UL_low} - F _{UL_high}	Downlink (DL) BS transmit / UE receive F _{DL_low} - F _{DL_high}	Modo dúplex
Bandas bajas en FR1 (< 1 GHz)			
n5	824 MHz – 849 MHz	869 MHz – 894 MHz	FDD
n8	880 MHz – 915 MHz	925 MHz – 960 MHz	FDD
n12	699 MHz – 716 MHz	729 MHz – 746 MHz	FDD
n20	832 MHz – 862 MHz	791 MHz – 821 MHz	FDD
n28	703 MHz – 748 MHz	758 MHz – 803 MHz	FDD
n71	663 MHz – 698 MHz	617 MHz – 652 MHz	FDD
n81	880 MHz – 915 MHz	N/A	SUL
n82	832 MHz – 862 MHz	N/A	SUL
n83	703 MHz – 748 MHz	N/A	SUL
Bandas medias en FR1 (1 GHz - 6 GHz)			
n1	1920 MHz – 1980 MHz	2110 MHz – 2170 MHz	FDD
n2	1850 MHz – 1910 MHz	1930 MHz – 1990 MHz	FDD
n3	1710 MHz – 1785 MHz	1805 MHz – 1880 MHz	FDD
n7	2550 MHz – 2570 MHz	2620 MHz – 2690 MHz	FDD
n25	1850 MHz – 1915 MHz	1930 MHz – 1995 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 – 1437 MHz	TDD
n66	1710 MHz – 1780 MHz	2110 MHz – 2200 MHz	FDD
n70	1695 MHz – 1710 MHz	1995 MHz – 2020 MHz	FDD
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
n78	3300 MHz – 3800 MHz	3300 MHz – 3800 MHz	TDD
n79	4400 MHz – 5000 MHz	4400 MHz – 5000 MHz	TDD
n80	1710 MHz – 17850 MHz	N/A	SUL
n84	1920 MHz – 1980 MHz	N/A	SUL
n86	1710 MHz – 1780 MHz	N/A	SUL
Bandas altas en FR2 (> 24 GHz)			
n257	26500 MHz – 29500 MHz	26500 MHz – 29500 MHz	TDD
n258	24250 MHz – 27500 MHz	24250 MHz – 27500 MHz	TDD
n260	37000 MHz – 40000 MHz	37000 MHz – 40000 MHz	TDD
n261	27500 MHz – 28350 MHz	27500 MHz – 28350 MHz	TDD

Tabla 7: Bandas de frecuencia operativas definidas por 3GPP para NR.

- Bandas operativas reutilizadas para 5G.
- Nuevas bandas operativas 5G NR.

Algunas de las bandas de frecuencia se superponen parcial o totalmente. En la mayoría de los casos, esto se explica por las diferencias regionales en cómo se implementan las bandas definidas por el ITU-R. Al mismo tiempo, se desea un alto grado de coincidencia entre las bandas para permitir la itinerancia global. Originado en desarrollos de espectro global, regional y local, se especificó un primer conjunto de bandas como bandas para UTRA. El conjunto completo de bandas UTRA luego se transfirió a las especificaciones LTE en 3GPP *release* 8. Se agregaron bandas adicionales en versiones posteriores. En la *release* 15, muchas de las bandas LTE ahora se transfieren a las especificaciones NR.

3.4.2. Plan Nacional 5G en España

En España, el gobierno está trabajando para impulsar el despliegue de redes y desarrollo de tecnologías 5G a través de tres grandes líneas de actuación, según como se establece en el Plan Nacional 5G [17]:

- Establecer el marco regulatorio. En junio de 2019 se aprobó el nuevo plan nacional técnico de la Televisión Digital Terrestre (TDT), que regula los principales aspectos de la liberación de la banda de 700 MHz (segundo dividendo digital).
- Habilitar y licitar una parte del espectro radioeléctrico para estas tecnologías.
 - La banda de 3.6 a 3.8 GHz fue licitada en julio de 2018.
 - La banda de 700 MHz será licitada en 2020.
- Apoyar la realización de experiencias a través de proyectos experimentales con la concesión de apoyos económicos directos.

En la siguiente tabla, se muestra la hoja de ruta definida para 5G en España:

Año	Actuaciones
2017	<ul style="list-style-type: none"> • Consulta pública Plan 5G y banda 700 MHz. • Plan Nacional 5G. • Oficina Técnica del Plan.
2018	<ul style="list-style-type: none"> • Licitación de primeras bandas de frecuencias (bandas 3.6 – 3.8 GHz). • Convocatoria de pilotos y acciones I+D+i. • Publicación hoja de ruta nacional banda 700 MHz.
2019	<ul style="list-style-type: none"> • Desarrollo proyectos piloto y casos de uso. • Proceso de liberación de segundo dividendo digital. • Evaluación de medio plazo y posibles nuevas acciones.
2020	<ul style="list-style-type: none"> • Despliegue de redes 5G.

Tabla 8: Hoja de ruta del Plan Nacional 5G en España.

3.5. SDN y NFV en 5G

La evolución de la arquitectura de red ha permitido que las redes se hayan vuelto más rápidas y resistentes con mayor capacidad, pero aún luchan por satisfacer las demandas del mercado cambiante: industria de redes impulsada por un nuevo conjunto de requisitos de los servicios basados en la nube y redes centradas en hardware. El diseño, la implementación y la administración de redes están transformando la industria de redes hacia un enfoque de virtualización y alejándose del hardware personalizado con

software preempaquetado. La principal motivación de esta transformación es ofrecer nuevos servicios y reducir los costes operativos y de implementación.

Con la finalidad de entender más fácilmente la necesidad y motivación que existe para evolucionar la arquitectura de red, se explican a continuación algunas de las características de las redes tradicionales:

- Los *middleboxes*⁵ transforman, filtran, inspeccionan, manipulan o controlan el tráfico de red para fines de control y gestión de redes.
- Los *middleboxes* son dispositivos especialmente, independientes y cerrados. Por lo tanto, los servicios tienen una fuerte conexión con algunos *middleboxes* específicos.
- El número aumenta constantemente y aunque está solucionado en algún lugar de la red, no se puede mover ni compartir fácilmente.
- Software patentado diseñado para ejecutarse en hardware personalizado.
- Ciclo de despliegue complejo y largo con trabajo manual de personal técnicamente capacitado. Implementación difícil, costosa y lenta.
- Diagnóstico complejo de fallas y configuraciones erróneas.
- Los entornos de múltiples proveedores requieren un alto nivel de experiencia.
- Los proveedores de servicios tienen que ampliar su infraestructura física periódicamente debido a que cada vez mayores requisitos de servicio conducen a un alto CAPEX y OPEX.

Por otro lado, algunas de las limitaciones sobre la arquitectura de red tradicional son:

- Flexibilidad: soluciones con hardware y software específicos. Falta de flexibilidad y personalización para cumplir con los requisitos que cambian rápidamente.
- Escalabilidad: limitaciones de hardware (potencia y espacio) y software (no puede mantenerse al día con la escala de cambios en la red de datos).
- *Time-to-Market*: implementar nuevos servicios requiere actualizar el equipo de red, rediseñar, migrar a otros proveedores, etc.
- Capacidad de administración: herramientas de administración específicas para monitorear y controlar implementaciones no estándar.
- Integración de hardware y software: capacidades de solución limitadas.
- Costes operativos: equipos altamente capacitados para cada sistema específico del proveedor implementado en la red.
- Actualización/migración: la actualización, la migración y la optimización de dispositivos y la red requieren acceso físico y personal en el sitio para implementar nuevo hardware, reconfigurar la conectividad física y actualizar las instalaciones en el sitio. Esto provoca una barrera de costes que se ralentiza al ofrecer nuevos servicios.
- Capacidad: en general, las redes están sobreaprovisionadas (demandas de capacidad a largo plazo) que resultan en un menor retorno de la inversión.
- Interoperabilidad: implementaciones patentadas (para acelerar el tiempo de comercialización e implementación).

Las redes móviles 5G también tienen el potencial de aportar beneficios sobre las tecnologías de red radio anteriores al permitir que las redes sean extremadamente

⁵ La arquitectura de redes tradicionales está llena de varios dispositivos de hardware patentados llamados *middleboxes* (firewalls, NAT, enrutadores, *flow monitor*, *load balancer*, etc).

ágiles y cumplan una gama potencialmente amplia de diferentes demandas, por ejemplo, latencia muy baja, requisitos de ancho de banda y densidad del dispositivo.

Por lo tanto, la justificación de la nueva arquitectura central en 5G es transformar hacia un ecosistema abierto, escalable y elástico para poder soportar una gran variedad de aplicaciones y servicios con alta confiabilidad a una velocidad más rápida, agilidad operativa para el despliegue rápido de nuevos servicios, conectividad escalable y utilizable, proporcionar conectividad de infraestructura desde los puntos de acceso a la red principal a un coste razonable, automatización extrema para reducir el coste total de propiedad (TCO), etc.

Las partes interesadas (conocido en inglés como *stakeholders*) han identificado habilitadores claves que ayudarán a que los nuevos servicios con diversos requisitos sean acomodados de manera eficiente y rápida utilizando una sola red. Estos habilitadores se resumen en la siguiente ilustración (Figura 18).

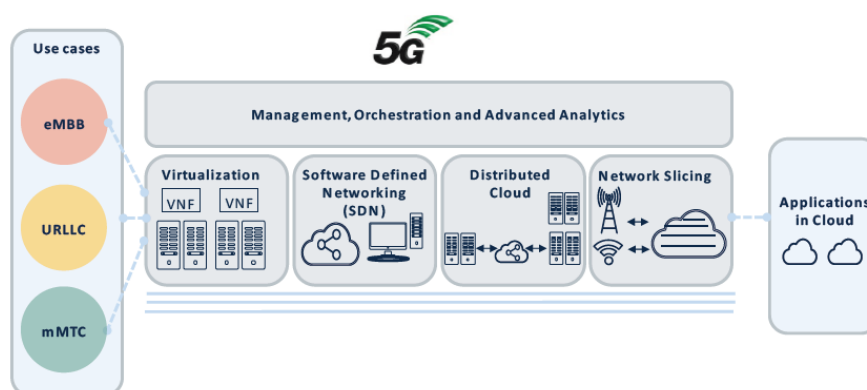


Figura 37: Redes 5G virtuales E2E diseñadas para satisfacer los requisitos de la aplicación [4].

La softwarización de redes, es una tendencia emergente que busca transformar las redes utilizando soluciones basadas en software. A través de tecnologías como las redes definidas por software (SDN) y la virtualización de funciones de red (NFV), la softwarización de red puede proporcionar la programabilidad, flexibilidad y modularidad que se requiere para crear múltiples redes lógicas (virtuales), cada una adaptada para un caso de uso dado.

Las redes SDN son un término del paradigma de redes programables. Se refiere a la capacidad de las aplicaciones de software para programar dispositivos de red individuales dinámicamente y, por lo tanto, controlar el comportamiento de la red en su conjunto. Es por ello, que las redes SDN son un conjunto de técnicas utilizadas para facilitar el diseño, la entrega y la operación de servicios de red de manera determinista, dinámica y escalable. Un elemento clave en SDN es la introducción de una abstracción entre los planos de control y reenvío (tradicionales) para separarlos y proporcionar a las aplicaciones los medios necesarios para controlar mediante programación la red. El objetivo es aprovechar esta separación y la capacidad de programación asociada para reducir la complejidad y permitir una innovación más rápida en ambos planos.

La tecnología NFV es, básicamente, la famosa tecnología *cloud* del mundo de las tecnologías de la información o IT (*Information Technologies*), aplicada en el mundo de los operadores de telecomunicaciones, desplegando así funciones y servicios de red basados en software, que puede ser alojado en hardware estándar de forma centralizada o bien distribuida. El objetivo de NFV es transformar la forma en que los

operadores de red diseñan redes mediante la evolución de la tecnología de virtualización de IT estándar para consolidar muchos tipos de equipos de red en servidores, conmutadores y almacenamiento de alto volumen estándar en la industria, que podrían ubicarse en los centros de datos, en la red o en las instalaciones del cliente final. NFV reemplaza el equipo de red tradicional, diseñado a medida (cajas negras) que continúa dominando la base instalada en las redes. La virtualización presenta funciones de red que generalmente se ejecutan en hardware dedicado y especializado, como software que se puede ejecutar como máquinas virtuales en servidores básicos. Por lo tanto, permite que los recursos de hardware se administren como un grupo de recursos común. *Network Function Virtualisation* permite la creación de nuevas funciones de red bajo demanda.

Para aprovechar al máximo la virtualización, la red definida por software (SDN), puede ajustar la red en software, permitiendo la programación de la red y la secuencia de funciones. La convergencia de SDN y NFV permitirá a los operadores responder mejor a las demandas de los clientes, tanto al poder adaptar los servicios a medida (dentro un tiempo y coste razonables) como a través del aprovisionamiento bajo pedido de los propios clientes a través de portales de autoservicio.

Una vez que las redes se virtualizan y se hacen programables, es posible cambiar los recursos de computación a la ubicación más adecuada. Algunos casos de uso pueden requerir respuestas de baja latencia, para las cuales la computación periférica móvil (es decir, los recursos de computación en la nube dentro de la red ubicada cerca del usuario) puede ser apropiada.

3.6. *Network slicing*

La tecnología 5G dará mayor robustez a la conectividad de los *smartphones*. Pero, sobre todo, llevará la conectividad a dispositivos e industrias que, hasta ahora, habían quedado al margen de la revolución móvil. En este nuevo entorno, las necesidades de cada dispositivo van a ser muy diversas. Por ejemplo, el vehículo autónomo no tiene por qué necesitar mucho ancho de banda, pero sí baja latencia. Sin embargo, el servicio de vídeo 4K en *streaming* requerirá grandes anchos de banda. Es por ello, que se ha desarrollado el concepto de *network slicing* como respuesta a este nuevo ecosistema.

La arquitectura de comunicación móvil actual no es lo suficientemente flexible y escalable para admitir los requisitos de multicliente y multiservicio de 5G. Mediante la combinación de tecnologías como las *Software Defined Networking* (SDN) y la *Network Function Virtualisation* (NFV) explicadas en el apartado anterior, las redes se pueden softwarizar y proporcionar la programabilidad, flexibilidad y modularidad necesarias para crear de extremo a extremo (autónomo) múltiples redes lógicas (es decir, *network slices*), cada una adaptada para un caso de uso dado, en la parte superior de una infraestructura común.

La arquitectura de los sistemas 5G, que actualmente se encuentra bajo su proceso de estandarización, pretende proporcionar la flexibilidad y capacidad de configuración necesarias para satisfacer la gama prevista de requisitos y asociaciones. Con este propósito, la arquitectura 5G incorpora el concepto de *network slicing* [18], que permite compartir una infraestructura común entre diversas redes lógicas de extremo a extremo (autónomas). Cada *network slicing* se puede proporcionar con el aislamiento requerido y las características optimizadas para una aplicación particular y/o se puede utilizar para

proporcionar servicio a los usuarios que pertenecen a un determinado proveedor, también denominados *tenants*.

Multi-tenancy es particularmente desafiante para la *Radio Access Network* (RAN) ya que implica la configuración de diferentes comportamientos de RAN sobre un conjunto común de recursos de radio. En este sentido, ha surgido la necesidad de desarrollar mecanismos que permitan *slicing* en la RAN.

El *network slicing* se aplica tanto en la red central 5G (5GCN), definida en la especificación como 5GC, como en la red de acceso radio de próxima generación, conocida en inglés como *Next Generation – Radio Access Network* (NG-RAN). *Slicing* es especialmente relevante para la RAN ya que es la parte más exigente de recursos (y más costosa) de la red móvil y la más desafiada por el soporte de la *network slicing* [19]. La materialización del *slicing* en la RAN está fuertemente relacionada con las funciones de *Radio Resource Management* (RRM) e Inteligencia Artificial (AI). Si bien las funciones RRM incluyen la gestión dinámica de los recursos de radio en la RAN, la inteligencia artificial permite percibir y analizar la gran cantidad de datos diferentes disponibles del entorno y tomar las medidas adecuadas para la configuración y optimización de la RAN. En base a esto, surge la necesidad de proponer y desarrollar soluciones RRM y AI que permitan la evaluación del *slicing* en la RAN en escenarios 5G.

Como se muestra en la Figura 38, los *network slices* se componen de *mobile Network Functions* (NF), que se combinan adecuadamente para cumplir los requisitos de un propósito particular o categoría de servicio (por ejemplo, aplicaciones con diferentes requisitos de acceso y/o funcionales) o incluso clientes individuales (por ejemplo, empresas, proveedores de servicios externos).

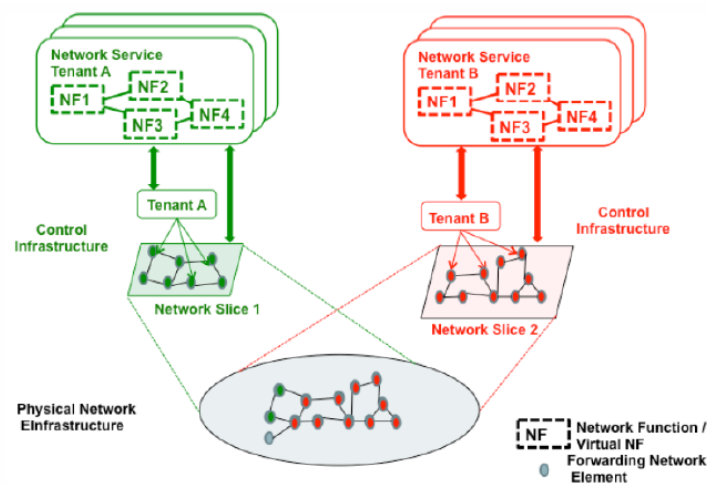


Figura 38: Esquema conceptual de *network slicing* [20].

Cada *network slice* en el sistema está compuesto por *Core Network* (CN) y RAN NF, así como por la comunicación entre NF [21]. Los *network slices* se especifican mediante una serie de políticas y configuraciones específicas que permiten admitir requisitos específicos del servicio, como la *Radio Access Technology* (RAT), ancho de banda, latencia, calidad de servicio garantizada (QoS), nivel de seguridad, etc. Además, cada *slice* puede estar total o parcialmente aislada de otras *slices* en diferentes niveles (físico, de gestión, de datos), dependiendo del nivel de los requisitos de exposición. El aislamiento entre diferentes *slices* se puede lograr definiendo NF compartido o dedicado en diversos niveles.

Además, *network slicing* puede estar compuesto de diferentes niveles de jerarquía, lo que permite la posibilidad de crear divisiones dentro de una división de nivel superior con NF diferentes, según los requisitos. En este sentido, se pueden unir *network slices* a los diferentes *tenants* que comparten la red, y cada uno de ellos define diferentes servicios con diversos requisitos de QoS.

También, *network slicing* debe estar provista de *Self Organizing Networks* (SON) para la automatización de la configuración y reconfiguración de *slices*, así como para la optimización automática del rendimiento de los servicios de acuerdo con las políticas preestablecidas y para la restauración automatizada para la identificación y resolución de posibles caídas de los *network slices*.

Asimismo, los mecanismos de inteligencia artificial pueden proporcionar la inteligencia requerida para gestionar y optimizar *slices* al realizar el ciclo de inteligencia artificial [22], que comienza con la adquisición y el procesamiento previo de los datos de entrada aprovechando la gran variedad de fuentes de datos disponible. Luego, los datos de entrada recopilados se procesan de manera inteligente en la etapa de descubrimiento de conocimiento explotables que representan la red y el comportamiento del usuario. Las herramientas basadas en inteligencia artificial dependen del aprendizaje automático para llevar a cabo la extracción de los datos de entrada y extraer modelos de conocimiento relevantes, que se pueden usar directamente para tomar decisiones inteligentes.

Tal y como se ha comentado anteriormente, *Network slicing* es especialmente desafiante para la RAN. Por un lado, el hecho de que el espectro de radio es un recurso limitado representa una restricción para la escala de *slice* de RAN, lo que lleva a la definición de nuevas estrategias y algoritmos para el RRM en el *slice* de RAN con el objetivo de maximizar la utilidad general. Por otro lado, el nivel de intercambio de información entre las diferentes capas en RAN representa una compensación entre la eficiencia de la operación de *slice* de RAN y la vulnerabilidad de seguridad. Por ejemplo, algunas aplicaciones de *tenants* con requisitos de seguridad exigentes (por ejemplo, servicios de emergencia, control de máquinas) podrían imponer restricciones sobre cómo se dividen las *slices*.

Los aspectos de implementación de *network slicing* en la NG-RAN se han estudiado desde múltiples ángulos, desde técnicas de virtualización y plataformas programables con mecanismos de protección [23] [24] y diferenciación de tráfico con reconocimiento de *slices* a algoritmos para el intercambio dinámico de recursos entre *slices* [25]. Del mismo modo, analiza el problema de *slice* de RAN en una red multicelular en relación con las funcionalidades RRM. A su vez, propone un conjunto de descriptores de configuración independientes del proveedor destinados a caracterizar características, políticas y recursos que se implementarán en las capas de protocolo de radio de un nodo NG-RAN para la realización de *slices* RAN concurrentes [26] [27].

En la Figura 39 se presenta más específicamente el *network slicing* 3GPP. En esa figura, el *network slice* número 3 es una implementación sencilla en la que todas las funciones de red sirven solo a un único *network slice*. La figura también muestra cómo un UE recibe servicio de múltiples *network slices*, número 1 y 2. En tales implementaciones, hay funciones de red en común para un conjunto de *slices*, incluido el AMF, el PCF y el NRF. Esto se debe a que hay una única instancia de control de acceso y gestión de movilidad por UE que es responsable de todos los servicios de un UE. Los servicios del plano de usuario, específicamente los servicios de datos, se pueden obtener a través de múltiples *network slices*. En la figura, el *slice* número 1 proporciona al UE servicios

de datos para la red de datos número 1 y el *slice* número 2 para la red de datos número 2. Esos *slices* y los servicios de datos son independientes entre sí, aparte de la interacción con el acceso común y el control de movilidad que se aplica a todos los servicios del usuario/UE. Esto hace posible adaptar cada *slice* para, por ejemplo, diferentes servicios de datos de QoS o diferentes funciones de aplicación, todo determinado mediante el marco de control de políticas.

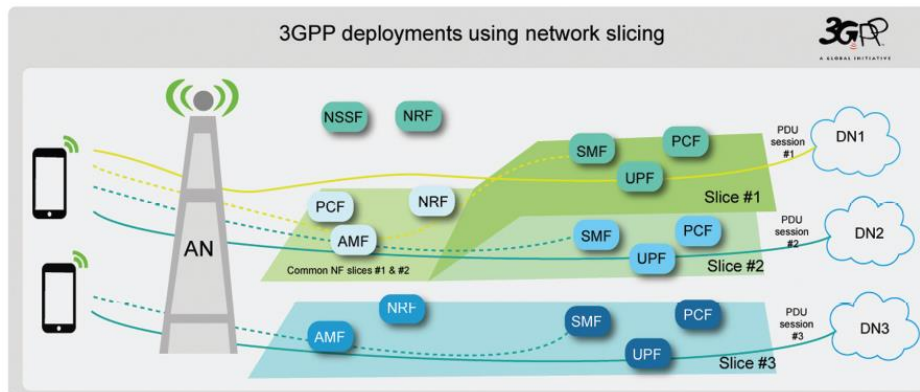


Figura 39: Funciones de red que componen network slices [28].

3.7. Casos de uso de 5G

Desde la publicación del servicio 5G se ha especulado mucho acerca de los posibles casos de uso que las capacidades técnicas mejoradas de 5G podrían soportar, desde mejoras en los servicios de banda ancha móvil hasta servicios de cómo vehículos totalmente autónomos. Sin embargo, la realización de casos de uso de 5G será un proceso paso a paso y muchos usos potenciales se encuentran actualmente en etapas muy tempranas de desarrollo, muchos casos de uso que eventualmente pueden llegar a ser importantes una vez que el 5G esté muy extendido pueden incluso no haberse identificado todavía.

Se espera que las primeras implementaciones de 5G se centren en mejorar las propuestas de banda ancha móvil existentes, según los operadores inalámbricos. *Enhanced mobile broadband* (eMBB) proporcionará banda ancha móvil de alta velocidad a áreas concurridas, facilitará a los consumidores disfrutar de transmisión de alta velocidad para dispositivos domésticos y permitirá que los servicios de colaboración empresarial evolucionen. Algunos operadores también están considerando eMBB como la solución de última milla en aquellas áreas que carecen de conexiones de cobre o fibra a los hogares.

También se espera que 5G impulse la evolución de las ciudades inteligentes y el IoT a través del despliegue de un número considerable de redes de sensores de baja potencia en ciudades y áreas rurales. La seguridad y robustez incorporadas en 5G lo harán adecuado para la seguridad pública, así como para su uso en servicios de misión crítica, como redes inteligentes, servicios policiales y de seguridad, servicios públicos de energía y agua, y atención médica. Sus características de rendimiento de baja latencia lo hacen adecuado para la cirugía remota, la automatización de fábricas y el control de procesos en tiempo real.

Las características de baja latencia y seguridad de 5G jugarán bien en la evolución de los sistemas de transporte inteligente, permitiendo que los vehículos inteligentes se

comuniquen entre sí y creando oportunidades para automóviles y camiones autónomos conectados. Por ejemplo, un vehículo autónomo (*Autonomous Vehicle*, AV) operado a través de un sistema de conducción autónomo basado en la nube debe ser capaz de detenerse, acelerar o girar cuando se le indique que lo haga. Cualquier latencia de la red o pérdida en la cobertura de la señal que impida la entrega de mensajes podría tener consecuencias catastróficas. Sin embargo, los operadores inalámbricos creen que los AV tienen un camino significativo por recorrer antes de que entren en servicio, a pesar de los pilotos y pruebas en curso.

Sin embargo, puede haber otros casos de uso para 5G habilitados por sus nuevas capacidades distintivas sobre las tecnologías de acceso radio anteriores. Con este fin, gran parte de la discusión sobre 5G hasta la fecha ha considerado casos de uso llamativos en industrias específicas donde se espera que 5G genere nuevas oportunidades de negocios o brinde un valor adicional significativo a los servicios existentes. Por ejemplo, los casos de uso de 5G a menudo se discuten en sectores como la automoción, salud, fábricas y agricultura, entre otros.

3.7.1. Escenarios principales de utilización de 5G

En la nueva era de 5G, los nuevos requisitos de comunicación plantean desafíos en las redes existentes en términos de tecnologías y modelos comerciales. La red móvil de próxima generación debe satisfacer demandas diversificadas. En la visión IMT-2020, el ITU-R sintetiza los diferentes casos de uso en tres escenarios de uso principales: *enhanced Mobile Broadband* (eMBB), *ultra-Reliable and Low-Latency Communications* (uRLLC) y *massive Machine Type Communications* (mMTC).

- **Enhanced mobile broadband (eMBB):** la banda ancha móvil mejorada aborda los casos de uso centrados en satisfacer la demanda de la gente de un estilo de vida cada vez más digital y se centra en servicios y datos multimedia que tienen altos requisitos de ancho de banda, por ejemplo, videos de alta definición (HD), realidad virtual (VR) y realidad aumentada (AR). Su demanda continuará aumentando y están surgiendo nuevas áreas de aplicación, estableciendo requisitos nuevos y diversos (por ejemplo, puntos críticos, cobertura de área amplia).
- **Ultra-reliable and low-latency communications (uRLLC):** las comunicaciones ultra confiables y de baja latencia tienen como objetivo cumplir con requisitos estrictos de latencia, confiabilidad y alta disponibilidad. Incluye comunicaciones tanto humanas (por ejemplo, Internet táctil, monitorización remota de pacientes, telemedicina) como centradas en máquina, por ejemplo, de vehículo a vehículo, control inalámbrico de la industria, redes inteligentes, entre otros.
- **Massive machine type communications (mMTC):** las comunicaciones masivas de tipo máquina caracterizadas por una gran cantidad de dispositivos conectados que generalmente transmiten datos confidenciales de bajo volumen y sin retraso. Por lo tanto, tiene como objetivo satisfacer las demandas de una sociedad digital más desarrollada y se centra en servicios que incluyen altos requisitos de densidad de conexión, como las ciudades inteligentes (*Smart Cities*), hogar inteligente, *Internet of Things*, agricultura inteligente y monitorización de energía.

En la Figura 40 se representan los escenarios principales de utilización de 5G, donde se puede observar algunos de los casos de uso para cada tipo de escenario.

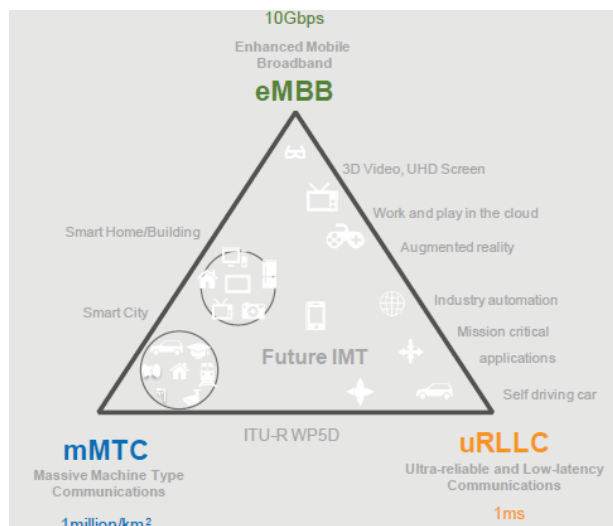


Figura 40: Clasificación de la ITU sobre los escenarios principales de redes 5G [29].

Aunque algunos de los casos de uso pueden no ajustarse exactamente a una de las categorías, esta categorización proporciona una agrupación relevante de los casos de uso previstos y puede usarse para identificar los requisitos necesarios para la tecnología de interfaz radio de próxima generación.

Las capacidades técnicas bajo IMT-2020 presentan una mejora significativa con respecto a su predecesor (IMT-Advanced, a veces denominado 4.5G). La Figura 41 muestra las mejoras en términos de velocidades de datos máximas, eficiencia espectral, movilidad, latencia, eficiencia energética y densidad de conexión, entre otros. Para evitar dudas, existen compensaciones y no todos los parámetros de rendimiento de la red se pueden llevar a los límites de las capacidades IMT-2020 simultáneamente. Sin embargo, un aspecto clave de 5G es que se pueden redes virtuales priorizando ciertas características (por ejemplo, baja latencia o eficiencia energética).

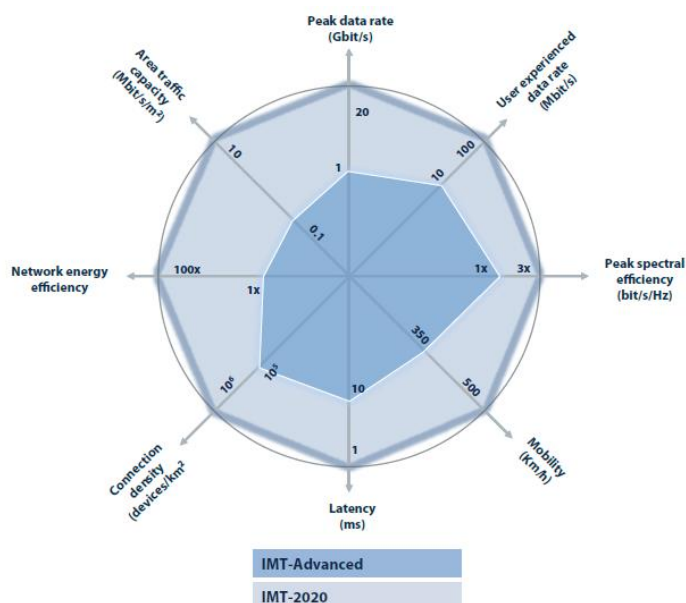


Figura 41: Mejoras de las capacidades clave de IMT-Advanced a IMT-2020 [4].

Aunque los requisitos finales para 5G aún no se han finalizado, se espera que cada una de las tres familias principales de escenarios de uso tengan necesidades diferentes en términos de estas capacidades técnicas, como se muestra en la Figura 42 a continuación.

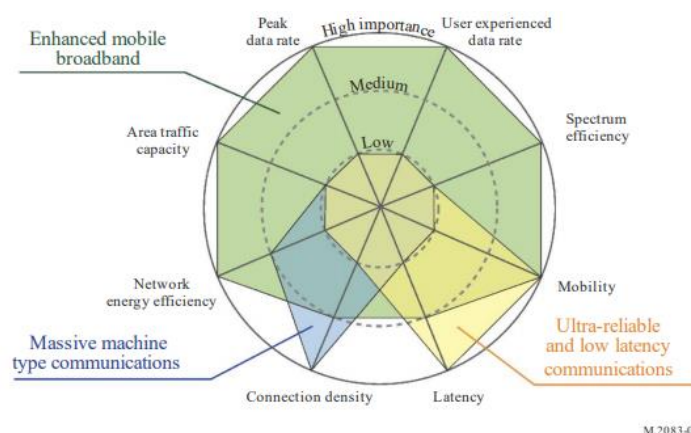


Figura 42: Capacidades clave en diferentes escenarios de uso [30].

Hay que tener en cuenta que todas las capacidades clave no necesariamente deben cumplirse simultáneamente y algunos requisitos de casos de uso pueden incluso ser mutuamente excluyentes dentro de una única configuración de red. Por lo tanto, habrá que hacer una compensación al definir un servicio diferenciado para soportar un caso de uso particular. Estos servicios diferenciados pueden implementarse utilizando *network slicing* para crear una serie de redes virtuales con diferentes características de rendimiento alojadas en una infraestructura común. Dentro de las limitaciones generales de esa infraestructura, las características de servicio de segmentos de red particulares se pueden variar ágilmente a través de la reconfiguración de software. Además, pueden aparecer nuevos casos de uso, surgiendo nuevos requisitos. Esto implica una necesidad de flexibilidad de red para poder adaptarse a las diversas necesidades de servicios y aplicaciones.

En este escenario, el concepto de cobertura de 5G no es tan sencillo de definir como para las generaciones anteriores de tecnología móvil. Los servicios 5G en una ubicación determinada no tendrán características fijas, sino que representarán una elección realizada dentro del rango general de posibilidades definido por IMT-2020. Además, la elección de las capacidades disponibles en una ubicación puede modificarse de vez en cuando para cumplir con los requisitos cambiantes del usuario.

En este contexto, se prevén diversos tipos de asociaciones para redes 5G que se establecerán en múltiples capas que van desde compartir la infraestructura hasta exponer capacidades de red específicas como un servicio de extremo a extremo e integrar los servicios de *partners* en el sistema 5G a través de un sistema rico y conjunto de capacidades orientadas al software. El intercambio del espectro y la infraestructura de la red móvil entre múltiples proveedores de comunicaciones, como operadores de redes virtuales móviles, conocido en inglés como *mobile virtual network operators* (MVNO), o proveedores de servicios verticales, llamados “*tenants*”, es una de las principales características de las arquitecturas futuras de las redes móviles, ya que el proceso de intercambio reducirá los costes operativos y de capital [31], lo que se puede lograr a través de las capacidades de *network slicing*.

4. Internet of Things (IoT)

4.1. Introducción

El concepto de *Internet of Things* (IoT) se refiere a la interconexión y el intercambio autónomo de datos entre dispositivos que son máquinas o partes de máquinas, a menudo involucrando sensores y actuadores. La coordinación entre las diversas máquinas, dispositivos y aplicaciones conectadas a Internet se puede realizar a través de múltiples redes cableadas o inalámbricas. El futuro mundo conectado tendrá decenas de miles de millones de dispositivos IoT. Es por ello, que *Internet of Things* es la próxima revolución en el ecosistema móvil donde es probable que los servicios de IoT sean un impulsor clave para un mayor crecimiento de la telefonía móvil. En relación con este hecho, surge el concepto de *Cellular IoT* (CIoT) el cual se refiere a una forma de conectar dispositivos físicos a Internet al hacer que se conecten en las mismas redes móviles que los *smartphones*. Su simplicidad de infraestructura combinada con el comienzo de 5G posiciona a *Cellular IoT* como un *player* fuerte en el espacio de conectividad.

Cellular IoT ha sido ampliamente adoptado en todo el mundo, con conectividad 2G y 3G que permite muchas de las primeras aplicaciones de IoT. Mayor ancho de banda, menor latencia y mayor soporte para grandes volúmenes de dispositivos por celda están llegando al mercado con ofertas 4G. Las tecnologías 3GPP como 4G LTE pueden proporcionar conectividad IoT de área amplia. Hay que tener en cuenta que LTE es la tecnología inalámbrica de mayor despliegue y más rápido crecimiento con 3.700 millones de conexiones en todo el mundo a finales de 2018 [32]. Además, las redes LTE continuarán expandiendo su cobertura y conexiones durante la próxima década formando la base para la próxima generación de tecnología inalámbrica 5G. Inicialmente las redes 5G habilitadas por el estándar 5G NR, habilitará las comunicaciones de baja latencia ultra confiables (uRLLC) que admiten aplicaciones cada vez más críticas.

Cellular IoT, por lo tanto, tiene la capacidad de abordar tanto los requisitos relativamente más simples del mercado *massive IoT* como las demandas altamente específicas y sensibles de entornos y aplicaciones complejas.

Los dispositivos IoT de hoy en día están conectados en una amplia variedad de tecnologías inalámbricas que podrían clasificarse aproximadamente en cuatro clases de tecnología de conectividad: cableada, inalámbrica de corto alcance (desde Bluetooth a redes de malla), inalámbrica de largo alcance (incluyendo celular y redes de área amplia de baja potencia (LPWA⁶)) y satélite. Naturalmente, dentro de cada clase hay numerosas tecnologías y estándares específicos. Otra forma de considerar las clases de tecnología IoT es dividiéndolas en segmentos de conectividad de corto alcance y área amplia. El primero generalmente está habilitado por tecnologías radio sin licencia como, por ejemplo, WiFi, Bluetooth, ZigBee y Z-Wave. El segmento de área amplia consiste en dispositivos alimentados por tecnologías celulares (GSM, LTE y 5G), así como tecnologías de baja potencia sin licencia, como SigFox y LoRA.

⁶ La tecnología de área amplia de baja potencia (*Low Power Wide Area*, LPWA) surgió en 2013 como una clase de tecnologías inalámbricas que se adaptan bien a las necesidades específicas de los dispositivos máquina a máquina (M2M) e IoT.

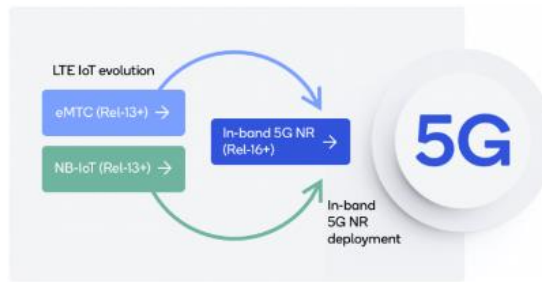


Figura 43: La evolución de LTE IoT es fundamental para 5G [33].

Cellular IoT es un ecosistema en rápido crecimiento basado en estándares globales 3GPP, respaldado por un número creciente de proveedores de redes móviles, así como por proveedores de dispositivos, *chipset*, módulos e infraestructura de red. 3GPP ya ha introducido un conjunto de dos tecnologías LTE IoT de banda estrecha complementarias en la versión 13: eMTC (comunicación mejorada de tipo máquina), también conocida como LTE-M (comunicación tipo máquina) y NB-IoT (*NarrowBand-Internet of Things*). Es un conjunto de dos tecnologías de banda estrecha, que reduce la complejidad del dispositivo y la red, maximiza la vida útil de la batería, extiende el alcance y aumenta la densidad del dispositivo. LTE-M y NB-IoT ya son etiquetadas como 5G debido a que ambas tecnologías cumplen con los requisitos de la ITU. LTE IoT se está implementado en todo el mundo para convertirse en la solución inicial para cumplir con los requisitos de 5G IoT masivo.

Debido a que el objetivo del presente trabajo es la red 5G NR, se van a presentar en este capítulo los conceptos básicos sobre tecnologías, características, tipos de redes, requerimientos y algunos de los casos de uso sobre *Internet of Things*.

4.2. Estado del arte de Clot en LTE y orientación a 5G

La mayoría de las personas conocen a NB-IoT y LTE-M como una tecnología 4G, pero también juegan un papel vital en un sistema 5G para admitir casos de uso de 5G LPWA. Se tiene que tener en cuenta que 5G NR aún no incluye en la *release 15* ninguna tecnología específica para IoT celular. Aunque el proyecto de la 3GPP, el grupo de estándares que especifica 5G y otros estándares de redes inalámbricas, ha indicado que LTE-M y NB-IoT serán parte de 5G y son la única tecnología 5G que admite casos de uso de 5G LPWA en el futuro previsible.

3GPP ha indicado a la ITU que presentará tecnologías NB-IoT y LTE-M como candidatos para cumplir con los requisitos de 5G LPWA descritos en IMT-2020. 3GPP también ha acordado que los casos de uso de LPWA solo se abordarán mediante la evolución de LTE-M y NB-IoT como parte del proceso de especificación 5G. Además, ha acordado que no se estudiarán o especificarán soluciones basadas en 5G NR para casos de uso de LPWA en el futuro previsible. Todas estas decisiones refuerzan el hecho de que NB-IoT y LTE-M serán las únicas tecnologías 5G que admitirán casos de uso de LPWA. También es importante tener en cuenta que la mayoría de los dispositivos NB-IoT y LTE-M implementados hoy son actualizables por firmware para admitir las características 5G NB-IoT y LTE-M, por lo que es justo decir que NB-IoT y LTE-M están en el camino a 5G.

Cuando NB-IoT y LTE-M se diseñaron inicialmente, se prestó especial atención para asegurarse de que funcionaran en banda con un sistema LTE para que el espectro LTE se pueda compartir. Lo mismo es posible con 5G NR, donde se prestó especial atención al diseño de 5G NR para asegurarse de que NB-IoT y LTE-M puedan operar o coexistir en banda con un sistema NR. Esto proporciona una ruta compatible hacia adelante para NB-IoT y LTE-M en el futuro 5G, que puede no incluir LTE.

3GPP está en proceso de estudiar mecanismos para permitir que NB-IoT y LTE-M se conecten a la red central 5G. Esto permitirá que los sistemas 5G del futuro admitan LTE, NR, NB-IoT y LTE-M utilizando la misma red central. Esta es una prueba más de que NB-IoT y LTE-M están en el camino hacia 5G [34].

4.3. Tecnologías principales de *Cellular IoT*

Internet of Things es una de las últimas apuestas en ascenso en la industria de la tecnología de la información y las comunicaciones. Tal y como se ha explicado anteriormente, incorpora la visión de conectar prácticamente cualquier cosa con todo y se basa en un crecimiento global del número total de dispositivos conectar. Para respaldar, y tal vez impulsar aún más, este crecimiento, la organización de desarrollo de estándares 3GPP ha desarrollado en su *release* 13 tres nuevas tecnologías para *Cellular IoT*:

- **LTE-M, también conocido como Cat-M1 o eMTC:** es una nueva tecnología basada en LTE que implementa mejoras para MTC asentadas en el trabajo iniciado en la *release* 12. Estas nuevas características son mejorar la duración de la batería, cobertura extendida y soporte para series de categorías de dispositivos de baja complejidad, llamados Cat-M.
- **NB-IoT:** es una nueva tecnología de acceso radio independiente basada en los fundamentos de la plataforma LTE y diseñada para integrarse en eNB LTE con un impacto mínimo en los nodos existentes. Permite una cobertura extrema y una mayor duración de la batería para dispositivos de complejidad ultra baja.
- **EC-GSM-IoT (*Extended Coverage-GSM-IoT*):** introducción de IoT en sistemas GSM/EDGE.

La cobertura radio por estación base se amplía mediante la repetición de las transmisiones, explotando los requisitos relajados sobre la velocidad de datos y la latencia. Se puede permitir que un dispositivo duerma durante períodos prolongados con la recepción discontinua extendida (*enhanced Discontinuous Reception, eDRX*) y modo de ahorro de energía (*Power Saving Mode, PSM*), lo que mejora significativamente la vida útil de la batería.

La complejidad de los dispositivos Cat-M y NB-IoT se mantiene baja mediante el uso de anchos de banda estrechos, operación semidúplex y la incorporación de una sola antena de transmisión y recepción en el dispositivo [35].

Cat-M y NB-IoT pueden coexistir eficientemente con 5G NR en el mismo espectro y ya cumplen con todos los requisitos masivos de MTC 5G, como se establece en los estándares IMT-2020 y 3GPP, en términos de cobertura, latencia, velocidad de datos, duración de la batería y densidad de conexión. Es por ello, que Cat-M y NB-IoT se están mejorando aún más en la *release* 16 del 3GPP.

La siguiente tabla muestra un resumen comparativo de las características más importantes de estas tres tecnologías (contempladas en la *release* 13).

Parámetro	LTE-M (Cat-M1)	NB-IoT (Cat-NB1)	EC-GSM-IoT
Modos de despliegue	<i>In-band</i> LTE	<i>In-band</i> LTE <i>Guard-band</i> LTE <i>Standalone</i> (banda GSM)	<i>In-band</i> (banda GSM)
Cobertura	>155.7 dB	164 dB para <i>standalone</i>	164 dB (33 dBm PwC) 154 dB (23 dBm PwC)
Rango de cobertura	< 11 km	< 35 km	< 35 km
Espectro	Licenciado (700-900 MHz)	Licenciado (700-900 MHz)	Licenciado (800-900 MHz)
Peak rate (DL/UL)	DL y UL: 1 Mbps	DL: ~ 250 kbps UL: ~ 250 kbps (multitono) ~ 20 kbps (tono único)	DL y UL (con 4 timeslots): ~ 70 kbps (GMSK) ~ 240 kbps (8PSK)
Data rate	375 kbps	20 – 65 kbps	70 kbps
Ancho de banda (BW)	1.08 MHz (equivalente a un canal LTE)	180 kHz para <i>In-band</i> y <i>Guard-band</i> 200 kHz para <i>Standalone</i>	2.4 MHz
Latencia	Rápida: 10 ms – 15 ms	Media: 1.6 s – 10 s	Lenta: 700 ms – 2 s
Modo Dúplex	<i>Full Duplex</i> <i>Half Duplex</i>	<i>Half Duplex</i>	<i>Half Duplex</i>
Soporte voz/datos	Voz y datos	Solo datos	Voz y datos
Soporte movilidad	Movilidad total	Sin movilidad	Movilidad total
Power class (PwC)	23 dBm	23 dBm	33 dBm 23 dBm

Tabla 9: Resumen comparativo de las características principales de LTE-M, NB-IoT y EC-GSM-IoT.

Como el objetivo del presente trabajo es la red 5G NR, se analizarán NB-IoT y LTE-M dejando fuera del estudio EC-GSM-IoT.

4.3.1. Características de LTE-M

Las principales **características** de la tecnología LTE-M (también denominada Cat-M1 o eMTC) son las siguientes:

- Mejora de LTE para admitir comunicaciones de tipo máquina, a partir de la *release* 12.
- Comparte la capacidad con redes LTE heredadas y coexiste dentro del mismo ancho de banda del operador LTE.
- Especifica una nueva categoría de dispositivo (Cat M1) para los UE:
 - Funcionamiento con ancho de banda reducido (1.08 MHz en UL y DL, correspondiente a 6 RB⁷).
 - Potencia de transmisión reducida (20 dBm).

⁷ Generalmente, un bloque de recursos (RB) es la unidad más pequeña de la cuadrícula de recursos compuesta por una subportadora en el dominio de la frecuencia y un símbolo OFDM en el dominio del tiempo.

- Modo *full duplex* y *half duplex* (sin TX/RX simultáneo).
- Transmisión solo con una sola capa (es decir, sin soporte de multiplexación espacial).
- Funciones de modo de ahorro de energía (PSM) y eDRX.
 - PSM (*Power Saving Mode*): estado en el que el UE es como si estuviera apagado, pero permanece registrado en la red.
 - eDRX (*enhanced Discontinuous Reception*): se trata de un método que se emplea en varias tecnologías inalámbricas para permitir que el dispositivo apague su receptor durante los períodos de inactividad.
- Transmisiones con repeticiones para una mejor cobertura.
- Cobertura extendida > 155.7 dB de pérdida de acoplamiento máxima (MCL).
- Velocidad máxima de 1 Mbps para UL y DL. Tasas variables entre 10 kbps a 1 Mbps dependiendo de las necesidades de cobertura.
- Larga duración de la batería: ~ 10 años de funcionamiento con una batería de 5 W/hora (dependiendo del tráfico y las necesidades de cobertura).
- Bajo coste del dispositivo, comparable al de los dispositivos GSM/GPRS.

En referencia a los **recursos físicos**, la organización de los recursos y canales se realiza de la siguiente manera:

- Cuando un dispositivo está programado para tráfico MTC, se le asigna hasta 6 RB en cualquier ubicación consecutiva dentro del espectro de un operador LTE (es decir, canal de control de enlace descendente físico (PDCCH) no utilizado).
 - MPDCCH (*MTC Physical Control CHannel*): se trata de un nuevo canal de control utilizado para comunicar las asignaciones de recursos a los dispositivos MTC.
- Los dispositivos LTE-M utilizan la misma sincronización, canales de transmisión y acceso aleatorio que LTE.

4.3.2. Características de NB-IoT

El ancho de banda de una portadora NB-IoT es 180 kHz. Con el requisito de ancho de banda limitado, NB-IoT se puede implementar en tres modos diferentes:

- **Standalone:** implementa una portadora de NB-IoT de forma independiente a ninguna de LTE. Esto permite que se puedan implementar en espacios libres del espectro y también dentro de huecos vacíos donde están implementadas otras tecnologías como por ejemplo GSM, ya que tienen el mismo ancho de banda.
- **Guard band:** utilizando los bloques de recursos (*Resource Block, RB*)⁸ no utilizados dentro de la banda de protección (*Guard Band*) de un operador LTE, es decir, entre el último RB y el borde de canalización (conocido en inglés como *channelisation edge*). Debido a que cada banda LTE debe dejar una banda de protección mínima de 100 kHz al final de la banda, entre 2 portadoras LTE consecutivas hay un espacio mínimo de 200 kHz, en el que cabe perfectamente una portadora de NB-IoT.
- **In-band:** se implementa dentro de una portadora normal de LTE. Con lo que LTE no puede hacer servir el RB que ocupa la de NB-IoT.

⁸ Un *Resource Block* es igual a, 1 RB = 180 kHz = 12 subportadoras consecutivas con separación de 15 kHz.

- Los 6 RB centrales de una portadora LTE no se pueden usar para NB-IoT porque se usan para sincronización y canales de transmisión de LTE.
- Coexistencia con LTE asegurada al evitar el mapeo de señales NB-IoT a los recursos ya utilizados por LTE (por ejemplo, evitando los símbolos utilizados por el PDCCH y el RS).

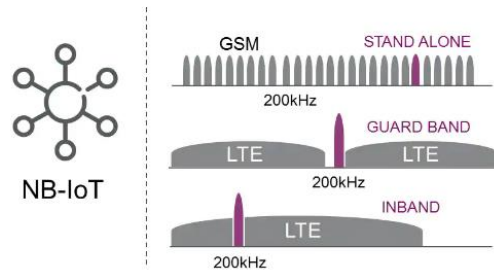


Figura 44: Modos de operación de NB-IoT [36].

Las principales **características** de la tecnología NB-IoT son:

- Ancho de banda total de una portadora NB-IoT de 180 kHz (1 RB).
- Enlace *downlink*:
 - Utiliza OFDMA (*Orthogonal Frequency-Division Multiple Access*) con espaciado de subportadora $\Delta f = 15 \text{ kHz}$.
 - Transmisión en 12 subportadoras.
 - Dominio del tiempo:
 - 1 *slot* de 0,5 ms incluye 7 símbolos OFDMA.
 - 1 subtrama = 1 ms (2 *slots*).
 - Velocidad máxima: ~ 50 kb/s.
- Enlace *uplink*: existen dos opciones de implementación.
 - Opción 1: transmisión de un solo tono.
 - La transmisión ocupa 1 subportadora. En este caso, existen dos posibilidades:
 - $\Delta f = 15 \text{ kHz}$ y *slots* de 0,5 ms.
 - $\Delta f = 3,75 \text{ kHz}$ y *slots* de 2 ms.
 - Velocidad máxima: ~ 20 kb/s.
 - Esta opción es adecuada para escenarios con poca cobertura.
 - Opción 2: transmisión multitono.
 - Las transmisiones pueden ocupar 3,6 o 12 subportadoras con $\Delta f = 15 \text{ kHz}$.
 - Velocidad máxima: ~ 50 kb/s.
- FDD *half duplex* que es lo mismo que *uplink* y *downlink* a diferentes frecuencias, pero sin transmisión y recepción (simultáneas). Como consecuencia, se reduce la complejidad.
- Cobertura extendida: hasta 164 dB (al menos para el modo de implementación *standalone*) de pérdida de acoplamiento máxima (MCL). Se logra repitiendo la misma transmisión varias veces (cada repetición es autodescodificable).
- Soporte para una gran cantidad de dispositivos: ~ 50.000 por celda. Algunos estudios (por ejemplo, 3GPP TR 45.820) indican que NB-IoT con un RB puede admitir más de 52.500 UE.
- Recepción discontinua mejorada (eDRX): se consideran ciclos DRX más largos para facilitar un aumento en la vida útil de la batería.

- Para los UE en modo conectado, la periodicidad para monitorear el canal de control es más larga (hasta 9.22 s).
- Para los UE en modo inactivo, la periodicidad para monitorear el canal de búsqueda es más larga (hasta casi 3 h).
- Modo de ahorro de energía (PSM).
 - Durante PSM el consumo de energía es menor que en modo inactivo.
 - No es necesario volver a conectar para establecer una conexión PDN.
 - No se puede acceder al UE mientras está en modo PSM.
 - La duración del PSM se controla con un temporizador (valor máximo de 12,1 días).
- Larga duración de la batería: ~ 10 años de funcionamiento con una batería de 5 W/hora (dependiendo del tráfico y las necesidades de cobertura).
- Bajo coste, incluso más bajo que LTE-M.

En referencia a los **recursos físicos**, NB-IoT tiene sus propios canales físicos y señales, separados del resto de canales LTE.

- Canales de enlace *downlink*:
 - NPDCCH (*Narrowband Physical Downlink Control CHannel*): se utiliza para indicar a los UE sobre sus datos de enlace descendente (ubicación, con qué frecuencia se repiten, etc.). También sobre cualquier concesión de UL presente para un UE. A parte de esto, NPDCCH también se utiliza para programar transmisiones de enlace *uplink*, transmisiones de enlace *downlink* y paginación.
 - NPDSCH (*Narrowband Physical Downlink Shared CHannel*): se utiliza para transportar las transmisiones de paquetes de datos de enlace descendente.
 - NRS (*Narrowband Reference Signal*): se utiliza para la búsqueda de celdas y la adquisición inicial del sistema.
 - NPSS (*Narrowband Primary Synchronization Signal*).
 - NSSS (*Narrowband Secondary Synchronization Signal*).

El UE utiliza NPSS y NSSS para su sincronización de frecuencia y sincronización con la estación base.

- NPBCH (*Narrowband Physical Broadcast CHannel*): el UE adquiere el bloque de información maestro (*Master Information Block*, MIB) del NPBCH, que proporciona información esencial para que el UE opere en la red NB-IoT.
- Se multiplexan principalmente en el dominio del tiempo dentro del RB utilizado por NB-IoT.
- Canales de enlace *uplink*:
 - NPUSCH (*Narrowband Physical Uplink Shared CHannel*): se utiliza para transportar las transmisiones de paquetes de datos de enlace ascendente.
 - NPRACH (*Narrowband Physical Random Access CHannel*): los UE lo utilizan para realizar el acceso inicial a la red, solicitar recursos de transmisión y volver a conectarse a la estación base después de un fallo de enlace.
 - La transmisión ocupa 1 subportadora de $\Delta f = 3,75 \text{ kHz}$.

- Utiliza el salto de frecuencia, es decir, la subportadora seleccionada se cambia del grupo de símbolos (prefijo cíclico + 5 símbolos) al grupo de símbolos.
- DMRS (*Demodulation Reference Signal*): se utiliza para la precisión de la estimación del canal del enlace ascendente.

4.4. Requerimientos de los servicios de IoT

En comparación con las comunicaciones tradicionales, IoT tiene muchos requisitos diferentes. Se espera que IoT brinde numerosos servicios, por ejemplo, medidores de servicios públicos, máquinas expendedoras, automoción (gestión de flotas, tráfico inteligente, información de tráfico en tiempo real para el vehículo, monitoreo e informes de seguridad), medición y alertas médicas, etc. El impresionante rendimiento de LTE-M y NB-IoT en combinación con la capacidad de operar dentro de un operador NR establece a LTE-M y NB-IoT como las tecnologías de IoT masivas más prominentes y a prueba de futuro.

Los requisitos clave de IoT para habilitar estos servicios y ser competitivos son:

- **Reducción de la complejidad del UE.**
- **Bajo coste del dispositivo.**
- **Bajo coste de implementación**

Los requerimientos de reducción de complejidad, bajo coste del dispositivo y bajo coste de implementación son necesarios debido a la gran escala de implementaciones.

- **Eficiencia energética mejorada. Batería de larga duración:** para evitar la molestia de cambiar o recargar con frecuencia millones de dispositivos IoT.
- **Cobertura interior mejorada:** dependiendo del tipo de servicios IoT, algunos dispositivos pueden instalarse en áreas con poca cobertura celular, como sótanos o espacios profundos dentro de un edificio, por lo que se necesitará una cobertura extendida para garantizar servicios confiables.
- **Soporte para una gran cantidad de dispositivos de bajo rendimiento:** a medida que surgen más y más nuevas aplicaciones de IoT, se espera que el número de enlaces de conectividad de IoT crezca exponencialmente.

La red IoT debe ser escalable para admitir una gran cantidad de dispositivos conectados simultáneamente sin sacrificar el rendimiento de la red tanto para usuarios como para máquinas. Para los operadores *legacy*, los servicios de IoT deberían idealmente aprovechar su infraestructura celular existente y coexistir con otros servicios no IoT en la misma red y espectro.

Claramente, aparte de los requisitos genéricos comunes a todos los servicios de IoT y presentados en las secciones anteriores, las necesidades específicas para cada una de la amplia variedad de servicios bajo consideración pueden diferir. Desde el punto de vista del operador, existen diferentes requisitos y estimaciones, dependiendo del rol y la ambición del operador.

Dependiendo del servicio específico y los valores, se deben considerar diferentes conjuntos de requisitos para satisfacer necesidades específicas de servicio de *Cellular IoT*, como:

- Patrones de tráfico (rendimiento y ciclos activos).
- Necesidades de identidad / seguridad.
- Facilidad de instalación.
- Movilidad.
- Acuerdo de nivel de servicio (*Service Level Agreement*, SLA).
- Fiabilidad.
- Posibles regulaciones del sector.
- Análisis y necesidades de carga.

La siguiente tabla muestra un resumen de las características más destacadas de las tecnologías LTE-M y NB-IoT.

LTE - M	NB-IoT
Mejor velocidad de datos	Menor potencia
Menor latencia	Cobertura mejorada (por ejemplo, en interiores)
Soporte de movilidad	Mayor densidad
Admite comunicación de voz a través de VoLTE	Dispositivos más baratos
Duración de la batería: ~ 10 años	Duración de la batería: ~ 10 años

Tabla 10: Resumen de las características principales de LTE-M y NB-IoT.

A continuación, en la Figura 45 se muestran dos gráficos que representan las características principales de las tecnologías NB-IoT y LTE-M. En ellos, se puede observar cómo se identifican las características que más destacan en cada una de las tecnologías.

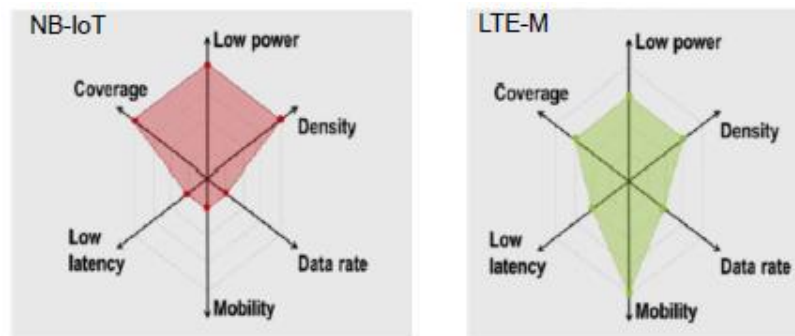


Figura 45: Características principales de las tecnologías LTE-M y NB-IoT [37].

4.5. Casos de uso de *Cellular IoT*

Tal y como se ha explicado en la introducción del capítulo, IoT interconecta “cosas” e intercambia datos entre ellas de manera autónoma. Las “cosas” pueden ser máquinas, partes de máquinas, medidores inteligentes, sensores o incluso objetos cotidianos, como dispositivos portátiles. Esta capacidad traerá enormes mejoras en la experiencia de usuario y la eficiencia del sistema.

La compatibilidad con IoT requiere comunicación de máquina a máquina (M2M). M2M se define como la comunicación de datos entre dispositivos sin la necesidad de

interacción humana. Esto puede ser comunicación de datos entre dispositivos y un servidor, o dispositivo a dispositivo, ya sea directamente o a través de una red. Ejemplos de servicios M2M incluyen seguridad, seguimiento, pago, red inteligente y mantenimiento, monitorización remota, etc.

Debido a la gran cantidad de posibles servicios de *Cellular IoT*, la variedad de casos de uso con diferentes requisitos es enorme. En la Tabla 11, se resumen algunos de los casos de uso más relevantes.

AGRICULTURA <ul style="list-style-type: none"> - Control de riego - Detección del entorno - Seguimiento de animales 	TELEMÁTICA DE VEHÍCULOS <ul style="list-style-type: none"> - Información de tráfico - <i>eCall</i>: llamada de emergencia - <i>bcall</i>: llamada de avería 	INDUSTRIAL <ul style="list-style-type: none"> - Calefacción y aire acondicionado - Estado del equipo - Seguimiento y monitoreo de activos - Mantenimiento predictivo - Edificios: eficiencia energética
TRACKING <ul style="list-style-type: none"> - Motos, bicicletas - Camiones - Contenedores de envíos - Niños - Mascotas - Seguros: activos valiosos - Encuentra mis cosas 	MEDIO AMBIENTE <ul style="list-style-type: none"> - Supervisas procesos agrícolas - Sensores de terremoto - Avalanchas - Inundaciones - Incendios forestales - Contaminación del aire 	SMART CITY <ul style="list-style-type: none"> - Sensores de tráfico y control - Alumbrado público - Monitoreo de infraestructura - Contenedores de basura y residuos - Eventos públicos: ubicación - Cajeros automáticos - Máquinas expendedoras - Estacionamiento inteligente
SMART HOME <ul style="list-style-type: none"> - Detectores de humo - Sistemas de seguridad - Electrodomésticos inteligentes - Calefacción y aire acondicionado inteligente 	mHEALTH <ul style="list-style-type: none"> - <i>Wearable's</i> médicos - Reducción de los tiempos de espera en la sala de espera - Seguimiento de pacientes - Salud remota y monitoreo 	SMART METERING <ul style="list-style-type: none"> - Eléctrico - Agua - Gas - Infraestructura y producción

Tabla 11: Algunos ejemplos de los diferentes casos de uso de *Cellular IoT*.

Por lo tanto, los requisitos para la gran variedad de aplicaciones de IoT son muy diferentes. 3GPP está trabajando para desarrollar un conjunto de estándares globales para garantizar que los desafíos se cumplan con éxito con valores que se adapten a la gran cantidad de servicios y aplicaciones que presentará nuestro futuro conectado.

Una empresa con un fuerte deseo por la seguridad de sus datos puede preferir una red privada para sus necesidades de IoT. Dicha red puede aprovechar la tecnología 5G, pero funcionará por separado de las redes celulares públicas de los operadores, proporcionando acceso solo a dispositivos autorizados. En algunos casos, los operadores aún pueden implementar y operar redes privadas como un servicio para las empresas, ya que estas últimas a menudo carecen de la experiencia y los conocimientos necesarios para hacerlo. Los operadores con espectro de sobra pueden optar por implementar una red privada en uno de sus operadores no utilizados. Alternativamente, también pueden implementar la red privada en un espectro compartido o sin licencia.

5. Evaluación de redes 5G en entornos con aplicaciones Celular IoT

5.1. Introducción

El ecosistema de IoT celular está creciendo rápidamente. La GSMA contabilizó 89 redes NB-IoT y 34 lanzamientos LTE-M en octubre de 2019, con varios operadores que ejecutaban ambas tecnologías en conjunto. El número de dispositivos y suscripciones NB-IoT y LTE-M también está creciendo un 34% y un 70% más que hace un año, respectivamente, según estimaciones realizadas por diferentes organizaciones [38].

Pero la quinta generación de redes móviles ya está aquí y esto provoca confusión entre usuarios, organizaciones y compañías sobre el impacto que podrán tener los sistemas 5G hacia el resto de los sistemas ya implantados o en curso. Por lo tanto, la pregunta es qué significa la llegada de 5G, y específicamente, la llegada de comunicaciones masivas de tipo máquina (mMTC) especificadas por 5G, para las empresas con nuevos servicios de IoT celular.

Tal y como se ha explicado anteriormente, las redes LTE-M y NB-IoT son compatibles con las tecnologías 5G entrantes y, de hecho, se especifican originalmente para servir aplicaciones IoT con banda mMTC. Pero esto no disipa al completo la confusión, ya que la discusión en los círculos de la industria aparece ante la inminente llegada del mMTC de la era 5G. La confusión es solo que LTE-M y NB-IoT como tecnologías de área amplia de baja potencia (LPWA) para el tipo de servicios IoT elementales que constituirán la gran masa del mercado de IoT, se adelantan al mMTC en las especificaciones 5G NR. Estas especificaciones 5G NR aún se están desarrollando, y traerán nuevas capacidades a los servicios existentes LTE-M y NB-IoT. LTE-M (LTE para comunicaciones de tipo máquina) y NB-IoT (IoT de banda estrecha) fueron introducidos como nuevos estándares LPWA celulares por 3GPP en la *release* 13 del estándar LTE en 2015. Los avances del 3GPP hacia la definición de los requisitos de 5G para mMTC se presentan en la Figura 46.

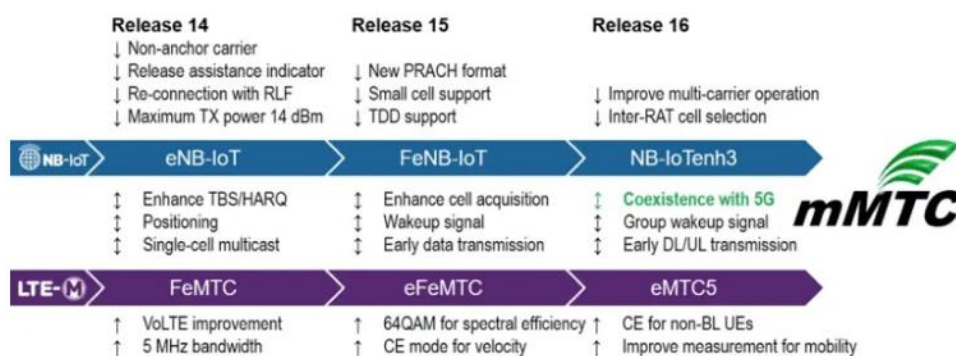


Figura 46: Avances de 3GPP hacia los requisitos de 5G mMTC [38].

A pesar de que 5G comienza a implementarse como un servicio mejorado de banda ancha móvil (eMBB), como una versión más rápida de LTE, continúa siendo definido y refinado actualmente como parte de la *release* 16 de 3GPP, que establece un tercer pilar para 5G NR, comunicaciones ultra confiables de baja latencia (uRLLC) para servicios críticos y, crucialmente, para aplicaciones industriales de alta gama.

Pero entre los lanzamientos de 3GPP se han especificado efectivamente LTE-M y NB-IoT como precursores de 5G para mMTC. Por lo tanto, la pregunta es ¿qué cambia con mMTC en 5G NR?

La ITU dijo hace cinco años que se requería un nuevo estándar mMTC, que se iniciará en la *release* 13, para atender la explosión en los servicios de IoT con redes celulares. Estos requisitos fueron cinco veces mayores y han llegado a respaldar las características fundamentales de diversas tecnologías LPWA.

Los términos siguen siendo que las redes mMTC permiten lo siguiente:

- Duración de la batería de 10 años.
- Penetración de cobertura de 164 dB con un rendimiento de 160 bits por segundo.
- Densidad de cobertura para soportar hasta un millón de dispositivos en un kilómetro cuadrado.
- Latencias de ida y vuelta de menos de 10 segundos con cargas de 20 bytes.
- Crucialmente para hardware a escala masiva y de costo ultra bajo.
- Admitir más funciones y aplicaciones en el tiempo, incluido el posicionamiento, la movilidad, las comunicaciones de multidifusión y el *Time Division Duplex* (TDD), donde el enlace ascendente está separado del enlace descendente por la asignación de diferentes intervalos de tiempo en la misma banda de frecuencia.

LTE-M y NB-IoT, basados en los estándares de red LTE, se establecieron para servir a estos fines. Se han refinado en las *releases* 14 y 15 para dar cabida al requisito final de la ITU, en constante evolución.

La *release* 16, en proceso, establece la plantilla para que LTE-M y NB-IoT coexistan en redes 5G NR. Es más, la GSMA en un documento técnico dice que LTE-M y NB-IoT, tal como se implementan hoy, son parte de la familia 5G. Además, indica que 5G NR fue diseñado para admitir diversos modelos de implementación, uso del espectro y capacidades del dispositivo y que uno de los escenarios de implementación compatibles desde el inicio del trabajo 5G NR en 3GPP, es permitir que las transmisiones LTE-M y NB-IoT se coloquen directamente en una banda de frecuencia 5G NR.

En la capa física, la coexistencia ya está resuelta: LTE-M y NB-IoT utilizan subportadoras de 15 kHz, según LTE, y 5G define cualquier subportadora en una secuencia de duplicación de 15 kHz a 240 kHz.

Las tecnologías gemelas LPWA celulares también tienen una estructura similar en el dominio del tiempo. En IoT, un *slot* se especifica como 0.5 ms, una subtrama es 1 ms y una trama es 10 ms. En 5G NR, la subtrama y la trama son consistentes con los tiempos LTE, y el *slot* ofrece más flexibilidad de todos los modos.

En la capa física se utiliza una estructura similar, como se define también en 5G NR. No hay problema de que esas tecnologías funcionen juntas en la misma red. Sin embargo, hay más trabajo en la red central (5GC) y en el nivel del sistema. El modo TDD, importante en 5G NR, ya se ha definido para LTE-M y NB-IoT, antes de la *release* 16.

El problema es que la arquitectura existente para la red central 5G está orientada hacia eMBB, que otorga la máxima prioridad en todo momento y contradice los requisitos de mMTC, que prioriza otras funciones de limitación de energía, como la comunicación de alta latencia, modo ahorro de energía (*Power Save Mode*, PSM), y recepción discontinua extendida (eDRX).

Pero la *release* 16 es un trabajo en progreso, y se están abordando estos problemas de coexistencia existentes. El objetivo es que las próximas redes 5G puedan admitir los requisitos de eMBB y mMTC.

Cuando LTE-M y NB-IoT fueron diseñados, se puso especial atención en asegurar que estos podrían operar en la banda con sistemas LTE, y por eso el espectro LTE tendría que compartirse. En el diseño de 5G NR también se tendría que asegurar que los sistemas NR puedan operar en bandas con LTE-M y NB-IoT.

Las tecnologías 3G UMTS y 4G LTE utilizan diferentes redes centrales, lo que crea una complejidad y costes adicionales que impulsan a los operadores a desaprobado las tecnologías 3G para llegar a una sola red central. El mismo problema no es cierto para la red central 5G recientemente especificada, que puede conectarse a 5G NR así como a 5G LTE.

5.2. Propósito del estudio experimental

El propósito del presente experimento surge de la necesidad de ampliar y profundizar los conocimientos en las comunicaciones móviles, específicamente, sobre los temas explicados en los capítulos anteriores. El mismo se desarrolla en el departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones (TSC) de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), en concreto, el montaje de todo el sistema de pruebas ha sido realizado en el laboratorio de Comunicaciones Radio de la UPC (Campus Nord), donde está instalado el equipo llamado OTS-100 que genera una red privada LTE y el dispositivo NB-IoT.

En este proyecto se han realizado un conjunto de configuraciones y estudios para caracterizar el funcionamiento de diferentes funcionalidades que ofrece el equipo OTS-100. Las funcionalidades estudiadas abarcan los diferentes modos de transmisión LTE. Todo ello, ha permitido evaluar un escenario mMTC 5G realizando el despliegue real de una red móvil LTE-NB en un entorno con dispositivos NB-IoT.

5.3. Equipo Amarisoft OTS-100

El equipo OTS-100 del fabricante *Amarisoft* es una implementación *Software Designed Radio* (SDR)⁹ instalada sobre un sistema operativo Linux que permite montar una red privada LTE a pequeña escala a la que se pueden conectar tanto terminales móviles comerciales como dispositivos que disponen de tarjetas USIM¹⁰ de prueba.

A continuación, se describen las características hardware y software de las que dispone el equipo OTS-100 utilizado para montar el entorno experimental, así como el proceso seguido para realizar la configuración inicial necesaria para realizar las diferentes pruebas de evaluación.

⁹ La radio definida por software (*Software Designed Radio*, SDR) es un sistema de comunicación por radio en el que los componentes que se han implementado típicamente en hardware (por ejemplo, mezcladores, filtros, amplificadores, etc.) se implementan mediante software en un ordenador o servidor.

¹⁰ Una tarjeta USIM (*Universal Subscriber Identity Module*) es una aplicación para telefonía móvil UMTS que se ejecuta en una tarjeta inteligente UICC (*Universal Integrated Circuit Card*).

5.3.1. Hardware del equipo OTS-100

El equipo OTS-100 está compuesto por dos partes, definidas en la siguiente tabla:

Componente	Características
PC Plataforma donde se ejecuta el software OTS-100	<ul style="list-style-type: none"> • Procesador Intel i7 – 4790 @ 3.6 GHz • 1 puerto Gigabit Ethernet • 500 GB de memoria • 8 GB de memoria RAM • Sistema operativo: Linux kernel 3.19.8. Distribución FEDORA
Tarjeta PCIe SDR Implementa la funcionalidad de un cabezal RF	<ul style="list-style-type: none"> • Transceptor 2x2 (AD9361) con 3xDAC y 3xADC de 12 bits integrados • 4 canales configurables (2 RX y 2 TX) • Rango de frecuencias: <ul style="list-style-type: none"> ○ TX: 47 MHz – 6 GHz ○ RX: 70 MHz – 6 GHz • Ancho de banda: 200 kHz – 56 MHz • Soporte de arquitecturas TDD y FDD • Ganancia variable en tiempo real • GPS integrado para precisión de la hora y sincronización en frecuencia • Potencia de salida de 10 dBm • 4 conectores SMA hembra: TX1, TX2, RX1 y RX2 + 1 SMA: GPS • Alimentación 12 V

Tabla 12: Componentes y características hardware del equipo OTS-100 [39].

En las siguientes imágenes se muestra el equipo OTS-100 utilizado para realizar el despliegue de la red móvil LTE-NB:



Figura 47: Equipo OTS-100 del fabricante Amarisoft utilizado para el experimento.

5.3.2. Software del equipo OTS-100

El equipo OTS-100 implementa las funciones de una red LTE en cuatro módulos:

Módulo	Descripción
LTE ENB	Implementa las funciones de un nodo <i>eNodeB</i> . Es donde se soportan las celdas, tanto para LTE como para NB-IoT.
LTE MME	Implementa las funciones del plano de control del MME (<i>Mobility Management Entity</i>), las funciones del plano de usuario con los <i>Serving</i> y <i>PDN Gateways</i> y la HSS (base de datos de suscriptores). Soporta NB-IoT y optimización del plano de control CIoT.
LTE IMS	Implementa las funciones básicas del sistema IMS con el protocolo SIP, soportando llamadas y videollamadas. Funciones implementadas: P-CSCF, I-CSCF, S-CSCF y HSS.
LTE MBMS	Implementa funciones de <i>Multimedia Broadcasting/Multicast Services</i> , permitiendo que haya transmisiones multiusuario con contenidos <i>broadcast</i> y <i>multicast</i> .

Tabla 13: Componentes y características software del equipo OTS 100 [39].

El equipo OTS-100 soporta una amplia variedad de funcionalidades sobre la tecnología LTE. En el caso de este trabajo, se ha desarrollado sobre las funcionalidades referidas a NB-IoT. Por ello, se muestran en la siguiente tabla todas las funcionalidades NB-IoT soportadas por los dos módulos utilizados para el desarrollo del trabajo (ENB y MME):

Funcionalidades	
LTE ENB	<ul style="list-style-type: none"> • LTE release 13 compliant. • FDD and TDD configurations. • Tested bandwidths: 1.4, 3, 5, 10, 15 and 20 MHz. • Handle several cells in intra-band or inter-band configurations. • Transmission modes: 1 (single antenna) and 2 to 10 (MIMO 4x2). • Wideband CQI/PMI reports. • HARQ support. • Timing measurement thru the PRACH. • Closed-loop UE power control. • Frequency based MMSE equalizer. • Highly optimized software turbo decoder.
LTE MME	<ul style="list-style-type: none"> • Manejo de procedimientos de UE: conexión, autenticación, configuración de seguridad, desconexión, actualización del área de seguimiento, acceso al servicio, establecimiento del portador radio, localización, etc. • Soporte de NB-IoT RAT y de optimización de Clot del plano de control • Soporte eDRX • PSM

Tabla 14: Funcionalidades NB-IoT del equipo OTS 100 [39].

Además, para poder interconectarse con el hardware, el equipo OTS-100 dispone de dos herramientas:

Herramienta	Descripción
WebTool	<p>Aplicación de acceso web basada en HTML5 que tiene las siguientes características principales:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Mostrar los registros de archivos. • Mostrar registros en tiempo real a través de <i>WebSocket</i>. • Mostrar estadísticas de capa física en gráficos. • Mostrar asignación de bloques de recursos (RB). • Soporte de visualización de constelaciones en tiempo real. • Soporte y visualización de análisis por celda. • Soporte para exportar registros. • Soporte de <i>wireshark</i> para decodificación de mensajes extendidos (SMS, IP).
Terminal	<p>Consola vía línea de comandos que permite interactuar, modificar y visualizar parámetros de la red en tiempo real.</p>

Tabla 15: Herramientas software del equipo OTS-100 para interconectarse con el hardware .

5.3.3. Parámetros de configuración NB-IoT del OTS-100

En la siguiente tabla se muestran algunos de los diferentes parámetros NB-IoT que pueden ser modificados para configurar el módulo LTEENB del equipo OTS-100:

Parámetro	Tipo y Descripción
<code>nb_cell_list</code>	<i>Array of objects or Strings</i> . Listado de todas las celdas NB-IoT que se desean crear. Cada elemento proporciona la configuración de una celda NB-IoT.
<code>operation_mode</code>	<i>Enumeration</i> . Establece el modo de operación de la celda. Modos disponibles: <ul style="list-style-type: none"> • <i>same_pci</i> y <i>diff_pci</i>: operación <i>in-band</i>. El modo <i>diff_pci</i> debe usarse en el caso de una celda base LTE con 4 puertos de antena PBCH. • <i>guardband</i>: portadora en la banda de protección. • <i>standalone</i>: portadora independiente.

plmn_list	<p><i>Array of objects or Strings.</i> Listado de PLMN emitidos por eNodeB. Como máximo se admiten 6 PLMN. El PLMN (<i>Public Land Mobile Network</i>) es un código que identifica a un operador de manera unívoca. Este código está formado a su vez por dos códigos: el MCC (<i>Mobile Country Code</i>) utilizado para identificar el país mediante los tres primeros dígitos y el MNC (<i>Mobile Network Code</i>) utilizado para identificar el operador de telefonía mediante los dos restantes dígitos. En las redes de prueba, como la creada para este trabajo, se utiliza el identificador de redes de prueba '00101'. Cada elemento de la array es un PLMN (cadena de 5 o 6 dígitos) o un objeto que contiene las siguientes propiedades:</p> <ul style="list-style-type: none"> • plmn: <i>string</i> de 5 o 6 dígitos. • reserved: booleano (predeterminado=<i>false</i>). El valor es verdadero si la celda está reservada para uso del operador. • attach_without_pdn: booleano. (predeterminado=<i>false</i>). Indica si PLMN admite conexión sin conectividad PDN.
dl_prb	<p><i>Integer.</i> Si se proporciona, define el DL PRB (<i>Physical Resource Block</i>) de la celda LTE base en la que se implementa el operador NB-IoT. Este parámetro solo está disponible para los modos de operación <i>in-band</i> o <i>guardband</i>. Si el parámetro está definido, entonces <i>dl_earfcn</i> y <i>dl_carrier_freq_offset</i> no estarán presentes.</p>
ul_prb	<p><i>Integer.</i> Si se proporciona, define el UL PRB de la celda LTE base en la que se implementa el operador NB-IoT. Este parámetro solo está disponible para los modos de operación <i>in-band</i> o <i>guardband</i>. Si el parámetro está definido, entonces <i>ul_earfcn</i> y <i>ul_carrier_freq_offset</i> no estarán presentes.</p>
dl_earfcn	<p><i>Integer.</i> Selecciona el NB DL EARFCN (<i>E-UTRAN Absolute Radio Frequency Channel Number</i>). Este parámetro es obligatorio para el modo <i>standalone</i>. Para el modo <i>in-band</i> y <i>guardband</i>, se puede utilizar <i>dl_prb</i> en su lugar. Para el funcionamiento del modo <i>in-band</i> y <i>guardband</i>, el eNB calculará automáticamente un valor válido para <i>dl_carrier_freq_offset</i> para especificar completamente la posición de la portadora NB. EARFCN son números de canal de operador LTE. Se usan en redes LTE para definir una frecuencia de portadora particular y no tienen en cuenta el ancho de banda del canal.</p>
ul_earfcn	<p><i>Integer.</i> Selecciona el NB UL EARFCN. Si no se proporciona ni <i>ul_prb</i> ni <i>ul_earfcn</i>, se utiliza la separación DL/UL predeterminada. Para el modo <i>in-band</i> y <i>guardband</i>, se puede utilizar <i>dl_prb</i> en su lugar. Para el funcionamiento del modo <i>in-band</i> y <i>guardband</i>, el eNB calculará automáticamente un valor válido para <i>ul_carrier_freq_offset</i> para especificar completamente la posición de la portadora NB.</p>
dl_carrier_freq_offset	<p><i>Integer.</i> Establece el desplazamiento entre la posición real de la portadora NB DL y el NB DL EARFCN. Este parámetro solo se puede usar con una configuración <i>dl_earfcn</i> y para el funcionamiento <i>in-band</i> o <i>guardband</i>. Solo es obligatorio especificar este valor para la operación <i>guardband</i> cuando varias portadoras NB pueden corresponder al mismo NB DL EARFCN. Este parámetro no debe estar presente para la operación <i>standalone</i>.</p>
ul_carrier_freq_offset	<p><i>Integer.</i> Establece el desplazamiento entre la posición real de la portadora NB UL y el NB UL EARFCN. Este parámetro solo se puede usar con una configuración <i>ul_earfcn</i> y para el funcionamiento <i>in-band</i> o <i>guardband</i>. Solo es obligatorio especificar este valor para la operación <i>guardband</i> cuando varias portadoras NB pueden corresponder al mismo NB UL EARFCN. Este parámetro no debe estar presente para la operación <i>standalone</i>.</p>
n_antenna_dl	<p><i>Enumeration:</i> 1, 2, 4 o 8. Número de antenas utilizadas para el <i>downlink</i>. Debe ser el mismo para todas las celdas NB-IoT y LTE que comparten el mismo puerto RF.</p>
n_antenna_ul	<p><i>Enumeration:</i> 1, 2, 4 o 8. Número de antenas utilizadas para el <i>uplink</i>. Debe ser el mismo para todas las celdas NB-IoT y LTE que comparten el mismo puerto RF.</p>
n_antenna_pbch	<p><i>Enumeration:</i> 1 o 2. Número de puertos de antena NPBCH (<i>Narrow Band-Physical Broadcast Channel</i>). Se configura automáticamente al mínimo (2, número de puertos de antena PBCH de la celda base) para operación en banda. El NPBCH proporciona información esencial para el que el UE funcione en la red NB-IoT.</p>
multi_band_list	<p><i>Array or integers.</i> Enumera las bandas adicionales admitidas por la celda. El enlace <i>downlink</i> y la frecuencia del enlace <i>uplink</i> de la celda deben existir en todas estas bandas.</p>
cell_id	<p><i>Integer.</i> entre 0 y 1023. Código identificador de la celda de 7, 8 o 10 bits. Para un macro eNodeB, el identificador de la celda de 28 bits es la concatenación de <i>enb_id</i> y <i>cell_id</i>.</p>
tac	<p><i>Integer.</i> entre 0 y 65535. Código de área de seguimiento de la celda (<i>Tracking Area Code, TAC</i>). Este código define unas celdas cercanas de la misma tecnología, para tener el terminal localizado dentro de una zona más amplia. El TAC de NB-IoT y LTE deben ser diferentes al ser tecnologías diferentes.</p>

base_cell_id	<i>Integer</i> . Código identificador de la celda de 7, 8 o 10 bits de la celda base en la que se asigna la celda NB-IoT. Solo es necesario para el funcionamiento <i>in-band</i> o <i>guardband</i> .
cell_gain	<i>Float</i> (predeterminado=0): entre -200 y 0 dB. Ganancia de la celda para el enlace <i>downlink</i> .
nrs_crs_power_offset	<i>Float</i> : entre -6 a 9. <i>Offset</i> de potencia en dB de la señal de referencia de NB-IoT con respecto a la señal de referencia de celda LTE. Este campo solo es necesario cuando el modo de operación es <i>same_pci</i> .
n_id_cell	<i>Integer</i> : entre 0 y 503. Identificador de la celda física. No es necesario si el modo de operación es <i>same_pci</i> .
cipher_algo_pref	<i>Array of integers</i> . Establece los algoritmos preferidos para el cifrado de RRC (<i>Radio Resource Control</i>) y plano de usuario en orden de preferencia decreciente.
integ_algo_pref	<i>Array of integers</i> . Establece los algoritmos preferidos para la verificación de integridad de RRC en orden decreciente de preferencia.
inactivity_timer	<i>Integer</i> . Enviar la liberación de la conexión RRC después del tiempo especificado (en ms) de inactividad de la red.
rel13_5	<i>Boolean</i> (predeterminado= <i>true</i>). Si es verdadero, habilita los cambios de capa física incompatibles para NPBCH/BCCH introducidos en la <i>release</i> 13.5.

Tabla 16: Parámetros NB-IoT para configurar el módulo LTEENB del equipo OTS-100 [39].

A continuación, se muestran en la siguiente tabla los parámetros de propiedades más importantes que pueden ser modificados para configurar el módulo LTEMME (*LTE Mobility Management Entity*) del equipo OTS-100:

Parámetro	Tipo y Descripción
plmn	<i>String</i> : 5 o 6 dígitos. Identidad PLMN de la MME
t3412	<i>Integer</i> (predeterminado=1800 segundos). Código de actualización del área de seguimiento (<i>Tracking Area Update</i> , TAU). Este código es el valor que pasa entre dos TAU. Si se establece a '-1' significa que el temporizador está desactivado.
t3412_extended_forced	<i>Integer</i> (predeterminado=-1). Valor en segundos del temporizador T3412 si el UE utiliza PSM. Si el terminal quiere conectarse al PSM enviará un <i>extended TAU time</i> y la red enviará el valor especificado en este parámetro.
t3324_forced	<i>Integer</i> (predeterminado=-1). Valor en segundos del temporizador T3324 si el UE utiliza PSM. Este parámetro fija un valor para el tiempo activo.
psm	<i>Boolean</i> (predeterminado= <i>true</i>). Determina si la red acepta que los terminales hagan servir el modo PSM. Si se establece en falso, el módulo MME ignorará la solicitud PSM enviada por el UE.
edrx	<i>Boolean</i> (predeterminado= <i>true</i>). Determina si la red acepta que los terminales hagan servir el modo eDRX (<i>extended Discontinuous Reception</i>). Si se establece en falso, el módulo MME ignorará la solicitud de eDRX enviada por el UE.
edrx_ptw_nb_s1	<i>Integer</i> : entre 0 y 15 (predeterminado=3). Establece la longitud de ventana de tiempo de paginación (<i>Paging Time Window</i>) de 4 bits para UE NB-S1, es decir, el tiempo que dura el <i>paging</i> dentro del estado RRC <i>Idle</i> .
edrx_cycle_forced	<i>Integer</i> : entre -1 y 15 (predeterminado=-1). Duración de ciclo de 4 bits E-UTRAN eDRX. Valor fijado en el caso de que el UE quiera conectar el modo eDRX para los tiempos entre <i>paging</i> . Si es diferente de -1, el MME ignorará el valor solicitado por el UE y lo enviará en su lugar.
cp_ciot_opt	<i>Boolean</i> (predeterminado= <i>false</i>). Se utiliza para activar la optimización Clot del plano de control (si es compatible con el UE) en la red. Es necesario activarlo para conectar dispositivos NB-IoT.

Tabla 17: Parámetros de propiedades para configurar el módulo LTEMME del equipo OTS-100 [39].

5.4. Dispositivo NB-IoT

El dispositivo utilizado se basa en la tecnología *NarrowBand-Internet of Things* (NB-IoT) que como se ha explicado anteriormente se trata de una tecnología de área amplia de baja potencia (LPWA) basada en estándares y desarrollada para permitir una amplia gama de nuevos dispositivos y servicios IoT. El motivo de la elección de este tipo de dispositivo para la evaluación del escenario mMTC propuesto para este proyecto, es

que NB-IoT mejora significativamente el consumo de energía de los dispositivos de usuario (duración de la batería más de 10 años), la capacidad del sistema y la eficiencia del espectro. Las nuevas señales y canales de capa física están diseñados para cumplir con los exigentes requisitos de cobertura extendida, tanto rural como profunda en interiores, y la complejidad ultra baja del dispositivo. Se espera que el coste inicial de los módulos NB-IoT sea comparable a GSM/GPRS. Sin embargo, la tecnología subyacente es mucho más simple que la GSM/GPRS actual y se espera que su coste disminuya rápidamente a medida que aumenta la demanda [40]. Todo ello, permite que el dispositivo escogido cumpla con los requisitos que establecen los escenario mMTC.

En este apartado se detallan las características del terminal utilizado, así como el proceso seguido para realizar la configuración inicial necesaria para realizar las diferentes pruebas de evaluación.

5.4.1. Hardware NB-IoT

El dispositivo NB-IoT utilizado está formado por tres módulos hardware: una placa de microcontrolador Arduino Uno desarrollada por Arduino.cc., una placa de expansión NB-IoT *Shield* para Arduino y un módulo NB-IoT Bee-QG96 (*core* del NB-IoT *Shield*) ambos desarrollados por *Dragino Technology*.

Componente	Características	
Arduino UNO	Placa de microcontrolador basada en el ATmega328. Utilizada para alimentar y conectar al ordenador mediante el puerto serie el módulo IoT. <ul style="list-style-type: none"> • 14 pines de entrada/salida digital (6 pueden usarse como salidas PWM) • 6 entradas analógicas • Resonador cerámico de 16 MHz • Puerto USB (puerto serie) • Conector para alimentación externa • Botón de reinicio 	
Módulo NB-IoT Dragino	NB-IoT <i>Shield</i>	Placa de expansión para Arduino que agrega tecnología NB-IoT y permite agregar un módulo fácilmente sin necesidad de cableado.
	NB-IoT Bee-QG96	Es el módulo principal para NB-IoT Shield y está formado por los siguientes elementos: <ul style="list-style-type: none"> • Antena • Interfaz SMA • Puerto para tarjeta tipo microSIM • Módulo Quectel BG-96 (procesador): soporta LTE Cat M1 y Cat NB1, EGPRS y módulo de bandas múltiples. • Puerto serie Características: <ul style="list-style-type: none"> • Admite diferentes bandas NB-IoT. • Bajo consumo de energía. • Cobertura de área amplia. • Admite comandos AT. Especificaciones: <ul style="list-style-type: none"> • Potencia de salida: 23 dBm • Sensibilidad: -129 dBm • Temperatura de funcionamiento: -40°C ~ +85°C • Entrada Vcc: 4.5 V ~5.5 V

Tabla 18: Componentes y características hardware de los dispositivos NB-IoT [40].

En la Figura 48 se muestran los tres módulos descritos que forman el dispositivo NB-IoT:

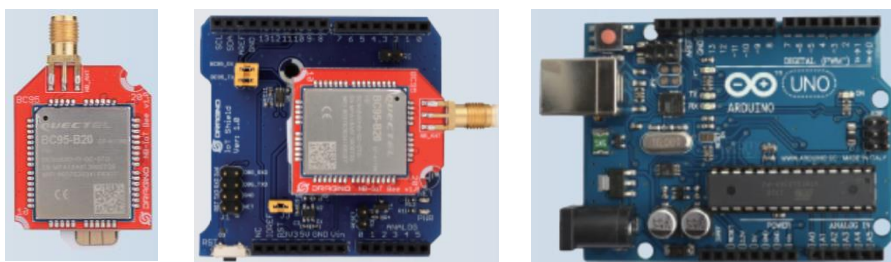


Figura 48: Módulos NB-IoT Bee, NB-IoT Shield y Arduino UNO [40].

5.4.2. Software NB-IoT

Para realizar la configuración y evaluación del entorno desplegado se han utilizado las dos herramientas software que se describen en la siguiente tabla.

Herramienta	Descripción
Arduino IDE	El entorno de desarrollo integrado es un software compuesto por un conjunto de herramientas de programación que permite editar, compilar y depurar código. Arduino IDE tiene funciones y comandos incorporados que, aunque funcionan en la plataforma Java, están personalizados para ejecutarse en el desarrollador de Arduino. La forma de comunicarse con el dispositivo se realiza a través del Serial Monitor de Arduino IDE y el puerto serie del módulo Arduino UNO.
Software BG-96	Se trata de un software interno que tiene el módulo NB-IoT Bee QG-96 y el cual funciona mediante comandos AT. AT es el comando base de los comandos Hayes ¹¹ . La forma de comunicarse con el módulo BG-96 es a través del puerto serie (conectado a su vez a los pines 10 y 11 del módulo Arduino UNO).

Tabla 19: Herramientas software utilizadas para configurar el dispositivo NB-IoT.

5.5. Configuración y despliegue del escenario experimental

En este apartado se describe la configuración realizada para el equipo OTS-100 y el dispositivo NB-IoT y, posteriormente, se explican las pruebas realizadas durante todo el despliegue y evaluación del funcionamiento de ambos. El objetivo principal en la evaluación del sistema es estudiar y documentar el método y pasos a seguir, para crear y desplegar una red LTE-NB y conectarse a ella con un dispositivo NB-IoT. Para ello, se ha seguido el siguiente proceso: configuración de la red LTE-NB (celda NB-IoT), configuración del dispositivo NB-IoT, monitorización y comprobación de la conexión (*attach*) y, por último, monitorización y comprobación de la desconexión (*detach*).

5.5.1. Configuración de la red LTE-NB

En esta sección se explica el diseño realizado en el equipo OTS-100 para configurar portadoras LTE-NB a las cuales se conectará el dispositivo NB-IoT una vez esté desplegada la red en cuestión. Para el desarrollo del experimento se ha decidido desplegar el modo de operación *standalone* (explicado en la sección 3.2). Para ello, se

¹¹ El conjunto de comandos AT de Hayes es el método estándar de la industria para configurar módems.

han configurado los diferentes parámetros del módulo LTEENB del equipo. A continuación, se muestran los parámetros más importantes que han sido configurados ya que la configuración completa aparece detallada en el Anexo A.

Parámetro eNB	Valores configurados	Comentarios
com_addr:	0.0.0.0:9001	Habilitar API remota e interfaz web.
mme_list:[]	mme_addr: "127.0.1.100"	Dirección de MME para conexión S1AP.
gtp_addr:	127.0.1.1	Dirección de la interfaz conectada al MME.
enb_id:	0x1A2D1	Identificador de eNB.
cell_list:[nb_cell_list:[]]	plmn_list: [{plmn: "00101" reserved: false}] cell_id: 0x01 tac: 0x0001 dl_earfcn: 900 /*B2*/ n_antenna_dl: 1 n_antenna_ul: 1 operation_mode:"standalone" rel13_5: true n_id_ncell: 37	Lista de celdas NB-IoT. - El PLMN definido es el identificador de redes de prueba indicado por el fabricante. - Se ha creado una única celda con el EARFCN de <i>downlink</i> de 900 MHz. - n_antenna_dl y n_antenna_ul es 1 debido a que NB-IoT se ha definido como SISO (<i>Single-Input Single-Output</i>). - Se ha definido el modo de operación <i>standalone</i> .
srb_config:	maxRetxThreshold: 32 enb_maxRetxThreshold: 32 t_PollRetransmit: 6000 enb_t_PollRetransmit: 6000	Configuración del <i>Signalling Radio Bearer</i> .

Tabla 20: Parámetros más importantes configurados en el módulo LTEENB.

Una vez configurado el módulo LTEENB se debe reiniciar el servicio LTE utilizando el comando 'service lte restart' en la consola de comandos de OTS-100. Seguidamente, se confirma que el equipo se ha reiniciado correctamente, se han arrancado los tres módulos que forman el sistema (LTEENB, LTEMME y LTEIMS) y se ha creado la celda configurada, tal y como se puede observar en la Figura 49.

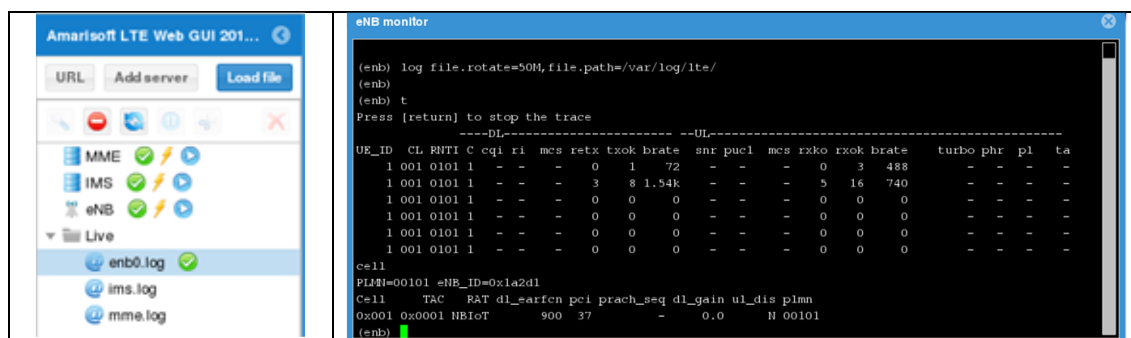


Figura 49: Monitorización de los módulos LTE y de la celda standalone creada en el eNB.

En la imagen anterior se puede observar como efectivamente la celda creada para NB-IoT tiene el identificador de celda definido al inicio, el parámetro TAC especificado y trabaja en la frecuencia central de 900 MHz (B2).

5.5.2. Configuración del dispositivo NB-IoT

Para realizar la configuración del dispositivo NB-IoT se han utilizado tal y como se ha avanzado anteriormente, comandos AT a través del *serial monitor* del software Arduino IDE. A fin de configurar el dispositivo NB-IoT a través de comandos AT es necesario crear un programa en Arduino IDE (el código del programa se muestra en el Anexo B

de este documento), que permita leer y escribir la placa a través del puerto serie del dispositivo y, posteriormente, cargarlo a la placa. El programa indicado dispone de una parte de código, que devuelve un mensaje de bienvenida con el objetivo de informar que la carga se ha realizado satisfactoriamente.

El último paso para la configuración del dispositivo es enviar los comandos AT a la placa. Para ello, es necesario desactivar previamente las comunicaciones RX/TX de la placa y reactivarlas una vez se ha realizado la configuración deseada. En la siguiente tabla se muestran los comandos utilizados.

Comando AT	Comentarios
Comunicación de la placa (RX/TX)	
AT+CFUN?	Consultar el estado RX/TX.
AT+CFUN=<x>	x=1 → <i>Enable RX/TX</i> ; x=4 → <i>Disable</i> ; x=1,1 → <i>Restart</i>
Estado de la tarjeta (U)SIM y módulo	
AT+QSIMDET?	Consulta si hay una (U)SIM introducida.
AT+QSIMSTAT?	Consulta el estado de inserción de la (U)SIM.
AT+CIMI	Solicita el código IMSI de la tarjeta SIM
AT+CPIN?	Comprobar si la (U)SIM dispone de código PIN (<i>Personal Identification Number</i>).
AT+CPAS	Consulta el estado de actividad del módulo. Valores devueltos: CPAS=0 → <i>Ready</i> ; CPAS=3 → <i>Ringing</i> ; CPAS=4 → <i>Call in progress or call hold</i>
Configuración extendida de UE	
AT+QCFG="ledmode",<x>	x=0 → El LED del dispositivo parpadea si está recibiendo y/o transmitiendo datos. En caso contrario, permanece apagado. x=1 → El LED permanece encendido si el dispositivo está conectado a una red. En caso contrario, permanece apagado.
AT+QCFG="nwscanmode",<x>	Especifica las RAT permitidas para la búsqueda: x=0 → <i>Automatic</i> ; x=1 → <i>GSM only</i> ; x=3 → <i>LTE only</i>
AT+QCFG="iotopmode",<x>	Especifica la categoría de red que se buscará en LTE RAT: x=0 → <i>LTE Cat M1</i> ; x=1 → <i>LTE Cat NB1</i> ; x=2 → <i>LTE Cat M1 y LTE Cat NB1</i>
AT+QCFG="band",<x>,<y>,<z>	Especifica las bandas de frecuencia que se pueden buscar en el UE en formato hexadecimal (0 → no cambiar la banda): x=<gsmbandval> → Ejemplo: 0x08 es GSM 900MHz. y=<catm1bandval> → Ejemplo: 0x2 corresponde a LTE B2. z=<catnb1bandval> → Ejemplo: 0x80000 es LTE B20
AT+QCFG="nb1/bandprior",<x>	Especifica la banda a escanear con prioridad bajo LTE Cat NB1 RAT. Algunos de los valores posibles a configurar son: 01 → <i>Band 1</i> , 02 → <i>Band 2</i> , 0C → <i>Band 12</i> , 14 → <i>Band 20</i> , etc.
AT+QCFG="roamservice",<x>	Se usa para habilitar o deshabilitar el servicio de roaming: x=1 → <i>Disable</i> ; x=2 → <i>Enable</i> ; x=255 → <i>Automatic</i>
AT+QCFG="psm/urc",x	Habilitar/deshabilitar la indicación de entrada de PSM: x=0 → <i>Disable</i> ; x=1 → <i>Enable</i>
AT+CEDRXS=<x>,<y>,<z>	Controla la configuración de los parámetros e-I-DRX (DRX en modo inactivo extendido) del UE. x=0 → <i>Disable</i> ; x=1 → <i>Enable</i> y=tecnología (2:GSM, 3:UTRAN, 4:LTECat M1, 5:LTECat NB1) z=valor de eDRX solicitado (<i>half a byte in a 4 bit format</i>)
Servicio de red	
AT+CREG=?	Consulta el estado de registro de red. Responde informando del código de registro, si el dispositivo está o no registrado, código de área de ubicación, ID celda E-UTRAN y la tecnología de acceso seleccionada (código 9 para LTE Cat NB1).
AT+CSQ	Indica los valores de RSSI y BER. Parámetros: <rsqi>: 0 → -113dBm or less, 1 → -111dBm, 2...30 → -109...-53dBm, 31 → -51dBm or greater, 99 → <i>Not know or not detectable</i> <ber>: 0...7 → <i>as RXQUAL values in the table in 3GPP TS 45.008 subclause 8.2.4</i> , 99 → <i>Not know or not detectable</i>

Tabla 21: Comandos AT utilizados durante la configuración y pruebas del dispositivo NB-IoT.

A continuación, se muestra la configuración aplicada en el dispositivo NB-IoT mediante los comandos AT enviados a través del *serial monitor* de Arduino IDE.

```

Welcome to use NB-IoT Shield QG96
AT          /*Se indica al dispositivo que se enviarán comandos AT*/
OK         /*Confirmación del dispositivo*/
AT+CFUN=4  /*Desactivación de RX/TX para realizar la configuración*/
OK
AT+QSIMDET?
+QSIMDET:1,1 /*Se confirma que hay una (U)SIM introducida*/
AT+QSIMSTAT?
+QSIMSTAT:1,1 /*Estado inserción (U)SIM es OK*/
AT+CIMI
00101000009913 /*Código IMSI de la tarjeta USIM*/
AT+CPIN?
+CPIN: READY /*Indica que la tarjeta USIM no dispone de código PIN*/
AT+QCFG="ledmode",1
OK
AT+QCFG="nwscanmode",3
OK
AT+QCFG="iotopmode",1
OK
AT+QCFG="band",0,0,0x2 /*Se establece la búsqueda de la banda B2*/
OK
AT+QCFG="nb1/bandprior",02 /*Banda B2 a escanear con prioridad*/
OK
AT+QCFG="roamservice",0
OK
AT+CFUN=1 /*Activación RX/TX*/
OK
AT+CFUN=1,1 /*Reinicio del dispositivo*/
OK
POWERED DOWN
?
RDY /*Reinicio del dispositivo completado*/
AT+CREG?
+CREG:2,1,"FFFE","1A2D101",9 //Estado de registro: registrado, código de
OK //área, ID celda y tecnología LTE Cat NB1

```

5.5.3. Monitorización y comprobación de la conexión (*attach*)

Una vez realizada la configuración del equipo OTS-100 y del dispositivo NB-IoT, e inicializados ambos sistemas, se procede a monitorizar mediante la herramienta WebTool de Amarisoft y la consola de comandos del dispositivo NB-IoT, la conexión y desconexión del dispositivo NB-IoT al eNB. Mediante la señalización mostrada en los *logs* la herramienta WebTool, se puede analizar la interacción entre el UE (dispositivo NB-IoT) y la red LTE-NB. En la Figura 50 se muestra la señalización generada durante el arranque del equipo OTS-100. En esta fase, se observan tres direcciones IP a las que el equipo experimental OTS-100 está conectándose, la IP 127.0.1.100 correspondiente al módulo LTEMME, la IP 127.0.1.1 correspondiente al módulo LTEENB y la IP 127.0.0.2 utilizada para la comunicación entre el módulo LTEMME y el módulo LTEIMS. De esta forma, una vez se han establecido las conexiones y completados los diferentes *setup*, quedan en funcionamiento los tres monitores LTEENB, LTEMME y LTEIMS.

Cuando se observa que los tres monitores están en funcionamiento, se procede a inicializar las comunicaciones RX/TX del dispositivo NB-IoT. Se puede observar en los mensajes de señalización y, en concreto, en el último mensaje de señalización, que se ha empezado a asignar un nuevo UE como consecuencia de haberse detectado un dispositivo.

Time	Diff	ENB	MME	IMS	UE ID	Cell	SFN	RNTI	Info	Message
19:19:38.445	-			CX						Connecting to 127.0.1.100:3868
-	-			RX						Connecting to 127.0.1.100:3868
-	-			RX						Connected to 127.0.1.100:3868
-	-			RX						127.0.1.100:3868 Capabilities-Exchange-Request
-	-			CX						Connected to 127.0.1.100:3868
-	-			CX						127.0.1.100:3868 Capabilities-Exchange-Request
-	-			RX						127.0.1.100:3868 Capabilities-Exchange-Answer
-	-			CX						127.0.1.100:3868 Capabilities-Exchange-Answer
19:19:38.943	+0.498			IMS						New connection from 127.0.0.2:10042
19:19:38.987	+0.044		STAP							New connection from 127.0.1.1:41222
-	-		STAP							Connecting to 127.0.1.100:36412
19:19:39.501	+0.514		STAP							127.0.1.1:41222 S1 setup request
-	-		STAP							127.0.1.1:41222 S1 setup response
-	-		STAP							Connected to 127.0.1.100:36412
-	-		STAP							127.0.1.100:36412 S1 setup request
19:19:39.502	+0.001		STAP							127.0.1.100:36412 S1 setup response
19:21:14.347	+94.845		PHY			1	269.4		PRACH	sequence_index=22 ta=1 snr=28.3
-	-		MAC			1				Allocating new UE

Figura 50: Señalización de arranque del equipo OTS-100.

A partir del momento en que se detecta un nuevo UE, se observa (Figura 51) cómo se empiezan a intercambiar mensajes RRC (*Radio Resource Control*). El mensaje *RRC Connection Request* se utiliza para conectar el UE al eNB. Además, al ser la primera vez que se conecta el dispositivo a la red, es necesario preparar la conexión (mensaje *RRC Connection Setup*). El protocolo RRC se encarga de la gestión de la conexión a nivel radio entre el terminal móvil y la red (eNB), de la configuración de los servicios portadores, y del envío de mensajes relacionados con la movilidad desde/hacia el terminal móvil. Es por ello, que RRC se entiende como un protocolo de capa 3 ya que gestiona funcionalidades a nivel de red. En la Figura 51 también se observan otros protocolos como MAC (*Medium Access Control*) y PHY (*Physical Layer*). MAC es la capa encargada de controlar el acceso al canal radio. En cambio, PHY hace referencia a la capa física encargada de realizar la transmisión propiamente dicha a través del canal radio.

Time	Diff	ENB	MME	IMS	UE ID	Cell	SFN	RNTI	Info	Message
-	-			MAC		1				Allocating new UE
-	-			MAC						RAR: rapid=22
-	-			PHY		1	269.9	0:5	PDSCH	haq=sl type=2 rb_start=23 L_crb=2 CW: tb_len=7 mod=2 rv_idx=0
-	-			PHY		1	269.9	0:5	PDCCH	cc_idx=0 L=12 L=4 dci=1a
19:21:14.357	+0.010			PHY		1	270.5	0:3d	PUSCH	haq=1 type=0 rb_start=19 L_crb=4 CW: tb_len=11 mod=2 rv_idx=0 rtx=0 crc=OK snr=19.3 epre=90.0 ta=0
-	-			MAC		1				LCID=0 len=6 PAD: len=2
-	-			RRC		1			CCCH	RRC Connection Request
-	-			RRC		1			CCCH	RRC Connection Setup
-	-			PHY		1	270.9	0:3d	PHICH	group=3 seq=4 h=1
-	-			MAC		1				UECRI: Se a3 48 75 d7 a6 LCID=0 len=26 PAD: len=1
-	-			PHY		1	270.9	0:3d	PDSCH	haq=0 type=2 rb_start=18 L_crb=7 tx=port0 CW: tb_len=37 mod=2 rv_idx=0 rtx=0
-	-			PHY		1	270.9	0:3d	PDCCH	cc_idx=4 L=12 L=4 dci=1a
19:21:14.365	+0.008			PHY		1	271.3		PUSCH	format=1A ns=16 snr=11.3 ack=1

Figura 51: Mensajes RRC encargados de la gestión de la conexión.

Después del intercambio de varios mensajes, en la Figura 52 se observa el mensaje "Attach accept" que confirma la correcta conexión del dispositivo al eNB experimental.

Time	Diff	ENB	MME	IMS	UE ID	Info	Message
-			NAS		105	EMM	Attach accept
-			SIAP				127.0.1.1:39612 Downlink nas transport
-			NAS		8	EMM	Attach request
-			SIAP				127.0.1.100:36412 Initial UE message
19:53:44.149	+0.001		SIAP				127.0.1.100:36412 Connection establishment indication
-			SIAP				127.0.1.100:36412 Downlink nas transport
-			NAS		8	EMM	Attach accept
19:53:44.344	+0.195		SIAP				127.0.1.1:39612 UE capability info indication
-			SIAP				127.0.1.1:39612 Uplink nas transport
-			NAS		105	EMM	Attach complete
-			IMS		3		IMS register. imsi=00101000009913 imeisv=8664250318744807 flags=3
-			SGsAP				127.0.1.100:29118 SGsAP-TMSI-REALLOCATION-COMplete
-			NAS		105	EMM	EMM information
-			SIAP				127.0.1.1:39612 Downlink nas transport
-			SGsAP				127.0.1.100:37697 SGsAP-TMSI-REALLOCATION-COMplete
-			IMS		3		IMS Register ack
-			SIAP				127.0.1.100:36412 UE capability info indication
-			NAS		8	EMM	Attach complete

Figura 52: Proceso de conexión (attach) del dispositivo NB-IoT.

A continuación, se muestra el log registrado en el equipo OTS-100 en referencia al mensaje "Attach complete".

```

LOG: Type Message → Attach complete
From: MME
Info: 127.0.0.1:9000, v2018-10-18
Time: 19:53:44.344
Message: Attach complete

Data:
0000: 27 d4 2d 58 d2 0c 07 43 00 03 52 00 c2      '-X..C..R..
Protocol discriminator = 0x7 (EPS Mobility Management)
Security header = 0x2 (Integrity protected and ciphered)
Auth code = 0xd42d58d2
Sequence number = 0x0c
Protocol discriminator = 0x7 (EPS Mobility Management)
Security header = 0x0 (Plain NAS message, not security protected)
Message type = 0x43 (Attach complete)
ESM message container:
  Protocol discriminator = 0x2 (EPS Session Management)
  EPS bearer identity = 5
  Procedure transaction identity = 0
  Message type = 0xc2 (Activate default EPS bearer context accept)

```

Para confirmar que el dispositivo NB-IoT se ha registrado correctamente en el sistema, se consulta la base de datos de suscriptores (Figura 53) del monitor LTEMME y se observa que efectivamente, aparece el terminal registrado con el código IMSI de USIM que utiliza el dispositivo NB-IoT (el código IMSI coincide con el obtenido en el fichero de configuración mostrado en la sección 5.5.2).

IMSI	IMEISV	M-TMSI	Registered
00101000009913	8664250318744807	1209231876	true

Figura 53: Base de datos de suscriptores del LTEMME.

Una vez se ha confirmado que el registro del dispositivo NB-IoT se ha realizado de forma satisfactoria en la red, el próximo paso es comprobar si el propio dispositivo dispone de acceso a Internet a través de la red experimental creada. Para ello, se realizan las siguientes pruebas:

- Revisión del *log* correspondiente al mensaje “*Attach accept*” para confirmar que la red ha asignado una dirección IP al dispositivo: se puede observar (texto resaltado en color azul) como la red ha asignado la IP 192.168.2.2 al dispositivo NB-IoT.

```

LOG: Type Message → Attach accept
From: eNB
Info: 127.0.0.1:9001, v2018-10-18
Time: 19:53:44.149
Message: Attach accept

...
EPS attach result = 2 (combined EPS/IMSI attach)
T3412 value:
  value = 30
  unit = 1 (1 minute)
TAI list:
  Length = 6
  Data = 00 00 f1 10 00 01
ESM message container:
  Protocol discriminator = 0x2 (EPS Session Management)
  EPS bearer identity = 5
  Procedure transaction identity = 1
  Message type = 0xc1 (Activate default EPS bearer context request)
  EPS Qos:
    QCI = 9
  Access point name = "default.mnc001.mcc001.gprs"
  PDN address:
    PDN type = 1 (IPv4)
    IPv4 = 192.168.2.2
...

```

- Ejecutar el comando `ping` desde el equipo OTS-100 hacia el dispositivo NB-IoT: en la siguiente imagen se observa la respuesta obtenida durante la prueba de conectividad hacia el dispositivo donde se han enviado y recibido correctamente 12 paquetes.

```

[root@localhost ~]# ping 192.168.2.2
PING 192.168.2.2 (192.168.2.2) 56(84) bytes of data:
64 bytes from 192.168.2.2: icmp_seq=1 ttl=255 time=1530 ms
64 bytes from 192.168.2.2: icmp_seq=2 ttl=255 time=949 ms
64 bytes from 192.168.2.2: icmp_seq=3 ttl=255 time=586 ms
64 bytes from 192.168.2.2: icmp_seq=4 ttl=255 time=226 ms
64 bytes from 192.168.2.2: icmp_seq=5 ttl=255 time=506 ms
64 bytes from 192.168.2.2: icmp_seq=6 ttl=255 time=466 ms
64 bytes from 192.168.2.2: icmp_seq=7 ttl=255 time=522 ms
64 bytes from 192.168.2.2: icmp_seq=8 ttl=255 time=546 ms
64 bytes from 192.168.2.2: icmp_seq=9 ttl=255 time=506 ms
64 bytes from 192.168.2.2: icmp_seq=10 ttl=255 time=530 ms
64 bytes from 192.168.2.2: icmp_seq=11 ttl=255 time=522 ms
64 bytes from 192.168.2.2: icmp_seq=12 ttl=255 time=546 ms
^C
--- 192.168.2.2 ping statistics ---
12 packets transmitted, 12 received, 0% packet loss, time 10999ms
rtt min/avg/max/mdev = 226.816/620.066/1530.035/313.563 ms, pipe 2

```

Figura 54: Log del ping realizado desde OTS-100 hacia el dispositivo.

- Ejecutar el comando `ping` desde el dispositivo NB-IoT hacia el servidor DNS principal de Google: en la Figura 55 se muestra la respuesta obtenida durante la prueba de conexión hacia Google.

```

AT+QPING=1,"8.8.8.8",10,10
OK
+QPING: 0,"8.8.8.8",32,405,255
+QPING: 0,"8.8.8.8",32,479,255
+QPING: 0,"8.8.8.8",32,107,255
+QPING: 0,"8.8.8.8",32,223,255
+QPING: 0,"8.8.8.8",32,480,255
+QPING: 0,"8.8.8.8",32,470,255
+QPING: 0,"8.8.8.8",32,107,255
+QPING: 0,"8.8.8.8",32,223,255
+QPING: 0,"8.8.8.8",32,480,255
+QPING: 0,"8.8.8.8",32,470,255
+QPING: 0,10,10,0,107,480,342

```

Figura 55: Log del ping realizado desde el dispositivo NB-IoT hacia Google.

A través del WebTool de Amarisoft también se puede visualizar la señalización correspondiente al ping. En la Figura 56:Figura 56, el ping corresponde con los mensajes del protocolo ICMP.

Time	Dir	ENB	MME	IMS	UE ID	Info	Message
-	-	-	NAS	-	112	ESM	ESM data transport
-	-	-	STAP	-	-	-	127.0.1.1:39612 Downlink nas transport
20:36:31.052	-	+0.001	STAP	-	-	-	127.0.1.100:39412 Downlink nas transport
-	-	-	NAS	-	50	ESM	ESM data transport
20:36:32.122	-	+0.470	NAS	-	50	ESM	ESM data transport
-	-	-	STAP	-	-	-	127.0.1.100:39412 Uplink nas transport
-	-	-	STAP	-	-	-	127.0.1.1:39612 Uplink nas transport
-	-	-	NAS	-	112	ESM	ESM data transport
-	-	-	IP	-	-	IP/ICMP	192.168.2.2 > 8.8.8.8
20:36:32.131	-	+0.009	IP	-	-	IP/ICMP	8.8.8.8 > 192.168.2.2
-	-	-	NAS	-	112	ESM	ESM data transport
-	-	-	STAP	-	-	-	127.0.1.1:39612 Downlink nas transport
20:36:32.132	-	+0.001	STAP	-	-	-	127.0.1.100:39412 Downlink nas transport
-	-	-	NAS	-	50	ESM	ESM data transport
20:36:32.633	-	+0.501	NAS	-	50	ESM	ESM data transport
-	-	-	STAP	-	-	-	127.0.1.100:39412 Uplink nas transport
-	-	-	STAP	-	-	-	127.0.1.1:39612 Uplink nas transport
-	-	-	NAS	-	112	ESM	ESM data transport
-	-	-	IP	-	-	IP/ICMP	192.168.2.2 > 8.8.8.8
20:36:32.042	-	+0.009	IP	-	-	IP/ICMP	8.8.8.8 > 192.168.2.2
-	-	-	NAS	-	112	ESM	ESM data transport

Figura 56: Visualización a través de WebTool del ping hacia el DNS de Google.

Por último, a través del *serial monitor* de Arduino IDE se utiliza el comando AT+CSQ (explicado en la Tabla 21) para obtener los valores RSSI y BER. Antes de ejecutar el comando, se ha alimentado el dispositivo NB-IoT mediante una batería externa y colocado en una habitación colindante al laboratorio de pruebas. Seguidamente, se muestran los valores obtenidos en la ejecución del comando AT+CSQ:

```

Welcome to use NB-IoT Shield QG96
AT          /*Se indica al dispositivo que se enviarán comandos AT*/
OK          /*Confirmación del dispositivo*/
AT+CSQ     /*Consultar los valores RSSI y BER*/
+CSQ:2,99  //RSSI=2 corresponde a una intensidad de -109 dBm
           //BER=99 significa que es desconocido o no detectable

```

El valor obtenido de $BER = 99$ es debido a que solo puede detectarse y ser válido cuando hay una llamada de voz activa. En caso de que no haya una llamada de voz en curso, el dispositivo siempre devolverá este valor.

5.5.4. Monitorización y comprobación de la desconexión (*detach*)

En esta sección, se muestra el proceso de desconexión del dispositivo NB-IoT en la red. Para realizar la desconexión se utiliza el comando AT+CFUN=4 que ejecuta la desconexión de las comunicaciones RX/TX del dispositivo. En la siguiente figura aparece la señalización correspondiente al proceso indicado.

Time	Diff	ENB	MME	IMS	UE ID	Info	Message
19:54:00.790	+0.049	NAS			9	EMM	Detach request
-		RRC			9	DCH-NB	RRC Connection Setup Complete
-		NAS			9	EMM	Detach request
19:54:00.791	+0.001		NAS		106	EMM	Detach request
-			NAS		106	EMM	Detach request
19:54:00.792	+0.001	RRC			9	DCH-NB	RRC Connection Release

Figura 57: Proceso de desconexión (*detach*) del dispositivo NB-IoT.

El primer mensaje en el proceso de desconexión es el que aparece como *Detach request*. Este tipo de mensajes utiliza el protocolo NAS (*Non-Access Stratum*). El protocolo NAS para la gestión de movilidad (EMM) proporciona los procedimientos necesarios para el control de la movilidad de un equipo de usuario que utiliza E-UTRAN para el acceso a la red troncal EPC. En particular, entre los procedimientos soportados por el protocolo EMM se encuentran los mecanismos de registro y cancelación de registro del usuario en la red LTE y la actualización del área de seguimiento 82[8]. En general, el protocolo NAS realiza la gestión de portadores de EPS, autenticación, manejo de movilidad ECM-IDLE, origen de paginación en ECM-IDLE y control de seguridad.

Una vez la red acepta la desconexión, se realiza la liberación del dispositivo NB-IoT con el mensaje *RRC Connection Release* (Figura 57).

Para confirmar que el dispositivo NB-IoT se ha desconectado correctamente en el sistema, se consulta la base de datos de suscriptores (Figura 58) del monitor LTEMME tal y como se había realizado en la sección anterior, y se observa que ahora el código IMSI de la tarjeta USIM tiene el estado del campo *Registered* igual a *false*.

IMSI	IMEISV	M-TMSI	Registered
001010000009913	8664250318744807	1209231876	false

Figura 58: Visualización del estado de desconexión del dispositivo.

5.6. Valoración Económica del Trabajo

En esta sección se describe una estimación de los gastos asociados al equipamiento y recursos utilizados para la evaluación realizada a lo largo del capítulo 5.

Durante la fase de diseño del entorno experimental, se identificó el equipamiento necesario para la implementación de la red privada LTE y dispositivo NB-IoT. Los dispositivos utilizados en este trabajo han estado:

- Equipo Amarisoft OTS-100.
- Tarjeta Arduino UNO.
- Dispositivo NB-IoT Shield Dragino.
- Tarjeta USIM.
- Ordenador con el software Arduino IDE.

Concepto	Cantidad	Precio	Total
Amarisoft OTS-100	1	15.750 €	15.750 €
Arduino UNO	1	50 €	50€
NB-IoT Shield Dragino con Quectel BG-96	1	40 €	40 €
Tarjeta USIM	1	12 €	12 €
Ordenador con software Arduino IDE	1	560 €	560 €
Horas ingeniero	140	10 €/hora	1.400 €
Coste Total			17.812 €

Tabla 22: Presupuesto para la realización del proyecto.

6. Conclusiones

En este apartado se incluyen las conclusiones de la realización del trabajo realizado.

Se consideran cubiertos todos los objetivos planteados al inicio del proyecto, con la finalización del mismo. La tecnología 5G es una tecnología en apogeo y con grandes expectativas de futuro y revolución tecnológica. Como consecuencia, esta tecnología cuenta con el respaldo de muchos organismos y empresas, lo que ha provocado que haya disponible una gran cantidad de información sobre esta que ha facilitado el avance del proyecto.

A lo largo de este trabajo se ha estudiado y explicado la nueva radio 5G (5G NR), la arquitectura, estandarización, espectro radioeléctrico y consideraciones de migración a tener en cuenta en el momento de realizar el despliegue de la tecnología.

Debido a los contenidos que incluye el proyecto y a la necesidad de síntesis del mismo, se ha puesto especial foco en los objetivos relacionados con el estudio de la tecnología 5G y la implantación de un escenario de utilización de esta tecnología (mMTC). Sin embargo, esto ha provocado una acotación en el nivel de profundidad de la evaluación de la red privada LTE y la explotación de capacidades adicionales que proporciona el equipo OTS-100 de Amarisoft.

Durante la ejecución del trabajo, se ha aprendido a configurar y modificar los parámetros del equipo Amarisoft OTS-100 y dispositivo NB-IoT, el funcionamiento de una red de comunicación móvil, además de adquirir nuevos conocimientos y aptitudes. Todo ello, ha permitido entender mejor los conceptos explicados en los capítulos teóricos del trabajo.

El proyecto puede seguir desarrollándose a través de diversos temas, que no se han incluido por limitaciones de tiempo y dimensionado del proyecto:

- Investigar los avances referentes a la *release* 16 del 3GPP.
- Estudiar en detalle los diferentes protocolos utilizados en la tecnología 5G.
- Complementar la parte práctica con un estudio más profundo de las capacidades y funcionalidades adicionales que ofrece el equipo OTS-100.
- Implementar agregación de portadoras de tipo *in-band*.
- Ampliar la parte práctica añadiendo al dispositivo NB-IoT diferentes tipos de sensores y, posteriormente, enviar la información recopilada a un servidor alojado en un *cloud*.
- Implantar un entorno híbrido con diversidad de dispositivos IoT.

7. Acrónimos

3GPP	<i>3rd Generation Partnership Project</i>	DC	<i>Dual Connectivity</i>
4G	<i>4th Generation (mobile communication technology)</i>	DN	<i>Data Network</i>
5G	<i>5th Generation (mobile communication technology)</i>	DP	<i>Data Plane</i>
5GC	<i>5G Core</i>	DRB	<i>Data Radio Bearers</i>
5GCN	<i>5G Core Network</i>	E2E	<i>End-to-end</i>
5G EN-DC	<i>LTE-NR Dual Connectivity</i>	EC-GSM-IoT	<i>Extended Coverage GSM IoT</i>
AF	<i>Application Function</i>	EDGE	<i>Enhanced Data rates for GSM Evolution</i>
AMBR	<i>Aggregate Maximum Bit Rate</i>	eDRX	<i>extended Discontinuous Reception</i>
AMF	<i>Access and Mobility Management Function</i>	eMBB	<i>enhanced Mobile Broad Band</i>
AMPS	<i>Advanced Mobile Phone System</i>	eNB/eNodeB	<i>evolved NodeB</i>
ARP	<i>Allocation and Retention Priority</i>	EPC	<i>Evolved Packet Core</i>
AUSF	<i>Authentication Server Function</i>	E-RAB	<i>E-UTRAN Radio Access Bearer</i>
AV	<i>Augmented Reality</i>	E-UTRA	<i>Evolved Universal Terrestrial Radio Access</i>
AV	<i>Autonomous Vehicle</i>	E-UTRAN	<i>Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network</i>
BDMA	<i>Beam Division Multiple Access</i>	FDD	<i>Frequency Division Duplex</i>
BER	<i>Bit Error Rate</i>	FDMA	<i>Frequency Division Multiple Access</i>
CAPEX	<i>Capital Expenditure</i>	FR	<i>Frequency Range</i>
Cat-M	<i>Category Machine</i>	FWA	<i>Fixed Wireless Access</i>
CDMA	<i>Code Division Multiple Network</i>	GBR	<i>Guaranteed Bit Rate</i>
CIoT	<i>Cellular IoT</i>	GFBR	<i>Guaranteed Flow Bit Rate</i>
CN	<i>Core Network</i>	gNB/gNodeB	<i>next generation NodeB</i>
CP	<i>Control Plane</i>	gNB-DU	<i>gNB-Distributed Units</i>
CSP	<i>Communications Service Providers</i>	GPRS	<i>General Packet Radio Service</i>
C-V2X	<i>Cellular Vehicle-to-everything</i>	GSM	<i>Global System for Mobile</i>
DC	<i>Data Center</i>	HSDPA	<i>High Speed Downlink Packet Access</i>

HSPA	<i>High Speed Packet Access</i>	Multi-RAT DC	<i>Multi-RAT Dual Connectivity</i>
HSS	<i>Home Subscriber Server</i>	NaaS	<i>Network as a Service</i>
HSUPA	<i>High Speed Uplink Packet Access</i>	NAS	<i>Non-Access Stratum</i>
I-CSCF	<i>Interrogating-Call State Control Function</i>	NB-IoT	<i>Narrowband-Internet of Things</i>
ID	<i>Identification</i>	NEF	<i>Network Exposure Function</i>
IDE	<i>Integrated Development Environment</i>	NF	<i>Network Function</i>
IMS	<i>IP Multimedia Subsystem</i>	NFV	<i>Network Function Virtualization</i>
IMSI	<i>International Mobile Subscriber Identity</i>	NG-C	<i>The Control-plane part of NG</i>
IMT	<i>International Mobile Telecommunication</i>	ng-eNB	<i>next generation eNodeB</i>
IMT-2020	<i>International Mobile Telecommunications 2020</i>	NG-RAN	<i>Next Generation-Radio Access Network</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>	NG-U	<i>The User-plane part of NG</i>
ITU	<i>International Telecommunication Union</i>	NMT	<i>Nordic Mobile Telephone</i>
KPI	<i>Key Performance Indicator</i>	NR	<i>New Radio</i>
LADN	<i>Local Area Data Network</i>	NRF	<i>NF Repository Function</i>
LTE	<i>Long Term Evolution</i>	NSA	<i>Non-Standalone</i>
LTE-M	<i>LTE for Machines</i>	NSSF	<i>Network Slice Selection Function</i>
MAC	<i>Media Access Control</i>	OFDMA	<i>Orthogonal Frequency-Division Multiple Access</i>
MEC	<i>Multi-access Edge Computing</i>	OPEX	<i>Operational Expenditures</i>
MFBR	<i>Maximum Flow Bit Rate</i>	O&M	<i>Operation and Maintenance</i>
MIB	<i>Master Information Block</i>	PCF	<i>Policy Control Function</i>
MIMO	<i>Multiple-Input Multiple-Output</i>	P-CSCF	<i>Proxy-Call State Control Function</i>
MME	<i>Mobility Management Entity</i>	PDCCP	<i>Packet Data Convergence Protocol</i>
MMT	<i>Multimedia Messaging Service</i>	PHY	<i>Physical Layer</i>
mMTC	<i>massive Machine Type Communications</i>	PIN	<i>Personal Identification Number</i>
mmW	<i>millimetre Wave</i>	PRB	<i>Physical Resource Block</i>
MPLR	<i>Maximum Packet Loss Rate</i>	PSM	<i>Power Saving Mode</i>
MTC	<i>Machine Type Communication</i>	PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>

QoS	<i>Quality of Service</i>	SUL	<i>Supplementary UpLink</i>
RAN	<i>Radio Access Network</i>	TACS	<i>Total Access Communication System</i>
RAT	<i>Radio Access Technology</i>	TDD	<i>Time Division Duplex</i>
RB	<i>Resource Block</i>	TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i>
RLC	<i>Radio Link Control</i>	TDT	<i>Televisión Digital Terrestre</i>
RQA	<i>Reflective QoS Attribute</i>	TIC	<i>Tecnologías de la Información y Comunicación</i>
RRC	<i>Radio Resource Control</i>	TSG	<i>Technical Specification Groups</i>
RRM	<i>Radio Resource Management</i>	TX	<i>Transmission</i>
RSSI	<i>Received Signal Strength Indicator</i>	UDM	<i>Unified Data Management</i>
RX	<i>Reception</i>	UE	<i>User Equipment</i>
SA	<i>Standalone</i>	UHD	<i>Ultra Hi-Definition</i>
SCS	<i>Sub-Carrier Spacing</i>	UICC	<i>Universal Integrated Circuit Card</i>
S-CSCF	<i>Serving-Call State Control Function</i>	UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunications System</i>
SDAP	<i>Service Data Adaption Protocol</i>	UPF	<i>User Plane Function</i>
SDF	<i>Service Data Flows</i>	uRLLC	<i>ultra-Reliable and Low-Latency Communications</i>
SDL	<i>Supplementary DownLink</i>	USIM	<i>Universal Subscriber Identity Module</i>
SDN	<i>Software Defined Networking</i>	V2N	<i>Vehicle-to-Network</i>
SDO	<i>Standards Developing Organizations</i>	V2X	<i>Vehicle-to-everything</i>
SDR	<i>Software Designed Radio</i>	VR	<i>Virtual Reality</i>
S-GW	<i>Serving Gateway</i>	WAP	<i>Wireless Application Protocol</i>
SIB	<i>System Information Block</i>	WCDMA	<i>Wideband Code Division Multiple Access</i>
SISO	<i>Single-Input Single-Output</i>	WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i>
SLA	<i>Service Level Agreement</i>	uRLLC	<i>ultra-Reliable and Low-Latency Communications</i>
SMA	<i>SubMiniature version A</i>	UPF	<i>User Plane Function</i>
SMF	<i>Session Management Function</i>		
SMS	<i>Short Message Service</i>		
SSC	<i>Session and Service Continuity</i>		

8. Bibliografía

- [1]. <https://www.athreon.com/5g-stimulates-disruption-and-opportunity/> [Último acceso: 7 enero 2020].
- [2]. <https://flauntdigital.com/blog/evolution-mobile-phones/> [Último acceso: 7 enero 2020].
- [3]. <https://www.nem.net.au/news/2019/3/19/5g-is-coming-are-we-ready> [Último acceso: 7 enero 2020].
- [4]. DotEcon Ltd and Axon Partners Group “*Study on Implications of 5G Deployment on Future Business Models*”, marzo 2018.
- [5]. Ericsson, “*Ericsson Mobility Report*”, Stockholm, junio 2019.
- [6]. Mark Newman, “*5G Future: Business models for monetization*” en TM Forum’s, septiembre 2019.
- [7]. E. Dahlman, S. Parkvall, J. Sköld, “*5G NR; The next generation wireless access technology*”, Academic Press, Elsevier, 2018.
- [8]. R. Agustí, F. Bernardo, F. Casadevall, R. Ferrús, J. Pérez-Romero, O. Sallent, “LTE: Nuevas tendencias en comunicaciones móviles”, Fundación Vodafone España, Madrid, 2010.
- [9]. UPC, “Tècnic/a en eines i tecnologies de xarxes mòbils 5G”, Universitat Politècnica de Catalunya, 2019.
- [10]. 3GPP TS 23.501 V15.2.0, “5G; *System architecture for the 5G system*”, Release 15, junio 2018.
- [11]. Junseok Kima, Dongmyoung Kimb, Sunghyun Choia, “*3GPP SA2 architecture and functions for 5G mobile communication system*”, abril 2017.
- [12]. ETSI, “*MEC in 5G networks*”, *White paper No. 28*, primera edición, junio 2018.
- [13]. 3GPP TS 23.501 V15.3.0, “5G; *System architecture for the 5G system; Stage 2 (Release 15)*”, septiembre 2018.
- [14]. 3GPP TS 38.300 V15.3.1, “*NR; NR and NG-RAN overall description; Stage 2 (Release 15)*”, octubre 2018.
- [15]. Balazs Bertenyi, Richard Burbidge, Gino Masini, “*NG Radio Access Network (NG-RAN)*”, *Journal of ICT*, vol. 6, no. 1&2, pp. 59-76, mayo 2018.
- [16]. 5G americas, “*Wireless Technology Evolution, Transition from 4G to 5G*”, 3GPP Releases 14 a 16, octubre 2018.
- [17]. <https://avancedigital.gob.es/5G/Paginas/Index.aspx> [Último acceso: 7 enero 2020]
- [18]. P. Rost, et al. “*Mobile network architecture evolution toward 5G*” en *IEEE Communication Magazine*, mayo 2016.
- [19]. P. Rost et al., “*Network slicing to enable scalability and flexibility in 5G mobile networks*” en *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 5, pp. 72-79, mayo 2017.
- [20]. 5GPP Architecture Working Group, “*View on 5G Architecture*”, diciembre 2017.
- [21]. 3GPP TR 28.801 V15.1.0 Release 14, “*Study on management and orchestration of network slicing for next generation network*”, abril 2018.

- [22]. J. Pérez-Romero, O. Sallent, R. Ferrús and R. Agustí, "Knowledge-based 5G Radio Access Network planning and optimization" *2016 International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS)*, Poznan, 2016.
- [23]. X. Costa-Perez, J. Swetina, T. Guo, R. Mahindra and S. Rangarajan, "Radio access network virtualization for future mobile carrier networks" en *IEEE Communications Magazine*, vol. 51, no. 7, pp. 27-35, julio 2013.
- [24]. A. Ksentini and N. Nikaiein, "Toward enforcing network slicing on RAN: flexibility and resources abstraction" in *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 6, pp. 102-108, junio 2017.
- [25]. P. Caballero, A. Banchs, G. de Veciana and X. Costa-Pérez, "Multi-tenant radio access network slicing: statistical multiplexing of spatial loads", in *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 25, no. 5, pp. 3044-3058, octubre 2017.
- [26]. R. Ferrús, O. Sallent, J. Pérez-Romero and R. Agustí, "On 5G radio access network slicing: radio interface protocol features and configuration", in *IEEE Communications Magazine*, vol. 56, no. 5, pp. 184-193, mayo 2018.
- [27]. O. Sallent, J. Perez-Romero, R. Ferrús, R. Agustí, "On radio access network slicing from a radio resource management perspective," in *IEEE Wireless Communications*, pp. 166-174, octubre 2017.
- [28]. Frank Mademann, "The 5G System Architecture", River Publishers, mayo 2018.
- [29]. <https://www.huawei.com/minisite/hwmbbf16/en/> [Último acceso: 7 enero 2020].
- [30]. ITU-R, "IMT Vision-Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond". Recommendation ITU-R M.2083, septiembre 2015.
- [31]. K. Samdanis, X. Costa-Perez and V. Sciancalepore, "From network sharing to multi-tenancy: The 5G network slice broker" en *IEEE Communications Magazine*, vol. 54, no. 7, pp. 32-39, julio 2016.
- [32]. 5G americas, "5G - The future of IoT", julio 2019.
- [33]. <https://www.qualcomm.com/invention/5g/internet-of-things> [Último acceso: 7 enero 2020]
- [34]. <https://www.sierrawireless.com/iot-blog/iot-blog/2018/05/lte-m-nb-iot-5g-networks/> [Último acceso: 7 enero 2020].
- [35]. Ericsson, "Cellular IoT Evolution for Industry Digitalization", Ericsson white paper, enero 2019.
- [36]. <https://www.ericsson.com/en/blog/2016/5/narrowband-iot-standardization-soon-finalized> [Último acceso: 7 enero 2020].
- [37]. Jian-Hua Wu, "CAT-M & NB-IoT Design and Conformance Test", Keysight, 2017.
- [38]. https://enterpriseiotinsights.com/20191016/channels/fundamentals/what-is-mmtc-in-5g-nr-and-how-does-it-impact-nb-iot-and-lte-m?utm_campaign=20191017%20Enterprise%20IoT%20NewsletterThurs&utm_medium=email&utm_source=Eloqua [Último acceso: 7 enero 2020].
- [39]. Amarisoft, "LTE OTS 100, 102, 103, 104 and LTE OTS UE 100", Versión documento 06-03-2017, marzo 2016.
- [40]. <https://www.dragino.com/products/nb-iot.html> [Último acceso: 7 enero 2020].

9. Anexos

9.1. Anexo A – Configuración del módulo LTEENB

El código que se muestra a continuación corresponde a la configuración completa del módulo LTEENB del equipo OTS-100.

```
/* lteenb configuration file for NB-IoT (standalone mode)
{
  /* Log filter: syntax: layer.field=value[,...]

  Possible layers are phy, mac, rlc, pdcp, rrc, nas, slap, x2ap, gtpu and
  all. The 'all' layer is used to address all the layers at the
  same time.

  field values:

  - 'level': the log level of each layer can be set to 'none',
  'error', 'info' or 'debug'. Use 'debug' to log all the messages.

  - 'max_size': set the maximum size of the hex dump. 0 means no
  hex dump. -1 means no limit.
*/
      //log_options: "all.level=debug,all.max_size=32",
  log_options:
"all.level=error,all.max_size=0,nas.level=debug,nas.max_size=1,slap.level=debug,sla
p.max_size=1,x2ap.level=debug,x2ap.max_size=1,rrc.level=debug,rrc.max_size=1",
  log_filename: "/tmp/enb0.log",

  /* Enable remote API and Web interface */
  com_addr: "0.0.0.0:9001",

  /* RF driver configuration */
  include "rf_driver/1chan.cfg",

  mme_list: [
    {
      /* address of MME for S1AP connection. Must be modified if the MME
      runs on a different host. */
      mme_addr: "127.0.1.100",
    },
  ],
  /* GTP bind address (=address of the ethernet interface connected to
  the MME). Must be modified if the MME runs on a different host. */
  gtp_addr: "127.0.1.1",

  /* high 20 bits of SIB1.cellIdentifier */
  enb_id: 0x1A2D1,

  /* list of LTE cells (for NB-IoT in-band operation they must be
  defined here) */
  cell_list: [ ],

  /* list of NB-IoT cells */
  nb_cell_list: [
    {
      plmn_list: [
        { plmn: "00101", reserved: false },
      ],
      cell_id: 0x01,
      tac: 0x0001, /* SIB1.trackingAreaCode */
      dl_earfcn: 900, /*B2*/
        //1515, /*B3*/
    }
  ]
}
```

```

        //2550, /*B5*/
        //6300, /*B20*/
n_antenna_dl: 1,
n_antenna_ul: 1,
operation_mode: "standalone",
rel13_5: true, /* release 13.5 NPBCH/BCCH scrambling changes */
n_id_ncell: 37,

/* SI info */
si_value_tag: 0, /* increment modulo 32 if SI is modified */
r_sib1: 4, /* number of SIB1 repetitions */
cell_barred: false, /* SIB1.cellBarred-r13 */
intra_freq_reselection: true, /* SIB1.intraFreqReselection-r13 */
q_rx_lev_min: -70, /* SIB1.q-RxLevMin */
q_qual_min: -34, /* SIB1.q-QualMin */
p_max_enable: true, /* if TRUE, p_max must be defined */
p_max: 10, /* SIB1.p-Max */

si_window_length: 160, /* ms */
si_radio_frame_offset: 0, /* in frames */
si_value_tag_list_enable: true, /* enable per SIB si_value_tag */
sib_sched_list: [
    {
        filename: "sib2_nb.asn",
        si_periodicity: 128,
        si_repetition_pattern: 2,
        si_value_tag: 0, /* increment modulo 4 if SIB is modified */
    },
],

mac_config: {
    msg3_max_harq_tx: 5,
    ul_max_harq_tx: 5,
    dl_max_harq_tx: 5,
    ul_max_consecutive_retx: 30, /* disconnect UE if reached */
    dl_max_consecutive_retx: 30, /* disconnect UE if reached */
    time_alignment_timer_dedicated: 0,
    periodic_bsr_timer: 16,
    retx_bsr_timer: 64,
    logical_channel_sr_prohibit_timer: 0, /* 0 means released */
},

npusch_max_its: 10, /* Max turbo decoder iterations */

/* each coverage level corresponds to a NPRACH configuration */
coverage_levels: [
    {
        nprach_detect_threshold: 40, /* in dB */
        npdcch_ra_n_rep: 1, /* must be <= npdcch-NumRepetitions-RA-r13 */
        npdsch_ra_n_rep: 1, /* number of repetition for NPDSCH with RAR */
        npdsch_ra_i_tbs: 3, /* I_TBS for NPDSCH with RAR */

        /* msg3 configuration */
        ul_sc_spacing: 1, /* 0 = 3.75 KHz subcarrier, 1 = 15 KHz subcarrier */
        msg3_n_sc: 1, /* 1, 3, 6, 12 max number of subcarriers */
        msg3_single_tone_mcs: 2, /* 0-2 */
        msg3_multi_tone_mcs: 1, /* 0-2, only needed for multi-tone */
        msg3_n_rep: 1, /* 1-128 number of repetitions for msg3 */

        /* Paging */
        npdcch_paging_n_rep: 1, /* must be <= npdcch-NumRepetitionPaging-r13 */
        npdsch_paging_i_tbs: 4,
        npdsch_paging_n_rep: 1,

        /* NPDCCH User Search Space */
        npdcch_uss_n_rep_max: 8, /* 1-2048 max number of NPDCCH repetition */
    }
]

```

```

    npdcch_uss_n_rep: 1, /* use 0 for half RB allocation, otherwise actual
                          number of NPDCCH repetitions */
    npdcch_uss_start_sf: 4, /* 1.5, 2, 4, 8, 16, 32, 48, 64 */
    npdcch_uss_offset: 0, /* 0-3 */
    /* NPDSCH config */
    npdsch_i_tbs: 5, /* 0-12 */
    npdsch_n_rep: 1, /* 1-2048 number of NPDSCH repetitions */
    /* NPUSCH config */
    npusch_n_sc: 12, /* 1, 3, 6, 12 max number of subcarriers */
    npusch_single_tone_i_tbs: 4, /* 0-12 */
    npusch_multi_tone_i_tbs: 4, /* 0-12 */
    npusch_n_rep: 1, /* 1-128 number of NPUSCH repetitions */
  },
],

/* RRC/UP ciphering algorithm preference. EEA0 is always the last. */
cipher_algo_pref: [],
/* RRC integrity algorithm preference. EIA0 is always the last. */
integ_algo_pref: [2, 1],

inactivity_timer: 10000,

/* SRB configuration */
srb_config: {
  maxRetxThreshold: 32,
  enb_maxRetxThreshold: 32,
  t_PollRetransmit: 6000,
  enb_t_PollRetransmit: 6000,
},

/* DRB configuration */
drb_config: "drb_nb.cfg",
},
], /* ncell_list */
}

```

9.2. Anexo B – Código Arduino

El siguiente código implementado en la aplicación Arduino IDE permite leer y escribir en el dispositivo NB-IoT a través del puerto serie.

```
Arduino_lectura_placa_Dragino $
#include <SoftwareSerial.h>
SoftwareSerial DraginoSerial(10, 11);
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  while(!Serial){
  }
  Serial.println("Welcome to use NB-IoT Shield QG96");
  DraginoSerial.begin(9600);
}
void loop(){
  if (DraginoSerial.available()){
    Serial.write(DraginoSerial.read());
  }
  if (Serial.available()){
    DraginoSerial.write(Serial.read());
  }
}
```